

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ИМПЛАНТАЦИИ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ*

О.В. Семендеева, Н.В. Учеваткина, В.В. Овчинников

В статье представлен краткий обзор отечественных и зарубежных работ, опубликованных в 1985–2010 гг., по вопросу модифицирования поверхности деталей из титановых сплавов методом ионной имплантации. Дан анализ способов модифицирования поверхности и методов исследования свойств модифицированного слоя после ионной имплантации.

Ключевые слова: ионная имплантация, титановые сплавы, сорт ионов, доза облучения, энергия ионов, механические свойства, износ, трибологические свойства, коррозионная стойкость.

Введение

Титановые сплавы обладают небольшой плотностью и хорошими механическими свойствами, сохраняющимися в широком интервале рабочих температур, высокой устойчивостью к коррозии в различных агрессивных средах и хорошей биологической совместимостью. Сочетание этих свойств позволило сплавам занять лидирующее положение среди конструкционных материалов особенно в таких областях, как машиностроение, судостроение, медицина, авиационно-космический комплекс. Однако более широкому использованию титановых сплавов в качестве конструкционных материалов в определенной мере препятствуют их низкие антифрикционные свойства, например, склонность к адгезионному схватыванию подвижных деталей машин, работающих на трение [1, 2], а также проблема фреттинг-износа и фреттинг-коррозии деталей газотурбинных двигателей [3–5]. К тому же титановые сплавы значительно хуже адсорбируют смазки, чем конструкционная среднелегированная сталь. Вследствие этого исключается использование титановых сплавов для изготовления подвижных трущихся деталей без специальной обработки поверхности трения, так как даже применение наиболее активных сульфированных смазок мало изменяет способность этих сплавов к схватыванию в условиях трения.

Эту проблему можно решить с помощью методов поверхностного модифицирования, одним

из которых является ионная имплантация. Это универсальный и эффективный метод повышения эксплуатационных характеристик деталей, в частности из титановых сплавов [1, 6–17]. Ионная имплантация заключается во взаимодействии пучка ускоренных до энергии более 1 кэВ ионов с поверхностью облучаемого материала, в результате которого образуются соединения, обладающие уникальными свойствами.

В связи с актуальностью проблемы повышения эксплуатационных характеристик деталей из титановых сплавов, работающих на трение, в данной работе проведен анализ влияния ионной имплантации на структурно-фазовое состояние и физико-механические свойства облучаемых сплавов, а также выявлены перспективы дальнейшего развития методов ионного модифицирования поверхности титановых сплавов.

Особенности ионной имплантации

Основными преимуществами метода ионной имплантации перед другими методами поверхностной обработки являются:

- введение любого химического элемента или соединения в любой облучаемый материал;
- возможность получения соединений с уникальными структурами, в том числе и из несмешивающихся компонентов;
- возможность модифицирования поверхности при различных температурах, в том числе и пониженных;

* Работа выполнена в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы (государственный контракт № П651).

- увеличение срока эксплуатации деталей за счет увеличения толщины поверхностного слоя;
- возможность контроля дозы вводимого флюенса;
- чистота ионного пучка;
- высокая адгезия к подложке.

Процесс ионного насыщения сопровождается образованием в имплантированном слое большого количества радиационных дефектов, насыщенных и перенасыщенных твердых растворов и интерметаллидных соединений, которые могут изменить в положительную сторону механические и физические свойства материала. Образование большого количества радиационных повреждений может привести к снижению эксплуатационных характеристик материала. Чтобы этого избежать, проводят послеимплантационный отжиг, позволяющий привести к равновесию разупорядоченную структуру материала.

Формирование структуры материала при ионной имплантации происходит под влиянием процессов ионного распыления, ионно-стимулированной миграции атомов в поверхностных слоях и зависит от физико-химических и термодинамических свойств внедряемых ионов и облучаемого материала. Немаловажное значение на структурообразование оказывает как сам процесс имплантирования, так и его режимы (доза облучения, время, ускоряющее напряжение и др.).

Следует учесть, что на изменение свойств титанового сплава при ионной имплантации влияют его структурно-фазовый состав и предимплантационное состояние.

Модифицирование поверхности различными ионами газов и неметаллов

Существенное влияние на свойства и структуру титановых сплавов оказывает имплантация ионов газов O^+ , N^+ , Ar^+ [18–34] и неметаллов C^+ , B^+ , Si^+ [18, 19].

Одним из достоинств имплантации данных ионов в поверхность конструкционных материалов, в том числе титановых сплавов, является их доступность по сравнению с ионами тяжелых металлов и более глубокое проникание в поверхностные слои мишени.

Ионное легирование титановых сплавов азотом приводит к улучшению их трибологических свойств, особенно при абразивном истира-

нии [16–18, 20, 22–37]. Проникание ионов азота в приповерхностный слой облучаемого материала приводит к формированию нитридных фаз титана, способствующих увеличению предела текучести и, как следствие, увеличению микротвердости титановых сплавов.

Так, в работах [23–25, 29–35] выявлено, что имплантация никелида титана ионами азота улучшает микротвердость и повышает прочность за счет структурно-фазовой перестройки. Структурные изменения характеризуются наличием в модифицированном слое азота в виде соединения TiN , а ближе к поверхности материала наблюдаются небольшие количества Ti_3O_5 и TiO_2 . Этот слой препятствует диссоциации никеля, который распыляется на поверхности.

При ионном легировании титановых сплавов (BT4 и BT16) одновременно азотом и кислородом [26] выявлено, что кислород снижает износостойкость и микротвердость по сравнению с имплантированием одного азота. Ухудшение свойств наблюдается из-за образования оксида титана, который обладает меньшей теплотой образования относительно нитрида. Одновременная имплантация азота и бора (BT6) [15] улучшает свойства более эффективно, чем легирование только азотом, в частности, уменьшаются коэффициент трения и объем изнашивания фреттинга в воздухе и морской воде.

Повышение стойкости к коррозии в различных средах также достигается за счет модифицирования поверхности титановых сплавов азотом. Так, в работе [12] приведены исследования влияния коррозии на поведение сплава Ti-6Al-4V до и после ионной имплантации, причем сравнивали образцы в исходном двухфазном состоянии, имплантируемые газом N_2 и одновременно газами N_2 и H_2 . Коррозионная стойкость имплантируемых образцов была в 10 раз выше по сравнению с исходным состоянием. Наилучшую стойкость показали образцы, имплантированные только азотом, несмотря на то, что образцы после одновременного воздействия N_2 и H_2 имели более обогащенный и более толстый слой азота. Вероятно, это объясняется радиационно-стимулированной диффузией.

Также заметно влияет на свойства титановых сплавов ионная имплантация ионов аргона. Так, образцы титанового сплава Ti-2,2Al-0,6Mn [21], облученные аргоном (доза 10^{16} – $3 \cdot 10^{16}$ ион/см²), выдержали большее количество циклов до разрушения по сравнению с исходными образцами при равных напряже-

ниях по сечению. Максимальное увеличение усталостной прочности происходит при дозе 10^{16} ион/см². Увеличение микротвердости на 10–30 % относительно исходного состояния в работе [21] объясняют интенсивным образованием радиационных дефектов, которые выступают в качестве энергетических барьеров, закрепляющих дислокации.

В этой же работе были приведены результаты интересных исследований по ионному легированию сплава Ti–2,2Al–0,6Mn ионами Si⁺, которые не проводились ранее. В частности было выявлено, что данный элемент также приводит к увеличению усталостной прочности и микротвердости материала, которое обусловлено изменением состава и структуры его поверхностных слоев.

Анализ результатов приведенных выше исследований позволяет утверждать, что имплантация титановых сплавов ионами газов и неметаллов является достаточно хорошо изученным процессом с позиций как материаловедения, так и технологий.

Модифицирование поверхности различными ионами металлов

Имплантация ионами металлов (Al, W, Sn, Mo, Fe, V, Pb и др.) проводится как для повышения твердости, износостойчивости и коррозионной стойкости сплавов, так и для придания специфических свойств, например жаропрочности [6, 9, 17, 25, 38–46]. Так, в качестве твердой смазки деталей, работающих в условиях трения, используют ионы Mo⁺, Zn⁺, Ni⁺, Sn⁺, Sc⁺, Pb⁺ и др. Повышению сопротивления коррозии металлов и сплавов способствует имплантация таких ионов, как Cr⁺, Al⁺, Ta⁺, Nb⁺, Ni⁺, Au⁺, Ag⁺ и др. [38]. Кратко опишем влияние некоторых из них.

Имплантация TiNi (51,5 % Ni) ионами Ni⁺, Mo⁺, W⁺ [25] приводит к увеличению твердости на 30 % и почти в 4,5 раза модуля упругости исследуемых образцов относительно исходного состояния, что обусловлено как особенностями самого сплава, обладающего эффектом памяти формы, так и способностью этих элементов изменять морфологию поверхности.

Положительное влияние на физико-механические характеристики оказывает ионное насыщение алюминием поверхности титана [9, 40, 41], которое достигается за счет образования алюминидов титана, а также увеличения тол-

щины ионно-легированных слоев при большей продолжительности и дозе облучения.

Внедрение ионов железа и циркония при облучении титанового сплава VT23 [17] позволяет повысить предел усталости, жаростойкость и сопротивление солевой коррозии данного материала. Это обусловлено в первую очередь свойствами имплантируемого элемента. После двойной имплантации уменьшается коэффициент трения и увеличивается износостойкость, а после имплантации и последующей обработки сильноточным электронным пучком возрастают глубина упрочненного слоя и износостойкость.

Влияние ионной имплантации Ta⁺ на коррозионную стойкость титановых сплавов [45, 46] связано с наличием в поверхностно-имплантируемом слое оксидов TiO₂, Ta₂O₅, препятствующих коррозии. Интересным фактом стало то, что в процессе ионного распыления тантала кислород проникает в облученный материал и благоприятно влияет на его свойства, в частности на биологическую совместимость.

Несмотря на широкий спектр используемых для имплантирования ионов металлов, модифицирование с их помощью титановых сплавов и оценка влияния на свойства и структурно-фазовый состав этих материалов в литературе недостаточно раскрыты.

Комплексное модифицирование поверхности различными ионами металлов и газов

Выбор внедряемого химического элемента или их комбинации всегда обусловлен требованиями, предъявляемыми к эксплуатационным параметрам облучаемой детали. В связи с этим для придания комплекса необходимых свойств часто применяют комбинированное легирование газами и металлами или неметаллами [17, 25, 35, 36, 39, 42, 47].

Так, для повышения износостойкости сплава Ti–6Al–4V [47] в поверхностный слой образцов внедряли олово на глубину 3–5 мкм, а затем подвергали бомбардировке ионами азота N⁺ при повышенной температуре. Это привело к уменьшению коэффициента трения и износу в процессе испытаний по сравнению с отдельным имплантированием в этот сплав олова и азота. Этот факт обусловлен образованием комплексов N⁺–Sn⁺ в поверхностном ионно-легированном слое.

Последовательная имплантация ионов N⁺–W⁺, N⁺–Ni⁺, N⁺–Zr⁺ в поверхность сплава

никелида титана (TiNi) [36] приводит к увеличению микротвердости и износостойкости. Также значительно меняется рельеф поверхности, наблюдается значительная концентрация кратеров средних и мелких размеров. В то же время имплантация этих же ионов в сплавы VT6 и VT22 показала отсутствие изменений в рельефе поверхности при улучшении физико-механических свойств. Это объясняется влиянием имплантируемых ионов на структурно-фазовую перестройку и образованием радиационных дефектов.

Исследования по комплексному (одновременному) легированию Cr^{++} P^+ и Cr^{++} Mo^+ подшпикеров из титановых сплавов [42] свидетельствуют о возможности этих ионов устранять питтинговую коррозию без нарушения объемных свойств.

Применение комбинированных методов имплантации титановых сплавов позволяет значительно улучшить эксплуатационные свойства этих материалов и тем самым расширить область их применения. Однако на сегодняшний день этот вопрос недостаточно освещен в научной литературе.

Данные табл. 1 свидетельствуют о том, что оптимальная доза имплантации титановых сплавов, приводящая к улучшению трибологических и механических свойств, лежит в пределах $1 \cdot 10^{17}$ – $1 \cdot 10^{18}$ ион/см², а введение того или иного имплантируемого иона влияет на количественную характеристику этих параметров. Наибольшее влияние на улучшение и придание специальных свойств титановым сплавам оказывает комплексное модифицирование ионами азота и металлов. Толщина получаемого модифицированного слоя в значительной мере зависит от параметров имплантации ионов – плотности тока (силы тока), времени имплантации, ускоряющего напряжения и температуры поверхности образцов. Так, наибольшая толщина наблюдается для титанового сплава VT1 при легировании ионами Al, когда облучение происходит при силе тока 145 А, температуре поверхности 1170 К в течение 125 мин.

Необходимо отметить, что несмотря на вышеперечисленные достоинства и возможности ионной имплантации, данный метод обладает существенным недостатком, который заключается в возможности проникновения в титановые сплавы различных газовых примесей в процессе обработки, например кислорода и углерода,

негативно влияющих на свойства материала. Это обусловлено высокой газопроницаемостью сплавов и, в некоторых случаях, низким вакуумом, а также системой вакуумирования установки (применяются диффузионные или погложительные насосы).

Методы исследования свойств модифицированного слоя после ионной имплантации

Достоверность получаемых результатов при изучении закономерностей процесса ионной имплантации зависит от правильного выбора метода исследования структуры поверхности материала, полученной после облучения.

Большинство современных методов изучения поверхности металлов после ионной имплантации основано на анализе взаимодействия пучков электронов, нейтральных атомов или молекул, электромагнитных волн различного диапазона с веществом. При этом анализируются поглощение, рассеяние первичного и испускание вторичного излучения. В настоящее время известно несколько десятков методов исследования поверхностей, многие из которых рассмотрены в работах [42, 48–50]. Как видно из табл. 2, они делятся на методы разрушающего и неразрушающего контроля. Наибольшее распространение получили дифракция медленных электронов (ДМЭ), электронная Оже-спектроскопия (ОЭС), рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС), рентгеноструктурный анализ (РСА), ядерная гамма-резонансная спектроскопия (ЯГР). В последнее время интенсивно развиваются ядерно-физические методы исследования поверхностей, из которых для исследования ионной имплантации наибольший интерес представляют методы обратного резерфордского рассеяния (ОРР), ядерных реакций (ЯР) и метод вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС).

Выбор того или иного метода основывается на поставленных перед исследователем задачах. Например, для определения структурно-фазового состояния используются методы неразрушающего контроля, а для определения свойств модифицированного слоя необходимо привлечение методов разрушающего контроля.

Заключение

Проведенный анализ литературных источников показал, что ионная имплантация является эффективным и перспективным методом улуч-

шения трибологических и физико-химических характеристик деталей из титановых сплавов. Комбинированное легирование ионами как металлов, так и неметаллов позволит расширить область применения этих материалов за счет варьирования дозы ионов и возможности их введения в облучаемый материал как последовательно, так и параллельно.

Список литературы

1. *Смыслов А.М., Селиванов К.С.* Разработка и исследование технологических методов повышения фреттинг-стойкости рабочих лопаток из титановых сплавов // Вестник УГАТУ. 2007. Т. 9. № 1. С. 77–83.
2. Закономерности изнашивания ультрамелкозернистых титановых сплавов / *К.В. Круковский, О.А. Кашин, Б.П. Гриценко, Н.В. Гирсова* // Ультрамелкозернистые и наноструктурные материалы – 2010. Тез. докл. Открытой школы-конференции стран СНГ, Уфа, 11–15 октября 2010 г. – Уфа, 2010. С. 196.
3. *Петухов А.Н.* Сопротивление усталости деталей ГТД. – М.: Машиностроение, 1993. – 232 с.
4. *Любимов Р.В.* Прогнозирование и технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей ГДТ, работающих в условиях фреттинг-коррозии: дис.... канд. техн. наук. – Рыбинск: РГАТА, 2000. – 193 с.
5. *Исанбердин А.Н.* Технологическое обеспечение долговечности лопаток паровых турбин из сплава ВТ6 с учетом наследственности при их ремонте с упрочнением поверхностного слоя: дис. ... канд. техн. наук. – Уфа: УГАТУ, 2011. – 197 с.
6. Модификация поверхностных слоев титана при высокоинтенсивной ионной имплантации алюминия / *И.А.Божко, И.А. Курзина, И.Б. Степанов, Ю.П. Шаркеев* // Физика и химия обработки материалов. 2005. № 4. С. 58–62.
7. *Смыслов А.М.* Комбинированные технологии на базе ионно-имплантационного модифицирования поверхности, обеспечивающие повышение ресурса надежности лопаток компрессора и турбины ГТД: дис. ... д-ра техн. наук. – Уфа : УАИ, 1993. – 326 с.
8. *Хирвонен Дж.К.* Ионная имплантация. – М.: Металлургия, 1985. – 457 с.
9. Высокоинтенсивная имплантация ионов алюминия в никель и титан / *И.А. Курзина, И.А. Божко, М.П. Калашиников, С.В. Фортуна, В.А. Батырева, И.Б. Степанов, Ю.П. Шаркеев* // Изв. Томского политехнического университета. 2004. Т. 307. № 3. С. 30–35.
10. *Dearnaley G.* Adhesive, abrasive and oxidative wear in ion-implanted metals // *Materials Science and Engineering*. 1985. Vol. 69. No. 1. P. 139–147.
11. *Комаров Ф.Ф.* Ионная имплантация в металлы. – М: Металлургия, 1990. – 216 с.
12. *Tandjaoui Baazi, Knystautas E. J., Fiset M.* Tribomechanical properties of ion-implantation-synthesized BN films and their dependence on Ti–6Al–4V substrate hardness // *Surface and Coatings Technology*. 1995. Vol. 72. No. 1–2. P. 120–127.
13. *Budzynski P., Youssef A.A., Sielanko J.* Surface modification of Ti–6Al–4V alloy by nitrogen ion implantation // *Wear*. 2006. Vol. 261. No. 11–12. P. 1271–1276.
14. *Carroll M.P., Stephenson K., Findley K.O.* Characterization of high energy ion implantation into Ti–6Al–4V // *Journal of Nuclear Materials*. 2009. Vol. 389. No. 2. P. 248–253.
15. *Saritas S., Procter R.P.M., Grant W.A.* Effect of ion implantation on fatigue, fretting and fretting-corrosion of Ti–6Al–4V // *Materials Science and Engineering*. Section A. 1989. Vol. 115. P. 307–314.
16. *Pogrebnyak A.D., Tolopa A.M.* A review of high-dose implantation and production of ion mixed structures // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. Section B: Beam Interactions with Materials and Atom. 1990. Vol. 52. No. 1. P. 25–43.
17. Изменение свойств титанового сплава ВТ23, вызванное имплантацией ионов железа и циркония и последующим воздействием низкоэнергетическим сильноточным электронным пучком / *Е.А. Базыль, А.Д. Погребняк, Б.П. Гриценко, С.В. Соколов* // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25 (15). С. 66–73.
18. Физико-химическое состояние поверхностных слоев и эксплуатационные свойства сплава ВТ18У, подвергнутого воздействию мощного ионного пучка / *А.Н. Диденко, В.А. Шулов, Г.Е. Ремнев и др.* // ФиХОМ. 1991. № 5. С. 14–23.
19. Глубокое азотирование мартенситной стали и титанового сплава при имплантационно-плазменной обработке / *М.В. Атаманов,*

- М.И. Гусева, Г.М. Гордеева, Ю.В. Мартыненко, В.Е. Неумоин, А.М. Смыслов // Металлы. 2000. № 2. С. 106–111.*
20. *Раджабов Т.Д., Богдасарян А.С.* Изменение поверхностной микротвердости и износостойкости сплава титана в результате ионного азотирования // *Поверхность. 1986. № 11. С. 104–111.*
 21. Механические свойства и состав поверхности титанового сплава в зависимости от дозы облучения ионами Si и Ag / *П.В. Быков, Ф.З. Гильмуудинов, А.А. Колотов, Н.А. Орлова, В.Я. Баянкин // VI Всероссийский семинар «Физические и физико-химические основы ионной имплантации». Нижний Новгород, 15–17 октября 2002 г. С. 119–126.*
 22. Влияние электрополировки и ионной имплантации азота в поверхность на электрохимическое поведение титана и никелида титана в растворе NaCl / *О.И. Налесник, Ю.Ф. Ясенчук, Н.А. Мазуркина, В.И. Итин, В.Э. Гюнтер // Имплантаты с памятью формы. 1992. № 4. С. 53–58.*
 23. *Сивоха В.П., Мейснер Л.Л., Гриценко Б.П.* Материал на основе никелида титана с эффектом памяти формы // Пат. 2191842 РФ. Заявка № 2000122116/02 от 18.08.2000; опубл. 27.10.2002. Бюл. №30. –6 с.
 24. Влияние высоких доз N^+ , N^+Ni^+ , Mo^+W^+ на физико-механические свойства TiNi / *А.Д. Погребняк, С.Н. Братушка, Л.В. Маликов, Н. Левинтант, Н.К. Ердыбаева, С.В. Плотников, Б.П. Гриценко // Журнал технической физики. 2009. Т. 79. № 5. С. 65–72.*
 25. *Авдиенко К.И., Авдиенко А.А., Коваленко И.А.* Влияние элементного состава пучка ионов на фазообразование и упрочнение поверхности конструкционных материалов // *Физика металлов и металловедение. 2001. Т. 92. № 6. С. 103–107.*
 26. *Humbrecht J.V.* Preface to the viewpoint set on: shape memory alloys // *Scripta Materialia. 2004. Vol. 50. No. 2. P. 179–180.*
 27. *Raniecki B., Lexcellent Ch.* Thermodynamics of isotropic pseudoelasticity in shape memory alloys // *European Journal of Mechanics. A: Solid. 1998. Vol. 17. No. 2. P. 185–205.*
 28. *Chrobak D., Morawiec H.* Thermodynamic analysis of the martensitic transformation in plastically deformed NiTi alloy // *Scripta Materialia. 2001. Vol. 44. No. 5. P. 725–730.*
 29. Surface morphology and plastic deformation of the ion-implanted TiNi alloy / *L.L. Meisner, V.P. Sivokha, A.I. Lotkov, L.A. Derevyagina // Physics. B: Condensed Matter. 2001. Vol. 307. No. 1–4. P. 251–257.*
 30. Structural and mechanical characterisation of boron and nitrogen implanted NiTi shape memory alloy / *H. Pelletier, D. Müller, P. Mille, J.J. Grob // Surface and Coatings Technology. 2002. Vol. 158–159. P. 309–317.*
 31. *Carroll M.C., Somsen Ch., Eggeler G.* Multiple-step martensitic transformations in Ni-rich NiTi shape memory alloys // *Scripta Materialia. 2004. Vol. 50. No. 2. P. 187–192.*
 32. *Mändl S., Gerlach J.W., Rauschenbach B.* Surface modification of NiTi for orthopaedic braces by plasma immersion ion implantation // *Surface and Coatings Technology. 2005. Vol. 196. No. 1–3. P. 293–297.*
 33. *Leng Chongyan, Asaoka Teruo, Zhou Rong.* Surface properties of nitrogen-ion-implanted TiNi shape memory alloy // *Journal of the University of Science and Technology of Beijing. Mineral, Metallurgy, Material. 2006. Vol. 13. No. 2. P. 154–157.*
 34. Структурно-фазовые изменения в приповерхностных слоях титанового сплава TiNi после ионной имплантации / *А.Д. Погребняк, В.М. Берсенов, Н. Левинтант, Л.В. Маликов, С.Н. Братушка, Н.К. Ердыбаева // ФИП. 2009. Т. 7. № 3. С. 239–243.*
 35. *Погребняк А.Д.* Влияние высокодозной имплантации ионов металлов и газов на физико-механические свойства титановых сплавов // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники. 2008. Т. 17. № 1. С. 81–92.*
 36. Improving the tribological properties of Ti–6Al–4V alloy by nitrogen-ion implantation / *Y. Itoh, A. Itoh, H. Azuma, T. Hioki // Surface and Coatings Technology. 1999. Vol. 111. No. 2–3. P. 172–176.*
 37. *Гусева М.И.* Технологические аспекты ионной имплантации в металлах // *Поверхность. Физика. Химия. Механика. 1993. № 3. С. 141–149.*
 38. Corrosion behavior of Ti–6Al–4V alloy treated by plasma immersion ion implantation process / *L.L.G. da Silva, M. Ueda, M.M. Silva, E.N. Codaro // Surface and Coatings Technology. 2007. Vol. 201. No. 19–20. P. 8136–8139.*
 39. Phase formation in aluminium implanted titanium and the correlated modification of mechanical and corrosive properties /

- I. Tsyganov, E. Wieser, W. Matz, A. Mücklich, H. Reuther, M.T. Pham, E. Richter // *Thin Solid Films*. 2000. Vol. 376. P. 188–197.
40. Knight S.T., Evans P.J., Samandi M. Titanium aluminide formation in Ti implanted aluminium alloy // *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res.* 1996. Vol. B119, P. 501–504.
41. Кадыржанов К.К., Туркебаев Т.Э., Удовский А.Л. Физические основы ионных технологий создания стабильных многослойных металлических материалов. – Алматы: ИЯФ НЯЦ РК, 2001. – 315 с.
42. Фазовый состав поверхностного слоя сплава ВТ6 после имплантации ионов W и Mo / Н.К. Ердыбаева, А.Д. Погребняк, С.В. Плотников, А.И. Купчишин // Науч.-темат. сб. «Радиационно-термические процессы в металлах, сплавах и композитах» / под ред. д. ф.-м. н., проф. А.И. Купчишина. – Алматы, 2009. С. 39–42.
43. Морфология и элементный состав поверхностного слоя сплава ВТ22 после двойной имплантации ионами Mo⁺, W⁺ / Н.К. Ердыбаева, А.Д. Погребняк, С.В. Плотников, А.И. Купчишин // Науч.-темат. сб. «Радиационно-термические процессы в металлах, сплавах и композитах» / под ред. д-ра физ. мат. наук, проф. А.И. Купчишина. – Алматы, 2009. С. 43–46.
44. Surface modification of TiNi alloy through tantalum immersion ion implantation / Y. Cheng, C. Wei, K. Y. Gan, L. C. Zhao // *Surface and Coatings Technology*. 2004. Vol. 176. No. 2. P. 261–265.
45. Corrosion behavior and surface characterization of tantalum implanted TiNi alloy / Yan Li, Songbo Wei, Xiangqian Cheng, Tao Zhang, Guoan Cheng // *Surface and Coatings Technology*. 2008. Vol. 202. No. 13. P. 3017–3022.
46. Шаркеев Ю.П. Колупаева С.В. Гирсова Н.В. Эффект дальнего действия в металлах при ионной имплантации // *Металлы*. 1998. № 1. С. 109–115.
47. Вудраф Д., Деллар Т. Современные методы исследования поверхности. – М.: Мир, 1989. – 564 с.
48. Бахарев О.Г., Погребняк А.Д. Применение неразрушающих методов анализа структуры, элементного состава облученной поверхности и эффект дальнего действия при высокодозной ионной имплантации (ВИИ) металлических материалов // *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*. Серия: Физика твердого тела. 2003. № 1. С. 161–172.
49. Некоторые аспекты эффекта дальнего действия / Н.П. Апарина, М.И. Гусева, Б.Н. Колбасов, С.Н. Коршунов, А.Н. Мансурова, Ю.В. Мартыненко // *Вопросы атомной науки и техники*. Сер.: Термоядерный синтез. 2007. № 3. С. 18–27.
50. Быковский Ю.А., Неволин В.Н., Фоминский В.Ю. Ионная и лазерная имплантация металлических материалов. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 240 с.

Материал поступил в редакцию 28.02.2011

СЕМЕНДЕЕВА
Ольга Валерьевна

Ведущий инженер кафедры материаловедения и технологии конструкционных материалов МГИУ. Область научных интересов – материаловедение и технологии получения новых материалов. Автор трех научных публикаций.

E-mail: hassand@mail.ru
Тел. +7 (495) 620-37-61

УЧЕВАТКИНА
Надежда
Владимировна

Кандидат химических наук, доцент кафедры материаловедения и технологии конструкционных материалов МГИУ. Область научных интересов – экологическая химия, материаловедение и технологии получения новых материалов. Автор 16 научных публикаций и 5 учебно-методических пособий.

E-mail: uchevatkina@yandex.ru
Тел. +7 (495) 620-39-61

ОВЧИННИКОВ
Виктор Васильевич

Доктор технических наук, профессор, академик Международной академии информатизации. Главный специалист по сварке и материаловедению ОАО «Российская самолетостроительная корпорация «МиГ». Область научных интересов – разработка новых алюминиевых сплавов и технологии изготовления из них ответственных сварных конструкций. Автор 275 научных работ, в том числе 96 авторских свидетельств и патентов на изобретения.

E-mail: vikov1956@mail.ru
Тел. +7 (495) 795-83-95

Таблица 1

Основные характеристики различных титановых сплавов после имплантации

Номер источника в списке литературы	Обрабатываемый сплав (система)	Параметры имплантации ионов						Толщина ионно-летированного слоя, нм	Фазовый состав	Изменение свойств**
		Тип ионов, применяемых для имплантации*	Ускоряющее напряжение, кВ	Сила тока, I, А, или плотность тока, j, А/см ²	Температура поверхности образцов, К	Время имплантации, мин	Доза облучения, D, ион/см ²			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
6	BT1	Al ³⁺	20	I=145	1170	125	2,2·10 ¹⁸	2600	Ti ₃ Al, TiAl, TiO ₂ (рутил.), γ-Al ₂ O ₃ (куб.), γ'-Al ₂ O ₃ (куб.)	увеличение HV в 1,5–3 раза, повышение износостойкости в 2–2,5 раза
9	BT1-0	Al ³⁺	20	I= 145	1170	12	2,2·10 ¹⁷	400	α ₂ - Ti ₃ Al, γ-TiAl, α-фаза, TiO ₂ (рутил.), TiC	–
						35	6,2·10 ¹⁷	1600	α ₂ - Ti ₃ Al, γ-TiAl, α-фаза, TiO ₂ (гекс.), TiC, γ-Al ₂ O ₃	–
						60	11,0·10 ¹⁷	2000	α ₂ - Ti ₃ Al, γ-TiAl, α-фаза, TiO ₂ (гекс.), γ-Al ₂ O ₃	увеличение HV в 1,2–2 раза
12	Ti-6Al-4V	N ⁺	50, 100	–	723, 873	–	3·10 ¹⁷	–	улучшение трибологических свойств (низкий коэффициент трения)	

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
13	Ti-6Al-4V	N ⁺	120	-	-	-	1·10 ¹⁶ -1·10 ¹⁸	-	-	увеличение HV и повышение трибологических свойств	
		N ⁺ +C ⁺		-	-	-		-	TiC, Ti (C, N)		
14	Ti-6Al-4V	Al ²⁺	-	-	-	-	1·10 ¹⁶	-	-	увеличение HV и повышение трибологических свойств	
		Au ³⁺	-	-	-	-		-			
		N ⁺	-	-	-	-		-			
15	Ti-6Al-4V	B ⁺	40	-	-	-	2·10 ¹⁷	-	-	уменьшение коэффициента трения и объема изнашивания	
		N ⁺		-	-	-		-	-		
17	Ti ₄₁ -Al ₄₁ -V ₁₈ (ВТ23)	Fe ⁺	60	$j=1,8\cdot 10^{-3}$	-	-	8·10 ¹⁶	до 500		увеличение HV до 9 ГПа, повышение износостойкости	
				$j=2,2\cdot 10^{-3}$	-	-					1·10 ¹⁷
				$j=3,5\cdot 10^{-3}$	-	-					5·10 ¹⁷
		Zr ⁺	40	$j=1,8\cdot 10^{-3}$	-	-	5·10 ¹⁶	-	-	-	
				$j=2,2\cdot 10^{-3}$	-	-		-	-		
				$j=3,5\cdot 10^{-3}$	-	-		-	-		

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
21	Ti-2,2Al-0,6Mn	Si ⁺	40	$j = 1 \cdot 10^{-5}$	-	-	$10^{15} - 5 \cdot 10^{16}$	-	-	увеличение HV на 10-30 %, повышение усталостной прочности
		Ar ⁺			-	-				
25	Ti _{48,5} Ni _{51,5}	N ⁺	60	$j = 0,8 - 1 \cdot 10^{-3}$	523	30	$5 \cdot 10^{17}$	280-300	-	увеличение HV на 15-20 %, увеличение модуля упругости в 4-4,5 раза
		N ⁺ +Ni ⁺								
	W ⁺ +Mo ⁺		B ₁ (TiNi), B ₄ (TiNi), TiN							
31	Ti ₅₄ Ni ₄₆	B ⁺	150	-	-	-	$1 \cdot 10^{16}$, $5 \cdot 10^{16}$, $1 \cdot 10^{17}$	-	-	увеличение HV и модуля упругости
		N ⁺								
35	Ti _{48,5} Ni _{51,5}	N ⁺ +Ni ⁺	60	-	487	30	$1 \cdot 10^{18}$ (N ⁺), $5 \cdot 10^{17}$ (Ni ⁺)	80-160	B ₂ (TiNi), Ti ₂ Ni	Ni ⁺ - увеличение HV с 4,4 до 7,7 ГПа, Ni ⁺ - до 8,4 ГПа

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
36	BT22	N ⁺ +W ⁺	60	-	523	-	5·10 ¹⁷ –1·10 ¹⁸	850	α-Ti; β-Ti; фазы Al _{0,67} Cr _{0,08} Ti; Al ₃ Ti _{0,8} V _{0,2}	увеличение HV, повышение износостойкости в 1,7 раз
		N ⁺ +Ni ⁺		-		α-Ti; β-Ti; фазы Al _{0,67} Cr _{0,08} Ti; Al ₃ Ti _{0,8} V _{0,2}				
		N ⁺ +Zr ⁺		-		α-Ti; β-Ti; фазы Al _{0,67} Cr _{0,08} Ti; Al ₃ Ti _{0,8} V _{0,2}				
37	Ti-6Al-4V	N ⁺ -W ⁺	60	-	523	-	5·10 ¹⁷ –1·10 ¹⁸	-	α-Ti; β-Ti; фазы Al ₃ Ti и Al ₂ Ti	улучшение трибологических свойств
		N ⁺ -Ni ⁺		-		α-Ti; β-Ti; фазы Al ₃ Ti и Al ₂ Ti				
		N ⁺ -Zr ⁺		-		α-Ti; β-Ti; фазы Al ₃ Ti и Al ₂ Ti				
40	Ti	Al ⁺	-	-	-	2,5·10 ¹⁷	100–200	Ti ₃ Al, TiAl	улучшение коррозионной стойкости и износостойкости	
46	Ti, Ni _{48,5} ^{51,5}	Ta ⁺	-	-	310	-	1,5·10 ¹⁷	-	TiO ₂ , Ta ₂ O ₅	улучшение коррозионной стойкости

* A+B – одновременное имплантирование ионов,

A-B – последовательное имплантирование ионов, где A и B ионы имплантируемых элементов.

** HV – микротвердость.

Таблица 2

Наиболее распространенные экспериментальные методы исследования поверхности металлических материалов после ионной имплантации

Метод исследования	Глубина анализируемого слоя, нм	Чувствительность метода	Особенности метода
Дифракция медленных электронов	1	$2 \cdot 10^{-3}$ монослоя	неразрушающий; анализ упорядочения атомов
Электронная Оже-спектроскопия	1	0,01–0,1 %	неразрушающий; полуколичественный; анализ элементов
Рентгеновская спектроскопия фотоэлектронов	0,5–2	0,1–1 %	полуколичественный; определение валентных состояний
Ядерная гамма-резонансная спектроскопия	определяется глубиной залегания резонансных ядер	относительное разрешение по энергиям составляет 10^{-13} – 10^{-14} эВ	неразрушающий
Скользкий пучок рентгеновских лучей	10^2	–	неразрушающий; анализ упорядочения атомов
Обратное резерфордское рассеяние	10^3	1 %	неразрушающий; количественный; получение концентрационных профилей
Метод ядерных реакций	10^3	1 %	неразрушающий; полуколичественный
Электронный микроанализ	10^2 – 10^4	10^2 – 10^3 атомных слоев	неразрушающий; количественный; возможность сканирования поверхности
Растровая электронная микроскопия	5–10	–	неразрушающий; анализ топографии поверхности
Электронно-стимулированная десорбция	5	10^{-2} монослоя	разрушающий; возможность исследования адсорбционных явлений
Отражательная электронография	1–10	–	неразрушающий; анализ упорядочения атомов
Ионизационная спектроскопия	1	10^{-1} монослоя	неразрушающий
Ультрафиолетовая электронная спектроскопия	3	$2 \cdot 10^{-2}$ монослоя	неразрушающий
Спектрометрия рассеянных ионов	1	10^{-2} – 10^{-3} монослоя	неразрушающий; полуколичественный; получение концентрационных профилей
Ионно-зондовый микроанализ	1	10^{-5} %	разрушающий; полуколичественный; получение трехмерных концентрационных профилей
Вторичная ионная масс-спектрометрия	1	10^{-5} %	разрушающий; полуколичественный; получение концентрационных профилей
Масс-спектрометрия тлеющего разряда	1	один монослой	разрушающий; получение концентрационных профилей.