

5. Rakhadilov B., Maulet M., Abilov M., Sagdoldina Zh., Kozhanova R. / Structure and Tribological Properties of Ni-Cr-Al based Gradient Coating Prepared by Detonation Spraying // Coatings 11(2) (2021) 218.

6. Rakhadilov B.K., Maulet M., Kakimzhanov D.N., Stepanova O.A., Botabaeva G.B. / Comparative study of the structure and properties of homogeneous and gradient Ni-Cr-Al // Eurasian Journal of Physics and Functional Materials 6 (1) (2022) 47-55.

7. Maulet M., Sagdoldina Zh.B., Rakhadilov B.K., Kakimzhanov D.N., Magazov N.M. / Influence of the content of aluminum on the structure of gradient detonation coatings based on NiCr-Al // Bulletin of the Karaganda university Physics series 3 (107) 2022.

8. Chen W.R., Wu X., Marple B.R., Nagy D.R., Patnaik P.C. / TGO growth behaviour in TBCs with APS and HVOF bond coats.

МОДИФИКАЦИЯ СТАЛИ AISI 420 ПРИ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКОМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ПОВЕРХНОСТЬ МОЩНОГО ИОННОГО ПУЧКА СУБМИЛЛИСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

И.И. МЕРЗЛЯКОВ, О.С. КОРНЕВА

Томский политехнический университет

Научная лаборатория высокоинтенсивной имплантации ионов

E-mail: iim15@tpu.ru

Современные тенденции развития промышленности требуют развития методов модификации поверхности твердого тела с целью улучшения его микроструктуры, физико-механических и эксплуатационных свойств. В настоящее время активно развиваются методы ионно-плазменного осаждения покрытий и импульсно-пучковые технологии, основанные на воздействии на поверхность лазерного излучения электронных и ионных пучков высокой плотности мощности [1,2]. Одним из перспективных методов является ионная имплантация, которая позволяет изменять не только фазовый, но и элементный состав приповерхностного слоя и в отличие от методов нанесения покрытий имеет преимущество в отсутствии проблем с адгезией модифицированного слоя к матричному материалу. Быстроразвивающиеся, в последнее время, методы основаны на высокоинтенсивной имплантации ионов низкой и средней энергий [3,4]. Высокоинтенсивная имплантация обеспечивает значительное усиление радиационно-стимулированной диффузии имплантируемых элементов, что создаёт предпосылки для решения принципиальной проблемы ионной имплантации, связанной с малым пробегом ионов в веществе и соответствующим ограничением толщин ионномодифицированных слоёв. Высокоинтенсивная имплантация ионов низкой энергии показывает хорошие результаты применительно к формированию азотированных слоёв в различных металлах и сплавах. В течение часа этот метод позволяет сформировать ионно-легированный слой толщиной до двухсот микрометров. Диффузия азота в обычных сталях, при плотностях ионного тока в несколько сотен mA/cm^2 , происходит при достаточно низких температурах. В то же время для формирования глубоко легированных интерметаллидных слоёв требуется наряду с большой плотностью ионного тока и высокие температуры. При высоких температурах во всём объеме матричного материала образца при длительном облучении, например в течение часа, имеет место существенный рост размеров зерна кристаллической структуры, что может негативно повлиять на эксплуатационные свойства модифицируемого изделия. В работе [4], для решения указанной выше проблемы, предложен метод, основанный на синергии высокоинтенсивной ионной имплантации и импульсно-периодического энергетического воздействия ионного пучка на облучаемую поверхность. Метод предполагает совмещение нескольких процессов, влияющих на микроструктуру и

свойства материала. Наряду с импульсно-периодической высокоинтенсивной имплантацией ионов с энергией в диапазоне от 50 до 100 кэВ, имеет место радиационно-стимулированная диффузия при плотности ионного тока порядка 1 А/см^2 , импульсный нагрев поверхности пучком высокой импульсной плотности мощности в диапазоне от нескольких десятков до нескольких сотен кВт/см^2 , сверхбыстрое охлаждение приповерхностного слоя за счёт отвода тепла с поверхности вглубь материала. Сверхбыстрое охлаждение, во-первых, решает проблему снижения температуры матричного материала при имплантации до уровня, при котором не происходит деградация его свойств. С другой стороны, сверхбыстрое охлаждение даже без ионного легирования может существенно повлиять на микроструктуру и эксплуатационные свойства материала за счёт эффекта сверхзакалки.

В настоящей работе экспериментально исследуется энергетическое воздействие мощного импульсного пучка ионов титана субмиллисекундной длительности на поверхность стали AISI 420.

Экспериментальные исследования проводились на комплексной установке для ионно-лучевой и плазменной обработки материалов, схема которой представлена на рисунке 1.

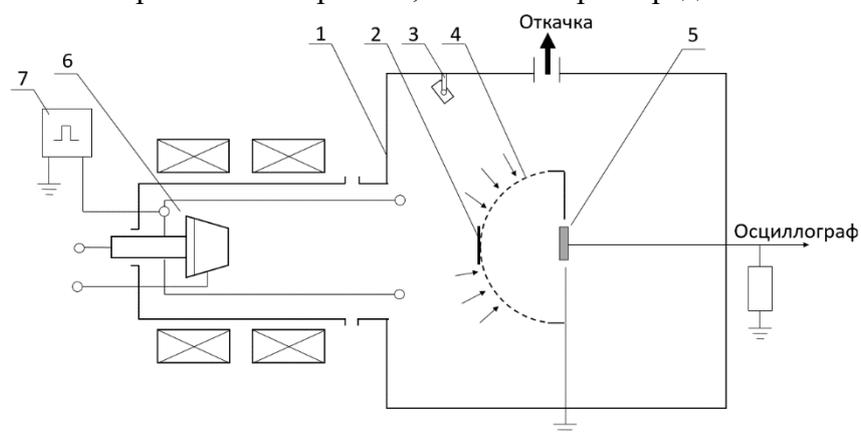


Рисунок 1 – Схема экспериментальной вакуумной установки:

- 1 – вакуумная камера; 2 – отсекающий электрод;
 3 – бесконтактный пирометр; 4 – сеточный электрод; 5 – экспериментальный образец;
 6 – дуговой источник плазмы; 7 – высоковольтный импульсно-периодический генератор

Импульсно-периодический пучок ионов высокой плотности мощности, длительностью 450 мкс с плотностью тока до $1,5 \text{ А/см}^2$, формировался при ускоряющем напряжении 35 кВ из плазмы непрерывного вакуумного дугового разряда с током 130 А. Высокая плотность тока достигалась за счёт баллистической фокусировки ионов с использованием сеточного электрода, радиусом 130 мм, в пространстве дрейфа, предварительно заполняемого плазмой. Энергетическое воздействие на поверхность образцов из стали AISI 420 диаметром 20 мм и толщиной 3 мм, в импульсно-периодическом режиме, с частотой 30 импульсов/сек, осуществлялось при плотности мощности в пучке достигающей 105 кВт/см^2 . Динамика изменения температуры мишени в течение времени облучения каждого из образцов определялась по показаниям термопары типа К, а начиная с температуры 350°C и по данным импульсного пирометра. Динамика изменения температуры мишени в течение воздействия импульсного пучка на поверхность определялась на основе осциллограмм пирометра KLEIBER 740-LO.

Результаты исследований шероховатости поверхности исходного образца и образцов, модифицированных в различных режимах, показывают значительное изменение значений R_a и R_z , рисунок 2. На рисунке 3 представлены графики изменения коэффициента трения. В таблице 1 представлены для разных режимов ионного нагружения образцов, средние коэффициенты трения, глубина трека износа и параметр износа. Трибологические

Секция 3. Модификация поверхности

исследования образцов № 1-4 указывают на существенное изменение коэффициента трения в зависимости от режима ионного облучения. Видно, что многократное улучшение трибологических свойств модифицированной поверхности достигается в режиме обработки, соответствующей образцу №4.

Таблица 1 – Коэффициент трения и параметр износа для образцов до и после энергетического воздействия

№ образца	Средний коэффициент трения μ	Средняя глубина трека износа h , мкм	Параметр износа $v \cdot 10^{-5}$, $\text{мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м}$
исходный	0.83	1,6	3,45
1	0.679	1,4	1,9
2	0.612	1	1,06
3	0.489	0,9	0,94
4	0,43	0,27	0,07

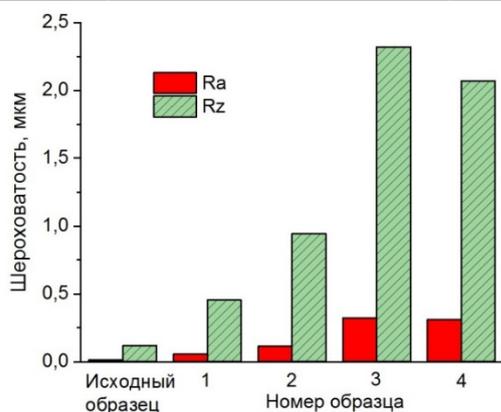


Рисунок 2 – Значения шероховатости Ra и Rz поверхности исходного и модифицированных образцов

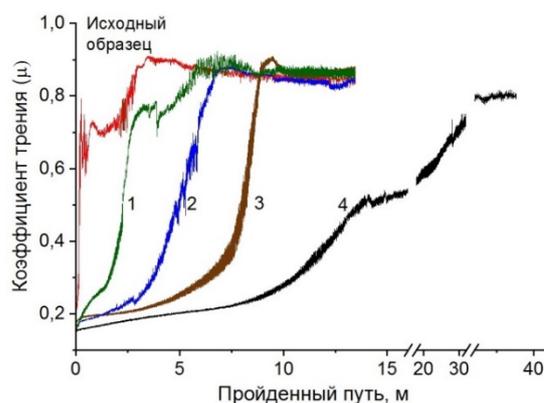


Рисунок 3 – Графики изменения коэффициента трения

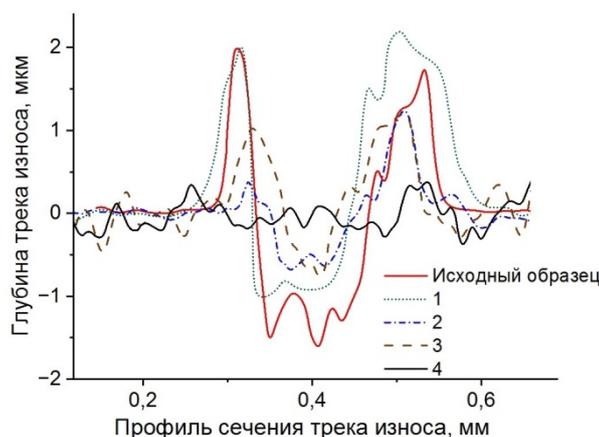


Рисунок 4 – Профили сечений треков износа

При исследовании микротвердости установлено, что твердость исходного образца равна 2.5 ГПа, энергетическое воздействие в режимах №1-3 привело к увеличению микротвердости на 60 %. В режиме №4 микротвердость была увеличена в 3 раза по сравнению с исходным образцом.

В докладе также приводятся результаты исследования микроструктуры ионно-модифицированных слоёв методом просвечивающей электронной микроскопии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, грант № FSWW-2023-0011.

Список литературы

1. Poate J.M., Foti G., Jacobson D.C., Surface Modification and Alloying by Laser, Ion, and Electron Beams. (Berlin, Germany: Springer, 2013)
2. Conrad J.R., Radtke J.L., Dodd R.A. et al. // J. Appl. Phys. 1987. V. 62. P. 4591.
3. Ryabchikov A.I., et al., Vacuum, 165, 127, 2019; doi: 10.1016/j.vacuum.2019.04.024
4. Ryabchikov A.I., IEEE Trans. Plasma Sci., 49(9), 2529, 2021; doi: 10.1109/TPS.2021.3073942

**ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЭО ПРОЦЕССА
НА ТИТАНОВОМ СПЛАВЕ ВТ-6**

А.И. ПЛЕШКОВА^{1,2}, Д.А. ЛЯПИН², И.М. ИМШИНЕЦКИЙ¹, К.В. НАДАРАИИ¹

¹Институт химии ДВО РАН

²Дальневосточный федеральный университет

E-mail: othariadna@gmail.com

В настоящее время титан и титановые сплавы находят широкое применение в ортопедии в качестве имплантационных материалов, что обусловлено их высокой коррозионной стойкостью, биоинертностью, а также легкостью [1–3]. К сожалению, несмотря на ряд достоинств, данный материал имеет определенные недостатки. К таким недостаткам относятся выделение при трении титанового имплантата о прилегающие ткани частиц субмикронного размера, повышающих риск некроза, а также эффект экранирования напряжений, зачастую приводящий к отторжению имплантата [4]. Одним из возможных способов устранения описанных недостатков является нанесение на поверхность титановых сплавов покрытий методом плазменного электролитического оксидирования (ПЭО). Полученные при помощи ПЭО поверхностные слои обладают не только повышенной коррозионной стойкостью и износостойкостью, но также и могут содержать в своем составе соединения, присутствующие также и в костной ткани [5]. Такое средство покрытия к костной ткани позволяет снизить риск отторжения материала. Известно, что свойства получаемых покрытий напрямую зависят от параметров оксидирования [6]. Так, в предыдущей работе нами было исследовано изменение ряда свойств покрытий, формируемых на магниевом сплаве МА8 [7]. Принимая во внимание, что такие свойства покрытия, как шероховатость, гидрофильность, пористость будут напрямую влиять на приживаемость имплантата, возникает потребность в детальном исследовании существующих корреляций не только для ПЭО-слоев на магниевом сплаве, но и на титановых сплавах.

В связи с вышесказанным, в данной работе исследовалась зависимость изменения плотности тока в процессе ПЭО от площади обрабатываемого образца.

Для исследования зависимостей использовались образцы из титанового сплава ВТ6 со следующей площадью поверхности: 64 мм², 300 мм² и 600 мм². Перед формированием ПЭО-слоя образцы подвергались механической обработке с целью стандартизации поверхности. Процесс ПЭО проводили в электролите, содержащем глицерофосфат и ацетат кальция в концентрациях 30 г/л и 40 г/л, соответственно. Режим формирования покрытий оставался неизменным с целью исследования влияния площади образцов на электротоксовые параметры.

Полученные данные были извлечены, для их обработки была написана программа, которая приводит тип данных к формату .txt, определяет режим ПЭО, разбивает данные на массивы для каждого эксперимента, а именно: время, сила тока, напряжение. Далее проводится предобработка данных по длине, высчитано среднее значение напряжения, силы тока и плотности тока по группе экспериментов, объединенных площадью поверхности образца.