

**ВЫСОКОИНТЕНСИВНАЯ ИМПЛАНТАЦИЯ ИОНОВ ТИТАНА В АЛЮМИНИЙ
В УСЛОВИЯХ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ
ПУЧКА НА ПОВЕРХНОСТЬ**

Д.Д. ЗАЙЦЕВ, А. И. ИВАНОВА, А. В. ГУРУЛЕВ

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

E-mail: ddz5@tpu.ru

Метод ионной имплантации представляет широкий интерес для модификации элементного состава, микроструктуры и свойств различных материалов [1, 2]. Среди сложностей в реализации метода ионной имплантации выделяется проблема, связанная с ограничением глубины проникновения ионов в твердое тело. Одним из определяющих факторов, влияющих на радиационно-стимулированную диффузию, и как следствие на толщину ионно-модифицированного слоя, считается высокая плотность ионного тока [3]. Однако для достижения залегания примеси на глубинах единицы-десятки мкм необходимо нагревать образец до температур, при которых наблюдается ухудшение микроструктуры всего матричного материала. Для решения данной проблемы был предложен метод, описанный в работе [4], основанный на синергии высокоинтенсивной имплантации ионов и энергетического воздействия пучка ионов высокой импульсной мощности на поверхность мишени. При таком подходе приповерхностный слой обрабатываемого изделия будет импульсно нагреваться до температуры, ускоряющей диффузионное проникновение атомов внедряемой примеси на глубины, существенно превышающие проективный пробег ионов. В итоге матрица облучаемой мишени не будет нагреваться до температур, при которых будет иметь место деградация материала во всем объёме.

Настоящая работа посвящена исследованию влияния синергии высокоинтенсивной имплантации ионов титана и одновременного энергетического воздействия ионного пучка на алюминий. В работе исследовалось несколько различных режимов ионной обработки мишени алюминия. Первоначально изучалось энергетическое воздействие ионного пучка на поверхность при неподвижной мишени и малой частоте импульсов ионного пучка. Затем с целью увеличению частоты следования импульсов образец располагался на вращающемся держателе, что позволило повысить частоту следования импульсов в несколько раз, исключив при этом расплавление мишени из алюминия. Одновременно проводилось численное моделирование энергетического воздействия на поверхность мишени с целью определения требуемых параметров ионного пучка и динамики изменения температурных полей в мишени как при одноимпульсном воздействии, так и импульсно-периодическом, в том числе с паузами за счет вращения держателя мишени.

Исследования проводились на комплексной установке для ионно-лучевой и плазменной обработки материалов, включающей модифицированную версию ионного источника «Радуга 5». Импульсно-периодическое формирование пучка ионов титана длительностью 450 мкс с высокой импульсной плотностью мощности осуществлялось из плазмы непрерывного вакуумного дугового разряда при ускоряющем напряжении в диапазоне от 10 до 35 кВ. Для формирования пучка использовалась баллистическая фокусировка ионов. Сеточный электрод радиусом 130 мм и размерами ячейки сетки 1×1 мм² использовался в качестве экстрактора ионов со свободной границы плазмы непрерывного вакуумного дугового разряда. В центральной области сеточного электрода устанавливался сплошной диск диаметром 40 мм, препятствующий прямому пролету микрочастиц с катода на облучаемую поверхность мишени. Импульсная плотность мощности в пучке с учетом зарядового состава ионов ($\bar{Z} = 2$ [5]) варьировалась в диапазоне от 20 до 140 кВт/см².

Моделирование импульсного и импульсно-периодического нагрева образца осуществлялось в условиях, когда воздействие пучка ионов заменялось нагружением поверхности тепловым потоком, падающим по нормали к поверхности. Численное

моделирование динамики изменения температурных полей проводилось для образца, изготовленного из алюминия, толщиной 3,2 мм и площадью 4 см² с использованием модели, описанной в работе [6]. Динамика изменения температуры поверхности исследовалась при одноимпульсном воздействии на алюминиевую мишень пучка ионов титана длительностью 450 мкс со средней энергией ионов 40 кэВ при плотности ионного тока 1 А/см². Для упрощения задачи был выполнен переход от трехмерной к двумерной модели. Для подтверждения справедливости такого допущения было проведено сравнение численных решений соответствующих геометрий. Данные расчетов представлены на рисунке 1(а).

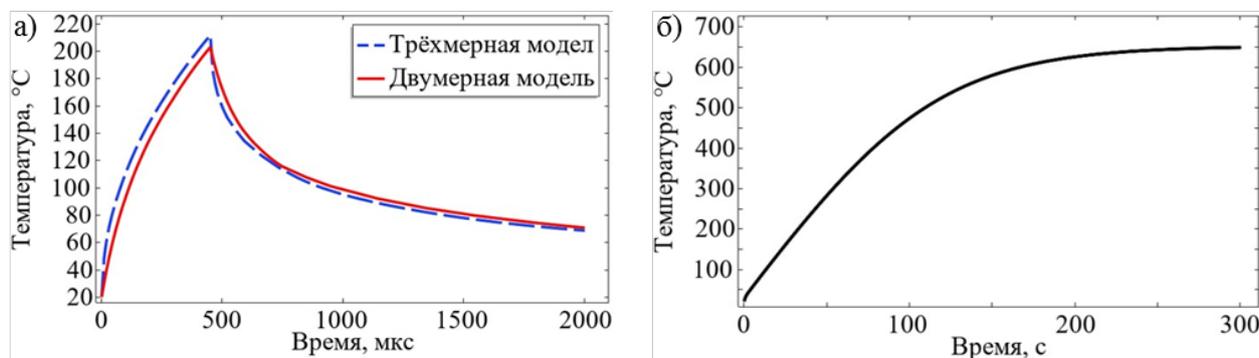


Рисунок 1 – Результаты численных расчетов:

- а) сравнение двумерной и трехмерной моделей динамики изменения температурных полей при одноимпульсном воздействии высокоинтенсивного пучка ионов титана на алюминий;
- б) динамика изменения температуры мишени по оси пучка при импульсно-периодическом облучении с частотой 1 имп./с

Из рисунка 1(а) видно, что численное моделирование динамики изменения температурных полей мишени в случае 2D и 3D моделей показывает близкие по значению результаты нагрева. Это означает, что для длительного нестационарного моделирования может быть использована 2D-модель.

На рисунке 1(б) приведено распределение температурных полей с учетом нелинейного изменения теплоемкости и коэффициента теплопроводности облучаемого алюминия в течение 300 с при импульсной плотности мощности до $4 \cdot 10^8$ Вт/м² и частоте 1 имп./с. Как видно из рисунка 1(б), максимальная средняя температура в центре облучаемой мишени достигает температуры плавления алюминия (660 °С). Очевидно, что при импульсном нагреве в течение данного времени облучения будет наблюдаться расплав мишени. Как следует из данных рисунка 1(а) однократное воздействие пучка на поверхность алюминия обеспечивает импульсное увеличение температуры поверхности примерно на 200 °С. Принимая во внимание данные рисунка 1(б), можно сказать, что для облучения алюминия без расплавления поверхности мишени с импульсной плотностью мощности пучка ионов титана $4 \cdot 10^8$ Вт/м² длительность облучения не должна превышать 90 с.

Экспериментальные исследования энергетического воздействия пучка ионов титана на неподвижную алюминиевую мишень проводились при частоте импульсов ускоряющего напряжения в диапазоне от 1 до 3 имп./с. Экспериментально измеренная с помощью импульсного пирометра динамика изменения температуры поверхности представлена на рисунке 2. Видно, что предварительное импульсно-периодическое облучение образца привело к его прогреву до температуры около 350 °С. Однократное импульсное воздействие обеспечивает увеличение температуры поверхности примерно на 190 °С. Полученные данные достаточно хорошо коррелируют с результатами численного моделирования, представленными на рисунке 1(а).

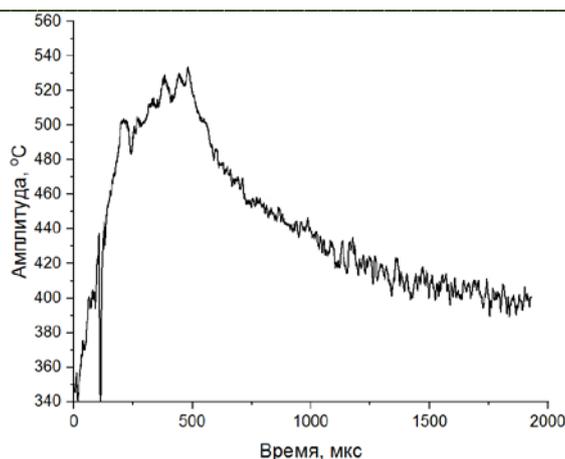


Рисунок 2 – Изменение температуры поверхности при одноимпульсном облучении пучком ионов титана алюминия

В экспериментах было обнаружено, что при малых частотах импульса ионного пучка длительной имплантации ионов препятствует осаждение плазмы титана на облучаемую область образца. Однако наличие температуры у ионов и электронов вакуумно-дуговой плазмы приводит к расширению плазменного потока в пространстве дрейфа ионного пучка и имеет место осаждение покрытия на мишень за счет этого эффекта. При частоте импульсов до 3 имп./с осаждаемое между импульсами ионного пучка покрытие не расплывается. С другой стороны, и повысить частоту импульсов в условиях неподвижной мишени невозможно из-за резкого увеличения температур поверхности и расплавления мишени. Решение данной проблемы было найдено за счет использования вращающегося вокруг своей оси держателя образцов. При высокой частоте импульсов до 35 имп./с осаждаемое между импульсами покрытие расплывается ионным пучком и, таким образом, достигается высокоинтенсивная имплантация ионов в течение длительного времени облучения.

В докладе представлены результаты изменения микротвердости и износостойкости алюминиевых образцов как после короткого импульсно-периодического энергетического воздействия на поверхность, так и при синергии высокоинтенсивной имплантации ионов титана в алюминий с одновременным импульсно-периодическим энергетическим воздействием пучка на поверхность.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10061, <https://rscf.ru/project/22-79-10061/>

Список литературы

1. Диденко А.Н., Лигачёв А.Е., Куракин И.Б. Воздействие пучков заряженных частиц на поверхность металлов и сплавов. Москва: Энергоатомиздат, 1987. –184 с.
2. Ryabchikov A.I. Ananin P.S., Dektyarev S.V., et al. High intensity metal ion beam generation // Vacuum. – 2017. – Vol. 143. – P. 447–453.
3. Wei R. Low energy, high current density ion implantation of materials at elevated temperatures for tribological applications //Surface and Coatings Technology. – 1996. – Vol. 83, №. 1– 3. – P. 218-227.
4. Ryabchikov A.I. High-Intensity Implantation With an Ion Beam’s Energy Impact on Materials // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2021. – Vol. 49, №. 9. – P. 2529-2534.
5. Brown I. G. (ed.). The physics and technology of ion sources. – John Wiley & Sons, 2004. – 396.
6. Иванова А.И., Сивин Д.О., Корнева О.С. и др. Моделирование температурных полей в мишенях при совмещении импульсно-периодической высокоинтенсивной имплантации ионов и энергетическом воздействии на поверхность // Proceedings of 8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects. – 2022. – P. 820–825.