

## ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ ТИТАНА ОТ4 ПРИ ИОННО–ПЛАЗМЕННОМ АЗОТИРОВАНИИ

*Бородина А.С.<sup>1</sup>, Соколова И.С.<sup>2</sup>, Порозова С.Е.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Пермь;*

<sup>2</sup>*ООО «Ионные технологии», Пермь*

**Ключевые слова:** ионно-плазменное азотирование, структура титана, сплав ОТ4, зернистость, микротвердость.

**Аннотация.** Известно, что при ионно-плазменном азотировании происходит увеличение зерна у некоторых титановых сплавов. В статье приведены результаты исследования структуры образцов из титанового сплава ОТ4 до и после ионно-плазменного азотирования при следующих параметрах: 800°C, 30 ч, газовая смесь – азот : водород при соотношении 30:70%. Проведено исследование формы зерна основного материала и зафиксированы характеристики азотированного слоя.

## CHANGES IN THE STRUCTURE OF TITANIUM OT4 DURING ION-PLASMA NITRIDING

*Borodina A.S.<sup>1</sup>, Porozova S.E.<sup>2</sup>, Sokolova I.S.<sup>1</sup>*

*Perm National Research Polytechnic University, Perm;  
Ion Technologies LLC, Perm*

**Keywords:** ion-plasma nitriding, structure of titanium, OT4 alloy, grain size, microhardness.

**Abstract.** It is known that during ion plasma nitriding, the grain increases in some titanium alloys. The article presents the results of a study of the structure of titanium alloy samples OT4 before and after ion plasma nitriding at 800°C, 30 hours, gas mixture 30:70% nitrogen:hydrogen. The grain shape of the base material was studied and the characteristics of the nitrided layer were recorded.

Титан ОТ4 – распространенный деформируемый сплав средней прочности, относящийся к псевдо- $\alpha$  классу. Сплав ОТ4 используется для изготовления деталей, требующих сочетания прочности, жаропрочности и коррозионной стойкости. Применяется в авиационной промышленности, машиностроении и т.д. Для повышения износостойкости проводят ионно-плазменное азотирование титана. При этом реакция сплавов титана может существенно отличаться, что не всегда связано с параметрами проведения процесса. Ионно-плазменное азотирование повышает износостойкость ВТ-20 [1], ВТ1-0, ВТ6 и ОТ4-1 [2]. Анализ литературы показал, что при ионном азотировании может происходить заметный рост зерна сплава ВТ1-0, в отличие от сплава ОТ4-1, который не подвержен активному росту зерен и может подвергаться упрочнению при температурах до 900°C [3].

Цель работы – исследование микроструктуры титанового сплава ОТ4 до и после ионно-плазменного азотирования, оценка влияния процесса на параметры зерна и структурную стабильность сплава. Работа является частью исследований, проводимых для оптимизации параметров азотирования сплава при различной величине заготовок.

Для исследования выбран сплав ОТ4 из прокатного круга, изготовлено два образца №1 и №2 (рис. 1). Процесс азотирования проводили на образце №2 при температуре 800°С в течение 30 ч в газовой смеси 30:70% азот:водород. После ионно-плазменного азотирования проводили сравнение двух образцов №1 (исходного) и №2 (после ионного азотирования).

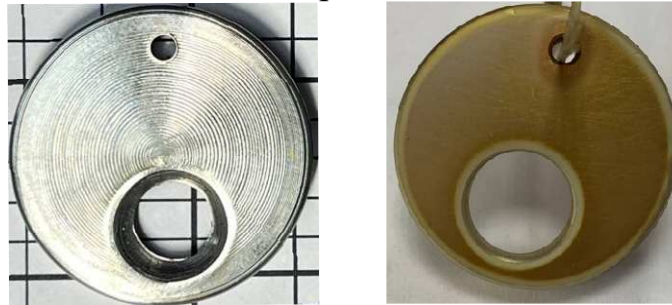


Рис. 1. Изделие до (образец №1) и после (образец №2) ионно-плазменного азотирования

Измеряли твердость с поверхности по методу Виккерса при нагрузках 1 кгс и 0,1 кгс. Вырезали часть образца и фиксировали в эпоксидной смоле перпендикулярно резу. По стандартной методике поэтапно шлифовали и полировали шлиф. После провели оценку микроструктуры основного материала и азотированного слоя, протравив реактивом  $\text{HF}(2\%)+\text{HNO}_3(2\%)+\text{H}_2\text{O}(96\%)$ . Оценка микроструктуры и глубины азотированного слоя проводили на оптическом микроскопе с помощью программного анализатора структур SIAMS модификации АСМ.1.

Твердость поверхности после упрочнения увеличилась в 1,4 раза при нагрузке в 1 кгс, а микротвердость поверхности в 3,2 раза при нагрузке 0,1 кгс (табл. 1). Такое повышение твердости поверхности является следствием образования на поверхности твердой фазовой составляющей - нитрида титана.

Табл. 1. Твердость поверхности

Образец	№ замера	HV1	HV0.1
№1 (исходный)	1	286,2	292,8
	2	278,9	322,2
	3	300,9	304,3
	4	287,6	300,8
	5	298,1	302,5
	Ср. знач.	290 HV1	305 HV0.1
№2 (азотированный)	1	417,8	1042
	2	405,9	846
	3	420,3	1037
	4	399,9	951
	5	412,3	985
	Ср. знач.	411 HV1	972 HV0.1

Среднее значение твердости поверхности, при одинаковой нагрузке, значительно больше твердости основного изделия, это увеличивает такие характеристики как, износостойкость поверхности [4], что немаловажно при эксплуатации изделий.

В структуре сплава титана ОТ4 образца №1 зёрна имеют вытянутую форму вдоль проката (рис. 2). В структуре не обнаружены значительные дефекты. Программный анализатор структур SIAMS автоматически оценил балл зерна образца №1 по ГОСТ 5639-82, установив величину зерна на уровне 9,8.

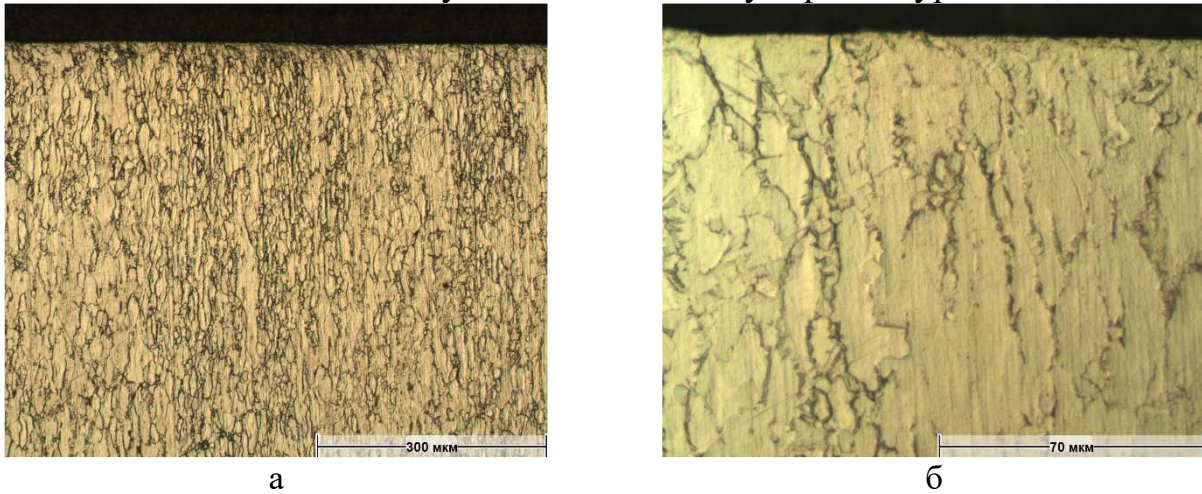


Рис. 2. Структура образца №1 (исходного): а)  $\times 100$ ; б)  $\times 500$

После азотирования титанового сплава ОТ4 наблюдается равномерная и однородная структура основного материала (рис. 3), форма зерна потеряла ярковыраженную вытянутую форму. Величина балла зерна равна 10,3, что свидетельствует об отсутствии существенных изменений – укрупнения зерна не произошло. Так как процесс прошел при температуре  $800^{\circ}\text{C}$  произошла рекристаллизация в структуре, которая привела к формированию равноосной структуры.

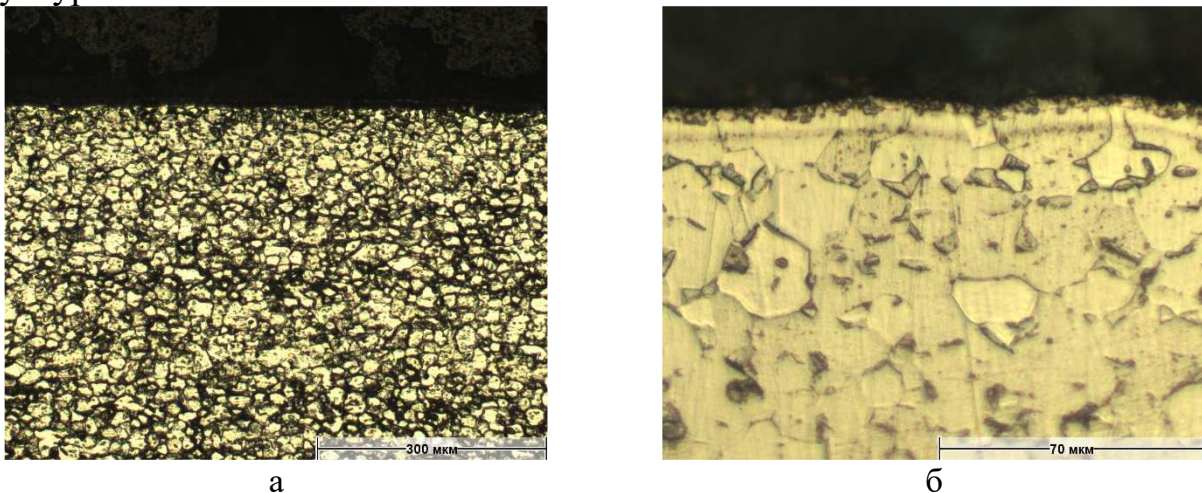


Рис. 3. Структура образца №2 после азотирования: а)  $\times 100$ ; б)  $\times 500$

Укрупнение зерна в приповерхностной зоне после ионно-плазменного азотирования также не наблюдается. На поверхности сформировался видимый плотный слой нитрида титана (рис. 3, б). Толщина нитридного слоя 8-10 мкм. При длительной выдержке в 30 ч, видимый слой по структуре имеет глубину небольшую, это связано с тем, что диффузия в сплавах титана намного ниже, чем в сталях.

Таким образом, при ионно-плазменном азотировании структура титанового сплава ОТ4 на образце №2 изменилась и стала равноосной, так как произошёл

рекристаллический отжиг, при этом укрупнение зерна не зафиксировано. На поверхности сформировался нитридный слой 8-10 мкм, благодаря которому микротвердость поверхности увеличилась с 305 HV0.1 до 972 HV0.1.

#### Список литературы

1. Соколова И.С., Князев А.А. Упрочнение титанового сплава VT20 методом ионно-вакуумного азотирования // Химия. Экология. Урбанистика. – 2021. – Т. 1. – С. 288-292.
2. Дробов А.Н., Босяков М.Н., Поболь И.Л. Влияние ионно-плазменного азотирования на износостойкость и характер изменения шероховатости поверхности титановых сплавов VT1-0, VT6 и OT4-1 // Литьё и металлургия. – 2022. – №2. – С. 78-83.
3. Гордиенко А.И., Дробов А.Н., Поболь И.Л. Влияние режима формирования газовой среды на характеристики диффузионных слоев титановых сплавов VT1-0, VT6 и OT4-1 после ионного азотирования // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сборник научных трудов. – Минск: Государственное научное учреждение "Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси", 2020. – С. 88-96.
4. Олешук И.Г., Дробов А.Н., Поболь И.Л., Босяков М.Н. Исследование влияния состава газовой среды при ионно-плазменном азотировании титановых сплавов на глубину упрочненных слоев // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: Сборник научных трудов. В 3-х книгах. – Минск: Государственное научное учреждение "Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси", 2018. – С. 201-211.

#### Сведения об авторах:

*Бородина Анастасия Сергеевна* – студентка;

*Соколова Ирина Сергеевна* – заведующая лабораторией;

*Порозова Светлана Евгеньевна* – д.т.н., доцент, профессор кафедры Механика композиционных материалов и конструкций.