

СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В ТИТАНЕ ПОСЛЕ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ И ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОТЖИГА

Д.В. Есипенко

*Белорусский государственный университет,
пр. Независимости 4, Минск 220030, Беларусь, ya.alukard2014@yandex.by*

В работе исследованы особенности структурно-фазовых превращений в титане, обработанном компрессионными плазменными потоками и подвергнутом высокотемпературному окислению в воздушной атмосфере при температуре 700 °С. Основной целью работы являлось повышение термической стабильности структурного состояния титана за счет его обработки импульсными потоками плотной компрессионной плазмы. Методом рентгеновской дифракции установлено формирование в приповерхностном слое титана оксида TiO_2 и промежуточного слоя твердого раствора $\alpha\text{-Ti(O)}$, объемная доля которого уменьшается после плазменного воздействия.

Ключевые слова: компрессионные плазменные потоки; титан; отжиг; термическая стабильность; оксид титана.

STRUCTURE AND PHASE CHANGES IN TITANIUM AFTER PLASMA TREATMENT AND HIGH-TEMPERATURE OXIDATION

D.V. Esipenko

*Belarusian State University,
4 Nezavisimosti Ave., 220030 Minsk, Belarus, ya.alukard2014@yandex.by*

The paper studies the features of structural-phase transformations in titanium treated with compression plasma flows and subjected to high-temperature oxidation in an air atmosphere at a temperature of 700 °С. The main goal of the work was to increase the thermal stability of the structural state of titanium due to its treatment with pulsed flows of dense compression plasma. The X-ray diffraction method found the formation of TiO_2 oxide in the near-surface layer of titanium and an intermediate layer of the $\alpha\text{-Ti(O)}$ solid solution, the volume fraction of which decreases after plasma exposure.

Keywords: compression plasma flows; titanium; annealing; thermal stability; titanium oxide.

Введение

Титан и его сплавы обладают высокой механической прочностью и повышенной коррозионной стойкостью в агрессивных средах. Особенно актуальным является вопрос повышения коррозионной стойкости титановых сплавов, используемых при изготовлении лопаток турбин электродвигателей, работа которых осуществляется в среде горячего (свыше 600 °С) водяного пара. Окисление поверхности лопаток в процессе эксплуатации приводит к существенному снижению их срока службы. Таким образом, увеличение стабильности титановых сплавов в условиях высокотемпературного окисления является важной задачей. В настоящей работе

предложено использовать воздействие импульсных высокоэнергетических плазменных потоков для модификации структурно-фазового состояния титана, способствующего повышению коррозионной стойкости. Основной целью данной работы являлось изучение влияния высокоэнергетического плазменного воздействия на кинетику высокотемпературного окисления титана.

Объект и методика эксперимента

В качестве объектов исследования использовались образцы технически чистого сплава титана марки ВТ1-0, которые подвергались воздействию компрессионных плазменных потоков (КПП). Плазменная

обработка осуществлялась в магнито-плазменном компрессоре компактной геометрии в остаточной атмосфере азота (давление в камере 400 Па) при напряжении на накопительной системе конденсаторов 4,0 кВ. Данный режим позволял достичь плотности поглощенной энергии 30 – 35 Дж/см², обеспечивающей плавление приповерхностного слоя титана. Впоследствии модифицированные образцы изотермически отжигались в муфельной печи в воздушной атмосфере при температуре 700 °С. Время отжига достигало 9 часов, охлаждение образцов осуществлялось вне печи.

Исследование фазового состава поверхностных слоев титана происходило с помощью рентгеноструктурного анализа на дифрактометре Ultima IV Rigaku в геометрии параллельных пучков с использованием медного излучения (длина волны 0.154178 нм).

Результаты и их обсуждение

На поверхности образцов титана после высокотемпературного отжига формируется фаза оксида титана TiO₂, через которую происходит насыщение нижележащих слоев атомами кислорода. Согласно равновесной диаграмме состояния системы «титан-кислород» образование оксидной фазы TiO₂ начинается при концентрации кислорода около 33 ат. %, менее которой в системе преимущественно формируется твердый раствор кислорода на основе низкотемпературной фазы титана α -Ti(O).

Результаты фазового анализа, представленные на рисунке 1 и 2, свидетельствуют о росте оксида TiO₂ и твердого раствора α -Ti(O) уже после одного часа изотермического отжига при температуре 700 С. Естественно, при увеличении времени отжига до 9 часов приводит к увеличению глубины диффузионного слоя и, как следствие, увеличению объемных долей кислородсодержащих фаз.

О формировании твердого раствора α -Ti(O) свидетельствует асимметрия диф-

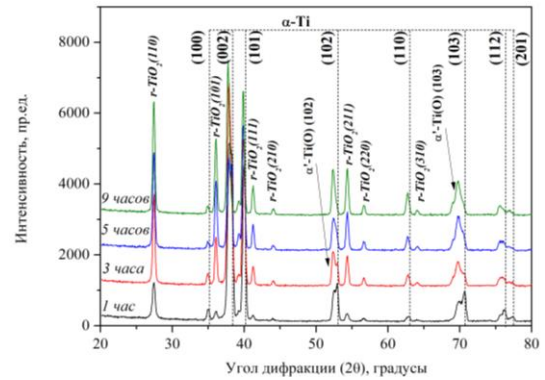


Рис. 1. Участки дифрактограмм титана после отжига на воздухе при температуре 700 °С

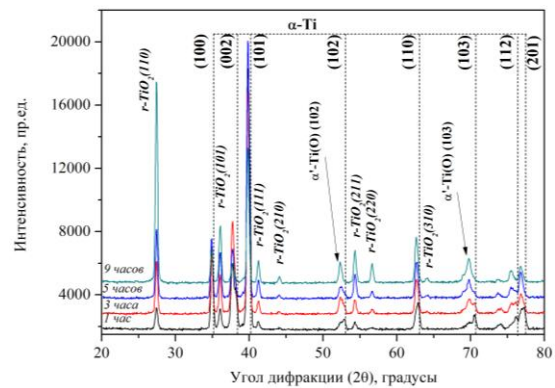


Рис. 2. Участки дифрактограмм титана, обработанного плазменным потоком, после отжига на воздухе при температуре 700 °С

ракционных линий титана со стороны малых углов дифракции, которая наиболее явно проявляется на дифракционных линиях (002), (102), (103). Такой твердый раствор обладает гексагональной кристаллической структурой с увеличенными параметрами решетки из-за внедрения атомов кислорода в междоузельные позиции (рис. 3).

На начальном этапе отжига атомы кислорода проникают в кристаллическую решетку α -Ti, образуя твердый раствор α -Ti(O) с гексагональной решеткой, формирующийся по типу внедрения, так как атомный радиус кислорода (60 пм) меньше атомного радиуса титана (147 пм). Следствием этого является увеличение параметров решетки a' и c' твердого раствора α -Ti(O). Обнаружение фазы низкотемпературной фазы титана с параметрами решетки, близкими к эталонным значениям, связано с проникновением рент-

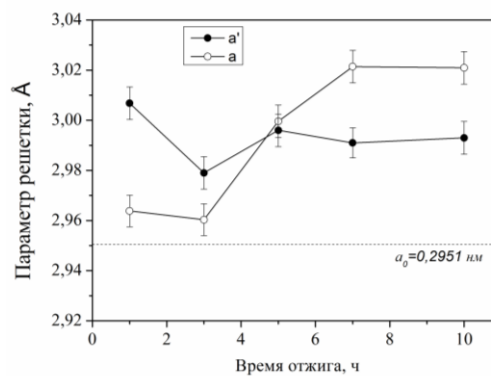
геновских лучей на глубину, превышающую толщину окисленного слоя.

Следует особо обратить внимание на увеличение интенсивности дифракционной линии твердого раствора с увеличением времени отжига. В силу того, что низкотемпературная фаза α -Ti и твердый раствор α -Ti(O) обладают одним и тем же типом элементарной ячейки, отношение интенсивностей соответствующих дифракционных линий может указывать на изменение их объемного соотношения в анализируемом слое. Из полученных дифрактограмм видно, что уже после трех часов отжига объемной содержание твердого раствора превосходит объемное содержание низкотемпературной фазы титана, которая представляет собой ту часть образца титана, в которой отсутствуют атомы кислорода. После 9 часов отжига дифракционная линия титана практически отсутствует и во всем анализируемом слое фиксируется исключительно твердый раствор α -Ti(O).

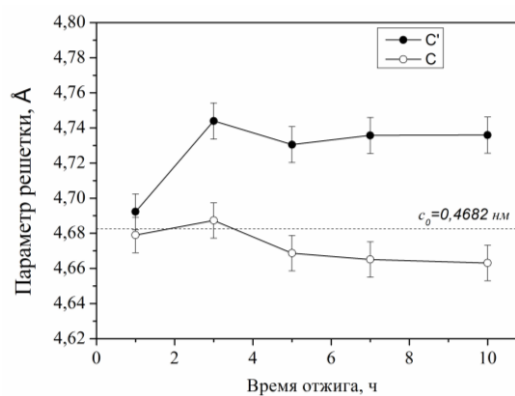
Помимо твердого раствора кислорода в титане методом рентгеновской дифракции обнаружено формирование оксида титана TiO₂ модификации рутил с тетрагональной кристаллической структурой. Рост оксида титана замечается после одного часа отжига и продолжается с последующим увеличением его объемного содержания.

Заключение

В результате проведенных экспериментов показано, что высокотемпературное



(а)



(б)

Рис. 3. Параметры решетки титана и твердого раствора α -Ti(O) после отжига при температуре 700 °C

окисление титана в воздушной атмосфере при температуре 700 °C приводит к формированию поверхностного слоя оксида титана и промежуточного слоя твердого раствора α -Ti(O) с увеличенными параметрами решетки. Предварительное воздействие на титан компрессионными плазменными потоками приводит к снижению объемной доли твердого раствора по сравнению с оксидом титана TiO₂.