

**ФАЗОВЫЙ СОСТАВ, СТРУКТУРА, И СВОЙСТВА ТИТАНА ПОСЛЕ  
ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ ИТТРИЕМ  
И ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКИ**

**Соснин К.В., Романов Д.А., Громов В.Е., Козак О.А., Гостевская А.Н.**

*Сибирский государственный индустриальный университет,  
г. Новокузнецк, Россия, E-mail: romanov\_da@physics.sibsiu.ru*

Развитие авиационной техники выдвигает новые требования к материалам на основе титана, технологическим процессам изготовления деталей из них и их упрочнению. Согласно литературным данным весьма перспективными с точки зрения их использования для упрочнения Ti могут явиться редкоземельные металлы и их аналоги, например иттрий. В последние годы находят применение новые способы упрочнения металлов и сплавов, основанные на использовании концентрированных потоков энергии. Одним из таких способов является электровзрывное легирование (ЭВЛ), суть которого состоит в изменении структурно-фазовых состояний и свойств металлов и сплавов путем оплавления и насыщения поверхности импульсной плазменной струей, сформированной из продуктов электрического взрыва проводников. Последующая электронно-пучковая обработка (ЭПО) улучшает свойства поверхности легирования. В последние годы выполнены исследования в области комбинированной обработки поверхности металлов и сплавов, сочетающей ЭВЛ и последующую ЭПО. Комбинированная обработка приводит к формированию нанокompозитных структурно-фазовых состояний, обеспечивающих кратное повышение микротвердости и износостойкости поверхности. В этой связи исследования структурно-фазовых состояний и трибологических свойств поверхностей титана при комбинированной обработке являются актуальными.

В настоящей работе для исследований был выбран технически чистый титан BT1-0. В качестве взрываемого электропроводящего материала использовали фольгу технически чистого титана BT1-0 массой 100 мг. На поверхность фольги в области взрыва помещали навеску порошка иттрия массой 400 мг. Время воздействия плазмы на поверхность образца составляло 100 мкс, поглощаемая плотность мощности на оси струи  $5.5 \text{ ГВт} \cdot \text{м}^{-2}$ , давление в ударно-сжатом слое вблизи облучаемой поверхности – 12.5 МПа, остаточное давление воздуха в рабочей камере – 100 Па.

Величина скорости изнашивания и коэффициент трения изменяются подобным образом. Оптимальной обработкой поверхностного сплава Ti-Y с точки зрения трибологических испытаний следует признать облучение интенсивным импульсным электронным пучком с параметрами  $50 \text{ Дж/см}^2$ ; 150 мкс; 3 имп.,  $0,3 \text{ с}^{-1}$ , при которых скорость изнашивания материала снижается в 3 раза, а коэффициент трения – более чем в 7 раз.

Анализ структуры дорожки трения выявил присутствие включений, характеризующихся более ярким контрастом относительно исходного состояния. Области, формирующие данные включения, обогащены иттрием. Они имеют глобулярную форму, распределены по дорожке трения неоднородно. Размеры таких включений достигают 10 мкм. Наряду с глобулярными, выявляются включения в виде прослоек, оконтуривающих объемы материала, размеры которых изменяются в пределах от 0,5 мкм до 1 мкм. Толщина таких прослоек изменяется в широких пределах, не превышая десятых долей микрометра. Результаты микрорентгеноспектрального анализа подтверждают высказанные предположения о присутствии иттрия в объеме дорожек трения.

Микротвердость поверхности облучения более чем в два раза превышает микротвердость подложки и весьма слабо зависит от режима облучения электронным пучком. Это означает, что твердость поверхностного слоя задается на стадии электровзрывного легирования. Последующее облучение легированного слоя импульсным электронным пучком, способствуя его гомогенизации, не приводит к дополнительному упрочнению материала.

Толщина упрочненного слоя изменяется в пределах от 30 мкм до 50 мкм и зависит от плотности энергии пучка электронов. А именно, увеличение плотности энергии пучка электронов в интервале от  $20 \text{ Дж/см}^2$  до  $60 \text{ Дж/см}^2$  сопровождается

ростом толщины упрочненного слоя. При дальнейшем увеличении плотности энергии пучка электронов толщина упрочненного слоя снижается, что, по всей видимости, обусловлено существенным испарением поверхностного модифицированного слоя.

После ЭВЛ основной фазой является  $\alpha$ -Ti. Дополнительной фазой, сформировавшейся вследствие легирования в условиях технического вакуума, является диоксид титана  $TiO_2$ .

При последующей ЭПО с плотностью энергии пучка электронов (20 – 50) Дж/см<sup>2</sup>, основной фазой является  $\alpha$ -иттрий, объемная доля которого изменяется в пределах (55 – 73) %. При больших значениях плотности энергии пучка электронов объемная доля фазы  $\alpha$ -иттрий быстро снижается и при плотности энергии пучка электронов 70 Дж/см<sup>2</sup>  $\alpha$ -иттрий в поверхностном слое титана методами рентгенофазового анализа не обнаруживается.

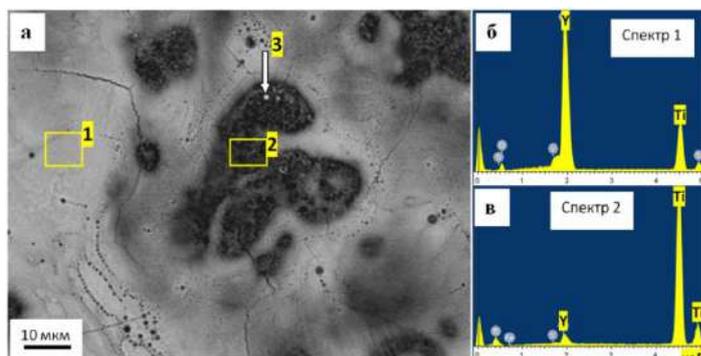
После электровзрывного легирования иттрием в поверхностном слое формируется структура, параметры кристаллической решетки  $\alpha$ -титана которой несколько больше, чем табличные значения параметров кристаллической решетки  $\alpha$ -титана. Принимая во внимание, что радиус атома титана  $R(Ti) = 0,147$  нм, а атома иттрия  $R(Y) = 0,178$  нм, можно предположить, что в процессе электровзрывного легирования формируется твердый раствор иттрия в титане. Это приводит к значимому увеличению параметра  $a$  кристаллической решетки  $\alpha$ -титана и незначительному повышению параметра  $c$  кристаллической решетки  $\alpha$ -титана. Облучение модифицированного слоя титана электронным пучком при малых (20 и 30 Дж/см<sup>2</sup>) плотностях энергии сопровождается уменьшением параметра  $a$  кристаллической решетки титана вплоть до значений, соответствующих табличным. По всей видимости это обусловлено уходом атомов иттрия из кристаллической решетки  $\alpha$ -титана, образованием фазы  $\alpha$ -иттрий и окисной фазы.

Микрорентгеноспектральный анализ поверхности образцов, подвергнутых электровзрывному легированию, выявил обогащение их атомами иттрия. Иттрий распределен неоднородно в поверхностном слое. Концентрация от области к области изменяется от 2,4 до 36 вес. %, т.е. может различаться в (5...15) раз.

Поверхность после ЭВЛ обладает высокоразвитым рельефом, элементами которого являются микрокапли, наплывы металла, микропоры и микротрещины. Последующая ЭПО сглаживает рельеф.

ЭПО приводит к формированию фрагментированной структуры. Фрагменты различаются по композиционному контрасту. Темные фрагменты обогащены атомами титана, более светлые фрагменты обогащены атомами иттрия. Соотношение площадей, занятых светлыми и темными фрагментами, 60 : 40. Облучение модифицированного слоя высокоинтенсивным импульсным электронным пучком сопровождается диспергированием структуры до нано- и субмикронного состояния. В областях, обогащенных Ti и имеющих темный контраст, содержатся включения Y размером 300-500 нм. Островки, обогащенные атомами Y, содержат прослойки из пластинок Ti размером 200-400 нм.

В совокупности эти факты указывают на протекающий при кристаллизации процесс расслоения фаз, имеющий место даже при высоких скоростях охлаждения материала, реализующихся при облучении пучком электронов.



б, в – энергетические спектры (на (а) выделены области микрорентгеноспектрального анализа)  
Рисунок 1 – Структура поверхности Ti после комбинированной обработки

Методами ПЭМ фольг, вырезанных перпендикулярно поверхности упрочнения, проведен анализ структурно-фазовых состояний материала по мере удаления от поверхности. В результате комбинированной обработки титана формируется ярко выраженная многослойная структура. Поверхностный слой толщиной  $\approx 500$  нм является аморфным. Об этом свидетельствует характерный вид микроэлектроннограммы, полученной с данного слоя и представленной двумя широкими диффузными дифракционными кольцами. Ниже, под слоем с аморфной структурой, располагается слой (толщина слоя 1,0...1,5 мкм), имеющий столбчатое строение. Под данным слоем выявляется протяженный слой со структурой глобулярной кристаллизации.

Поверхностный аморфный слой обогащен титаном, лежащий под ним слой со столбчатой структурой – иттрием, ниже лежащий слой вновь обогащен титаном. Слой со столбчатой структурой имеет чередующуюся структуру и сформирован столбиками, обогащенными титаном и столбиками, обогащенными иттрием, свидетельствуя о фазовом расслоении материала данного слоя. Столбики, обогащенные титаном, имеют блочную структуру. Столбики, обогащенные иттрием, блочной структуры не имеют. Блоки разориентированы, о чем свидетельствует различие в контрасте их изображения. Размер блоков изменяются в пределах от 5 нм до 20 нм.

Слой, имеющий столбчатое строение, сформирован оксидами титана, иттрия и оксидами сложного состава на основе титана и иттрия. Индицирование микроэлектроннограммы показало, что блочная структура сформирована оксидами иттрия ( $Y_{0.4}O$ ), титана ( $Ti_7O_{13}$ ) и оксидом сложного состава ( $Y_2TiO_5$ ).

Слой, расположенный под слоем со столбчатой структурой, имеет глобулярное строение. Размеры глобул изменяются в пределах от 150 до 300 нм. Титан, преимущественно в форме прослоек, разделяет включения иттрия. Размеры прослоек титана изменяются в пределах от 100 до 150 нм. Следовательно, приповерхностный слой, анализ которого был осуществлен при исследовании поперечной фольги (слой толщиной  $\approx 25$  мкм), обогащен иттрием при соотношении  $Ti : Y \approx 3 : 1$ . Данные выводы подтверждаются как результатами анализа морфологии структуры модифицированного слоя, так и результатами микрорентгеноспектрального анализа.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-32-60032 мол\_а\_дк, Гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук МК-1118.2017.2.*