

УДК 539.22/23

ВЛИЯНИЕ ДОЗЫ ОБЛУЧЕНИЯ НА УПРОЧНЕНИЕ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОГО ТИТАНА

© И.А. Курзина, А.В. Никоненко, Н.А. Попова, Е.Л. Никоненко, М.П. Калашников

Ключевые слова: альфа-титан; ионная имплантация; доза облучения; фазовый состав; зерно; скалярная плотность дислокаций; упрочнение.

Методом просвечивающей дифракционной электронной микроскопии проведено исследование фазового состава и тонкой структуры сплава ВТ1-0 со средним размером зерна 0,2 мкм до и после имплантации ионами алюминия. Проведен расчет прочностных составляющих, входящих в предел текучести в зависимости от дозы облучения. Показано, что имплантация приводит к существенному изменению структурно-фазового состояния и дополнительно упрочнению материала.

Одним из наиболее перспективных направлений модификации поверхностных свойств металлов в настоящее время являются методы обработки материалов пучками металлических ионов [1]. Большой интерес представляет ионный синтез фаз внедрения в поверхностных слоях материалов на основе Ti и Al, в частности, алюминидных фаз (Ti_3Al , $TiAl$ и $TiAl_3$) [1, 2]. Поверхностные слои металлов, состоящие из алюминидных фаз с наноразмерными параметрами зерен, будут характеризоваться высокими механическими характеристиками. Целью работы являлось исследование структурно-фазового состояния и расчет прочностных составляющих, входящих в предел текучести, поверхностных ионно-легированных слоев титана в зависимости от дозы облучения. В качестве имплантируемого элемента в работе был выбран алюминий, что обусловлено перспективами формирования в поверхностных слоях алюминидов титана, дополнительно способствующих улучшению физико-механических характеристик.

В качестве исходного материала (мишени) был выбран прутки технической чистого титана марки ВТ1-0 диаметром 20 мм. Для формирования субмикроструктурного состояния в заготовках титана применяли разработанный в ИФПМ СО РАН комбинированный метод многократного одноосного прессования (abc-прессование) с последующей многоходовой прокаткой в ручьевых валках при комнатной температуре и дорекристаллизационным отжигом [3].

Для имплантации ионами алюминия образцов из ВТ1-0 использована усовершенствованная версия ионного источника Mevva-5.RU, которая характеризуется снижением загрязнения ионного пучка продуктами эрозии катододержателя и электродов системы извлечения [4]. Вариация дозы облучения ($1 \cdot 10^{17}$, $5 \cdot 10^{17}$ и $10 \cdot 10^{17}$ ион/см²) достигалась за счет изменения времени облучения (0,5; 3; 5,25 ч).

Типичными характеристиками количественных показателей механических свойств металлических материалов являются, прежде всего, предел текучести и деформационное упрочнение. К настоящему времени установлено, что прочность любого металлического материала определяется многими факторами [5], основными из которых являются: 1) наличие границ зерен и других структурных образований; 2) высокая

плотность дислокаций, образующихся при любом воздействии на материал; 3) наличие в материале карбидных, оксидных частиц и других вторичных фаз и др. Роль каждого из этих факторов в каждом конкретном случае будет различной, и доля вклада отдельных механизмов упрочнения в общее упрочнение материала также неодинакова.

В настоящей работе расчет предела текучести проводился по формуле, где квадратично складываются вклады упрочнения дислокациями «леса» и внутренних полей, остальные вклады складываются аддитивно [5]:

$$\sigma = \Delta\sigma_{\text{п}} + \Delta\sigma_{\text{тв}} + \Delta\sigma_{\text{з}} + \Delta\sigma_{\text{ор}} + \sqrt{(\Delta\sigma_{\text{д}}^2 + \Delta\sigma_{\text{л}}^2)}.$$

В этой формуле $\Delta\sigma_{\text{п}}$ – напряжение трения дислокаций в кристаллической решетке α -Ti; $\Delta\sigma_{\text{тв}}$ – упрочнение твердого раствора на основе α -Ti атомами легирующих элементов (Al, C, O); $\Delta\sigma_{\text{д}}$ – упрочнение дислокациями «леса», которые перерезают скользящие дислокации; $\Delta\sigma_{\text{з}}$ – упрочнение дальнедействующими полями напряжений; $\Delta\sigma_{\text{ор}}$ – упрочнение материала некогерентными частицами при обходе их дислокациями по механизму Орована; $\Delta\sigma_{\text{л}}$ – упрочнение за счет границ зерен. Рассмотрим роль каждого из факторов подробнее.

Было установлено, что в исходном состоянии в сплаве ВТ1-0 формируется зернистая структура с сильно вытянутыми зернами, средние размеры которых составляют $0,15 \times 1,9$ мкм. Сплав является практически однофазным сплавом. В незначительном количестве (0,9 об. %) по границам зерен α -Ti присутствуют зерна β -Ti. Поэтому вклад в упрочнение материала, обусловленный наличием вторичных фаз, практически отсутствует. Отметим, что наличие в сплаве фазы β -Ti какого-либо заметного вклада в упрочнение вследствие ее малой объемной доли не дает. Составляющие $\Delta\sigma_{\text{п}}$ и $\Delta\sigma_{\text{тв}}$ также вносят в общее упрочнение минимальный вклад, т. к., согласно данным Оже-спектроскопии и рентгеноструктурного анализа [4], в твердом растворе исходного сплава углерод и кислород отсутствуют. Упрочнение дальнедействующими полями напряжений полностью отсутствует. Одним из основных и определяющих в упрочнении сплава в исходном состоянии оказывается фактор наличия границ

зерен, или, иначе говоря, плотность границ зерен. Повышение прочности происходит за счет границ зерен α -Ti, являющихся барьерами распространения течения. Оно описывается соотношением Холла-Петча [6]: $\Delta\sigma_3 = kd^{-0.5}$, где k – коэффициент пропорциональности, который, прежде всего, зависит от размера зерна [1, 5] (для исследуемого сплава $k = 0,24 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ [1]).

Важную роль в упрочнение исходного сплава вносят дислокации «леса», создающие напряжение сдвига, которое определяется по формуле [5]: $\Delta\sigma_d = m\alpha Gb\sqrt{\rho}$, где m – ориентационный множитель; α – безразмерный коэффициент, который зависит от типа дислокационного ансамбля [6]; G – модуль сдвига; b – вектор Бюргера; ρ – среднее значение скалярной плотности дислокаций. Оказалось, что по величине $\Delta\sigma_d$ в исходном сплаве практически соизмерим с $\Delta\sigma_3$. Таким образом, в исходном сплаве вклад в упрочнение вносят только границы зерен и дислокации «леса».

Для имплантированных сплавов влияние факторов иное. Было установлено, что имплантация приводит к уменьшению как поперечных, так и продольных размеров зерен. Причем, чем выше доза имплантации, тем более заметно это уменьшение (рис. 1). Так как при имплантации размеры зерен уменьшаются, то величина $\Delta\sigma_3$ будет возрастать. При увеличении дозы имплантации вклад $\Delta\sigma_3$ становится больше.

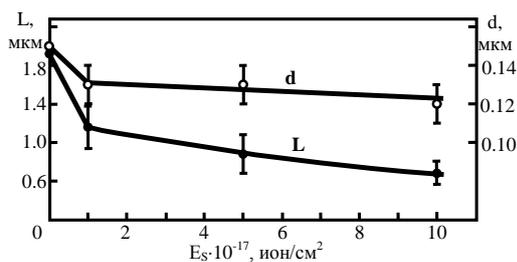


Рис. 1. Зависимости средних (L – продольный, d – поперечный) размеров зерен от дозы облучения (E_s)

Исследования показали, что имплантация при любой дозе облучения, во-первых, слабо изменяет величину скалярной плотности дислокаций и, во-вторых, не приводит к возникновению дальнедействующих полей напряжений. Поэтому вклад в упрочнение в имплантированном сплаве за счет $\Delta\sigma_d$ как и в исходном сплаве, отсутствует, а за счет $\Delta\sigma_3$ по величине практически остается на прежнем уровне.

Имплантация титана ионами алюминия привела к изменению фазового состава сплава. Во-первых, вдоль продольных границ зерен α -Ti наблюдается образование пластинчатых выделений упорядоченной фазы Ti_3Al со сверхструктурой D0_{19} , обладающей ГПУ кристаллической решеткой. Во-вторых, в стыках зерен α -Ti присутствуют округлой формы выделения упорядоченной фазы TiAl_3 со сверхструктурой D0_{22} , обладающей ОЦТ кристаллической решеткой. В-третьих, внутри зерен α -Ti на дислокациях образуются мелкие округлые выделения карбида TiC и оксида TiO_2 . Изменение объемных долей вторичных фаз в зависимости от дозы облучения приведены на рис. 2. Таким образом, имплантация привела к образованию целого набора фаз. При расчете $\Delta\sigma_{\text{ор}}$ можно использовать упрощенную формулу Орована: $\Delta\sigma_{\text{ор}} = 2\lambda Gb/r$, где r – расстояние между частицами.

Полученные вклады отдельных механизмов упрочнения в предел текучести до и после имплантации при разных дозах облучения приведены в табл. 1.

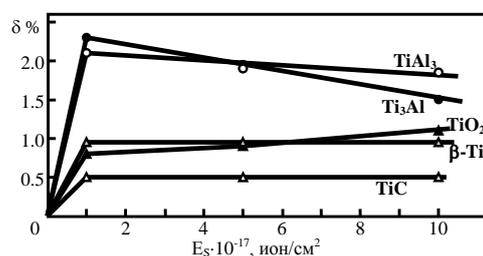


Рис. 2. Изменение объемных долей вторичных фаз в зависимости от дозы облучения

Таблица 1

Доза имплантации, ион/см ²	$\Delta\sigma$, МПа			
	$\Delta\sigma_3$	$\Delta\sigma_d$	$\Delta\sigma_{\text{ор}}$	σ
Исх.	400	390	25	815
$1 \cdot 10^{17}$	450	420	1270	2140
$5 \cdot 10^{17}$	460	420	1045	1925
$10 \cdot 10^{17}$	490	415	1120	2025

Из табл. 1 видно, что имплантация алюминия в исследуемый сплав ВТ1-0 привела к упрочнению практически в 2,5 раза. Доля вклада отдельных механизмов упрочнения в общее упрочнение сплава неодинакова. И вклад каждого из этих механизмов в каждом конкретном случае разный. Тем не менее, хорошо видно, что основной вклад в общее упрочнение после имплантации вносит $\Delta\sigma_{\text{ор}}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Курзина И.А., Козлов Э.В., Шаркеев Ю.П. и др. Нанокристаллические интерметаллидные и нитридные структуры, формирующиеся при ионно-плазменном воздействии. Томск: Изд-во НТЛ, 2008. 324 с.
2. Гринберг Б.А., Иванов М.А. Интерметаллиды Ni_3Al и TiAl : микроструктура, деформационное поведение. Екатеринбург: Изд-во Уро РАН, 2002. 358 с.
3. Ерошенко А.Ю., Шаркеев Ю.П., Толмачев А.И. и др. Структура и свойства объемного ультрамелкозернистого титана, полученного *abc*-прессованием и прокаткой // Перспективные материалы. 2009. №7. С. 107-112.
4. Курзина И.А., Попова Н.А., Калашников М.П. и др. Фазовое состояние титановых материалов после имплантации ионами алюминия // Изв. вузов. Физика. 2011. №11/3. С. 112-119.
5. Козлов Э.В., Конева Н.А. Природа упрочнения металлических материалов // Изв. вузов. Физика. 2002. № 3 (приложение). С. 52-71.
6. Конева Н.А., Козлов Э.В. Дислокационная структура и физические механизмы упрочнения металлических материалов // Перспективные материалы / под ред. Д.Л. Мерсона. Тула: Изд-во ТГУ, МИ-СиС, 2006. С. 267-320.

Поступила в редакцию 10 апреля 2013 г.

Kurzina I.A., Nikonenko A.V., Popova N.A., Nikonenko E.L., Kalashnikov M.P. INFLUNCE OF IRRADIATED DOSE ON HARDENNING OF ULTRAFINE TITANIUM

The investigation of the phase composition and structural state of the titanium with average size 0.2 μm before and after implantation by aluminum ions by transmission electron microscopy is made. The calculation of the boundary hardening in depends of the dose irradiation was made. It is shown that implantation leads to significant improvement of the structural-phase state and addition strength.

Key words: alpha-titanium; ion implantation; dose of irradiation; phase composition; grain; density of dislocations; hardening.