

УДК 669.14.018

©1995

ВЛИЯНИЕ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ НА ВНУТРЕННЕЕ ТРЕНИЕ ТИТАНОВОГО СПЛАВА

В.И. Лаврентьев

Институт прикладной физики АН Украины, Сумы
(Поступила в Редакцию 24 октября 1994 г.)

Исследована температурная зависимость внутреннего трения титанового сплава ВТЗ до и после ионной имплантации разной продолжительности. Имплантация осуществлялась на технологическом источнике ТАМЕК. На исследуемой зависимости обнаружены три пика X , Y и Z . Анализ показывает, что данные пики обусловлены диффузией соответственно кислорода, углерода и водорода в β -фазе титана. Показано, что ионная имплантация приводит к уменьшению объемного содержания нестабильной β -фазы и образованию соединений типа TiC и Ti_6O .

Как известно [1], термообработка и примеси влияют на характер фазовых превращений в титане, что практически неограниченно позволяет оптимизировать физико-механические свойства этого металла и рассматривать его как перспективный конструкционный материал. С помощью развиваемых в последние годы методов ионно-плазменной обработки, которые кроме легирования оказывают и термофизические воздействия, могут быть улучшены антифрикционные, антикоррозионные и другие поверхностные свойства титана [2]. Известно также [3], что в результате ионной имплантации могут быть улучшены и объемные макроскопические свойства титана глубоких приповерхностных слоев, например усталостные. Целью настоящей работы являлось исследование методом внутреннего трения (ВТ) [4] фазовых превращений в титановом сплаве ВТЗ, имплантированном ионами меди на источнике ТАМЕК.

1. Методика эксперимента

Исследовался поликристаллический титановый сплав ВТЗ в виде фольги толщиной $50 \mu m$, имплантированный ионами меди в камере технологического вакуумно-дугового ускорителя ТАМЕК [5] при следующих режимах: ускоряющее напряжение — $60 kV$, длительность импульса — $200 \mu s$, частота следования импульсов — $50 Hz$. Время имплантации составляло 4 и 480 мин. В качестве теплоотвода служил массивный охлаждаемый медный зажим. Исследования осуществлялись на установке электростатического возбуждения изгибных колебаний [4] в вакууме $1.3 \cdot 10^{-4} Pa$ на частоте $\sim 1 kHz$. Температурный диапазон составлял 300–870 K, скорость нагрева — $5 K/min$. Амплитуда относительной деформации образца не превышала 10^{-6} . Образцы имели размер $2 \times 10 mm$.

2. Экспериментальные результаты и обсуждение

На рис. 1 приведена температурная зависимость внутреннего трения $Q^{-1}(T)$ образцов неимплантированного титанового сплава и после имплантации в различных режимах. Видно, что ионная имплантация значительно изменяет температурный спектр ВТ сплава. Так, зависимость $Q^{-1}(T)$ неимплантированного образца обнаруживает три пика (X , Y и Z), высота которых меняется по-разному после непродолжительной (4 min) ионной имплантации: пик X возрастает, а пики Y и Z уменьшаются (кривые 1 и 2 на рис. 1). Длительная имплантация приводит к полному подавлению пиков X и Y и сильно понижает пик Z (кривая 3 на рис. 1). Кроме того, в результате ионной имплантации пики ВТ сдвигаются (на 10–20 К) в сторону низких температур. При температурах выше 750 К внутреннее трение резко возрастает примерно одинаково для всех образцов.

Анализ наблюдаемых пиков в координатах $Q^{-1}-T^{-1}$ (рис. 2) свидетельствует об их релаксационной природе, причем каждый из пиков описывается одним временем релаксации. Энергии активации E , определенные по формуле Маркса-Верта [4], для пиков X , Y и Z оказались соответственно равными 1.46, 1.07 и 0.73 eV. Полученные значения E оказались близки к значениям энергии активации диффузии в β -фазе титана соответственно кислорода, углерода и водорода [6,7]. Следовательно, в исходном образце присутствуют включения высокотемпературной β -фазы, а пики X , Y и Z являются пиками Снука [4] для кислорода, углерода и водорода в β -Ti. Такое предположение является вполне уместным, так как релаксация Снука проявляется для атомов внедрения в ОЦК металлах и именно такую кристаллическую струк-

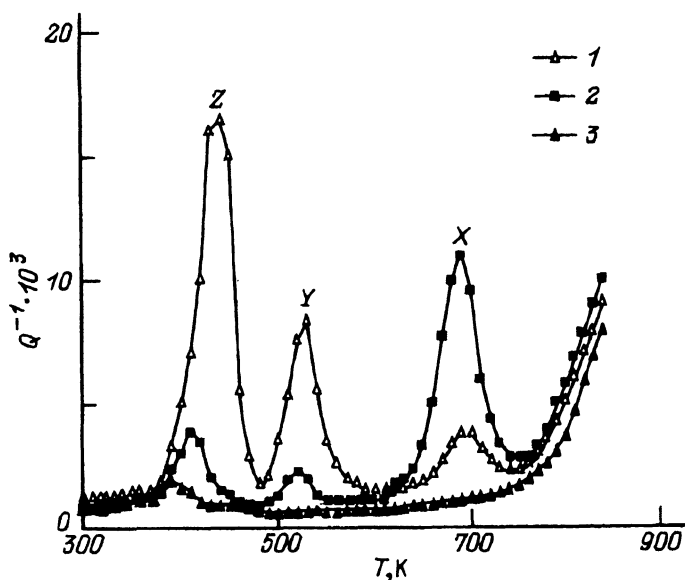


Рис. 1. Температурная зависимость внутреннего трения титанового сплава ВТЗ до (1) и после (2, 3) ионной имплантации разной продолжительности. 2 — имплантация в течение 4 min, 3 — имплантация в течение 480 min. Частота 400 Hz.

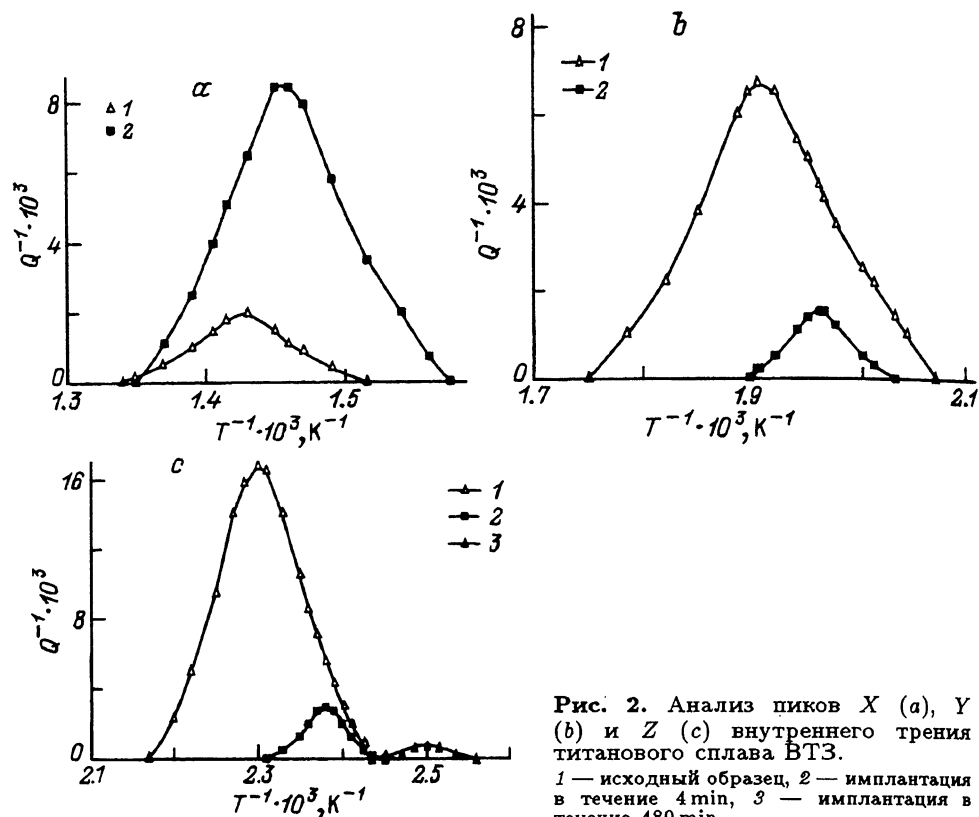


Рис. 2. Анализ пиков X (а), Y (b) и Z (с) внутреннего трения титанового сплава ВТЗ.

1 — исходный образец, 2 — имплантация в течение 4 min, 3 — имплантация в течение 480 min.

туру имеет титан в β -модификации [1]. Значения частотного фактора τ_0 рассчитывались по известным диффузионным характеристикам D_0 и E атомов внедрения в титане [8] и с учетом связи

$$\tau_0 = a^2/36D_0, \quad (1)$$

где a — межатомное расстояние, D_0 — предэкспоненциальный множитель в выражении для коэффициента диффузии D . Для пиков X, Y и Z значения τ_0 оказались соответственно равными $6.8 \cdot 10^{-15}$, $4.2 \cdot 10^{-15}$ и $1.1 \cdot 10^{-15}$ s.

Понижение пиков Y и Z после кратковременной ионной имплантации свидетельствует, во-первых, об уменьшении объемного содержания в образце нестабильной β -фазы, а во-вторых, о выпадении интерметаллидов типа TiH₂ и TiC в результате пересыщения атомами внедрения включений β -фазы при уменьшении ее объемной доли и имплантации ионов углерода и водорода из остаточной атмосферы паромасленного вакуума. Часть атомов внедрения осаждается на дислокациях, образовавшихся в поверхностных слоях металла в результате имплантации [2]. Водородный пик Z уменьшается и вследствие нагрева материала мишени в процессе ионной обработки, что вызывает выход водорода из образца. Возрастание кислородного пика связано с увеличением концентрации кислорода в β -фазе как за счет уменьшения

размеров ее включений, так и за счет имплантации кислорода из остаточной атмосферы. Таким образом, концентрация кислорода в сплаве до обработки не достигает предела растворимости при температуре кислородного пика. Считая, что высота пика Снука соответствует содержанию примеси внедрения (в mass.%) [9], по максимальным значениям высоты каждого пика можно оценить значения пределов растворимости кислорода, углерода и водорода в титане: соответственно 0.010 (при 680 К), 0.007 (при 525 К) и 0.015 mass.% (при 435 К). Эти результаты коррелируют с данными, полученными из диаграмм состояний [6,7], хотя в последнем случае ввиду большой погрешности можно судить лишь о порядке величины.

Исчезновение пиков X и Y, а также резкое уменьшение пика Z после длительной ионной имплантации связано с практически полным исчезновением β -фазы и выпадением карбидов и оксидов, в первую очередь TiC и Ti₆O [6]. Слабое проявление водородного пика обусловлено неустойчивостью гибрида TiH₂, который разлагается при температурах выше 550 К с образованием водорода [6]. Кроме того, наличие водородного пика свидетельствует о существовании небольшой доли включений β -фазы даже после такой длительной обработки. Более того, включения β -фазы, видимо, сохраняются в основном в глубинных объемах образца, далеких от поверхности, куда углерод и кислород в результате имплантации практически не проникают. Водород же ввиду специфически малых размеров атомов проникает на большие глубины металлического образца, в связи с чем и может проявляться водородный пик в остатках β -фазы.

Смещение пиков ВТ в сторону более низких температур в результате ионной имплантации может быть связано с возникновением внутренних напряжений за счет фазовых превращений в титановом сплаве. Известно [1], что при $\beta \rightarrow \alpha$ -превращении в титане происходит уменьшение объема, что и приводит к возникновению внутренних напряжений. Напряжения понижают энергетический барьер диффундирующей примеси внедрения [4], что сказывается на понижении энергии активации пика Снука.

Для выяснения природы возрастания ВТ при температурах выше 750 К зависимости перестраивались в координатах $\ln Q^{-1} - T^{-1}$ (рис. 3), что дало возможность определить соответствующие энергии активации [10]. При этом экспериментальные точки для всех образцов хорошо укладываются на прямые, имеющие одинаковый наклон. Энергия активации, определенная из наклона прямой, оказалась равной 1.42 eV,

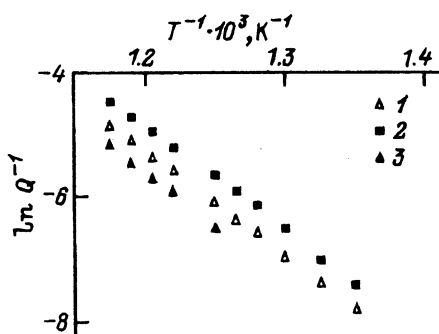


Рис. 3. Анализ роста фона внутреннего трения титанового сплава ВТЗ до (1) и после (2, 3) ионной имплантации. 2 — имплантация в течение 4 min, 3 — имплантация в течение 480 min.

что примерно соответствует энергии активации самодиффузии в титане [8]. Поскольку при данных температурах в титане начинаются процессы рекристаллизации [6], то можно сделать вывод о том, что эти процессы протекают по механизму самодиффузии.

В заключение автор выражает благодарность А.М.Толопе за предоставленные образцы.

Список литературы

- [1] Маквиллен М.К. Фазовые превращения в титане и его сплавах. М. (1967), 76 с.
- [2] Комаров Ф.Ф. Ионная имплантация в металлы. М. (1990), 216 с.
- [3] Jata K.V., Han J., Starke Jr.E.A. and Legg K.O. Scripta Met. 17, 479 (1983).
- [4] Постников В.С. Внутреннее трение в металлах. М. (1974), 246 с.
- [5] Duvanov S.M., Kobzev A.P. and Tolopa A.M. Nucl. Instr. and Methods B52, 264 (1994).
- [6] Еременко В.Н. Титан и его сплавы. Киев (1960), 500 с.
- [7] Каган Я.Д., Калачев Б.А., Левинский Ю.В. Константы взаимодействия металлов с газами. Справочник. М. (1987), 368 с.
- [8] Лариков Л.Н., Исайчев В.И. Структура и свойства металлов и сплавов. Диффузия в металлах и сплавах. Справочник. Киев (1978), 512 с.
- [9] Фаст Дж.Д. Взаимодействие металлов с газами. М. (1975), 352 с.
- [10] Новик А., Берри Б. Релаксационные явления в кристаллах. М. (1975), 472 с.