

ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ СТАБИЛЬНОСТИ МИКРОСТРУКТУРЫ ТИТАНА, СФОРМИРОВАННОЙ ВОЗДЕЙСТВИЕМ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Иванов М.Б., Манохин С.С., Колобов Ю.Р., Морозова А.И., Ткачев Е.С., Нечаенко Д.А.

Научно-образовательный и инновационный центр «Наноструктурные материалы и нанотехнологии», Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

Ivanov.Maxim@bsu.edu.ru

Хорошо известно, что наноструктурный субмикрокристаллический технически чистый титан обладает достаточно высокой термостабильностью, превышающей таковую для металлов с близкой температурой плавления, например, никеля. Однако в литературе на сегодняшний день нет данных по исследованию собирательной рекристаллизации в наноструктурированных материалах в интервале температур 273-623 К. Широкое применение наноструктурированного титана в медицине рассчитано на сохранение его структуры в течении десятков лет при температурах $\sim 310\text{K}$, однако достоверных данных об этом не существует, это является причиной того, что изучение механизмов термостабильности наноструктурированного титана в наше время является актуальным.

Объектом исследования является технически чистый титан марки BT1-0 (хим. состав(мас. %): Al – 0,010; C – 0,004; N – 0,003 Fe – 0,120; Si – 0,002; H₂ – 0,0008; O – 0,143; Ti – основа).

Исходный наноструктурированный материал (после поперечно-винтовой прокатки) был подвергнут отжигам в печи в интервале температур 273-623K, а затем был исследован методами электронной микроскопии.

На рис.1 приведены примеры микроструктуры, а на рис. 2 – гистограмма распределения зерен по размерам титана BT1-0 в исходном НС состоянии и после отжига 743 К.

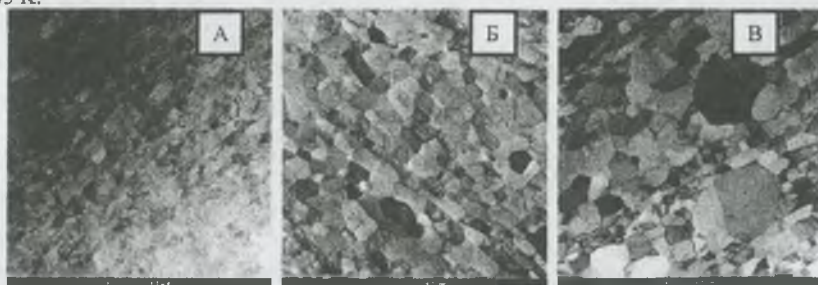


Рис. 1. Микроструктура титана BT1-0: а) в исходном наноструктурном состоянии; б) 623 К (субмикрокристаллическое состояние, собирательная рекристаллизация), 92 ч.; в) после отжига 743 К, 1 ч. (субмикрокристаллическое состояние, вторичная рекристаллизация). Просвечивающая растровая электронная микроскопия в режиме сканирования

В случае нормального закона роста зерен при 623 К кинетика описывается линейной зависимостью с коэффициентом детерминации равным 3. (рис. 3а). Рассчитаны коэффициенты детерминации при линейной интерполяции (рис. 3б).

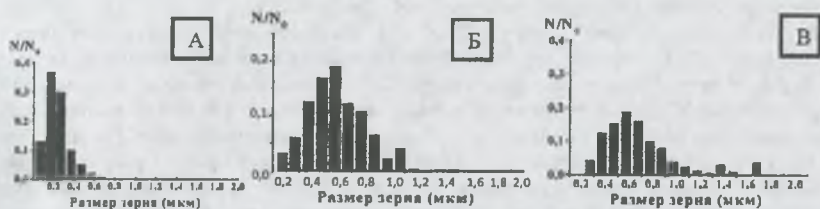


Рис. 2. Гистограммы распределения зерен по размеру: а) в исходном наноструктурном состоянии; б) после отжига 623 К, 92 ч. (нормальное распределение); в) после отжига 743 К, 1 ч. (бимодальное распределение)

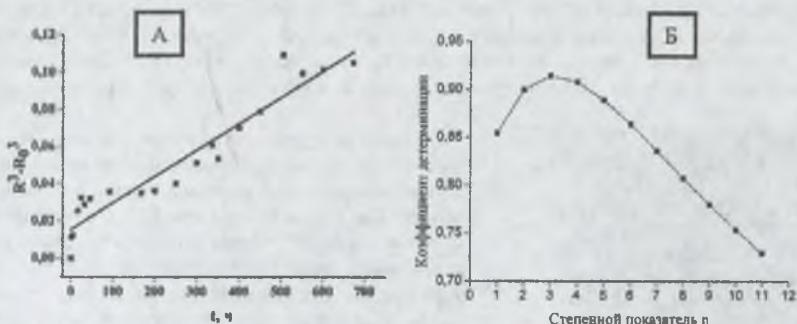


Рис. 3. а) Кинетика роста зерен при 623 К при $n = 3$. Линейная интерполяция. б) Зависимость коэффициента детерминации от степенных показателей в случае линейной интерполяции роста зерен

Оценки рациональности выбора степенного показателя кинетической зависимости указывают на то, что степенной показатель n близок к 3. Максимальный коэффициент детерминации свидетельствует о минимальном разбросе измеряемой величины от среднего значения (Рисунок 3б). Температурная зависимость кинетического параметра C из уравнения $R^3 - R_0^3 = ct$ со степенным показателем n , равным 3, приведена на рис. 4.

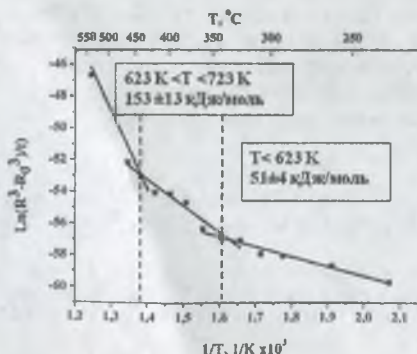


Рис. 4. Температурная зависимость скорости роста зерен в наноструктурном титане марки ВТ1-0 при величине степенного показателя $n=3$.

В случае кубического закона роста зерен на температурной зависимости можно выделить три участка, с условными названиями «низкотемпературных», «повышенных» и «высоких» температур. При «высоких» температурах (выше 723 К), по данным электронно-микроскопического анализа наблюдается вторичная рекристаллизация, которая сопровождается аномальным ростом зерен. При «повышенных» температурах (ниже 723 К, но выше 623 К) рост зерен можно считать нормальным, при этом определяемая из эксперимента энергия активации составляет 153 ± 13 кДж/моль (9%). Низкотемпературная ветвь роста зерен ха-

рактируется величиной энергии активации 51 ± 4 кДж/моль (8%).

Согласно данным литературы [1, 2, 3] при «повышенных» температурах (ниже 723 К, но выше 623 К) энергия активации близка к энергии активации объемной диффузии углерода и титана. При температурах ниже 623°C энергия активации собирательной рекристаллизации НС титана близка к энергии активации самодиффузии по границам зерен, а также зернограницной диффузии углерода в титане (измеренной для СМК и НС состояния). Общеизвестно, что диффузия во многом контролирует процесс рекристаллизации. Таким образом, вероятно, в интервале температур 603-643 К излом обусловлен сменой механизма диффузии в результате перехода материала из неравновесного состояния в равновесное. Кроме этого, излом, обусловленный вторичной рекристаллизацией в сторону увеличения энергии активации процесса при увеличении температуры, может быть связан с условной активацией миграции границ за счет их отрыва от включений или сегрегаций. Таким образом, увеличение температуры отжига выше 723 К, вероятно, приводит к отрыву границы от тормозящих ее частиц или сегрегаций, что эффективно повышает энергию активации процесса, а также приводит к аномальному росту отдельных зерен. Включениями, тормозящими границы, могут оказаться карбиды, которые должны обнаруживаться в материале в виду малой растворимости углерода в ГПУ титане при низких температурах.



Рис. 5. Изображение частиц карбида титана в НС титане после отжига 623 К.

Действительно, высокодисперсные карбиды титана пластинчатой морфологии наблюдались в серии экспериментов по росту зерен в настоящей работе. Так, после отжига при 623 К в течение 8 ч. объем зерен НС титана заполнен частично когерентными включениями (Рисунок 5). В литературе процесс стабилизации границ зерен в НС титане связывается с зернограницными сегрегациями углерода. Таки образом, свыше 623 К может происходить отрыв границ от сегрегаций углерода с образованием карбидов в объеме зерен.

Известные экспериментальные данные указывают на значение энергии активации объемной диффузии углерода в ГПУ-титане в диапазоне от 128 до 188 кДж/моль. К сожалению, данные по зернограницной диффузии углерода в титане практически отсутствуют. Но, имеющиеся значения находятся в интервале 98-108 кДж/моль. Значения энергии активации зернограницной диффузии углерода в титане ниже соответствующего для объемной диффузии. Таким образом, контролировать температурную зависимость роста зерен в НС титане может как зернограницная диффузия (до температур 623 К), так и объемная диффузия углерода и титана (в интервале температур 623-723 К).

Список литературы

1. Herzig Chr., Wilger T., Przeorski T., Hisker F., Divinski S. Titanium tracer diffusion in grain boundaries of a-Ti, a2-Ti3Al, and g-TiAl and in a2/g interphase boundaries // *Intermetallics*. 2001 19. - P. 431-442.
2. Dudarev E. F., Pochivalova G. P., Kolobov Yu. R., at el. Diffusion-controlled true grainboundary sliding in nanostructured metals and alloys // *Russian Physics Journal*. 2004. Vol. 503. P. 58-61
3. Dyment F. Labinati C.M. Self-Diffusion of Ti, Zr, and Hf in their HCP Phases, and Diffusion of Nb in HCP Zr // *Journal of materials science*. 3. 1968. C. 349-359.