

PACS: 62.20.Fe

М.А. Тихоновский¹, И.Ф. Кисляк¹, О.И. Волчок¹, Т.Ю. Рудычева¹,
В.Г. Яровой¹, А.В. Кузьмин¹, Н.В. Камышанченко², И.С. Никулин²

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТИТАНА ПОСЛЕ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ВОЛОЧЕНИЕМ В КРИОГЕННЫХ (77 К) УСЛОВИЯХ

¹Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт» НАНУ
ул. Академическая, 1, г. Харьков, 61108, Украина
E-mail: tikhonovsky@kipt.kharkov.ua

²Белгородский государственный университет
ул. Студенческая, 14, г. Белгород, 308007, Россия

Проведено сравнительное исследование изменения физико-механических свойств чистого титана в зависимости от степени деформации волочением ϵ при криогенных (77 К) температурах и при 300 К. На полученных проволочных образцах измерены зависимости микротвердости $H_{\mu}(\epsilon)$ и удельного электросопротивления $\rho(\epsilon)$ при 77 и 300 К. Установлено существенное влияние температуры деформации волочением на характер зависимостей $H_{\mu}(\epsilon)$ и $\rho(\epsilon)$, свидетельствующее о том, что криогенные условия деформирования титана являются дополнительным фактором оптимизации его свойств.

Введение

Применение больших пластических деформаций – один из основных технологических приемов создания субмикроскопической и нанокристаллической структур в металлах и сплавах. Следствием больших деформаций в массивных кристаллических материалах является фрагментация зерен. Существенным дополнительным фактором оптимизации процессов фрагментации структуры могут служить низкотемпературные (криогенные) условия деформирования. При этом, как известно [1–3], мощность границ фрагментов, определяемая углом разориентации, плотностью дефектов и уровнем вызываемых ими внутренних напряжений, значительно возрастает. В связи с этим задачи настоящей работы предусматривали изучение закономерностей изменения механических и электрофизических свойств поликристаллического титана в зависимости от степени его деформации волочением при 77 К. Выбор титана в качестве материала исследования обусловлен его большой

практической значимостью, а также необходимостью одновременного повышения его прочностных и пластических свойств.

Материал и методика

Йодидный титан (99.99%) после электронно-лучевой переплавки в вакууме подвергали деформированию по схеме осадка–выдавливание–волочение. Осадку и выдавливание проводили при 800 К, а полученный пруток волочили при 300 К до степени истинной деформации $\varepsilon = 3.2$ (этап предварительного волочения). Дальнейшую деформацию волочением (финишный этап) осуществляли до различных степеней финишной деформации ε_F как в среде жидкого азота (77 К), так и при температуре 300 К. Волочение в криогенных условиях проводили на специальной установке, подробно описанной в [4]. На полученных проволочных образцах измеряли зависимости микротвердости $H_\mu(\varepsilon_F)$ и удельного электросопротивления $\rho(\varepsilon_F)$. Измерения H_μ выполняли на поперечных шлифах на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке 0.5 Н. Для измерения удельного электросопротивления образцов при 77 К, $\rho_{77}(\varepsilon_F)$, а также при 300 К, $\rho_{300}(\varepsilon_F)$ применяли четырехточечную схему (погрешность измерения не превышала 1%).

Результаты и обсуждение

На стадии предварительного волочения микротвердость титана возросла с 1050 до 2200 МПа. Дальнейшая финишная деформация волочением при 77 и 300 К приводит к существенно разным зависимостям $H_\mu(\varepsilon_F)$, которые представлены на рис. 1,а. Видно, что при криогенном волочении с повышением ε_F до значений $\varepsilon_F \approx 1$ наблюдается резкий рост H_μ , сменяющийся падением вплоть до значений, меньших, чем микротвердость в исходном состоянии, т.е. при $\varepsilon_F = 0$. Особенно велико это падение при максимальных степенях деформации. Качественно иная картина изменения $H_\mu(\varepsilon_F)$ наблюдается после волочения при 300 К: при деформации вплоть до величины $\varepsilon_F \cong 1.4$ значения H_μ практически не меняются, а при $\varepsilon_F > 1.4$ наблюдается чередование

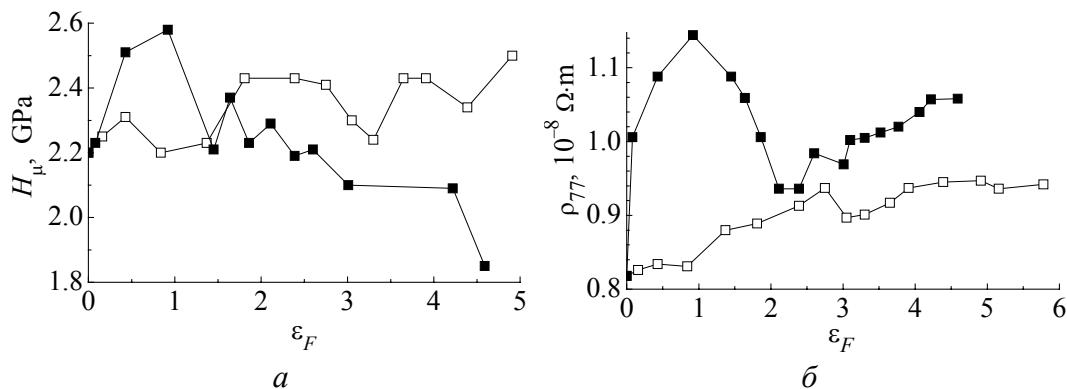


Рис. 1. Зависимость микротвердости (а) и удельного электросопротивления титана при 77 К (б) от степени деформации волочением при 77 (■) и 300 К (□)

роста и снижения $H_{ц}$. При этом максимальное значение микротвердости образцов, полученных волочением при комнатной температуре, ниже, чем после волочения при 77 К (2400 против 2580 МПа), и достигается оно при больших значениях ε_F .

Увеличение прочностных характеристик после криогенного волочения по сравнению с волочением при 300 К в целом может быть связано с ростом степени дефектности структуры, уровнем ее фрагментации и изменением состояния границ фрагментов. При этом характер эволюции дефектной структуры с повышением степени деформации при 77 и 300 К существенно различен. Об этом свидетельствуют данные измерений ρ_{77} после различных степеней финишной деформации волочением при 77 и 300 К (рис. 1,б). Так, для случая волочения в криогенных условиях по мере роста ε_F значения ρ_{77} быстро увеличиваются (максимальный прирост $\delta\rho_{77}$ составляет 40%), затем резко снижаются, а далее имеет место тенденция постепенного роста ρ_{77} . Такая явно выраженная немонотонность зависимости $\rho(\varepsilon_F)$ не проявляется для случая деформации волочением при 300 К. Здесь наблюдается незначительный рост удельного электросопротивления, достигающий не более 14% для ρ_{77} и 5% для ρ_{300} . При этом в области деформаций $\varepsilon_F > 4$ происходит насыщение величины ρ_{77} .

Следует отметить, что характер зависимостей $\rho(\varepsilon_F)$ при температурах измерений 77 и 300 К подобен. Обращает на себя внимание тот факт, что значения ε_F для «критических» точек зависимостей $H_{ц}(\varepsilon_F)$ и $\rho(\varepsilon_F)$ практически совпадают. Поскольку значения удельного электросопротивления после волочения при 77 К резко снижаются для $\varepsilon_F > 1$, можно заключить, что при этом имеет место активное развитие фрагментации, которая обычно сопровождается уменьшением объемной доли областей с равномерным распределением дислокаций [2]. При анализе изменения $\rho(\varepsilon_F)$ как характеристики рассеяния электронов проводимости преимущественно на дислокациях будем исходить из того, что этот вклад в электросопротивление равен $\rho \approx N\rho_d$ (где N – плотность дислокаций, ρ_d – вклад, вносимый в электросопротивление единицей длины дислокационной линии).

Таким образом, в результате волочения в криогенных условиях до больших степеней деформации ($\varepsilon_F > 1$) уменьшается величина N , т.е. реализуются релаксационные процессы, приводящие к снижению плотности дислокаций. Такими процессами могут быть динамический возврат, аннигиляция движущихся дислокаций, выстраивание дислокаций в стенки, что приводит к снижению «эффективной» (в смысле рассеяния электронов) плотности дислокаций, и др. Возможно также, что на определенных стадиях криогенного волочения более активно включается механизм деформации двойникованием. Двойники могут по-разному влиять на механические свойства и электросопротивление титана, а также приводить к формированию другого типа кристаллографической текстуры.

Наконец, отметим еще одну причину, которая может вызывать разное поведение физико-механических свойств титана в результате деформации волочением при 77 и 300 К. Как установлено в последнее время, при интенсивной пластической деформации в материале образуется высокая неравновесная концентрация вакансий (и даже нанопоры), которые сосредоточены вблизи границ зерен. Формирование этих дефектов также может зависеть от температуры волочения.

Выводы

Таким образом, полученные данные позволяют заключить, что криогенные (77 К) условия деформации волочением являются дополнительным фактором реализации структурного ресурса для оптимизации физико-механических свойств титана.

1. В.К. Аксенов, Н.Ф. Андриевская, О.И. Волчок, М.М. Олексиенко, Я.Д. Стародубов, М.А. Тихоновский, *Металлофизика* **13**, № 5, 24 (1991).
2. В.К. Аксенов, О.И. Волчок, А.В. Мац, Я.Д. Стародубов, *ФНТ* **21**, 1246 (1995).
3. В.К. Аксенов, О.И. Волчок, Я.Д. Стародубов, Н.А. Черняк, *ФНТ* **22**, 583 (1996).
4. О.И. Волчок, И.М. Неклюдов, Я.Д. Стародубов, Б.П. Черный, *Металловедение и термическая обработка металлов* **28**, № 12, 28 (1993).
5. В.А. Лихачев, В.Е. Панин, Е.Э. Засимчук, В.И. Владимиров, А.Е. Романов, *Кооперативные деформационные процессы и локализация деформации*, Наукова думка, Киев (1989).

M.A. Tikhonovsky, I.F. Kislyak, O.I. Volchok, T.Yu. Rudycheva, V.G. Yarovoy, A.V. Kuzmin, N.V. Kamyshanchenko, I.S. Nikulin

PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF TITANIUM AFTER SEVERE PLASTIC DEFORMATION THROUGH DRAWING IN CRYOGENIC (77 K) ENVIRONMENT

A comparative analysis of changes in physical and mechanical properties of pure titanium depending on degree of drawing strain ϵ at cryogenic (77 K) temperatures and at 300 K has been done. Dependences of microhardness $H_{\mu}(\epsilon)$ and resistivity $\rho(\epsilon)$ at 77 and 300 K have been measured for wire samples drawn at 77 and 300 K. The dependences $H_{\mu}(\epsilon)$ and $\rho(\epsilon)$ are found to be noticeably affected by wire drawing temperature, which gives an evidence that cryogenic conditions of titanium deformation are an additional optimizing factor for its properties.

Fig. 1. Dependence of titanium microhardness (a) and electrical resistivity at 77 K (b) on the level of strain by wire drawing at 77 (■) and 300 K (□)