

PACS: 62.20.Fe

М.А. Тихоновский<sup>1</sup>, И.Ф. Кисляк<sup>1</sup>, О.И. Волчок<sup>1</sup>, Т.Ю. Рудычева<sup>1</sup>,  
В.Г. Яровой<sup>1</sup>, А.В. Кузьмин<sup>1</sup>, Н.В. Камышанченко<sup>2</sup>, И.С. Никулин<sup>2</sup>

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

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

<sup>2</sup>Белгородский государственный университет  
ул. Студенческая, 14, г. Белгород, 308007, Россия

*Проведено сравнительное исследование изменения физико-механических свойств чистого титана в зависимости от степени деформации волочением  $\epsilon$  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  $\varepsilon_F$  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  $H_\mu$  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  $\varepsilon_F$  до значений  $\varepsilon_F \approx 1$  наблюдается резкий рост  $H_\mu$ , 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  $H_\mu$  практически не меняются, а при  $\varepsilon_F > 1.4$  наблюдается чередование

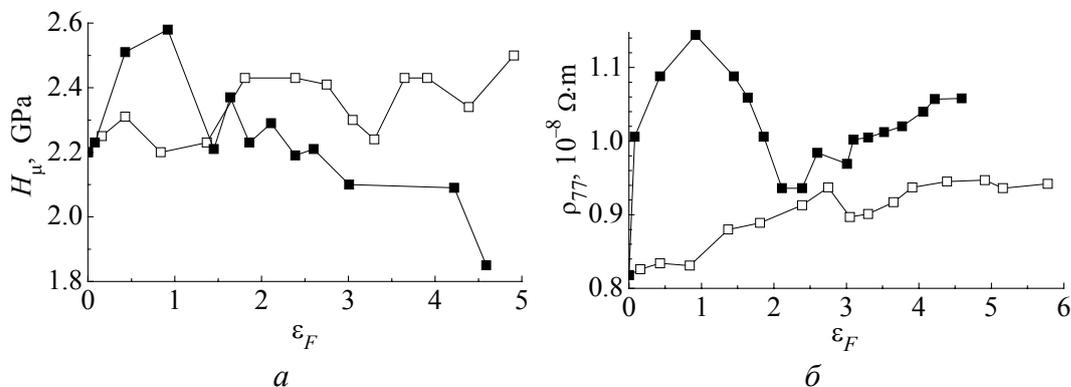


Рис. 1. Зависимость микротвердости (а) и удельного электросопротивления титана при 77 К (б) от степени деформации волочением при 77 (■) и 300 К (□)

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  $\varepsilon_F$ .

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  $\rho_{77}$  после различных степеней финишной деформации волочением при 77 и 300 К (рис. 1,б). Так, для случая волочения в криогенных условиях по мере роста  $\varepsilon_F$  значения  $\rho_{77}$  быстро увеличиваются (максимальный прирост  $\delta\rho_{77}$  составляет 40%), затем резко снижаются, а далее имеет место тенденция постепенного роста  $\rho_{77}$ . 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  $\rho_{77}$  и 5% для  $\rho_{300}$ . При этом в области деформаций  $\varepsilon_F > 4$  происходит насыщение величины  $\rho_{77}$ .

Следует отметить, что характер зависимостей  $\rho(\varepsilon_F)$  при температурах измерений 77 и 300 К подобен. Обращает на себя внимание тот факт, что значения  $\varepsilon_F$  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,  $\rho_d$  – 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  $\epsilon$  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 (□)