

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Maeda Itaru // J. Faculty Sci. Ser. 7. Geophysics. – Hokkaido University, 1990. – V. 8. – No. 5. – P. 479–484.
2. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. Т. 8. Электродинамика сплошных сред. – М.: Наука, 1982. – 624 с.

Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
г. Томск, Россия  
E-mail: Alex@sibmail.com; proecs@mail.tsu.ru

Поступило в редакцию 21.08.14.

Бадьин Александр Владимирович, аспирант, инженер;  
Дунаевский Григорий Ефимович, д.т.н., профессор, зав. каф. радиоэлектроники.

УДК 539.43:669.295:621.77

Ю.Р. КОЛОБОВ\*, Е.Ф. ДУДАРЕВ\*\*, Г.П. БАКАЧ\*\*, В.И. ТОРГАНЧУК\*

### ВЛИЯНИЕ МЕХАНОТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ТИТАНА<sup>1</sup>

*Ключевые слова:* субмикрокристаллический титан, механотермическая обработка, упругопластические свойства, термическая стабильность структуры.

Для формирования в титане субмикрокристаллической структуры наиболее широкое применение нашли такие методы интенсивной пластической деформации, как равноканальное угловое прессование и разносторонняя ковка (*abc*-прессование) [1–3]. Однако в этих методах интенсивная пластическая деформация обычно проводится при температурах выше  $0.3 T_{пл}$  ( $T_{пл}$  – температура плавления титана) и средний размер элементов зеренно-субзеренной структуры превышает 300 нм. Чтобы уменьшить размер элементов зеренно-субзеренной структуры, титан после интенсивной пластической деформации подвергали специальной механотермической обработке, включающей холодную пластическую деформацию путем прокатки с последующим дорекристаллизационным отжигом. Однако полученных экспериментальных данных пока недостаточно для выяснения механизмов упрочнения субмикрокристаллического титана в результате механотермической обработки. Так как при прокатке изменяется текстура, есть основания предположить, что эффект упрочнения в результате механотермической обработки может быть разным при деформации растяжением, сжатием, изгибом и кручением.

В настоящей работе исследовано влияние механотермических обработок субмикрокристаллического титана на его деформационное поведение и упругопластические свойства при деформации растяжением со скоростью  $3 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ . В качестве объекта исследования использовали субмикрокристаллический  $\alpha$ -титан марки ВТ1–0 следующего химического состава: 0.18 % Fe; 0.12 % O; 0.07 % C; 0.04 % N; 0.01 % H (вес. %). Субмикрокристаллическая структура была сформирована при теплой глубокой пластической деформации со ступенчатым понижением температуры от 773 до 673 К. Для данной субмикрокристаллической структуры характерно наличие большеугловых и малоугловых границ зерен при доле большеугловых границ больше 50 % и среднем размере элементов зеренно-субзеренной структуры 350 нм. Плотность дислокаций внутри зерен достигает  $2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ , а границы зерен являются несовершенными [4].

Многokратная прокатка при комнатной температуре титана с такой субмикрокристаллической структурой при суммарной степени деформации 40 % практически не повлияла на размер элементов зеренно-субзеренной структуры, но привела к увеличению плотности дислокаций в зернах и степени неравновесности границ. В то же время при увеличении степени деформации до 80 % сильно уменьшился (до 150 нм) средний размер элементов зеренно-субзеренной структуры при одновременном увеличении доли большеугловых границ (примерно до 90 %), степени неравновесности границ, внутренних напряжений и плотности дислокаций в зернах. При этом элементы зеренно-субзеренной структуры вытянуты вдоль направления прокатки [5].

На рис. 1 приведены кривые течения крупнозернистого (средний размер зерен 10 мкм) и субмикрокристаллического титана при растяжении со скоростью  $3 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$  при комнатной температуре. Они рассчитаны в предположении однородной пластической деформации на всей рабочей длине образца, то есть без учета макролокализации пластической деформации перед разрушением образца. Из данного рисунка следует, что при переходе от крупнозернистой к субмикрокристаллической структуре, сформированной в процессе интенсивной пластической деформации, вид кривых течения в общих чертах сохранился. Но при этом увеличилось напряжение течения и коэффициент упрочнения при небольших степенях пластической деформации,

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках базовой и конкурсной части (проект № 3.1492.2014/К) госзадания Минобрнауки вузам.

а равномерное удлинение и удлинение до разрушения, наоборот, уменьшились. При обеих структурах разрушение титана происходит путем вязкого ямочного отрыва.

Указанные выше изменения характеристик субмикроструктурной структуры при холодной прокатке практически не повлияли на вид кривых течения при комнатной температуре деформации (рис. 1), то есть на деформационное поведение при квазистатическом растяжении. В то же время получен существенный положительный эффект в изменении упругопластических свойств – возможность почти в 2 раза увеличить предел текучести ( $\sigma_{0,2}$ ) и предел прочности ( $\sigma_B$ ) при небольшом уменьшении степени пластической деформации до разрушения ( $\epsilon_p$ ) (таблица). Причем прокатка приводит к наибольшему повышению напряжения течения, если она одновременно обеспечивает сильное уменьшения размера элементов зеренно-субзеренной структуры, сужение интервала распределения зерен по размерам и увеличение доли большеугловых границ.

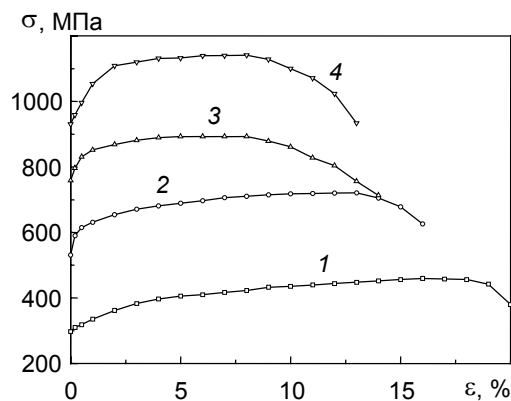


Рис. 1. Кривые течения крупнозернистого (кр. 1) и субмикроструктурного (кр. 2, 3 и 4) титана без прокатки (кр. 2) и после многократной прокатки с суммарной степенью деформации 40 % (кр. 3) и 80 % (кр. 4)

**Влияние температуры отжига на предел текучести  $\sigma_{0,2}$  и относительное удлинение до разрушения  $\epsilon_p$  после прокатки субмикроструктурного титана при комнатной температуре**

Состояние		Температура отжига, К			
		293	573	673	773
Без прокатки	$\sigma_{0,2}$ , МПа	590		548	
	$\epsilon_p$ , %	16		21	
Степень деформации при прокатке 40 %	$\sigma_{0,2}$ , МПа	796	780	644	476
	$\epsilon_p$ , %	14	15	17	27
Степень деформации при прокатке 80 %	$\sigma_{0,2}$ , МПа	959	874	729	434
	$\epsilon_p$ , %	13	10	14	24

Для выяснения влияния холодной пластической деформации субмикроструктурного титана на термическую стабильность структуры и упругопластические свойства образцы после прокатки отжигали 1 ч при температуре 573, 673 или 773 К. Оказалось, что холодная пластическая деформация прокаткой субмикроструктурного титана понижает термическую стабильность структуры и упругопластических свойств, и тем сильнее, чем больше степень пластической деформации. Если после интенсивной пластической деформации титан не подвергался холодной пластической деформации, его субмикроструктурная структура стабильна при температурах ниже температуры, при которой была закончена теплая пластическая деформация (то есть до 673 К). Естественно, что при этом только при температурах отжига 673 К и выше уменьшается напряжение течения и повышается пластичность (таблица).

В то же время после деформации прокаткой на 40 и 80 % уже при температуре отжига 573 К произошли изменения в структуре, в частности уменьшились внутренние напряжения и неравновесность границ зерен. Вид кривых течения при этом не изменился, но понизились предел текучести и предел прочности (рис. 2, таблица). При повышении температуры отжига до 673 К происходят более существенные изменения в субмикроструктурной структуре и появляются признаки начала рекристаллизации. Все это приводит к дальнейшему понижению напряжения течения; пластичность при этом повышается незначительно (рис. 2, таблица). Вид кривых течения остается характерным для субмикроструктурного состояния.

При температурах отжига выше 673 К происходит рекристаллизация, и уже при температуре отжига 773 К вместо субмикроструктурной структуры образуется мелкозернистая структура со средним размером зерен примерно 2 мкм. Вследствие этого вид кривых течения при комнатной температуре деформации становится таким же, как и при крупнозернистой структуре (рис. 1 и 2). При этом сильно понижается напряжение течения, но значительно возрастает степень пластической деформации до разрушения, и она становится такой же, как при крупнозернистой структуре (таблица).

Полученные экспериментальные данные показывают, что для повышения прочности титана с субмикроструктурной структурой, сформированной при интенсивной пластической деформации при повышенных температурах, его можно подвергать глубокой пластической деформации при комнатной температуре. Последующая термическая обработка при температурах ниже 600 К позволяет повысить термическую стабильность структуры и механических свойств при температурах ниже 570 К.

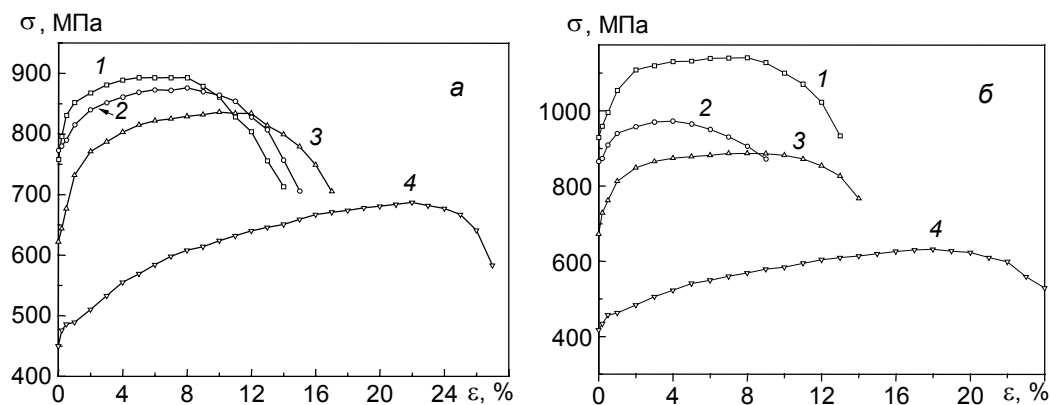


Рис. 2. Кривые течения при деформации растяжением при комнатной температуре субмикроструктурированного титана после прокатки на 40 % (а) и 80 % (б) (кр. 1) с последующим отжигом при 573 К (кр. 2), 673 К (кр. 3) и 773 К (кр. 4)

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Валиев Р.З., Александров И.А. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. – 398 с.
2. Колобов Ю.Р., Валиев Р.З., Грабовецкая Г.П. и др. // Зернограничная диффузия и свойства наноструктурных материалов. – Новосибирск: Наука, 2001. – 232 с.
3. Салищев Г.А., Галеев Р.М., Малышева С.П. и др. // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2006. – № 2 (608). – С. 19–26.
4. Дударев Е.Ф., Почивалова Г.П., Колобов Ю.Р. // Изв. вузов. Физика. – 2012. – Т. 55. – № 7. – С. 87–97.
5. Дударев Е.Ф., Почивалова Г.П., Колобов Ю.Р. // Изв. вузов. Физика. – 2013. – Т. 56. – № 5. – С. 33–40.

\*Белгородский государственный  
национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

\*\*Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
г. Томск, Россия  
E-mail: dudarev@spti.tsu.ru

Поступило в редакцию 17.09.14.

Колобов Юрий Романович, д.ф.-м.н., профессор;  
Дударев Евгений Федорович, д.ф.-м.н., профессор;  
Бакач Галина Павловна, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр.;  
Торганчук Владимир Игоревич, аспирант.