УДК 620.171.2:620.186.8

ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В ТИТАНОВЫХ СПЛАВАХ

© Владимир Владимирович Столяров
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН
vlstol@mail.ru

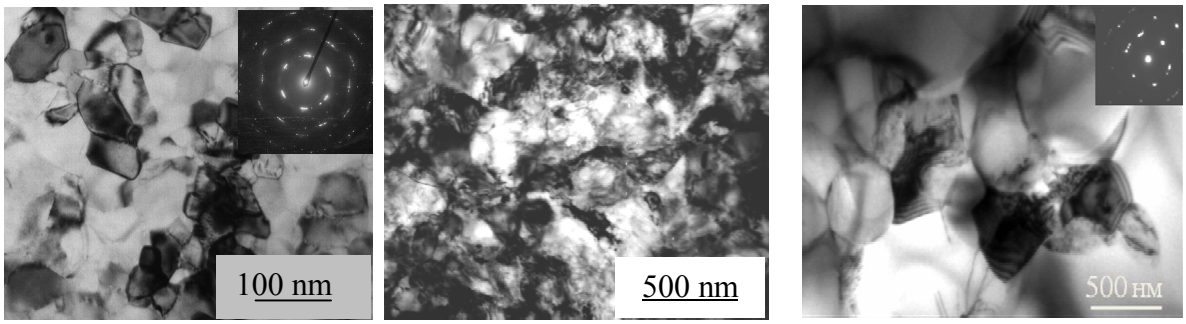
Аннотация. *Анализируется природа разнонаправленных скачков напряжения, наблюдаемых на диаграммах «напряжение-деформация» при растяжении с импульсным током. Показано, что амплитуда и направление скачков напряжений определяются конкуренцией механизмов электропластического эффекта (ЭПЭ) и фазового превращения, а ЭПЭ является структурно-чувствительным свойством. Величина ЭПЭ уменьшается при измельчении структуры и даже исчезает в нанокристаллическом состоянии.*

Введение

Одним из подходов к увеличению технологических и эксплуатационных свойств материалов является метод, основанный на электропластическом эффекте (ЭПЭ) [1, 2]. Предполагается, что помимо теплового и пинч эффектов, значимый вклад в механизм ЭПЭ вносит взаимодействие потока электронов с дислокациями. Поскольку большая часть ранних исследований ЭПЭ была выполнена на монокристаллах чистых металлов или однофазных сплавах с крупнозернистой (КЗ) структурой, то роль исходной нано- или ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры, влияние легирования и фазовых превращений не исследовались. Недавно было показано, что прокатка с током не только повышает деформируемость, но и обеспечивает формирование УМЗ и (или) наноструктуры в титане и его сплавах [3-5]. В работах [5-7] были выполнены первые оценки величины ЭПЭ в экспериментах по растяжению с введением тока, которые, однако, нуждаются в дополнительном анализе полученных результатов. В этой связи для расширения представлений о физической природе ЭПЭ в настоящей статье обобщаются результаты предыдущих исследований проявления ЭПЭ при прокатке и растяжении в КЗ и УМЗ титановых сплавах ВТ1-0, ВТ6 и TiNi, различных по природе, химическому и структурно-фазовому составу.

Экспериментальные методы и материалы

Крупнозернистое состояние с размером зерен от 20 до 50 мкм в материалах было получено отжигом при 700 ºС (ВТ1-0, Grade-4); закалкой из β-области или отжигом в двухфазной (α+β)-области при температуре 900 ºС (сплав ВТ6); и закалкой с 800 ºС в воду ($Ti_{49.3}Ni_{50.7}$ и $Ti_{49.2}Ni_{50.8}$). Наноструктура в никелиде титана (рис.1а) и УМЗ структура в сплавах ВТ1-0 и ВТ6 (рис.1б, в) получены методом ЭПП с последующим отжигом. Многопроходная ЭПП выполнена на полосах сечением 2х6 мм^2 с одновременным пропусканием однополярного импульсного тока плотностью j=80-150 А/мм^2, длительностью импульса (1-10)х10^{-4}с$^{-1}$ и частотой 10^3 Гц; подробности метода описаны в [2]. Деформируемость полос оценивали истиной степенью деформации $e = \ln t_o / t_к$, где t_o, $t_к$ – начальная и конечная толщина полосы.



(а) e=1.81 (б) e=1.2 (в) e=1.8

Рис.1. Микроструктура сплавов, подвергнутых ЭПП и отжигу: а - $Ti_{49.4}Ni_{50.6}$, 450 ºС-1 ч; б - ВТ1-0, 450 ºС-1 ч; в – ВТ6, 600 ºС-1 ч

Аттестация структуры и механические испытания были выполнены на образцах после отжига при температуре 450 и 600 ºС, когда происходят заметные структурные изменения – релаксация напряжений, рекристаллизация или старение. Механическое поведение изучалось с введением импульсного тока плотностью j=1500 А/мм^2 , длительностью 100 и 1000 мкс при скорости растяжения 0.5 мм/мин на горизонтальной машине ИМ-5081 (с одиночным и многоимпульсным током).

Экспериментальные данные

Данные табл. 1 показывают, что преимущество прокатки с током зависит от химического и фазового состава сплава. В однофазных сплавах (титан и никелид титана) определяющим является влияние содержания примесей или легирующего элемента. Так, *деформируемость* чистого титана с током в КЗ состоянии повышается с уменьшением содержания кислорода (Grade-4 и ВТ1-0). Аналогично уменьшение содержания никеля в никелиде титана повышает его деформируемость ($Ti_{50.0}Ni_{50.0}$ и$Ti_{49.2}Ni_{50.8}$). Переход из аустенитного в мартенситное состояние также способствует повышению деформируемости никелида титана. Известно, что в сплаве с исходной мартенситной структурой наряду с механическим двойникованием В19 фазы может происходить дополнительное образование двойников В2 фазы в процессе обратного мартенситного превращения [8], что вносит дополнительный вклад в деформируемость.

Таблица 1. Истинная деформация КЗ сплавов до разрушения при прокатке с током и без тока

материал	$e_{j=0}$ без тока	e_j с током
Ti (Grade 4, O=0.4%) Ti (ВТ1-0, O = 0.2%)	2.0 2.3	2.3 3.2
$Ti_{49.2}Ni_{50.8}$ (аустенит) $Ti_{50.0}Ni_{50.0}$ (мартенсит)	0.1 0.6	1.2 3.6
ВТ6 (α + β) (β)	0.55 0.35	2.4 1.9

В сплаве ВТ6 деформируемость связана с морфологией вторых фаз. В случае равноосной зеренной (α+β)-структуры деформируемость выше, по сравнению с деформируемостью

мартенситных игл β'-фазы. Отметим, что аналогичные зависимости для исследованных сплавов наблюдаются и при прокатке без тока.

На характер *деформационного упрочнения в* процессе ЭПП при одинаковой плотности тока влияет дисперсность сплава (рис.2). В КЗ состоянии сплавы испытывают упрочнение (кривые 1 и 3), тогда как в УМЗ состоянии чистый титан проявляет разупрочнение с ростом деформации (кривая 2). Разупрочнение в процессе ЭПП для сплава ВТ6 наблюдали и в работе [4]. Авторы связывают этот факт с динамической рекристаллизацией, температура которой уменьшается с измельчением структуры и может быть близкой к температуре деформации, особенно при высоких плотностях тока.

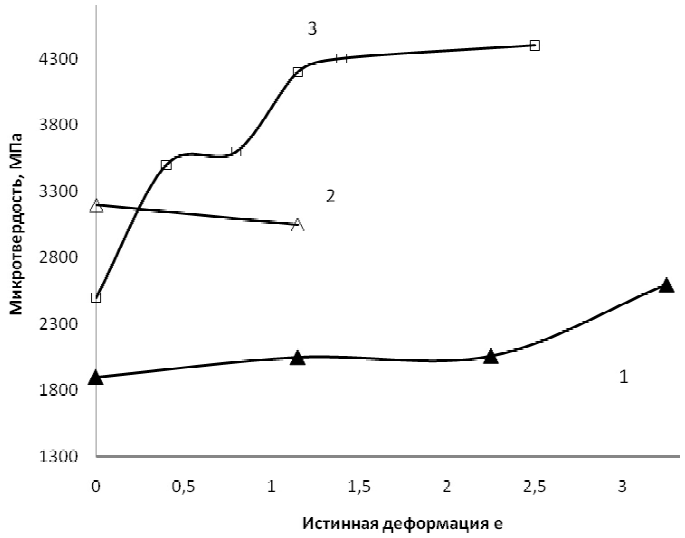
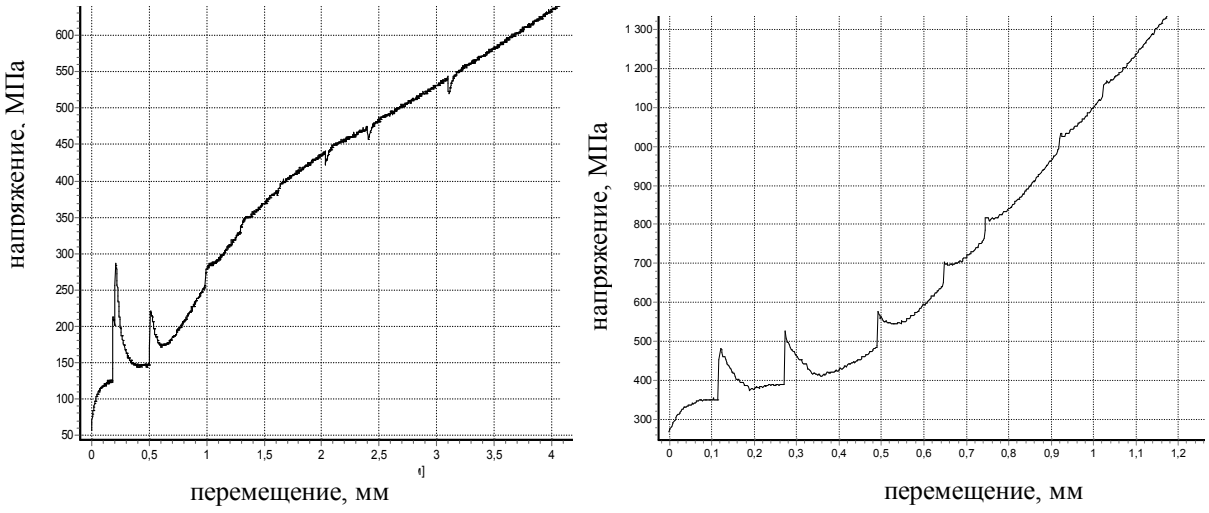


Рис.2. Зависимость микротвердости от деформации при ЭПП: 1 – КЗ ВТ1-0; 2 – УМЗ ВТ1-0; 3 – КЗ TiNi

Механическое поведение сплавов после ЭПП и постдеформационного отжига представлено диаграммами растяжения (рис.3 и 4).

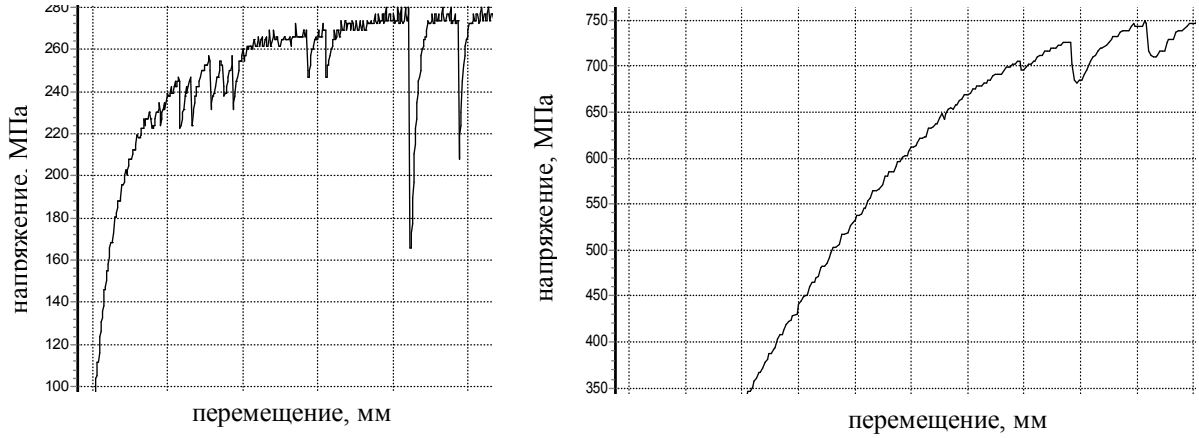
Отличительной особенностью кривых «напряжение – перемещение» при воздействии импульсным током является появление скачков напряжения, каждый из которых соответствует одиночному импульсу тока.



(а) (б)

Рис.3. Кривые растяжения с одиночными импульсами тока для сплава $Ti_{49.3}Ni_{50.7}$ в КЗ (а) и НС (б) состояниях.

Направление (верх, вниз) и амплитуда скачка напряжения различны и зависят от химического состава сплава, структурного состояния. При наличии фазового превращения при деформации (TiNi) наблюдаются оба вида скачков напряжения (рис.3а), при их отсутствии присутствуют только скачки вниз (рис.4). Подробный анализ физической причины скачков свидетельствует о фазовом превращении (скачки вверх) или о действии ЭПЭ (скачки вниз) [1]. Амплитуда скачков напряжения для КЗ Ti в два раза выше, чем для УМЗ Ti, что указывает на уменьшение ЭПЭ с уменьшением размера зерен. Аналогичное влияние размерного эффекта структуры на ЭПЭ наблюдается и в сплаве TiNi, в котором он присутствует в КЗ состоянии и отсутствует в НК состоянии (рис.3). Возможной причиной отсутствия ЭПЭ в НК сплаве является недостаточно высокая плотность тока, выбранная для данного сплава. Требуются дополнительные исследования ЭПЭ в зависимости от плотности тока.



(а) (б)

Рис.4. Диаграммы растяжения с током в КЗ (а) и УМЗ (б) титане.

Заключение

1. Электропластическая прокатка формирует УМЗ и наноструктурные состояния, повышает деформируемость и прочность исследованных сплавов ВТ1-0, ВТ6 и $Ti_{49.3}Ni_{50.7}$.
2. ЭПЭ является структурно-чувствительным свойством, величина которого уменьшается при измельчении структуры и даже исчезает в нанокристаллическом состоянии.
3. В сплаве $Ti_{49,3}Ni_{50,7}$ с памятью формы введение тока при растяжении приводит к дополнительным скачкам напряжения вверх, обусловленным обратимым термоупругим мартенситным превращением.

Благодарности

Работа выполнялась при финансовой поддержке РФФИ, грант №11-08-00327_а и Минобрнауки, госконтракт № 14.740.11.0825

Список литературы

1. *Троицкий О.А., Баранов Ю.В., Авраамов Ю.С., Шляпин А.Д.,* Физические основы и обработки современных материалов (теория, технология, структура и свойства), 2 тома, Москва-Ижевск: Изд-во Ин-та комп. техн., 2004. 590с.
2. *Conrad H.,* // Mater. Sci. Eng. A 287. 2000. P.276.

4. *Stolyarov V, Ugurchiev U, Trubitsyna I., et al.* // J. of High Pressure Phys. Techn. 2006. V.4. № 16. P. 64.
5. *Меденцов В.Э., Столяров В.В.* // Деформация и разрушение материалов. 2012. №12. С.37.
6. *Столяров В.В.*// Известия академии наук, серия физическая. 2012. Т.76, № 1, С.108.
7. *Столяров В.В., Угурчиев У.Х.*// ФТВД, 19, 1 (2009) С.92.
8. *Федоткин А.А., Меденцов В.Э., Столяров В.В.* // Известия ВУЗов. Черная металлургия. 2012. №8. С.47.
9. *Сурикова, Н. С., Тюменцев А. Н., Евтушенко О. В.* // Известия ВУЗов. Физика. 2009. Т.52. №5. С. 58

Поступила: 04.02.13.