

# Структурные превращения при растяжении с током в титановых сплавах

Столяров В.В.

Институт машиноведения РАН, г. Москва

vlstol@mail.ru

## Structure transformations during tension with current in titanium-based alloys

V.V. Stolyarov

Institute of Mechanical Engineering, Russian Academy of Sciences, Moscow

Анализируется деформационное поведение при растяжении с электрическим током титановых сплавов различных видов и степени дисперсности структуры. Показано влияние размера зерен, фазового состава и режимов тока на характер прыжков напряжения течения на диаграмме растяжения.

**Ключевые слова:** структура, память формы, напряжения течения, деформация

Deformation behavior during tension with electric current has been analyzed in Ti-based alloys of various types and structure refinement. Influence of grain size, phase composition and current regimes on type of flow stress jumps on stress-strain curve is demonstrated.

**Key words:** structure, shape memory, flow stresses, deformation

### 1. Введение

Одним из подходов к увеличению технологических и эксплуатационных свойств материалов является метод, основанный на взаимодействии деформации и тока [1]. Недавно было показано, что введение тока не только повышает деформируемость, но и обеспечивает измельчение структуры до наноразмеров в титановых сплавах [2, 3]. Предполагается, что наряду с известными тепловым эффектом Джоуля – Ленца и пинч-эффектом основной вклад в механизм наблюдаемых явлений вносит взаимодействие движущихся электронов и дислокаций при деформации материалов, называемое электропластическим эффектом (ЭПЭ) [4]. Впервые ЭПЭ в виде скачков напряжения течения наблюдался при растяжении монокристаллов и крупнокристаллических чистых металлов [5]. Было опубликовано много работ, посвященных феноменологии ЭПЭ, однако влияние структурных особенностей самого материала (морфологии структурных элементов, типа границ и размера зерен, фазовых и полиморфных превращений и т.д.) оставалось слабо изученным. Особую актуальность представляет изучение ЭПЭ в современных титановых сплавах: с памятью формы [6], наноструктурных и аморфных материалах, деформационная обработка которых затруднена и может быть основана на использовании деформации с током. Первые результаты в этом направлении получены в [2, 7], где скачки напряжений были обнаружены при

растяжении с током в наноструктурном сплаве TiNi с размером зерен менее 100 нм.

В этой связи целью работы являлось исследование особенности проявления ЭПЭ при растяжении в зависимости от структурно-фазового состояния, размера зерна и режимов импульсного тока в титановых сплавах различной природы.

### 2. Материалы, методы обработки и исследований

Исследования проводились на сплаве  $Ti_{49.3}Ni_{50.7}$  с эффектом памяти формы (ЭПФ), двухфазном сплаве ВТ6 и технически чистом титане (ВТ1-0). Исследовались два структурных состояния – крупнозернистое (КЗ) и наноструктурное (НС). Для получения КЗ-состояния в сплаве  $Ti_{49.3}Ni_{50.7}$  проводили закалку с 700 °С в течение 1 часа, для получения НС-состояния ( $d = 50$  нм) – электропластическую прокатку (ЭПП,  $e=0,8$ ) с последующим отжигом, 400 °С/1 час.

Сплав ВТ6 был использован в виде горячекованных заготовок, поставленных ОАО ВСМПО, из которых были вырезаны полосы размером  $2 \times 5 \times 100$  мм<sup>3</sup>. Образцы были предварительно подвергнуты изотермическому отжигу при 850 °С, с выдержкой в течение часа и охлаждены с печью. Затем образцы из сплава ВТ6 прокатывали до истинной деформации  $e = 0,7$  с током плотностью  $j=150$  А/мм<sup>2</sup> при длительности импульса 120 мкс и часто-

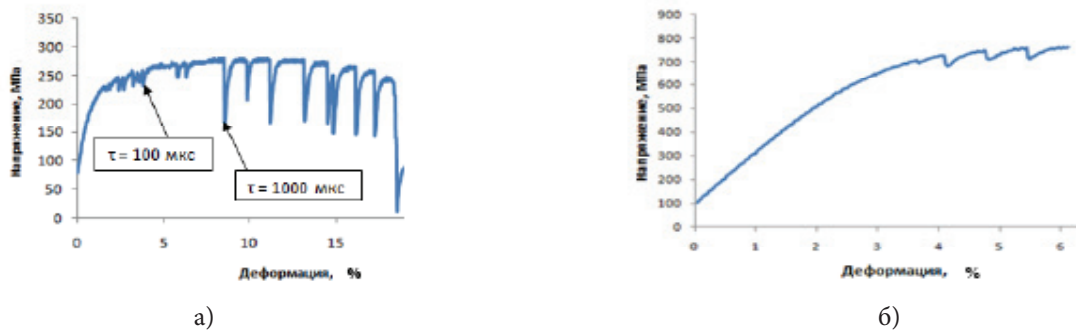


Рис. 1. Диаграммы растяжения VT1-0 с током: а) КЗ-состояние; б) НС-состояние.

те  $F=830$  Гц. В результате была получена субмикроструктурная (СМК) структура с размером структурных фрагментов 250 нм.

Сплав VT1-0 использовали в форме горячекатаного прутка  $\varnothing 50$  мм, структура которого в исходном состоянии поставки является крупнозернистой со средним размером зерен 15 мкм. Для получения наноструктуры ( $d = 100$  нм) VT1-0 прутки подвергались теплomu РКУП и последующей ТМО [8, 9].

Статические испытания на растяжение с импульсным током проводились на плоских образцах при комнатной температуре на горизонтальной разрывной машине ИР 5081-20 со скоростью 0.5 мм/мин с подключением генератора импульсного тока. Из анализа предыдущей работы [3] были выбраны параметры тока – плотность  $j = 1500$  А/мм<sup>2</sup> и длительность импульса  $\tau = 100$  и 1000 мкс.

### 3. Экспериментальные результаты

Рассмотрим механическое поведение чистого титана. На рис. 1 а, б приведены диаграммы растяжения с током сплава VT1-0 в КЗ и НС состояниях.

Введение импульсов тока в КЗ титан (рис. 1 а) приводит к появлению скачков напряжения, амплитуда которых  $\Delta\sigma$  при увеличении длительности импульса от 100 до 1000 мкс увеличивается с 15 МПа до 85 МПа. При подаче импульса тока наблюдается мгновенный спад напряжения, а затем быстрое, но более плавное восстановление. При подаче импульсов 100 мкс для НС титана (рис. 1 б) скачков напряжения не наблюдалось, и были применены импульсы длительностью 1000 мкс, которые вызвали появление скачков напряжения вниз с амплитудой  $\Delta\sigma=20$  МПа.

Теперь рассмотрим деформационное поведение двухфазного сплава VT6. На рисунке 2 а, б представлены условные деформационные кривые при растяжении с током образца крупнозернистого и СМК сплава VT6. Абсолютные значения напряжений в данном эксперименте не измерялись. Амплитуда скачков напряжений для импульсов тока в сплаве VT6 для КЗ состояния (около 20 МПа) в 4 раза больше, чем для СМК состояния (5 МПа). Отметим, что значения амплитуд скачков напряжения в сплаве VT6 в 4 раза ниже, чем для VT1-0. Из сравнения кривых на рис. 2 а и 2 б видно, что импульсный ток в СМК сплаве VT6 приводит к снижению напряжения течения и предела прочности.

Таким образом, видно, что ЭПЭ зависит как от размера зерна, так и от фазового состава сплава. В сплавах VT6 и VT1-0 амплитуда скачков вниз при растяжении с током уменьшается с уменьшением размера зерен (фрагментов). Таким образом, величина ЭПЭ в сплавах с СМК-структурой меньше, чем в сплавах с КЗ структурой. Важно отметить, что ЭПЭ проявляется в двухфазном сплаве VT6 слабее, чем в однофазном VT1-0. Действительно, амплитуда скачков напряжений в VT6 составляла 20 МПа, в то время как у VT1-0 - 80 МПа.

Влияние размера зерен на проявление ЭПЭ при переходе от КЗ к СМК состоянию сплавов титана, по-видимому, связано с уменьшением длины свободного пробега дислокаций. Этот факт подтверждает дислокационный механизм ЭПЭ и его структурную чувствительность к размеру зерен. На снижение ЭПЭ в VT6, по сравнению с VT1-0, может влиять наличие второй фазы ( $\beta$ -фазы), а также наличие ОЦК решетки для  $\beta$ -фазы в отличие от ГПУ решетки  $\alpha$ -фазы. Таким образом, для сплава VT6 необходимо введение большего по величине импульса

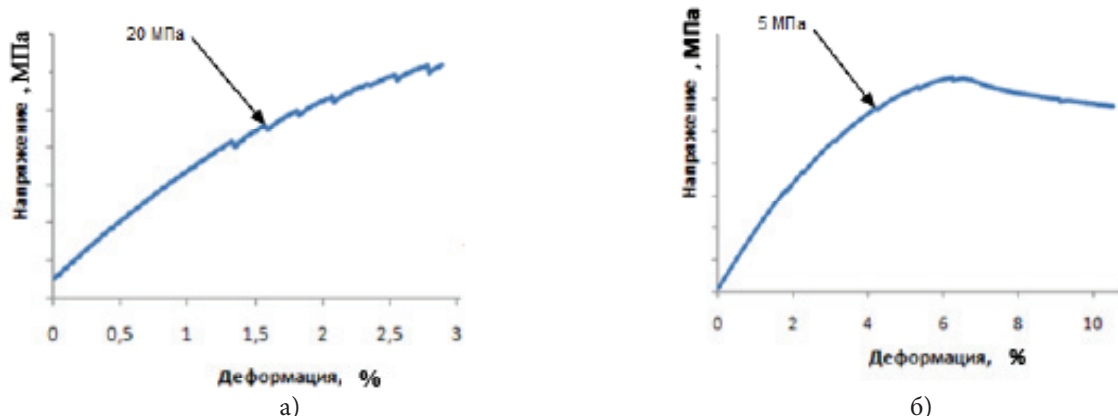


Рис. 2. Диаграммы растяжения VT6 с током: а) КЗ-состояние; б) СМК-состояние.

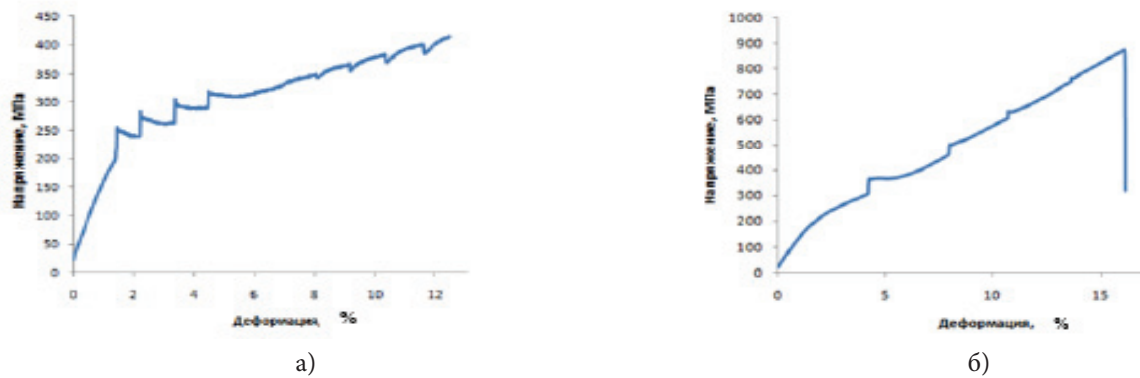


Рис. 3. Диаграммы растяжения никелида титана с током: а) КЗ-состояние; б) НС-состояние.

тока по сравнению с однофазным сплавом ВТ1-0, чтобы получить сравнимую величину ЭПЭ.

Рассмотрим деформационное поведение сплава TiNi. На рис. 3 а, б представлены типичные кривые деформации при растяжении с током КЗ и НС образцов сплава  $Ti_{49,4}Ni_{50,6}$ .

Поскольку применение импульсов тока длительно-стью 100 мкс не вызывает видимых изменений на диаграмме растяжения, то длительность импульсов была повышена до 1000 мкс, при которой были обнаружены скачки напряжения. Отметим, что если для КЗ состояния амплитуда скачка напряжений для аналогичных импульсов тока составляла 85 МПа, то для НС – только 20 МПа.

При растяжении КЗ образца с применением импульсного тока на диаграмме растяжения наблюдаются два вида скачков напряжения – вверх и вниз (рис. 3 а). Скачки вверх, свидетельствующие о росте напряжений, наблюдались только в области площадки фазового превращения аустенита в мартенсит. При использовании импульсного тока наблюдается также общий рост напряжений в этой области, хотя фазовое превращение в отсутствие импульсного тока происходит без изменения напряжения. Разрушение образцов также происходит при одинаковом значении удлинения, но с заметной разницей в напряжении течения. На диаграмме растяжения с применением импульсного тока для НС образца все наблюдаемые скачки свидетельствуют об увеличении напряжений в образце под действием импульсов тока, уменьшающиеся с ростом деформации.

#### 4. Обсуждение результатов

В технически чистом титане в отсутствие фазового превращения на диаграмме растяжения наблюдаются только скачки напряжения вниз, амплитуда которых зависит как от длительности импульса тока, так и от размера зерен. Увеличение длительности импульса усиливает ЭПЭ (рис. 1 а), а уменьшение размера зерен ослабляет его так, что в наноструктурном состоянии он наблюдается только при длительности импульсов  $\tau = 1000$  мкс (рис. 1 б). Такое влияние длительности импульса на ЭПЭ является типичным для многих материалов и объясняется зависимостью количества электронов, воздействующих на дислокацию в единицу времени [9].

Влияние размера зерен при переходе от КЗ к УМЗ состоянию титана связано с уменьшением длины свободного пробега дислокаций. Этот факт подтверждает дислокационный механизм ЭПД и его структурную чувствительность к размеру зерен.

Другой особенностью деформационных кривых с током является значительное снижение напряжений течения при практически неизменной величине относительного удлинения до разрушения.

В сплаве TiNi с наличием фазового превращения роль импульсного тока является более сложной. В КЗ никелиде титана, как и в чистом титане, наблюдаются скачки напряжения вниз, свидетельствующие о проявлении ЭПЭ (рис. 3). В отличие от титана их амплитуда растет со степенью деформации. Это связано с одновременным влиянием двух противоположных эффектов (ЭПФ и ЭПЭ) на всей диаграмме растяжения. В точке с  $\epsilon = 6\%$  суммарное действие от двух эффектов равно нулю, о чем свидетельствует отсутствие скачка напряжения от импульса тока.

Наиболее важной отличительной особенностью никелида титана по сравнению с титаном является появление скачков напряжения вверх за пределом упругости, природа которых связана с обратимым фазовым превращением  $A \leftrightarrow M$  (рис. 3). При этом скачки вверх затухают с ростом деформации при одинаковых параметрах тока, а скачки вниз, наоборот, начинают проявляться в большей степени с ростом деформации. При деформации  $\epsilon = 6\%$  был дан импульс тока, который не вызвал соответствующего скачка напряжений. По-видимому, ток способствует проявлению одновременно двух эффектов (ЭПЭ и ЭПФ), которые из-за разнонаправленности могут компенсировать друг друга. В общем случае их вклад в значение  $\Delta\sigma$  с ростом деформации и количеством аустенита будет различен в каждый момент времени.

При малых напряжениях (менее 50 МПа) на кривых для КЗ TiNi после закалки всегда наблюдалась дополнительная горизонтальная площадка, длина которой не превышала 0.5%. Причиной появления площадки, является наличие в исходной аустенитной структуре небольшой доли мартенсита, который переориентируется под действием напряжений.

Возможно, для TiNi в НС состоянии (рис. 3 б) общая тенденция падения напряжения течения под действием тока обуславливается повышением подвижности дислокаций, вследствие передачи им дополнительной энергии от электронов.

Уменьшение амплитуды скачков напряжения вверх в НС состоянии от импульсов тока с увеличением степени деформации связано с изменением соотношения аустенитной и мартенситной фаз, а также со стабилизацией одной из этих фаз.

### 5. Заключение

1. В однофазном сплаве ВТ1-0 в отсутствие фазового превращения импульсный ток вызывает скачки напряжения только вниз, связанные с проявлением ЭПЭ. В двухфазном сплаве ВТ6 также скачки наблюдаются только вниз. В сплаве TiNi с наличием обратимого мартенситного превращения помимо скачков вниз, наблюдаются также скачки напряжения вверх, обусловленные ЭПФ.

2. ЭПЭ является структурно-чувствительным свойством сплавов. Измельчение зерен от десятков микрон до десятков и сотен нанометров уменьшает амплитуду скачков напряжения вниз для ВТ1-0 и ВТ6, а для сплава TiNi приводит к их полному исчезновению. Амплитуда скачков напряжения при введении импульсного электрического тока в сплаве ВТ6 снижается в 4 раза в связи с наличием двух фаз, а так же с уменьшением размера структурных составляющих сплава.

3. Увеличение степени деформации для сплава TiNi при растяжении с током приводит к постепенному затуханию скачков напряжения вверх и росту скачков вниз. Для сплавов ВТ1-0 и ВТ6 увеличение степени деформации не влияет на амплитуду скачков напряжения вниз.

4. Увеличение длительности импульса с 100 до 1000 мкс приводит к повышению амплитуды скачка напряжения вниз для сплава ВТ1-0 с 15 до 85 МПа. В сплавах TiNi и ВТ6 скачки напряжения наблюдались только при длительности импульса 1000 мкс.

### Литература

1. Баранов Ю.В., Троицкий О.А., Авраамов Ю.С., Шляпин А.Д. Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы. М.: МГИУ, 2001, 844 с.
2. Столяров В.В., Угурчиев У.Х., Трубицына И.Б. и др. Интенсивная электропластическая деформация сплава TiNi. Физика и техника высоких давлений, 2006, Т.16, № 4, С. 48-51.
3. Столяров В.В., Угурчиев У.Х. Влияние импульсного тока на деформационное поведение наноструктурного сплава с памятью формы TiNi. Физика и техника высоких давлений, 2009, Т.19, № 1, С. 92-96.
4. Фикс В.Б. Ионная проводимость в металлах и полупроводниках (Электроперенос). М.: Наука, 1969, 296 с.
5. Troitskii O.A. Electromechanical effect in metals. Zh. Eksp. Teor. Fiz., 1969, 10 (1), P. 18-22.
6. Столяров В.В. Письма о материалах. 2011, т.1, С. 75-77.
7. Stolyarov V.V. Deformation behavior at rolling and tension under current in TiNi alloy. ESOMAT 2009, 06033, 2009, P.1-7.
8. Валиев Р.З. Александров И.В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. М.: Логос, 2000, 272 с.
9. Stolyarov V.V., Zhu Y.T., Alexandrov I.V. et al. Grain refinement and properties of pure Ti, processed by warm ECAP and cold rolling. Materials Science and Engineering A, 2003, V. 343, P. 43 – 50.