

PACS: 62.20.Fe

В.В. Столяров, У.Х. Угурчиев

ВЛИЯНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ТОКА
НА ДЕФОРМАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ
НАНОСТРУКТУРНОГО СПЛАВА С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ TiNi

Учреждение Российской академии наук,
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН
М. Харитоньевский пер., 4, г. Москва, 101990, Россия
E-mail: vlst@yauza.ru

Изучено влияние импульсного тока на деформационное поведение при одноосном растяжении и комнатной температуре наноструктурного сплава с памятью формы TiNi. Показано, что направление и величина скачков напряжения в исследуемом материале резко отличаются от таковых, наблюдаемых в чистых металлах и сплавах без фазовых превращений при электропластическом эффекте (ЭПЭ).

Введение

Известно, что в металлах и сплавах (Al, Cu, Ni, Fe, Nb, W, Ti, Zr, нержавеющая сталь) при растяжении и одновременном воздействии одиночными импульсами тока плотностью $\sim 10^3$ А/мм² и длительностью $\sim 10^{-4}$ с наблюдается ЭПЭ [1–5]. Он проявляется в скачкообразных удлинениях и соответствующих им сбросах напряжений на кривой растяжения при прохождении по образцу одиночного импульса тока без существенного теплового эффекта и тепловой дилатации образцов. Показано, что ЭПЭ существует лишь во время пластической деформации материала, а его величина по отношению к напряжению течения варьируется от нескольких процентов для поликристаллов до десятков процентов для монокристаллов. Предполагается, что в основе ЭПЭ лежит ускорение пластического течения металла потоком электронов проводимости, которые помимо джоулевого эффекта способны оказывать особое специфическое электропластическое действие на металл, находящийся под механическим напряжением выше предела текучести. Для указанных металлов и сплавов фазовые превращения в интервале исследованных температур 77–300 К либо отсутствуют, либо имеют место при более высоких температурах. Поэтому в литературе отсутствуют данные по влиянию фазовых превращений на ЭПЭ.

Однако в ряде материалов, например в сплавах TiNi с памятью формы, обратимые мартенситные превращения наблюдаются при комнатной и более низких температурах, что может влиять на их деформационное поведение как с током, так и без тока. Поскольку в сплавах TiNi хорошо установлено положительное влияние импульсного тока на деформируемость и формирование наноструктуры при холодной прокатке [6], важно понять механизм этого влияния, исследуя деформационное поведение. Целью работы является изучение деформационного поведения сплава TiNi с памятью формы при растяжении и одновременном действии импульсного тока.

Материал и методы исследования

Объект исследования – наноструктурный сплав $Ti_{49.3}Ni_{50.7}$ в форме полосы размерами $0.35 \times 8.0 \times 80$ mm, полученной методом электропластической прокатки (ЭПП) со степенью истинной деформации $e = 1.81$ [6]. Вид наноструктуры со средним размером зерен менее 100 nm показан на рис. 1,а. Полосы исследовали в двух состояниях: а) исходно-деформированном; б) после отжига при 450°C в течение 1 h. Температуры мартенситных превращений измерены на приборе NETZSCH DSC204 при скорости нагрева/охлаждения $10^\circ\text{C}/\text{min}$ и показаны на рис. 1,б. Деформационное поведение сплава изучали при растяжении и одновременном наложении импульсного тока на горизонтальной машине ИР-5081 при скорости испытания 0.5 mm/min на образцах общей длиной 20 mm и размерами рабочей длины $0.35 \times 2.5 \times 1.0$ mm. От генератора импульсный ток частотой 10^3 Hz, длительностью одиночных импульсов 80 μs , плотностью около 10^3 A/mm² вводили на стадии пластической деформации образца через захваты машины. Время воздействия тока составляло 0.5 s. Ток вводили при напряжениях течения выше напряжения $A \rightarrow M$ -превращения.

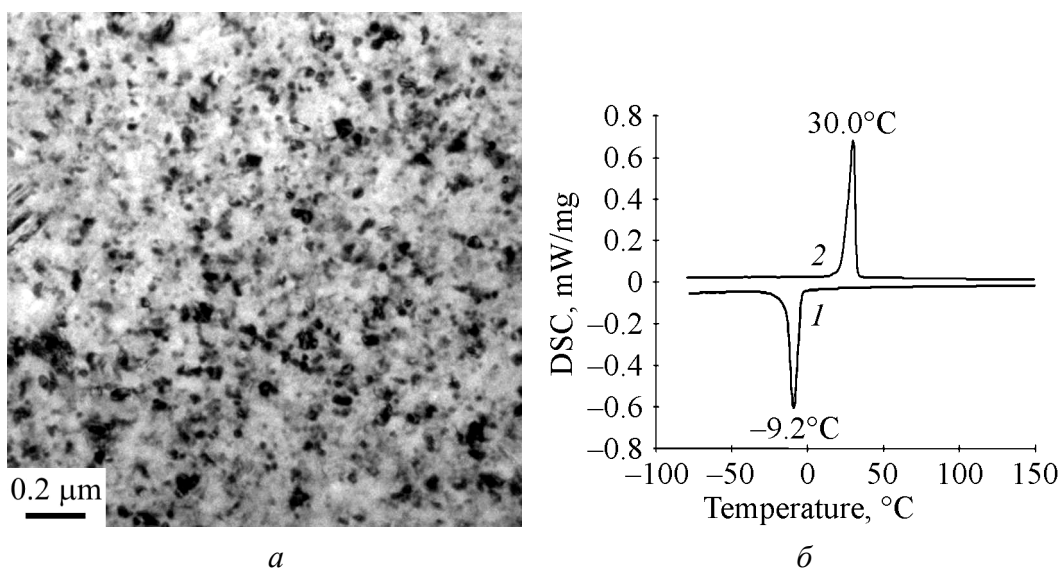


Рис. 1. Микроструктура (а) и термограммы (б) при охлаждении (кривая 1) и нагреве (кривая 2) в ЭПП-сплаве $Ti_{49.3}Ni_{50.7}$ после отжига

Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 2 представлены кривые растяжения без тока и с током для ЭПП-сплава $Ti_{49.3}Ni_{50.7}$ после отжига. На стадии деформации мартенсита после горизонтального плато в случае растяжения с током появляются значительные по величине (до 500 МПа) скачки напряжения, соответствующие кратковременному включению генератора (рис. 2,б). При растяжении без тока пики отсутствуют (рис. 2,а). В ЭПП-сплаве $Ti_{49.3}Ni_{50.7}$ без отжига скачки напряжения также наблюдаются, но их величина не превышает 200 МПа (рис. 3,а).

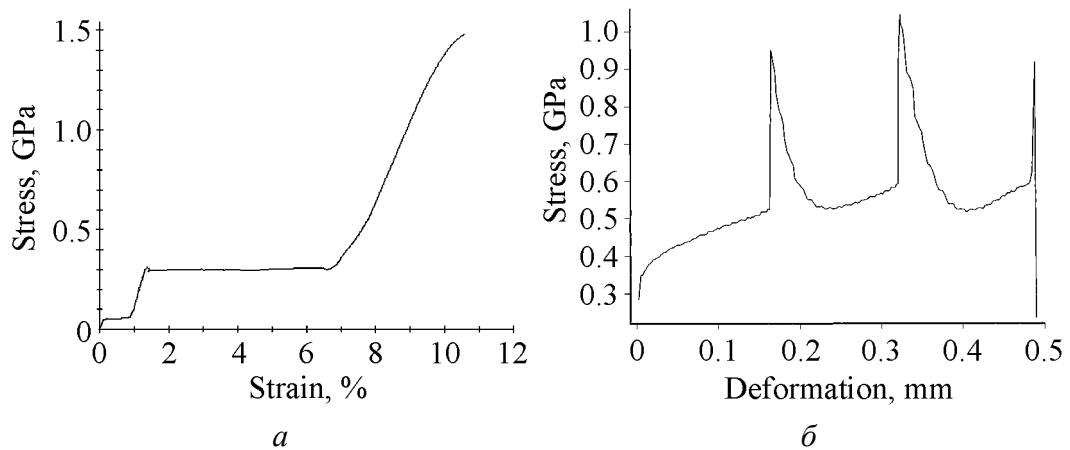


Рис. 2. Кривые растяжения ЭПП-сплава $Ti_{49.3}Ni_{50.7}$ после отжига: без тока (а) и с током (б)

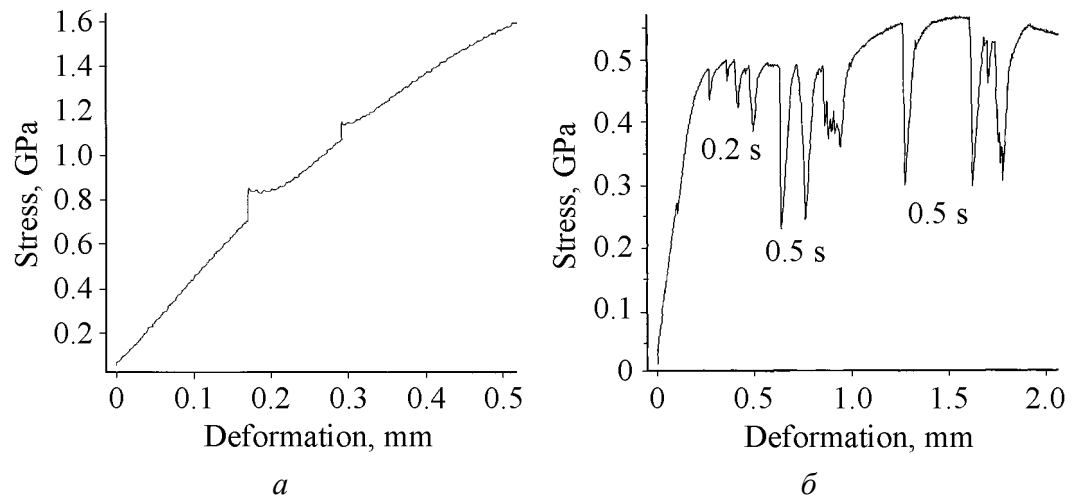


Рис. 3. Кривые растяжения с током: а – сплав $Ti_{49.3}Ni_{50.7}$, ЭПП + отжиг; б – нержавеющая сталь

В нержавеющей стали импульсный ток также вызывает появление пиков, однако их направление противоположно пикам в сплаве $Ti_{49.3}Ni_{50.7}$. Относительная амплитуда пиков напряжения уменьшается со временем воздействия тока до 10% и может быть сравнима с величиной ЭПЭ.

Анализ полученных данных показывает, что природа скачков напряжения в наноструктурном сплаве $Ti_{49.3}Ni_{50.7}$ не связана с ЭПЭ, поскольку их величина и знак не соответствуют наблюдаемым в [1–5] скачкам. Вероятной причиной скачков в сплаве $Ti_{49.3}Ni_{50.7}$ является тепловой эффект от импульсного тока, при котором имеет место прямое фазовое превращение мартенсита в аустенит и связанное с ним сокращение длины образца. Отжиг сплава после ЭПП увеличивает этот эффект.

Выводы

Импульсный ток плотностью около 10^3 А/мм² длительностью менее 1 с при растяжении образца наноструктурного сплава $Ti_{49.3}Ni_{50.7}$ вызывает скачки напряжения, природа которых не связана с ЭПЭ. Предполагается, что сильное повышение напряжения обусловлено обратным М → А-превращением, вызванным тепловым эффектом импульсного тока. Отжиг ЭПП-сплава снимает внутренние напряжения, облегчает мартенситное превращение и увеличивает амплитуду скачков напряжения почти в 2 раза.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №08-08-00497_а и № 08-08-08-90403-Укр_а.

1. О.А. Троицкий, Письма в ЖЭТФ **10**, 18 (1969).
2. К. Okazaki, М. Kagawa, Н. Conrad, Scr. Metallurgica **12**, 1063 (1978).
3. К. Okazaki, М. Kagawa, Н. Conrad, Scr. Metallurgica **13**, 277 (1979).
4. К. Okazaki, М. Kagawa, Н. Conrad, Scr. Metallurgica **13**, 473 (1979).
5. К. Okazaki, М. Kagawa, Н. Conrad, Mater. Sci. Eng. **45**, 109 (1980).
6. В.В. Столяров, У.Х. Угурчиев, И.Б. Трубицына, С.Д. Прокошкин, Е.А. Прокофьев, ФТВД **16**, № 4, 48 (2006).

В.В. Столяров, У.Х. Угурчиев

ВПЛИВ ІМПУЛЬСНОГО СТРУМУ НА ДЕФОРМАЦІЙНУ ПОВЕДІНКУ НАНОСТРУКТУРНОГО СПЛАВУ З ПАМ'ЯТТЮ ФОРМИ TiNi

Досліджено вплив імпульсного струму на деформаційну поведінку при одноосному розтягуванні та кімнатній температурі наноструктурного сплаву з пам'яттю форми TiNi. Показано, що напрям і величина стрибків напруження в досліджуваному матеріалі різко відрізняються від спостережуваних в чистих металах і сплавах без фазових перетворень при електропластичному ефекті (ЕПЕ).

V.V. Stolyarov, U.Kh. Ugurchiev

INFLUENCE OF PULSED CURRENT ON DEFORMATION BEHAVIOR OF NANOSTRUCTURED SHAPE MEMORY TiNi ALLOY

Influence of a pulsed current on deformation behavior is studied at tension and a room temperature of nanostructured shape memory TiNi alloy. It is shown that the direction and amplitude of stress jumps in investigated material sharply differ from those observed in pure metals and alloys without phase transformations under the electroplastic effect (EPE).

Fig. 1. Microstructure (*a*) and DSC curves (*b*) at cooling (curve 1) and heating (curve 2) of electroplastically rolled (EPR) Ti_{49,3}Ni_{50,7} alloy after annealing

Fig. 2. Stress-strain curves of EPR Ti_{49,3}Ni_{50,7} alloy after annealing: with no current (*a*) and with current (*b*)

Fig. 3. Stress-strain curves with current: *a* – Ti_{49,3}Ni_{50,7}, EPR + annealing; *b* – stainless steel