
**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕХАНИКА.
ДИАГНОСТИКА ИСПЫТАНИЯ**

УДК 621.791.70

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОВОГО ЭФФЕКТА
ПРИ РАСТЯЖЕНИИ БЕЗ ТОКА И С ТОКОМ**© 2021 г. У. Х. Угурчиев^{1,*}, Н. Н. Новикова^{1,**}¹ *Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия***e-mail: umar77@bk.ru****e-mail: natalnn3@mail.ru*

Поступила в редакцию 13.03.2021 г.

После доработки 06.06.2021 г.

Принята к публикации 24.06.2021 г.

Исследован тепловой эффект при различных видах деформации образцов из титановых сплавов.

Ключевые слова: титановые сплавы, тепловой эффект, прокатка, растяжение, электрический ток

DOI: 10.31857/S0235711921050138

Проблема повышения деформируемости и физико-механических свойств конструкционных материалов, особенно хрупких и малопластичных наноструктурных сплавов, является важной как в научном, так и в прикладном значении. К материалам с ограниченной деформационной способностью относятся исследуемые титановые сплавы — технически чистый титан ВТ1-0, двухфазный сплав ($\alpha + \beta$) ВТ6 и интерметаллид TiNi с эффектом памяти формы (ЭПФ), обладающие высоким комплексом служебных свойств, особенно в наноструктурном (НС) и ультрамелкозернистом (УМЗ) состояниях [1–5].

Получение длинномерных изделий тонкого сечения (проволоки, фольги, листа) с высокими механическими свойствами из этих сплавов является непростой задачей, что связано с быстрым упрочнением материала при холодной деформации, а деформирование при повышенных температурах приводит к снижению прочности. В качестве альтернативного решения можно рассматривать применение электропластической деформации (ЭПД), основанной на стимулирующем эффекте электрического тока.

Для определения механизма ЭПД важно оценить величину сопутствующих эффектов, в частности теплового эффекта $\Delta t = t_{\text{обр}} - t_{\text{комн}}$, где $t_{\text{обр}}$ — температура образца, $t_{\text{комн}}$ — комнатная температура при деформации, либо совместном действии деформации и тока. Рассмотрим результаты теоретического и экспериментального исследования теплового вклада в сплаве TiNi при прокатке и при растяжении с током и без тока.

В процессе электропластической прокатки (ЭПП) происходит повышение температуры за счет деформационного и электроимпульсного воздействия, т.е. пластической деформации и нагрева током. Генерируемый тепловой поток распределяется между валками и деформируемым образцом (полосой с размерами $2 \times 8 \times 130$ мм) пропорционально их теплофизическим свойствам.

Кинетическая энергия упругопластической деформации является источником контактного теплообразования при прокатке металлов. В зависимости от ее величины

Таблица 1. Тепловые и физико-механические свойства валков и материалов

Материал	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м °С)	Теплоемкость C , Дж/(кг °С)	Плотность ρ , кг/м ³	Прочность σ_B , МПа
<u>валки</u>				
90ХФ	44	46	—	990
<u>образцы</u>				
BT1-0	18.85	540	4505	375
BT6	8.37	0.58	4450	885
TiNi	18	490	6450	1000

контактная температура может колебаться от комнатной, при низких значениях энергии и небольших скоростях деформации, до температуры плавления — при больших значениях энергии и высоких скоростях деформации. Из-за дискретности площади контакта при прокатке необходимо различать среднюю контактную температуру, объемную и температурную вспышку.

Общее количество тепла, генерируемого при ЭПП распределится между прокатываемой полосой и валками в зависимости от их теплофизических свойств

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3, \quad (1)$$

где Q_1 , Q_2 , Q_3 — количество теплоты, соответственно, поглощенное полосой и валками.

Количество теплоты, поглощаемое двумя валками, одинаково: $Q_2 = Q_3$.

Общее количество теплоты, образующееся при прокатке с током, выраженное через мощность W , имеет вид

$$W = (PV + IU)\tau = Q, \quad (2)$$

где P — сила; V — скорость прокатки; I — сила тока; U — напряжение; τ — длительность действия тока.

С учетом формулы (2) запишем формулу (1)

$$(PV + IU)\tau = Q_1 + 2Q_2. \quad (3)$$

Тогда, при импульсных процессах при прокатке с током в связи с кратковременностью процесса для расчета контактной температуры между валками и прокатываемой полосой, температурных полей и градиента температуры при прокатке можно воспользоваться формулами, представленными в работе [6].

По данным [7] величина конвективной теплоотдачи с металлической поверхности составляет 60 ккал/м² ч, однако, в процессе листовой прокатки за доли секунды динамического контактирования вала с полосой мгновенная площадь их контакта составляет всего 2–3 мм², поэтому величина конвективной теплоотдачи мала и ею в балансе тепла пренебрегаем. Такая модель дана для конкретного способа деформации (прокатка). В ней не учтено структурное состояние материалов (размер зерен) и другой возможный способ деформации (растяжение).

Тепловые и физико-механические свойства прокатываемых материалов и валков приведены в табл. 1.

Тепловой эффект при растяжении без тока. Рассмотрим тепловой эффект при растяжении лопаточных образцов из нитинола (с размерами $0.3 \times 2 \times 50$ мм и с расчетной длиной 20 мм) с крупнозернистой структурой (КЗ) и зеренной нанокристаллической структурой (НС).

Процесс статического растяжения без тока сопровождается неоднородным нагревом образца, зависящим от структурного состояния материала. Для исходного

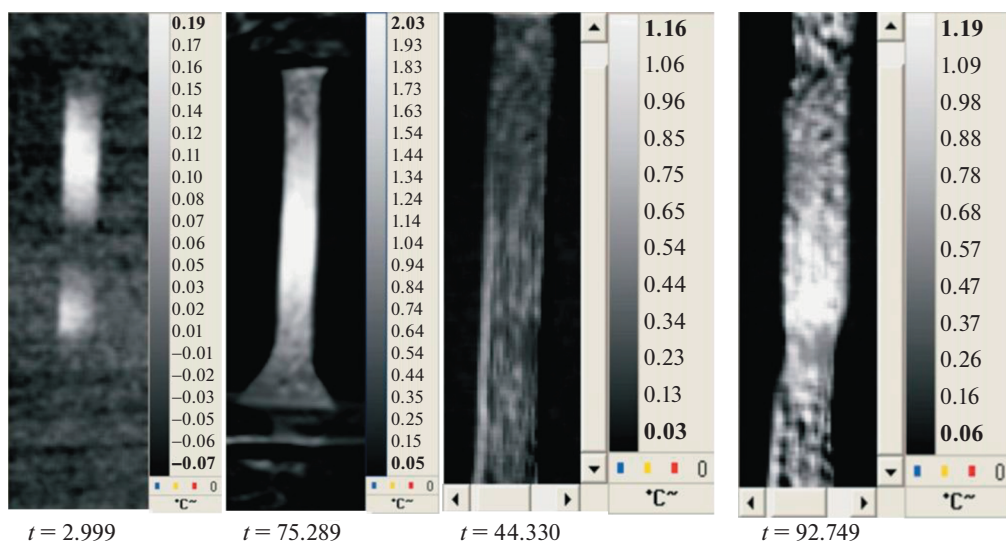


Рис. 1. Распределение температуры на поверхности образца в различные моменты времени: (а) – КЗ состояние; (б) – НС.

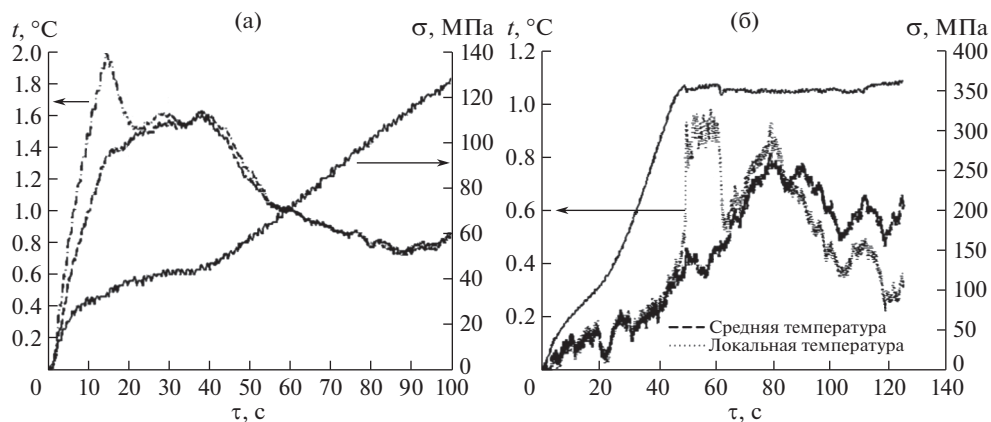


Рис. 2. Зависимость средней и локальной температуры и напряжения в закаленном (а) и НС (б) образце Ti-Ni от времени.

КЗ- и НС-образцов на термограммах наблюдаются полосы (участки) макро- или микронеоднородности размером, соответственно 3–5 мм (рис. 1а) и 200–300 мкм (рис. 1б), подъем температуры, в которых не превышает 2°C, по сравнению с комнатной температурой.

Для обоих случаев максимальная температура достигается на участке фазового превращения соответствующим плато (рис. 2а, б). В обоих случаях тепловой эффект связан с деформацией меньше, чем тепловой эффект от фазового превращения.

Тепловой эффект при растяжении с током. Наблюдаемые явления при растяжении с током носят более сложный характер по сравнению с обычным растяжением. Это свя-

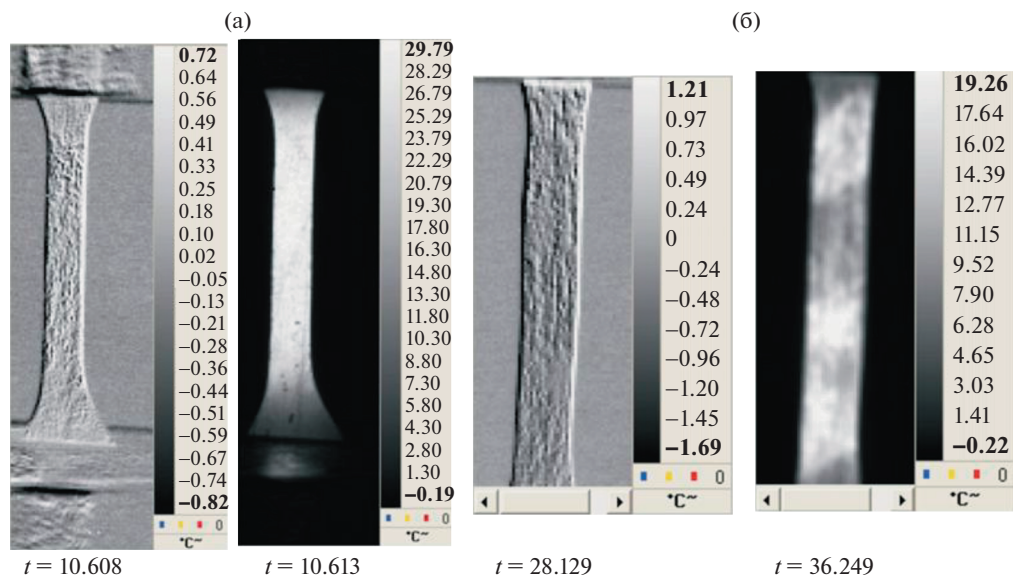


Рис. 3. Распределение температуры на поверхности образцов в КЗ – (а) и НС – (б) сплаве TiNi при растяжении с током.

зано с тем, что каждый импульс тока вызывает кратковременный разогрев – охлаждение, которые в свою очередь стимулируют прямое и обратное превращение аустенита $\leftrightarrow$ в мартенсит: $A \leftrightarrow M$.

Импульс тока в КЗ-образце вызывает мгновенный подъем температуры и связанное с ним обратное превращение $M \rightarrow A$, видимое на термограмме как светлое поле по всей длине образца (рис. 3а). На термограмме НС-образца такой же импульс тока вызывает такое же превращение, которое в отличие от КЗ-образца, стимулирует превращение $M \rightarrow A$ в виде отдельных полос (рис. 3б). Таким образом, в НС-состоянии фазовое превращение под действием одиночного импульса тока тормозится и осуществляется отдельными полосами по длине образца.

На рис. 4 приведены зависимости напряжения и средней температуры от времени при растяжении. Они показывают, что подъем температуры вызванный деформацией и током составляет до 45°C (рис. 4а) и 17°C (рис. 4б), соответственно, для КЗ и НС. На кривых растяжения каждый импульс тока соответствует скачку напряжения вверх или вниз. Природа указанных скачков в обоих состояниях связана с конкуренцией проявления двух одновременно действующих разнонаправленных эффектов – эффекта памяти формы (скачки вверх) и электропластического эффекта (скачки вниз). Подробно природа таких скачков рассматривается и объясняется в работе [8].

Тепловой эффект и, соответственно, подъем температуры при растяжении с током на два порядка выше, чем при растяжении без тока (сравни рис. 2 и 4).

Сравнение полученных выше результатов показывает, что величина теплового эффекта в случае КЗ-состояния выше, чем в НС-состоянии, причем наиболее заметно при растяжении с током. Полученный результат можно объяснить более низкой теплопроводностью сплавов в нанокристаллическом состоянии, что в свою очередь связано с высокой плотностью кристаллических дефектов (границ зерен, дислокаций). Действительно в обзоре [1] показано, что теплопроводность уменьшается с уменьшением размеров зерна.

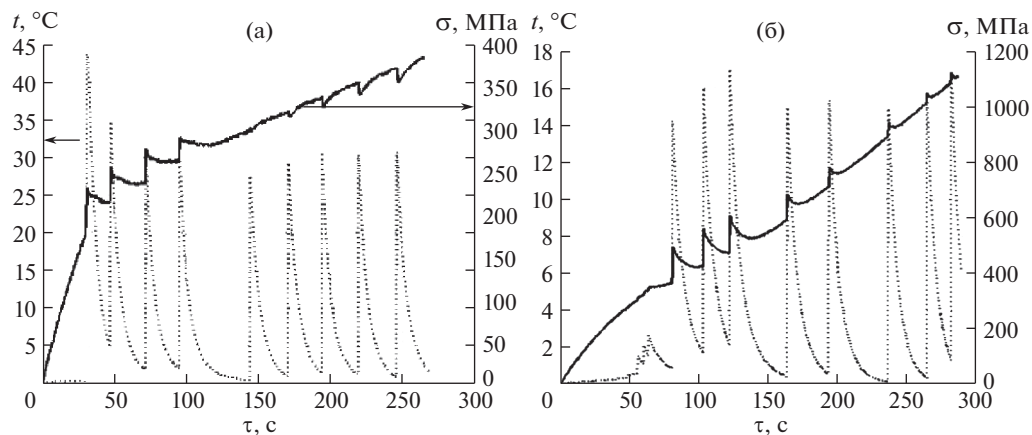


Рис. 4. Зависимость средней температуры и напряжения в КЗ – (а) и НС – (б) сплаве TiNi от времени при растяжении с током.

Выводы. При расчете теплового эффекта необходимо учитывать структурное состояние материалов (размер зерен). Величина теплового эффекта в случае КЗ состояния выше, чем в НС состоянии, причем наиболее заметно при растяжении с током. Тепловой эффект при растяжении с током на два порядка больше, чем при растяжении без тока.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Валиев Р.З., Александров И.В. Объемные наноструктурные материалы: получение, структура и свойства. М.: ИКЦ “Академкнига”, 2007. 398 с.
2. Носкова Н.И., Перетурина И.А., Столяров В.В., Елкина О.А. Прочность и структура нанокристаллического титана // ФММ. 2004. Т. 97. № 5. С. 106.
3. Столяров В.В., Прокофьев Е.А., Прокошкин С.Д., Добаткин С.В., Трубицына И.Б., Хмелевская И.Ю., Пушин В.Г., Валиев Р.З. Структурные особенности, механические свойства и эффект памяти формы в TiNi сплаве, полученном равноканальным угловым прессованием // ФММ. 2005. Т. 100. № 6. С. 91.
4. Столяров В.В. Структура и свойства ультрамелкозернистого титанового сплава ВТ6, полученного РКУП // Машиностроение и инженерное образование. 2010. № 2. С. 30.
5. Хасьянова Д.У. Контроль основных характеристик металлов, обладающих эффектом памяти формы // Вестник Брянского государственного технического университета. 2018. № 9 (70). С. 21.
6. Албагачиев А.Ю., Угурчиев У.Х. Моделирование температуры при прокатке с импульсным воздействием электрического тока // В сборнике трудов конференции “Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении – 2014”. 2014. С. 25.
7. Чичинадзе А.В., Берлинер Э.М., Браун Э.Д. и др. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / Под общ. ред. А.В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 2003. 576 с.
8. Угурчиев У.Х., Новикова Н.Н. Особенности обработки и получение изделий из сплавов на основе TiNi, претерпевающих фазовые превращения // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2020. № 3. С. 91.