

# Тепловое действие импульсного тока в сплавах с различными теплофизическими свойствами

А. А. Мисоченко, В. В. Столяров

Исследовано тепловое воздействие импульсного тока в сплавах различного назначения: с памятью формы Ti49,2Ni50,8, конструкционных Д16 и ВТ6. Обнаружено, что тепловое воздействие при обработке импульсным током зависит не только от электро- и теплопроводящих свойств сплавов, но и снижается с повышением дисперсности и уровня внутренних напряжений микроструктуры. Экспериментально промоделирован разогрев по режимам, аналогичным режимам тока при прокатке исследованных сплавов.

**Ключевые слова:**

электропластический эффект, деформации с током, электроимпульсная обработка, дисперсность структуры, тепловой эффект при обработке током

УДК 620.1, 67.017 | ВАК 2.6.17

DOI: 10.22184/2499-9407.2023.33.4.34.41

## Введение

В последнее время активно развивается научное направление, связанное с получением объемных наноструктурных (НС) материалов, свойства которых превосходят крупнозернистые аналоги. Одним из методов создания НС-состояния в сплавах является метод интенсивной пластической деформации (ИПД) с использованием импульсного тока [1, 2]. Было показано, что введение тока в процессе прокатки способствует повышению деформационной способности материалов, формированию в них НС-состояния и повышению физико-механических и функциональных свойств [2, 3, 4]. Метод основан на электропластическом эффекте (ЭПЭ) [5, 6], природа которого для современных материалов изучена недостаточно, а предполагаемые физические механизмы практически не подтверждены экспериментально.

Одним из реальных механизмов, повышающих деформационную способность материалов, может быть тепловое воздействие электрического тока. Оценка теплового воздействия на материал при деформации с током является актуальной научной проблемой, поскольку ее решение

позволит отделить тепловой вклад от других физических механизмов ЭПЭ (электрон-дислокационное взаимодействие, скин-эффект, пинч-эффект и др.) [6]. Существующие теоретические модели оценки нагрева металлов электрическим током включают различные составляющие (эмиссия электронов, решеточная и электронная теплопроводность и др.) [7, 8], учесть каждый из которых сложно.

Кроме того, сложность оценки заключается в том, что температура образца зависит и от физических характеристик материала, и от геометрии образца, а зависимость от плотности тока носит немонотонный характер [9]. Экспериментальным способом оценки распределения температуры в металлических образцах является методика с использованием инфракрасной камеры [10]. Однако недостатком этого метода является его зависимость от излучательной способности объекта. Основной сложностью определения температуры образца при прокатке является аккумуляция части тепла в валках, а также деформация термпары при непосредственном ее соединении с прокатываемым образцом. Авторы [11, 12] оценивают вклад теплового эффекта

путем сравнения кривых растяжения с током и без тока, но при нагреве феном до аналогичных температур. Кроме того, температура образца может зависеть от структурно-фазового состояния, которое различается в зависимости от термомеханической обработки.

В этой связи в настоящей работе исследуется влияние дисперсности структуры на величину теплового эффекта при электроимпульсной обработке материалов с разной электро- и теплопроводностью.

### Материалы и методы исследования

Материалами исследования служили сплавы в виде прутков  $\varnothing 6$  мм в крупнозернистом (КЗ) состоянии:  $Ti_{49,2}Ni_{50,8}$  с памятью формы, конструкционные сплавы Д16 и ВТ6. За исходное состояние сплава  $Ti_{49,2}Ni_{50,8}$  и ВТ6 принято состояние после закалки в воду при 750 и 850 °С, соответственно; сплава Д16 – после закалки при 515 °С (5 ч). Выбор указанных материалов обусловлен их различными электро- и теплофизическими свойствами (табл. 1) [13–15], что позволит сравнить их влияние на нагрев током.

Для получения ультрамелкозернистой (УМЗ) и мелкозернистой (МЗ) структур исследуемые сплавы подвергались прокатке с импульсным током до 3 мм по режиму:

- плотность тока:  $j = 100 \text{ А / мм}^2$ ;
- длительность импульса: 120 мкс;
- частота импульсов:  $f = 1000 \text{ Гц}$ ;
- скважность:  $Q = 10$ ;
- скорость прокатки:  $v = 5 \text{ см / с}$ ;
- обжатие за проход: 50 мкм.

После каждого шага прокатки образцы выдерживали на воздухе или охлаждали в воде, чтобы избежать влияния возможного нагрева. Истинную деформацию  $e$  при прокатке вычисляли по изменению площади поперечного сечения образца

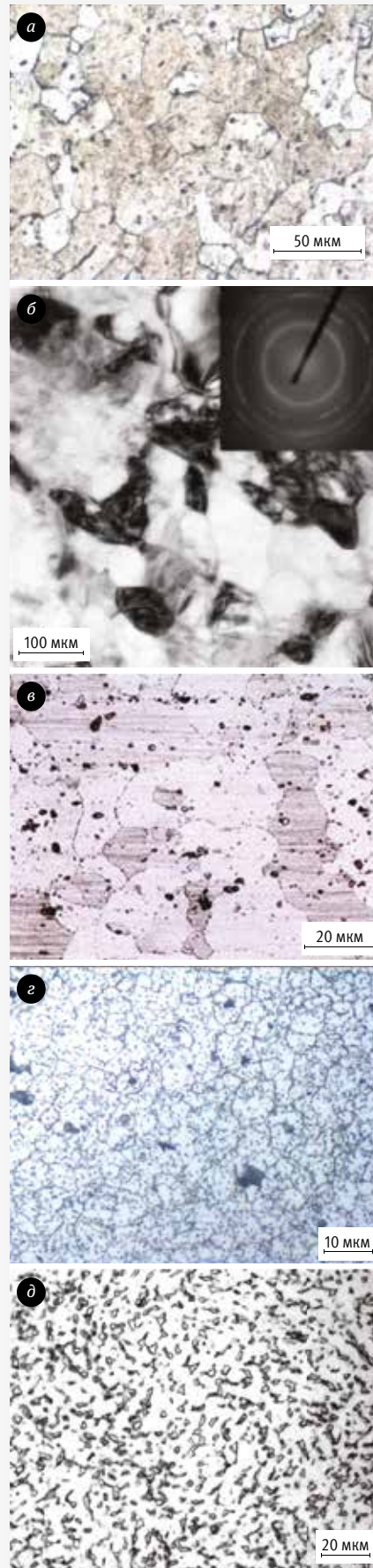
$$e = \ln(S_0 / S),$$

где  $S_0, S$  – площадь поперечного сечения образца до и после прокатки.

Образование УМЗ-структуры достигалось применением постдеформационного отжига при 500 °С для сплава TiNi ( $e = 1,2$ ) и 190 °С – для Д16 ( $e = 1,4$ ). Полученный размер

**Таблица 1.** Электро- и теплофизические свойства исследуемых материалов

Сплав	Коэффициент теплопроводности, $\lambda$ , Вт/м·К	Удельное электросопротивление при 20 °С, $\rho$ , Ом·мм
ВТ6	8	$1,6 \cdot 10^{-3}$
TiNi	18	$0,715 \cdot 10^{-3}$
Д16	130	$0,086 \cdot 10^{-3}$



**Рис. 1.** Микроструктура сплавов в КЗ (а, в) и МЗ (б, з, д) состояниях: а, б –  $Ti_{49,2}Ni_{50,8}$ , в, з – Д16, д – ВТ6

зерен соответствует 50 мкм (КЗ) и 90 нм (УМЗ) для сплава TiNi (рис. 1 а, б); 30 мкм (КЗ) и 6 мкм (МЗ) для сплава Д16 (рис. 1 в, г). Размер зерен в сплаве ВТ6 уже после закалки с 850 °С соответствовал 8–10 мкм для α-фазы и 2–4 мкм для β-фазы (рис. 1 д). Микроструктуру исследовали методами оптической металлографии на микроскопе Olympus GX51 и просвечивающей электронной микроскопии на микроскопе JEM – 100 В при ускоряющем напряжении 100 кВ.

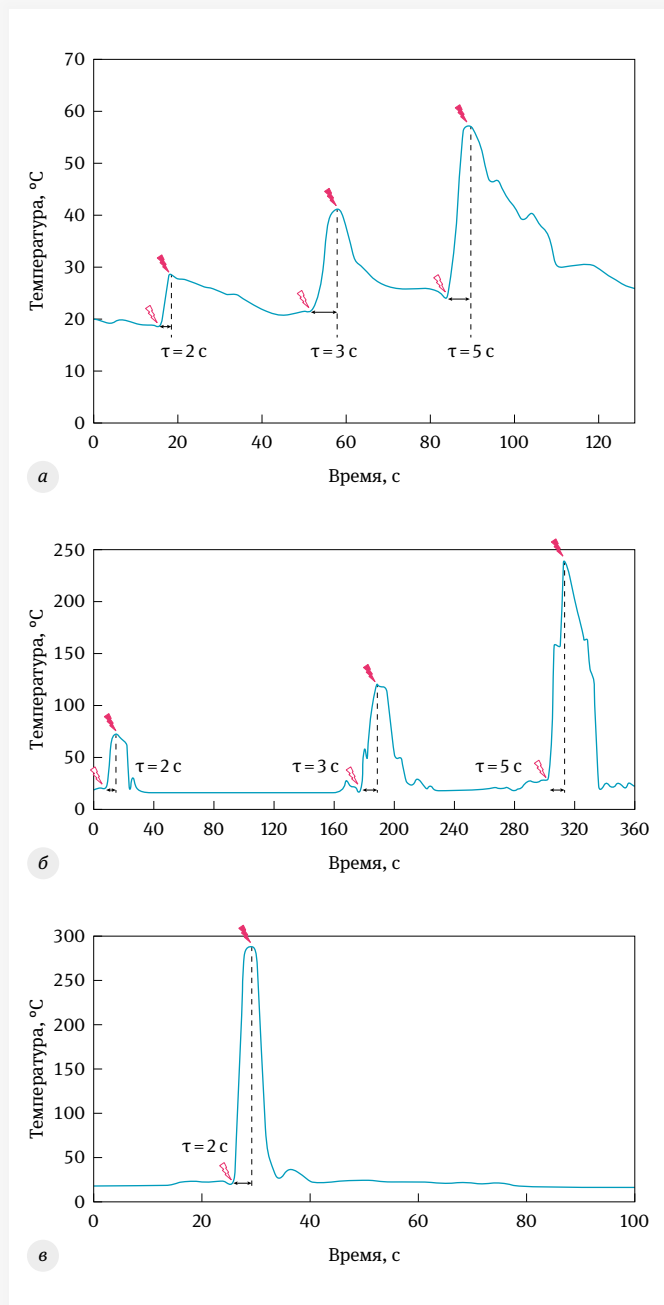


Рис. 2. Влияние длительности действия тока на температуру в КЗ сплавах Д16 (а), TiNi (б) и ВТ6(в):  $\blacktriangleright$  – момент включения тока;  $\blacktriangleleft$  – момент выключения тока;  $\tau$  – длительность действия тока

Тепловое воздействие тока определяли на проволочных образцах  $\varnothing 3 \times 30$  мм после пропускания импульсного тока ( $j = 100$  А / мм<sup>2</sup>;  $f = 1000$  Гц;  $\tau = 120$  мкс) в течение 2, 3 и 5 с ( $t$ ). При этом с помощью термопары «хромель – капель», закрепленной на поверхности образца с помощью непроводящего зажима, и осциллографа измеряли температуру образца. Параметры импульсного тока и длительность его действия при исследовании теплового эффекта соответствовали режиму, при котором осуществлялась прокатка.

### Результаты эксперимента

Измерения показали, что в исходных КЗ сплавах с увеличением длительности действия тока от 2 до 5 с тепловой эффект  $\Delta T$ , в соответствии с законом Джоуля – Ленца, закономерно повышается от 30–70 до 55–250°C для сплава Д16 и TiNi, соответственно (рис. 2 а, б). Для сплава ВТ6 был измерен тепловой эффект лишь при двух секундах ввиду его сильного разогрева (250 °С) (рис. 2 в).

Отметим, что максимальный разогрев соответствует сплаву ВТ6 с наиболее низкой теплопроводностью ( $\lambda = 8$  Вт / (м · К)) и наиболее высоким электросопротивлением ( $1,6 \cdot 10^{-3}$  Ом · мм); минимальный разогрев – сплаву Д16 с  $\lambda = 130$  Вт / (м · К) и  $\rho = 0,086 \cdot 10^{-3}$  Ом · мм. Поскольку при повышении температуры вследствие усиления колебательных движений атомов рассеивание электронов на них увеличивается, это приводит к уменьшению теплопроводности. Таким образом, чем больше значение коэффициента  $\lambda$ , тем интенсивнее в материале процесс теплоотведения, то есть меньше количество тепла, которое аккумулирует образец и, соответственно, его температура [15]. Другой физической причиной теплового действия тока является удельное электросопротивление, чем меньше которое, тем меньше нагрев. Таким образом, тепловой эффект при обработке током зависит от электро- и теплопроводящих свойств материала.

Поскольку и электросопротивление, и теплопроводность являются структурнозависимыми характеристиками, рассмотрим тепловое воздействие тока аналогичной длительности в тех же сплавах с меньшим размером зерен в структуре. Сравнение максимальных температур разогрева в образцах с разным размером зерна (до и после прокатки с током) позволило обнаружить зависимость теплового эффекта от степени дисперсности структуры, которая выражена сильнее в сплаве  $Ti_{49,2}Ni_{50,8}$  (рис. 3).

Видно, что предварительная деформационная обработка с последующим отжигом снижает тепловой эффект при дальнейшей обработке током (линии 1 и 3 на рис. 3). В сплаве  $Ti_{49,2}Ni_{50,8}$  в наноструктурном состоянии (средний размер зерен 90 нм) тепловой эффект на 40–90 °С меньше, чем в крупнозернистом состоянии (рис. 3 а). Аналогично в сплаве Д16 тепловой эффект отличается на 7–20 °С в зависимости от размера зерна (рис. 3 б). Примечательно, что электросопротивление и теплопроводность имеют

Промышленно-энергетический форум  
и специализированная выставка предприятий

# ПРОМ-ЭНЕРГО VOLGA' 2023

22-24 ноября  
Волгоград Арена



[www.promenergovolga.ru](http://www.promenergovolga.ru)

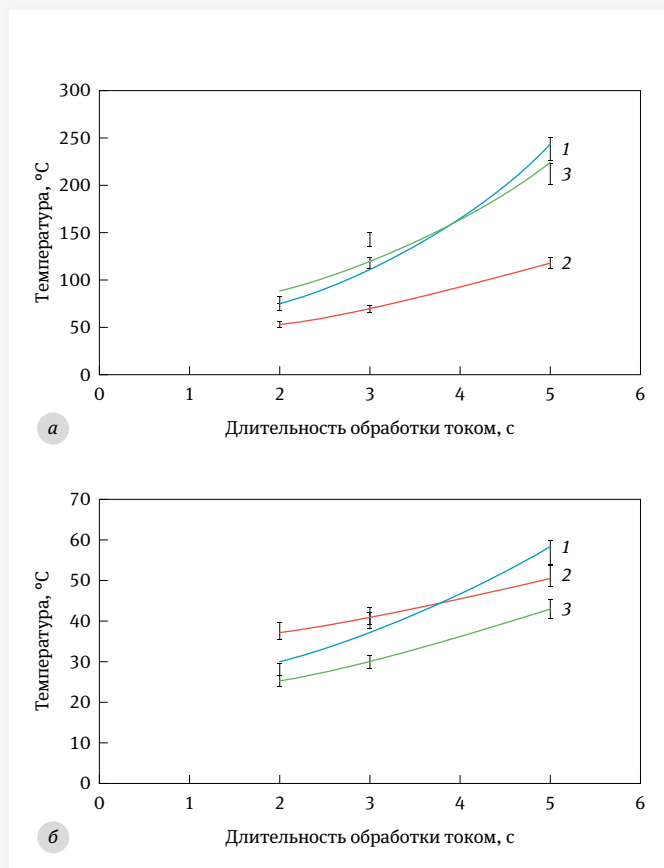
ВЦ ЦАРИЦЫНСКАЯ ЯРМАРКА

тел./факс: (8442) 26-50-34

[www.zarexpo.ru](http://www.zarexpo.ru)

противоположную зависимость от размера структурных элементов [16], однако результаты данной работы свидетельствуют о преимущественном влиянии последней. Повышение коэффициента теплопроводности в этом случае связано с тем, что в результате деформации и последующего отжига в сплавах формируется сильно измельченное или даже наноструктурное состояние, в результате чего количество дефектов в структуре и протяженность границ заметно увеличивается. Поскольку дефекты способствуют рассеянию на них электронов, это способствует снижению теплового эффекта от воздействия током.

Линия 2 на рис. 3 соответствует деформированному состоянию после прокатки с током, но без отжига, то есть в данном случае зеренная структура отсутствует. Деформация создает в сплавах дефекты, которые аналогично повышению протяженности границ должны уменьшать теплопроводность. Однако согласно рис. 3 этого не происходит, и тепловой эффект в деформированных методом прокатки с током сплавах остается на уровне исходного крупнозернистого закаленного сплава (линии 1 и 2 на рис. 3).



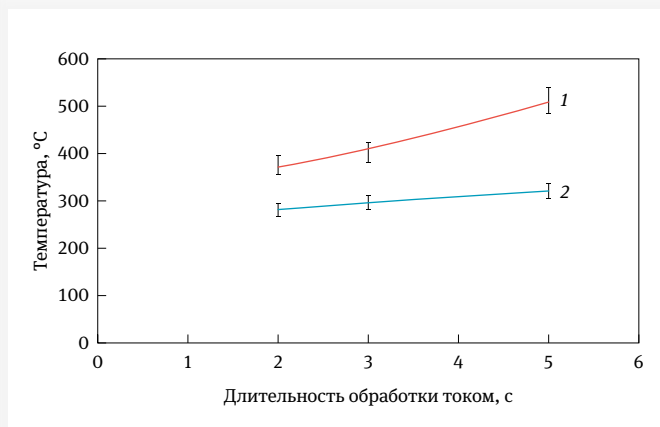
**Рис. 3.** Влияние длительности действия тока на температуру в сплавах Ti<sub>49,2</sub>Ni<sub>50,8</sub> (а) и D16 (б): 1 – КЗ-состояние; 2 – деформированное состояние после прокатки с током; 3 – после прокатки с током и отжига (меньший размер зерна)

Такое anomalous поведение, вероятно, связано с особенностью метода деформирования, то есть присутствием импульсов тока уже во время прокатки. Возможно, импульсы тока способны действовать на скопления клубков дислокаций, образующихся в результате деформационного наклепа, разряжая эти скопления, частично уменьшая количество дефектов. Однако этот вывод требует дополнительных структурных исследований.

Для объяснения отсутствия изменений в тепловом эффекте в образцах после прокатки с током, несмотря на наклеп и увеличение дефектов по сравнению с недеформированным состоянием, аналогично вышеописанным исследованиям было проведено сравнение температур в сплаве D16 после деформации методами прокатки с током и без тока (рис. 4).

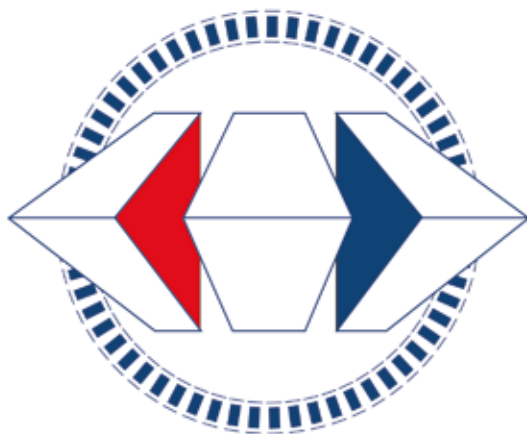
Видно, что тепловой эффект заметно выше (на 10–20 °С) в том случае, когда образец подвергнут прокатке с током. Таким образом, выявлена зависимость теплового эффекта от способа прокатки. Это согласуется с ранее обнаруженным эффектом релаксационного воздействия тока на структуру при деформировании: после прокатки с током при равных величинах деформации (в структуре сплава TiNi наблюдаются меньшая степень фрагментации и повышение температуры рекристаллизации по сравнению с холодной прокаткой) [17].

Исследованный выше тепловой эффект является результатом воздействия импульсного тока на материал, но без деформации. Однако интерес представляет также тепловое действие тока при одновременном воздействии пластической деформации, например, прокаткой. Поскольку длительность действия импульсов, равная двум секундам, соответствует времени нахождения образца между валками в процессе прокатки с током (при длине образца 100 мм),



**Рис. 4.** Влияние длительности действия тока и метода прокатки на температуру в сплаве D16: 1 – прокатка с током, 2 – холодная прокатка

**28-30  
НОЯБРЯ 2023**



**РОССИЙСКИЙ  
ПРОМЫШЛЕННИК**  
МЕЖДУНАРОДНЫЙ ФОРУМ-ВЫСТАВКА



**УСТОЙЧИВОСТЬ  
И РАЗВИТИЕ**

СООРГАНИЗАТОРЫ:



ПРАВИТЕЛЬСТВО  
САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

**EXPOFORUM**

**12+**

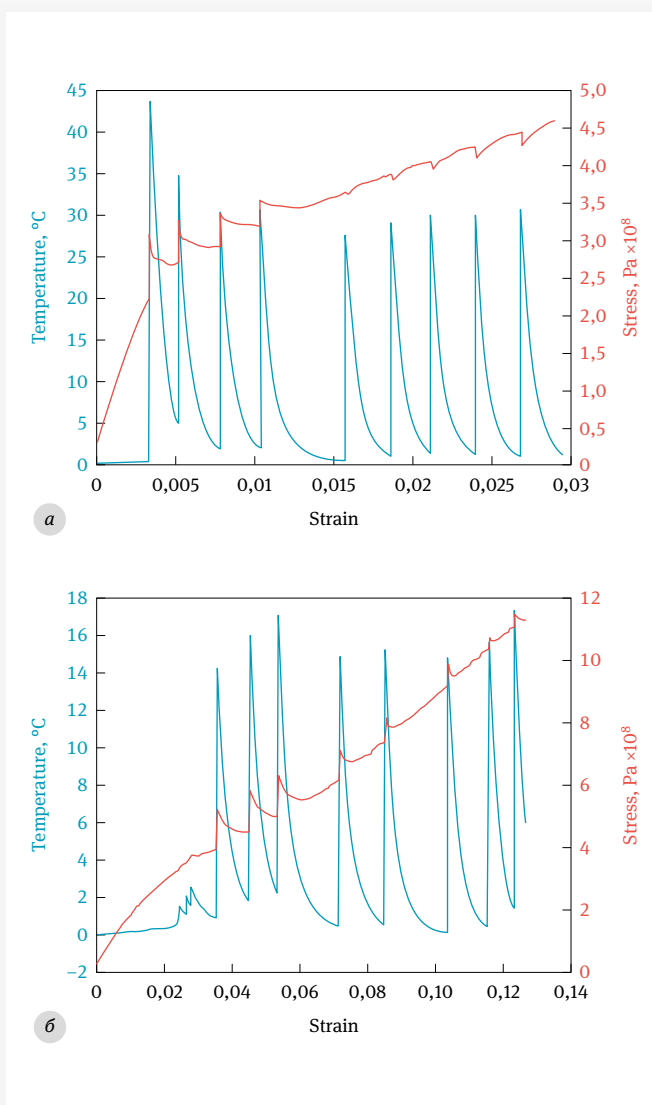
**Таблица 2.** Температура образцов при электроимпульсном воздействии в течение 2 с

Сплав	Размер зерен, мкм	Температура, °С
Ti <sub>49,2</sub> Ni <sub>50,8</sub>	50	70
	0.09	50
ВТ6	8–10 (α-фаза) 2–4 (β-фаза)	250
Д16	30	30
	6	25

то тепловой эффект при пропускании тока в течение этого времени можно условно сопоставить с тепловым эффектом в процессе прокатки. Хотя в реальности с учетом разогрева валков и разницы в отводе тепла нагрев при прокатке с током должен быть существенно меньше. С учетом этого, измеренный условный максимальный тепловой эффект в процессе прокатки с током ( $j=100 \text{ A/мм}^2$ ;  $f=1000 \text{ Гц}$ ;  $\tau=120 \text{ мкс}$ ) представлен в табл. 2.

В сплаве ВТ6 указанные режимы тока приводят к значительному тепловому эффекту. Однако в сплаве TiNi температура при обработке током в течение двух секунд не превышает 70 °С, что может свидетельствовать об отсутствии значительного теплового воздействия, которое могло бы вызвать существенное снижение прочности материала в процессе прокатки с током по аналогичному режиму. Поскольку тепловой эффект в сплаве Д16 не превышает 30 °С (при  $t=2 \text{ с}$ ), то, вероятно, он не будет существенно отличаться и в других сплавах на основе Al. Следовательно, одно лишь тепловое воздействие не может объяснить факт многократного повышения деформационной способности в процессе прокатки с током по сравнению с традиционными методами холодной деформации, который наблюдался в работе [18]. В этой связи, помимо теплового воздействия при деформации с током, следует рассматривать и другие возможные механизмы повышенной деформируемости, например, пондеромоторные силы, «электронный ветер», скин-эффект, образование дискретных бризеров и т. д.

Отметим, что полученные в работе зависимости теплового эффекта от размера зерна в структуре хорошо согласуются с полученными ранее [19] результатами измерения температуры при растяжении с импульсным током с помощью инфракрасной камеры (рис. 5). Показано, что в крупнозернистом состоянии нагрев не превысил 45 °С, в мелкозернистом – эта величина существенно меньше и не превышает 17 °С при плотности тока  $j=1000 \text{ A/мм}^2$ . Видно, что при наложении температурных импульсов на



**Рис. 5.** Зависимость средней температуры и напряжения в крупнозернистом (а) и мелкозернистом (б) образце TiNi от времени при растяжении с импульсным током ( $j=1000 \text{ A/мм}^2$ )

кривую «напряжение – деформация» при растяжении с током сплава TiNi пики от них совпадают со скачками напряжения, которые свидетельствуют о проявлении электропластического эффекта [20]. Такое совпадение пиков подтверждает наличие нагрева как одной из составляющих механизма электропластического эффекта, однако низкие абсолютные значения температур подтверждают наличие других физических механизмов, оценка которых требует дополнительных исследований.

Таким образом, проведенное исследование показало, что тепловой эффект при обработке током зависит от тепло- и электропроводящих свойств материала, размера зерен структуры и способа деформирования. Показано, что тепловой эффект при обработке током по режимам, аналогичным прокатке с током ( $t=2 \text{ с}$ ), не

превышает 70 °С в сплаве с памятью формы и вдвое меньше в сплаве Д16.

## Выводы

Тепловой эффект при обработке импульсным током КЗ сплавов тем выше, чем меньше коэффициент теплопроводности сплава и выше удельное электросопротивление. При обработке по режимам, аналогичным режимам при прокатке с током, тепловой эффект не превышает 70 °С в сплаве  $Ti_{49,2}Ni_{50,8}$  и 30 °С в сплаве Д16. Наибольший разогрев при этом соответствует сплаву ВТ6 и достигает 250 °С.

Тепловой эффект при обработке импульсным током зависит от структурного состояния сплава, он снижается с уменьшением размера зерна.

Тепловой эффект электроимпульсного тока зависит от способа предварительной подготовки сплава Д16. Он выше в том случае, когда сплав подвергнут прокатке с током по сравнению с прокаткой без тока при одинаковой степени деформации.

Низкие значения температур при обработке импульсным током в сплаве Д16 (не более 30 °С при плотности тока  $j = 100 \text{ А/мм}^2$ ) подтверждает наличие, помимо теплового воздействия, других физических механизмов, сопровождающих электропластический эффект.

## Литература

1. **Tilak Kumar J. V., Jayaprakasam S., Senthil Kumar V. S., Padmanabhan K. A., Frolova A., Stolyarov V.** On the microstructure and tensile behaviour of nanostructured NiTi alloy produced by electroplastic rolling / Letters on Materials. 2022. V. 12. No. 2 (46). PP. 83–88.
2. **Столяров В. В.** Влияние комбинированных схем деформации на структуру и механические свойства титановых сплавов // Актуальные проблемы в машиностроении. 2015. № 2. С. 358–362.
3. **Меденцов В. Э., Столяров В. В.** Особенности деформирования, структура и механические свойства сплава ВТ6 при электропластической прокатке // Деформация и разрушение материалов, 12 (2012) 37–41.
4. **Potapova A. A., Resnina N. N., Stolyarov V. V.** Shape memory effects in TiNi-based alloys subjected to electroplastic rolling // Journal of Materials Engineering and Performance, 7 (2014) 2391–2395.
5. **Спицын В. И., Троицкий О. А.** Электропластическая деформация металлов. М.: Наука, 1985.
6. **Троицкий О. А.** Электропластический эффект в металлах: монография. М.: Ким Л. А., 2021. 468 с.
7. **Caro A., Victoria M.** Ion-electron interaction in molecular-dynamics cascades // Phys. Rev. A, 40 (5) (1989) 2287–2291.
8. **Nordlund K., Wei L., Zhong Y., Averback R. S.** Role of electron-phonon coupling on collision cascade development in Ni, Pd, and Pt // Phys. Rev. B, 57 (1998) 13965–13968.
9. **Parviainen S., Djurabekova F., Timko H., Nordlund K.** Electronic processes in molecular dynamics simulations of nanoscale metal tips under electric fields // Computational Material Science, 50 (2011) 2075–2079.
10. **Иванов А. М., Лукин Е. С.** // Деформация и разрушение материалов, 6 (2008) 39–43.
11. **Корольков О. Е., Столяров В. В.** Влияние режимов многоимпульсного тока и теплового нагрева на механическое поведение при растяжении титана Grade 4 // СТАНКОИНСТРУМЕНТ. 2022. № 4(029). С. 62–67.
12. **Пахомов М. А., Столяров В. В.** Особенности электропластического эффекта в моно- и поликристаллическом алюминии // Металловедение и термическая обработка металлов. 2021. № 5 (791). С. 8–14.
13. **Гува А. Я.** Краткий теплофизический справочник. Новосибирск: Сибвузиздат, 2002.
14. Таблицы физических величин / Под ред. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976.
15. **Бледнова Ж. М.** // Электронный научный журнал КубГАУ, 107(03) (2015) <http://ej.kubagro.ru/2015/03/pdf/58.pdf>
16. **Булат Л. П., Драбкин И. А., Каратаев В. В., Освенский В. Б., Пшенин-Северин Д. А.** Влияние рассеяния на границах на теплопроводность наноструктурированного полупроводникового материала на основе твердого раствора  $BixSb_{2-x}Te_3$  // Физика твердого тела. 2010. Т. 52, вып. 9. С. 1712–1716.
17. **Potapova A. A., Stolyarov V. V.** Relaxation effect of pulse current on TiNi structure during rolling // Materials Science and Technology. V. 31. No. 13a (2015) 1541–1544.
18. **Бродова И. Г., Ширинкина И. Г., Астафьев В. В., Яблонских Т. И., Потапова А. А., Столяров В. В.** Влияние импульсного тока на структуру алюминиевого сплава системы AL–MG–SI при холодной деформации // Физика металлов и металловедение, 114(11) (2013) 1019–1025.
19. **Угурчиев У. Х., Пантелеев И. А., Плехов О. А. и др.** Бернштейновские чтения по термомеханической обработке металлических материалов. М.: МИСиС, 2009.
20. **Федоткин А. А., Столяров В. В.** Особенности деформационного поведения наноструктурных титановых сплавов при растяжении под действием импульсного тока // Машиностроение и инженерное образование, 1 (30) (2012) 28–35.

## Авторы

**Мисоченко Анна Александровна** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института машиноведения им. А. А. Благонравова РАН

**Столяров Владимир Владимирович** – доктор технических наук, главный научный сотрудник Института машиноведения им. А. А. Благонравова РАН