

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ / INSTRUMENTS AND METHODS OF EXPERIMENTAL PHYSICS

Оригинальная статья / Original article
УДК 621.7:621.3.089

doi: 10.15507/2658-4123.034.202403.461-473



Критические параметры атермического электропластического эффекта в металлических материалах

В. В. Столяров 

*Институт машиноведения РАН
(г. Москва, Российская Федерация)*

 vlstol@mail.ru

Аннотация

Введение. Пластическая деформация и электрический ток, действующие раздельно, обычно оказывают противоположное влияние на деформационное поведение и напряжения течения в электропроводящих материалах. В случае совместного действия пластической деформации и приложенного электрического тока результат не является заранее предсказуемым. Исследование синергетического эффекта деформации и электрического тока может быть использовано для обработки металлов давлением.

Цель исследования. Демонстрация наличия пороговых параметров импульсного тока, при которых проявляется атермический электропластический эффект в различных материалах.

Материалы и методы. Выполнены испытания на растяжение при различных режимах тока, которые исключают повышенный вклад теплового эффекта в снижение напряжений течения – плотности и скважности. Изучены фрактографические особенности поверхности разрушения методом растровой сканирующей микроскопии. Определены пороговые значения параметров тока, при которых возникают скачки напряжения, связанные с электропластическим эффектом.

Результаты исследования. Показано влияние плотности и скважности импульсного тока на проявление электропластического эффекта. Оба параметра имеют пороговые значения, выше которых электропластический эффект становится наблюдаемым (при плотности $j > j_{кр}$) или атермическим (при скважности $Q > Q_{кр}$). Все виды растяжения сопровождаются вязким характером разрушения и появлением пор, наиболее интенсивно образующихся при введении тока.

Обсуждение и заключение. В сплавах с низким электросопротивлением пороговая плотность импульсного тока, соответствующая возникновению электропластического эффекта, выше, чем в сплавах с высоким электросопротивлением. Повышенные скважности импульсного тока снижает температуру деформируемого образца, что позволяет рассматривать электропластический эффект как атермический.

© Столяров В. В., 2024



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Ключевые слова: растяжение, импульсный ток, плотность тока, скважность, поверхность разрушения

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Столяров В. В. Критические параметры атермического электропластического эффекта в металлических материалах // Инженерные технологии и системы. 2024. Т. 34, № 3. С. 461–473. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202403.461-473>

Critical Parameters of the Athermal Electroplastic Effect in Metallic Materials

V. V. Stolyarov ✉

*Mechanical Engineering Research Institute
of the Russian Academy of Sciences
(Moscow, Russian Federation)*

✉ vlstol@mail.ru

Abstract

Introduction. Plastic deformation and electric current, acting separately, usually have opposite effects on the deformation behavior and flow stresses in electrically conductive materials. In the case of the combined action of plastic deformation and applied electric current, the result is not pre-predictable. The study of the synergistic effect of deformation and electric current can be used for metal forming.

Aim of the Study. The study is aimed at demonstrating the existence of impulse current threshold parameters at which the athermal electroplastic effect manifests itself in various materials.

Materials and Methods. Tensile tests were performed at various current modes, which exclude the increased contribution of the thermal effect to the reduction of flow stresses – current density and duty cycle. The fractographic features of the fracture surface were studied using raster scanning microscopy. There were found the threshold values of current parameters at which stress jumps associated with the electroplastic effect occur.

Results. The influence of the density and duty cycle of the impulse current on the manifestation of the electroplastic effect is shown. Both parameters have threshold values, above which the electroplastic effect becomes observable (at density $j > j_{sp}$) or athermal (at duty cycle $Q > Q_{sp}$). All types of tension are accompanied by a viscous fracture and void formation, which is most intensively formed, when current is injected.

Discussion and Conclusion. In alloys with low electrical resistance, the threshold impulse current density corresponding to the occurrence of the electroplastic effect is higher than in alloys with high electrical resistance. Increasing the duty cycle of the impulse current reduces the temperature of the deformed sample that allows considering the electroplastic effect as athermal.

Keywords: tension, impulse current, current density, duty factor, fracture surface

Conflict of interest: The author declares no conflict of interest.

For citation: Stolyarov V.V. Critical Parameters of the Athermal Electroplastic Effect in Metallic Materials. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(3):461–473. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202403.461-473>

Введение. Прохождение электрического тока по проводнику вызывает ряд хорошо известных эффектов, например, тепловой нагрев по закону Джоуля-Ленца [1], а также атермические скин- и пинч-эффекты [2] в случае импульсного тока. При совместном действии электрического тока и пластической деформации возникают дополнительные эффекты, обусловленные наличием в кристаллических телах структурных особенностей: границ зерен, тройных стыков, подвижных дефектов, например, дислокаций и вакансий. К таким эффектам относятся электропластический (ЭПЭ) [3–5] и магнитопластический [6] эффекты.

Проявление ЭПЭ хорошо изучено экспериментально и теоретически во многих металлических системах. При введении одиночных импульсов тока на кривой растяжения/сжатия появляются скачки напряжения вниз/вверх [5]. Мерой интенсивности эффекта в данном материале является амплитуда скачков, которая зависит от плотности тока, длительности импульса и частоты [7]. В меньшей степени используется такой важный параметр, как скважность, которая связывает между собой длительность и частоту импульсов [8]. Однако при введении многоимпульсного или постоянного тока скачки отсутствуют, а мерой эффекта становится общее снижение напряжений течения [9]. При этом повышается тепловой вклад тока, возникают связанные с ним изменения структуры и механических свойств проводников.

Целью статьи является определение критических параметров импульсного тока, обеспечивающих атермический электропластический эффект в металлических материалах.

Обзор литературы. Установлено, что структура, свойства материала, а также мода и параметры электрического тока являются определяющими при анализе особенностей деформационного поведения материалов в сопровождении электрического тока [10]. Предложено несколько физических механизмов, феноменологически объясняющих возникновение ЭПЭ, которые включают электронный ветер [11], локальный нагрев на границах зерен [12], разблокировку дислокаций на препятствиях [7], подавление двойникования и магнитные эффекты [13]. Поскольку ЭПЭ проявляется в заметном снижении сопротивления деформации и повышении технологической пластичности, то потенциально он может использоваться в обработке металлов давлением [14; 15]. Многие прикладные и теоретические аспекты электропластического эффекта представлены в недавнем обзоре [15]. Теоретической и практической проблемой является нагрев проводника при воздействии тока, который затрудняет экспериментальную оценку вклада каждого из сопутствующих эффектов, а также является препятствием при необходимости осуществления технологических процессов без нагрева. Для снижения теплового вклада от тока были выполнены растяжение в жидком азоте [1; 2], а также охлаждение воздухом [16]. Другим возможным подходом может быть выбор таких параметров электрического тока, при которых тепловой эффект минимален или отсутствует. В литературе их часто называют пороговыми или критическими. Проведенный анализ источников позволил выделить основные параметры импульсного тока, влияющие на деформационное поведение проводниковых материалов и тепловой эффект при прохождении импульсов тока, и установить их пороговые значения.

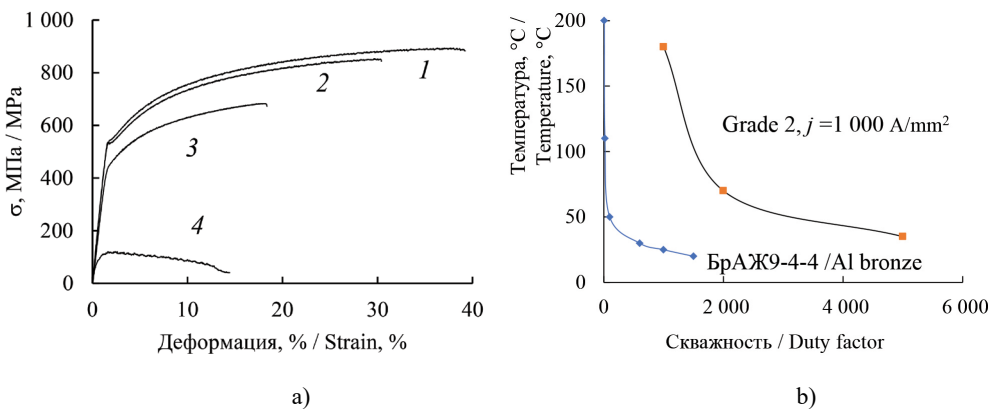
Материалы и методы. Объектами исследования были выбраны две группы материалов с отличающимся уровнем удельного электросопротивления. Среди хорошо проводящих материалов использовались: чистая медь М1 / Cu; медные сплавы – оловянная бронза (БрОЖ6.5-0.15 / Sn bronze), алюминиевая бронза (БрАЖ9-4-4 / Al bronze); алюминиевые сплавы – Al_2Cu_2Mn и АМг2. Среди слабо проводящих материалов применялись сплавы на основе титана (ВТ1-00, Grade 4, ВТ6). Материалы были исследованы в отожженном крупнозернистом (КЗ) состоянии. Для сравнения сплав Grade 4 применялся также и в ультрамелкозернистом (УМЗ) состоянии, полученном при помощи интенсивной пластической деформации методом РКУП Конформ [17; 18].

Механические испытания с током и без тока выполняли на горизонтальной машине ИМ-5081 при скорости растяжения 0,8 мм/мин ($1.3 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$) на плоских образцах с размерами $1 \times 2 \times 10 \text{ мм}^3$. Варьируемыми параметрами импульсного тока были плотность тока $j = 100 - 4\,000 \text{ А/мм}^2$ и скважность импульсов $Q = T/\tau = 10 - 20\,000$, где T и τ – период и длительность импульса.

Длительность импульса во всех опытах была постоянной и соответствовала $\tau = 1\,000 \text{ мкс}$. Выбранные параметры позволяли уверенно наблюдать проявление ЭПЭ в виде скачков напряжения $\Delta\sigma$ вниз или снижения напряжений течения величиной не менее 5 МПа.

Фрактографические изображения поверхностей разрушения после испытаний на растяжение были получены с помощью сканирующей электронной микроскопии на приборе Tescan Mira 3 LMU.

Результаты исследования. *Влияние скважности.* Рассмотрим влияние скважности на деформационное поведение при относительно малых значениях $10 \leq Q \leq 100$ в сравнении с растяжением без тока на примере бронзы БрАЖ9-4-4 (рис. 1а).



Р и с. 1. Влияние скважности тока на деформационное поведение (а) и температуру образца (б):
 1 – без тока; 2 – $Q = 100, j = 200 \text{ А/мм}^2$; 3 – $Q = 20, j = 200 \text{ А/мм}^2$; 4 – $Q = 10, j = 200 \text{ А/мм}^2$

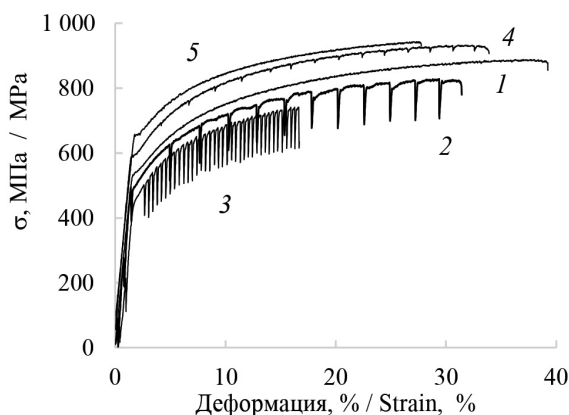
F i g. 1. Influence of duty cycle on deformation behavior (a) and sample temperature (b):
 1 – no current; 2 – $Q = 100, j = 200 \text{ А/мм}^2$; 3 – $Q = 20, j = 200 \text{ А/мм}^2$; 4 – $Q = 10, j = 200 \text{ А/мм}^2$

Источник: рисунки 1–5 составлены автором статьи.

Source: the diagrams 1–5 were drawn up by the author of the article.

Растяжение без тока (кривая 1) характеризуется максимальной прочностью и относительным удлинением бронзы, а также отсутствием скачков напряжения [19]. Введение импульсного тока снижает напряжения течения и относительное удлинение до разрушения и влияет на характер механического поведения. Деформационное упрочнение при скважности $Q = 100$ и 20 (кривые 2 и 3) сменяется деформационным разупрочнением при скважности $Q = 10$ (кривая 4). Кроме того, снижение скважности повышает температуру образцов, особенно сильно в слабо проводящем титане Grade 4, по сравнению с бронзой БрАЖ 9-4-4 (рис. 1b). Видно, что для достижения комнатной температуры (атермического ЭПЭ) необходимо повышать скважность более 1 000 и 5 000, соответственно для бронзы.

Рассмотрим влияние скважности на деформационное поведение при более высоких значениях $1\ 000 \leq Q \leq 20\ 000$. На рисунке 2 приведены кривые напряжение/деформация для медного сплава БрАЖ9-4-4, полученные при различных комбинациях скважности и плотности тока. Введение одиночных импульсов тока при постоянной длительности импульса вызывает появление скачков напряжения вниз разной амплитуды (от 10 до 120 МПа), зависящей от плотности и скважности тока. При высокой плотности тока 1 600 А/мм² уменьшение скважности от 20 000 до 15 000 практически не влияет на амплитуду скачка (кривые 2 и 3), но снижает относительное удлинение и повышает температуру образца с 70 до 80 °С.



Р и с. 2. Кривые напряжение/деформация для БрАЖ 9-4-4 при $\tau = 1\ 000$ мкс:
 1 – без тока; 2 – $j = 1\ 600$ А/мм², $Q = 20\ 000$; 3 – $j = 1\ 600$ А/мм², $Q = 15\ 000$;
 4 – $Q = 20\ 000$, $j = 450$ А/мм²; 5 – $Q = 100$, $j = 400$ А/мм².

Кривые 4 и 5 сдвинуты вверх на 50 МПа по оси Y , чтобы избежать наложения

F i g. 2. Stress/strain curves for Al bronze at $\tau = 1\ 000$ μ s:

1 – no current; 2 – $j = 1\ 600$ А/мм², $Q = 20\ 000$; 3 – $j = 1\ 600$ А/мм², $Q = 15\ 000$;
 4 – $Q = 20\ 000$, $j = 450$ А/мм²; 5 – $Q = 100$, $j = 400$ А/мм².

Curves 4 and 5 are shifted up on 50 MPa along the Y axis to avoid overlap

При более низкой плотности тока 400–450 А/мм² скачки напряжения уменьшаются по амплитуде и даже исчезают со снижением скважности от 20 000 до 100 (кривые 4 и 5). В этом случае также происходит повышение температуры образца, но более значимое (на 40 °С).

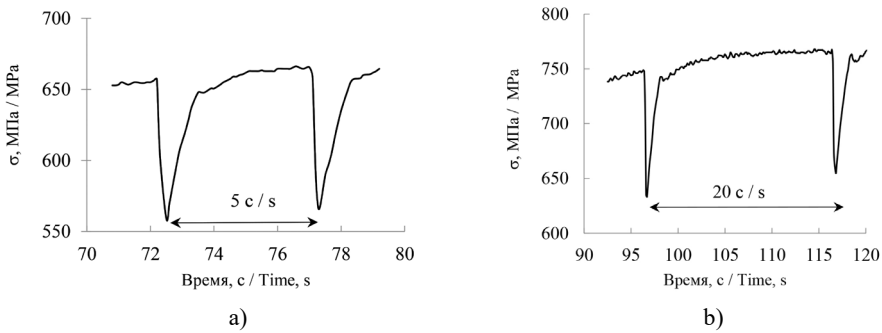


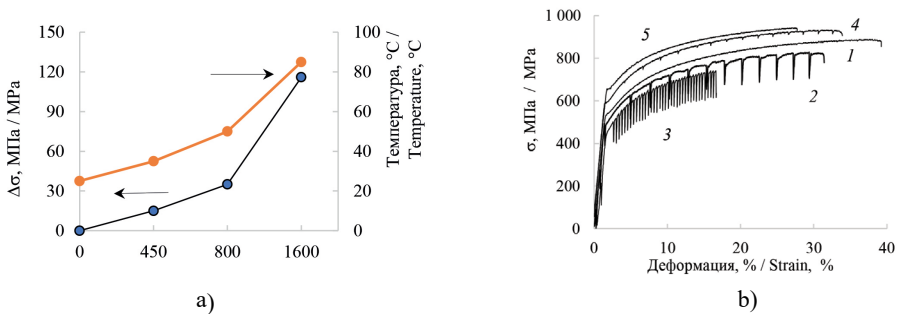
Рис. 3. Влияние скважности на форму и амплитуды скачка напряжений при $j = 1\,600\text{ А/мм}^2$ и $\tau = 1\,000\text{ мкс}$: а) $Q = 5\,000$; б) $Q = 20\,000$
 Fig. 3. Influence of duty cycle on shape and stress jump amplitude at $j = 1\,600\text{ А/мм}^2$ and $\tau = 1\,000\text{ }\mu\text{s}$: а) $Q = 5\,000$; б) $Q = 20\,000$

Отметим, что в данной статье наблюдающиеся скачки в упругой области не рассматриваются, поскольку их появление является следствием теплового расширения образца и не связано с ЭПЭ.

На рисунке 3 иллюстрируется влияние скважности при одинаковой плотности тока и длительности импульса на взаимное расположение скачков напряжения, а также их форму и амплитуду в бронзе БрАЖ9-4-4. Четырехкратное повышение скважности с 5 000 до 20 000 привело к слабому увеличению амплитуды скачка напряжений с 110 до 120 МПа и действующих напряжений течения. Независимо от скважности форма скачка напряжений является ассиметричной. Снижение напряжения в скачке (левая часть) происходит почти на порядок быстрее, чем его восстановление (правая часть).

Можно заключить, что скважность является критическим параметром ЭПЭ, регулирующим его проявление и влияющим на тепловой эффект тока.

Влияние плотности тока. На рисунке 4а на примере крупнозернистой оловянистой бронзы представлены кривые напряжение/деформация, полученные растяжением без тока и с током разной плотности, но одинаковой скважности.

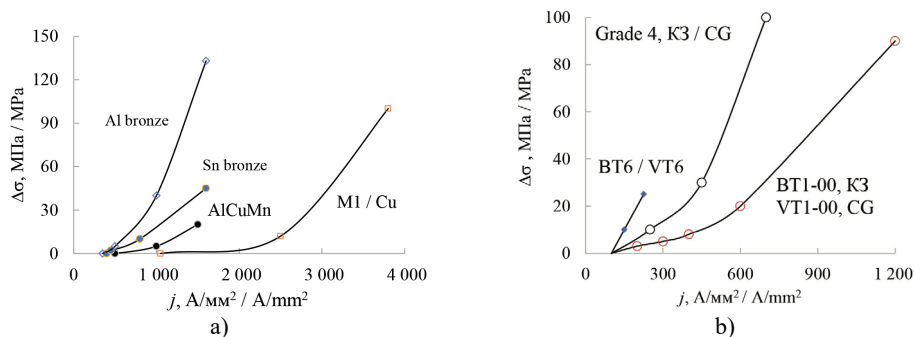


Р и с. 4. Кривые напряжение/деформация (а) и зависимость амплитуды скачка от плотности тока (б) бронзы БрОЖ6.5-0.15: 1 – без тока; 2 – 450 А/мм²; 3 – 800 А/мм²; 4 – 1 600 А/мм², $Q = 20\,000$, $\tau = 1\,000\text{ мкс}$. Кривые смещены по оси Y относительно друг друга на 5–15 МПа, чтобы исключить наложение

Fig. 4. Stress/strain curves (a) and jump amplitude on current density (b) for Al bronze: 1 – no current; 2 – 450 А/мм²; 3 – 800 А/мм²; 4 – 1 600 А/мм², $Q = 20\,000$, $\tau = 1\,000\text{ }\mu\text{s}$. Curves are shifted along the Y axis relative to each other by 5–15 МПа to prevent overlap

Поскольку кривые растяжения при многократном изменении плотности тока в реальном масштабе напряжений накладываются друг на друга, они были смещены относительно друг друга по оси Y так, чтобы можно было оценить амплитуду скачков. Типичные скачки напряжения, соответствующие ЭПЭ, появляются только при плотности тока выше $j_{кр} \geq 450 \text{ А/мм}^2$ (кривая 2). Дальнейшее повышение плотности тока до $1\,600 \text{ А/мм}^2$ способствовало увеличению амплитуды скачка напряжения от нескольких МПа до 40 МПа (кривые 3 и 4), снижению относительного удлинения на 10 % и практически не влияло на напряжения течения. На рисунке 4b показана зависимость амплитуды скачка напряжения от плотности тока и температуры.

Аналогичные испытания были выполнены для материалов, заметно отличающихся величиной удельного электросопротивления. Соответствующие зависимости амплитуды скачков напряжения от плотности тока показаны для сплавов на основе алюминия, меди (рис. 5a) и титана (рис. 5b). Все кривые носят экспоненциальный характер, отличающийся показателем степени. Видно, что для каждого материала существует своя критическая (пороговая) плотность тока $j_{кр}$, ниже которой ЭПЭ не проявляется, а выше этого значения амплитуда скачка повышается с увеличением плотности тока по экспоненте.



Р и с. 5. Влияние плотности тока на амплитуду скачка напряжения в КЗ материалах: а) сплавы на основе Al и Cu; б) титановые сплавы. Длительность импульса $\tau = 1\,000 \text{ мкс}$, $Q = 30\,000$

F i g. 5. Current density effect on stress jump amplitude in CG materials:

а) Al and Cu based alloys; б) Ti based alloys. $\tau = 1\,000 \text{ }\mu\text{s}$, $Q = 30\,000$

Значения критической плотности тока показаны в таблице. Она наименьшая в слабо проводящих титановых сплавах Grade 4, BT1-00, BT6 ($90\text{--}120 \text{ А/мм}^2$) и наибольшая в высокопроводящей меди (около $1\,000 \text{ А/мм}^2$). В сплавах на основе меди и алюминия критическая плотность тока имеет промежуточные значения.

Т а б л и ц а

T a b l e

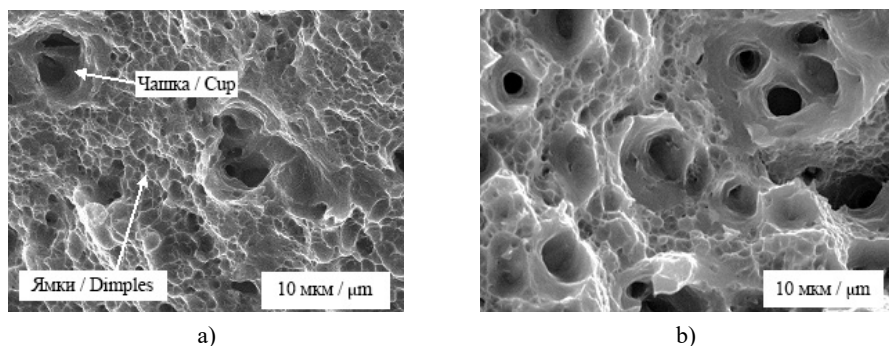
Критическая плотность тока (А/мм^2) в материалах при $\tau = 1\,000 \text{ мкс}$

Threshold current density (А/мм^2) in materials at $\tau = 1\,000 \text{ }\mu\text{s}$

Состояние / State	BT1-00 / VT1-00	Grade 4	BT6 / VT6	Медь / Copper	БрАЖ 9 / Al bronze	БрОЖ6.5 / Sn bronze	AMr2 / Al ₆ Mg	Al ₂ Cu ₂ Mn
КЗ / CG	90	100	120	1 050	450	450	300	300
УМЗ / UFG	300	250	—	—	—	—	—	—

Роль структурного измельчения материалов также оказывает некоторое влияние на представленные зависимости. Так, в титановых сплавах ВТ1-00 и Grade 4 измельчение структуры приводит к слабому повышению критической плотности тока (табл.).

Фрактография. Фрактографические исследования образцов после растяжения без тока и с током разной скважности были выполнены для разных материалов. Для большинства исследованных материалов воздействие импульсного тока высокой плотности и скважности практически не оказывает влияние на характер излома, который остается вязким и отличается присутствием чашек и ямок отрыва (рис. 6а).



Р и с. 6. Изображения поверхности излома образца сплава АМг2: а) без тока; б) ток, $Q = 10$
F i g. 6. Fracture surface images in the Al_2Mg alloy: а) without current; б) current, $Q = 10$

Источник: рисунки получены автором с помощью микроскопа Tescan Mira 3 LMU в программе прибора и переведены в изображение в программе Paint.net.

Source: the images were made by the author using the microscope Tescan Mira 3 LMU in the device program and translated into pictures using the Paint.net program.

Однако снижение скважности импульсного тока приводит к увеличению доли чашек и появлению пор. Для примера на рисунке 6 показаны изображения изломов в растровом микроскопе для алюминиевого сплава АМг2. Видно, что введение импульсного тока низкой скважности способствует увеличению количества и размеров чашек в изломе, тогда как доля ямок заметно снижается (рис. 6б).

Обсуждение и заключение. Одним из важных результатов выполненного исследования является демонстрация влияния скважности импульсного тока на деформационное поведение и тепловой эффект. Было показано, что при вариации скважности в широком интервале значений в бронзе реализуется либо преимущественно тепловой электропластический эффект без скачков напряжения: $10 \leq Q \leq 100$ (рис. 1), либо атермический электропластический эффект со скачками напряжения: $Q \geq 1\,000$ (рис. 2). При высокой скважности тока ($Q \geq 20\,000$) деформационное поведение и механические характеристики прочности и пластичности приближаются к таковым для растяжения без тока. Преимущественно этот факт связан с отсутствием значительного повышения температуры образца. Другой возможной причиной может быть действие механизма электронного ветра, которое способствует релаксации напряжений

за счет аннигиляции возникающих при деформации новых дислокаций. Фактически скважность как характеристика тока является критическим параметром. Качественно близкие результаты были получены ранее для чистого титана [20] и алюминия [21].

Влияние плотности тока на амплитуду скачка напряжений и температуру образца носит экспоненциальный характер и свидетельствует о термоактивационных процессах в материалах (рис. 4b). Пороговый характер этого параметра в разных металлах был замечен ранее. Автор работы [22] показал, что критическая плотность тока возрастала с увеличением электропроводности материалов. Однако эти эксперименты были выполнены при ползучести под током и только для чистых металлов. Авторы недавнего исследования электропластического эффекта при растяжении титановых сплавов установили, что критическая плотность импульсного тока зависит от чистоты материала. Так, в технически чистом титане Grade 4 критическая плотность оказалась в два раза выше, чем в легированном титановом сплаве ВТ6 [23]. Результаты данного исследования подтверждают существование порогового значения плотности тока при квазистационарном растяжении, которое распространяется на группы сплавов с разной электропроводностью (рис. 5). Чем выше электропроводность и меньше размер зерен, тем выше пороговое значение плотности тока. Это наблюдение полезно для обоснования механизма электронного ветра и практического применения при обработке материалов давлением.

Параметры тока, исследованные выше, представляют собой важные и разные характеристики импульсного тока. Плотность тока связана с энергетической составляющей внешнего воздействия, тогда как скважность тока характеризует частотную составляющую импульсного тока. Оба параметра вместе определяют интенсивность распределения энергии импульса во времени. По своему воздействию на механическое поведение материалов они являются независимыми, но каждая из них влияет на температуру образца, по которому идет ток. Регулируя оба параметра, можно создавать условия, при которых тепловой эффект тока будет максимальным или отсутствовать. В большинстве случаев на практике используется режим, при котором происходит значительный нагрев деформируемого материала, что позволяет заменять термическую обработку обработкой током. В исследовательских целях часто появляется необходимость снижать тепловой эффект тока, чтобы определить вклад атермического (истинного) электропластического эффекта. В этой связи знание зависимостей температуры и деформационного поведения от указанных параметров становится актуальным.

Анализ формы скачков напряжения показал, что их профиль имеет асимметричность во времени (рис. 3). Асимметричность связана с разной скоростью теплопередачи при мгновенном объемном нагреве от импульса тока и замедленном поверхностном охлаждении образца. Подобные наблюдения подробно обсуждаются в работах [23; 24] и хорошо согласуются с асимметричным температурным профилем скачка [7]. Жесткость испытательной машины тоже может вносить определенный вклад в асимметрию формы скачка [25], которая в «мягких» машинах замедляет восстановление напряжения.

Полученные результаты исследования влияния параметров импульсного тока на особенности проявления электропластического эффекта в различных проводниковых материалах позволяют сделать следующие выводы:

1. Среди многих параметров импульсного тока, сопровождающих пластическую деформацию растяжением, скважность и плотность тока являются пороговыми. Это означает, что при превышении/снижении их критических значений электропластический эффект может появляться/исчезать или изменять атермический механизм на тепловой;

2. Пороговые значения обоих критических параметров тока зависят от электропроводности и микроструктуры материалов. С увеличением электропроводности и уменьшением размера зерен критическая плотность тока повышается. Атермический механизм электропластического эффекта в материалах с высокой электропроводностью достигается при меньших значениях скважности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Goldman P. D., Motowidlo L. R., Galligan J. M. The Absence of an Electroplastic Effect in Lead at 4.2K // *Scripta Metallurgica*. 1981. Vol. 15, Issue 4. P. 353–356. [https://doi.org/10.1016/0036-9748\(81\)90208-8](https://doi.org/10.1016/0036-9748(81)90208-8)

2. Okazaki K., Kagawa M., Conrad H. An Evaluation of the Contributions of Skin, Pinch and Heating Effects to the Electroplastic Effect in Titanium // *Materials Science and Engineering*. 1980. Vol. 45, Issue 2. P. 109–116. [https://doi.org/10.1016/0025-5416\(80\)90216-5](https://doi.org/10.1016/0025-5416(80)90216-5)

3. Троицкий О. А. Электромеханический эффект в металлах // Письма в «Журнал экспериментальной и теоретической физики». 1969. Т. 10. С.18–22. URL: https://jetpletters.ru/ps/852/article_13061.pdf (дата обращения: 10.03.2024).

4. Electroplasticity Effects: from Mechanism to Application / J. Liu [et al.] // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024. Vol. 131. P. 3267–3286. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12072-y>

5. Effect of Electrical Pulsing on Various Heat Treatments of 5XXX Series Aluminum Alloys / W. A. Salandro [et al.] // *International Manufacturing Science and Engineering Conference*. 2008. Vol. 1. P. 283–292. https://doi.org/10.1115/MSEC_ICMP2008-72512

6. Research Progress of Magnetic Field Regulated Mechanical Property of Solid Metal Materials / Y. Hu [et al.] // *Metals*. 2022. Vol. 12, Issue 11. Article no. 1988. <https://doi.org/10.3390/met12111988>

7. The Effect of Short Duration Electric Current on the Quasi-Static Tensile Behavior of Magnesium AZ31 Alloy / T. T. Nguyen [et al.] // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2016. Article no. 9560413. <https://doi.org/10.1155/2016/9560413>

8. Dobras D., Zimniak Z., Zwierzchowski M. The Effect of Pulsed Electric Current on the Structural and Mechanical Behavior of 6016 Aluminium Alloy in Different States of Hardening // *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2023. Vol. 23. Article no. 166. <https://doi.org/10.1007/s43452-023-00700-z>

9. The Effect of Direct Electric Current on the Plastic Behavior of AA7075 Aluminum Alloy in Different States of Hardening / D. Dobras [et al.] // *Materials*. 2021. Vol. 14, Issue 1. Article no. 73. <https://dx.doi.org/10.3390/ma14010073>

10. Троицкий О. А. Электропластический эффект в металлах // *Annali D'Italia*. 2021. № 26. С. 60–73. EDN: PWRSOB

11. Elucidating the Origin of Electroplasticity in Metallic Materials / M.-J. Kim [et al.] // *Applied Materials Today*. 2020. Vol. 21. Article no. 100874. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2020.100874>

12. Lahiri A., Shanthraj P., Roters F. Understanding the Mechanisms of Electroplasticity from a Crystal Plasticity Perspective // *Modeling and Simulation in Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 27. Article no. 085006. <https://doi.org/10.1088/1361-651X/ab43fc>

13. Excellent Ductility in the Extruded AZ61 Magnesium Alloy Tube Induced by Electropulsing Treatment during Tension / B. Jiang [et al.] // *Metals*. 2021. Vol. 11, Issue 5. Article no. 813. <https://doi.org/10.3390/met11050813>
14. Wu C., Zhou Y. J., Liu B. Experimental and Simulated Investigation of the Deformation Behavior and Microstructural Evolution of Ti6554 Titanium Alloy During an Electropulsing-Assisted Microtension Process // *Materials Science and Engineering: A*. 2022. Vol. 838. Article no. 142745. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.142745>
15. Stolyarov V. V., Misochenko A. A Pulsed Current Application to the Deformation Processing of Materials // *Materials*. 2023. Vol. 16, Issue 18. Article no. 6270. <https://doi.org/10.3390/ma16186270>
16. Understanding the Microstructure Evolution and Mechanical Behavior of Titanium Alloy During Electrically Assisted Plastic Deformation Process / F. Yin [et al.] // *Materials Science and Engineering: A*. 2023. Vol. 869. Article no. 144815. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.144815>
17. Annealing Behavior of Severely-Deformed Titanium Grade 4 / G. S. Dyakonov [et al.] // *Materials Science and Engineering: A*. 2019. Vol. 742. P. 89–101. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.10.122>
18. Strength and Torsion Fracture Mechanism of Commercially Pure Titanium with Ultrafine-Grained Structure / G. V. Klevtsov [et al.] // *Letters on Materials*. 2021. Vol. 3. P. 273–278 <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2021-3-273-278>
19. Effect of Pulsed Current Duty Factor on Deformation Behavior of Aluminum Bronze / M. A. Pakhomov [et al.] // *Metal Science and Heat Treatment*. 2023. Vol. 65. P. 292–297. <https://doi.org/10.1007/s11041-023-00928-9>
20. Stolyarov V. V. Role of the Pulse Current Duty Cycle during Titanium Tension // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2023. Vol. 52, No. 4. P. 313–319. URL: <https://link.springer.com/content/pdf/10.3103/S1052618823040167> (дата обращения: 10.03.2024).
21. Pakhomov M. A., Stolyarov V. V. Specific Features of Electroplastic Effect in Mono- and Polycrystalline Aluminum // *Metal Science and Heat Treatment*. 2021. Vol. 63. P. 236–242. <https://doi.org/10.1007/s11041-021-00677-7>
22. Conrad H. Electroplasticity in Metals and Ceramics // *Materials Science and Engineering: A*. 2000. Vol. 287, Issue 2. P. 276–287. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)00786-3](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)00786-3)
23. Корольков О. Е., Пахомов М. А., Столяров В. В. Электропластический эффект в титановых сплавах при их растяжении // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2022. Т. 88, № 10. С. 73–82. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2022-88-10-73-82>
24. Modeling of Thermal and Mechanical Behavior of a Magnesium Alloy AZ31 during Electrically-Assisted Micro-Tension / X. Wang [et al.] // *International Journal of Plasticity*. 2016. Vol. 85. P. 230–257. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2016.07.008>
25. Importance of Machine Compliance to Quantify Electro-Plastic Effect in Electric Pulse Aided Testing: An Experimental and Numerical Study / A. Subrahmanyam [et al.] // *Journal of Manufacturing Processes*. 2022. Vol. 75. P. 268–279. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.12.027>

REFERENCES

1. Goldman P.D., Motowidlo L.R., Galligan J.M. The Absence of an Electroplastic Effect in Lead at 4.2K. *Scripta Metallurgica*. 1981;15(4):353–356. [https://doi.org/10.1016/0036-9748\(81\)90208-8](https://doi.org/10.1016/0036-9748(81)90208-8)
2. Okazaki K., Kagawa M., Conrad H. An Evaluation of the Contributions of Skin, Pinch and Heating Effects to the Electroplastic Effect in Titanium. *Materials Science and Engineering*. 1980;45:(2)109–116. [https://doi.org/10.1016/0025-5416\(80\)90216-5](https://doi.org/10.1016/0025-5416(80)90216-5)
3. Troitskii O.A. [Electromechanical Effect in Metals]. *Pisma v Zhurnal Experimentalnoi Teoriticheskoi Fiziki*. 1969;10:18–20. (In Russ.) Available at: https://jetpletters.ru/ps/852/article_13061.pdf (accessed 10.03.2024).
4. Liu J., Jia D., Fu Y., Kong X., Lv Z., Zeng E., et al. Electroplasticity Effects: from Mechanism to Application. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024;131:3267–3286. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12072-y>

5. Salandro W.A., Jones J.J., McNeal T.A., Roth J.T., Hong S.-T., Smith M.T. Effect of Electrical Pulsing on Various Heat Treatments of 5XXX Series Aluminum Alloys. *International Manufacturing Science and Engineering Conference*. 2008;1:283–292. https://doi.org/10.1115/MSEC_ICMP2008-72512
6. Hu Y., Zhao H., Yu X., Li J., Zhang B., Li T. Research Progress of Magnetic Field Regulated Mechanical Property of Solid Metal Materials. *Metals*. 2022;12(11):1988. <https://doi.org/10.3390/met12111988>
7. Nguyen T.T., Nguyen T.V., Hong S.-T., Kim M.-J., Han H.N., Morestin F. The Effect of Short Duration Electric Current on the Quasi-Static Tensile Behavior of Magnesium AZ31 Alloy. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2016;9560413. <https://doi.org/10.1155/2016/9560413>
8. Dobras D., Zimniak Z., Zwierchowski M. The Effect of Pulsed Electric Current on the Structural and Mechanical Behavior of 6016 Aluminium Alloy in Different States of Hardening. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2023;23:166. <https://doi.org/10.1007/s43452-023-00700-z>
9. Dobras D., Bruschi S., Simonetto E., Rutkowska-Gorzycza M., Ghiotti A. The Effect of Direct Electric Current on the Plastic Behavior of AA7075 Aluminum Alloy in Different States of Hardening. *Materials*. 2021;14(1):73. <https://dx.doi.org/10.3390/ma14010073>
10. Troitskiy O.A. Electroplastic Effect on Metals. *Annali D'Italia*. 2021;26:60–73. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: PWRSOB
11. Kim M.-J., Yoon S., Park S., Jeong H.-J., Park J.-W., Kim K. Elucidating the Origin of Electroplasticity in Metallic Materials. *Applied Materials Today*. 2020;21:100874. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2020.100874>
12. Lahiri A., Shanthraj P., Roters F. Understanding the Mechanisms of Electroplasticity from a Crystal Plasticity Perspective. *Modeling and Simulation in Materials Science and Engineering*. 2019;27:085006. <https://doi.org/10.1088/1361-651X/ab43fc>
13. Jiang B., Zhang D., Xu H., Liu Y., Cao Z., Yang X. Excellent Ductility in the Extruded AZ61 Magnesium Alloy Tube Induced by Electropulsing Treatment during Tension. *Metals*. 2021;11(5):813. <https://doi.org/10.3390/met11050813>
14. Wu C., Zhou Y.J., Liu B. Experimental and Simulated Investigation of the Deformation Behavior and Microstructural Evolution of Ti6554 Titanium Alloy During an Electropulsing-Assisted Microtension Process. *Materials Science and Engineering: A*. 2022;838:142745. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.142745>
15. Stolyarov V.V., Misochenko A. A Pulsed Current Application to the Deformation Processing of Materials. *Materials*. 2023;16(18):6270. <https://doi.org/10.3390/ma16186270>
16. Yin F., Ma S., Hu S., Liu Y., Hua L., Cheng G.J. Understanding the Microstructure Evolution and Mechanical Behavior of Titanium Alloy During Electrically Assisted Plastic Deformation Process. *Materials Science and Engineering: A*. 2023;869:144815. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.144815>
17. Dyakonov G.S., Mironov S., Enikeev N., Semenova I.P., Valiev R.Z., Semiatin S.L. Annealing Behavior of Severely-Deformed Titanium Grade 4. *Materials Science and Engineering: A*. 2019;742:89–101. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.10.122>
18. Klevtsov G.V., Valiev R.Z., Klevtsova N.A., Fesenyuk M.V., Tyurkov M.N., Polyakov A.V. Strength and Torsion Fracture Mechanism of Commercially Pure Titanium with Ultrafine-Grained Structure. *Letters on Materials*. 2021;3:273–278. <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2021-3-273-278>
19. Pakhomov M.A., Savenkov G.G., Smakovsky M.A., Stolyarov V.V. Effect of Pulsed Current Duty Factor on Deformation Behavior of Aluminum Bronze. *Metal Science and Heat Treatment*. 2023;65:292–297. <https://doi.org/10.1007/s11041-023-00928-9>
20. Stolyarov V.V. Role of the Pulse Current Duty Cycle during Titanium Tension. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2023;52(4):313–319. Available at: <https://link.springer.com/content/pdf/10.3103/S1052618823040167> (accessed 10.03.2024).
21. Pakhomov M.A., Stolyarov V.V. Specific Features of Electroplastic Effect in Mono- and Polycrystalline Aluminum. *Metal Science and Heat Treatment*. 2021;63:236–242. <https://doi.org/10.1007/s11041-021-00677-7>
22. Conrad H. Electroplasticity in Metals and Ceramics. *Materials Science and Engineering: A*. 2000;287(2):276–287. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)00786-3](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)00786-3)
23. Korolkov O.E., Pakhomov M.A., Stolyarov V.V. [The Electroplastic Effect in Titanium Alloys



under Tension]. *Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials*. 2022;88(10):73–82. (In Russ.) <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2022-88-10-73-82>

24. Wang X., Xu J., Shan D., Guo B., Cao J. Modeling of Thermal and Mechanical Behavior of a Magnesium Alloy AZ31 during Electrically-Assisted Micro-Tension. *International Journal of Plasticity*. 2016;85:230–257. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2016.07.008>

25. Subrahmanyam A., Shivaprasad C., Suman G., Raju D.V., Rahul K.V., Venkata R.N. Importance of Machine Compliance to Quantify Electro-Plastic Effect in Electric Pulse Aided Testing: An Experimental and Numerical Study. *Journal of Manufacturing Processes*. 2022;75:268–279. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.12.027>

Об авторе:

Столяров Владимир Владимирович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук (101000, Российская Федерация, г. Москва, Малый Харитоньевский переулок, д. 4), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7604-3961>, Researcher ID: A-1928-2014, Scopus ID: 7005641592, vlstol@mail.ru

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 25.03.2024; поступила после рецензирования 27.05.2024;
принята к публикации 03.06.2024*

About the author:

Vladimir V. Stolyarov, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher of Mechanical Engineering Research Institute, Russian Academy of Sciences (4 Maly Kharitonievsky Lane, Moscow 101000, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7604-3961>, Researcher ID: A-1928-2014, Scopus ID: 7005641592, vlstol@mail.ru

The author has read and approved the final manuscript.

Submitted 25.03.2024; revised 27.05.2024; accepted 03.06.2024