УДК 620.171.2:620.186.8 *Оригинальная статья*

Тепловые эффекты импульсного тока в титане при растяжении

А.А. Мисоченко, О.Е. Корольков
ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН»
101000, Россия, Москва, Малый Харитоньевский пер., д. 4
Ls3216@yandex.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.072

Аннотация: Проанализировано тепловое действие импульсного тока при растяжении в титане Grade 2 и Grade 4 в крупнозернистом и ультрамелкозернистом состояниях. В работе показана определяющая роль скважности тока при проявлении механизмов электропластического и тепловых эффектов. Показано, что в режиме одиночных импульсов (скважность 5000-10000) наблюдается соответствие начала температурного пика и скачка напряжений течения. В режиме многоимпульсного тока (скважность 10) максимальные температуры линейно увеличиваются при повышении плотности тока выше 40 А/мм^2 и могут достигать порядка 170°С при плотности тока 100 А/мм^2. При скважности ниже 5000 тепловые эффекты становятся доминирующими механизмами. Представлены результаты сравнения проявления электропластического эффекта в крупнозернистом и ультрамелкозернистом титане Grade 4, которые демонстрируют структурную чувствительность эффекта к размеру зерен и позволяют прогнозировать тренд при их уменьшении в нанообласть. Проведено сравнение снижения напряжений течения под действием тока и при нагреве внешним источником, демонстрирующее наличии других вкладов в электропластический эффект помимо теплового. При этом тепловой вклад тока в снижение напряжения течения в ультрамелкозернистом титане меньше, чем в крупнозернистом.

Ключевые слова: электропластический эффект, растяжение, импульсный ток, титан, тепловой эффект импульсного тока

Мисоченко Анна Александровна – к.т.н, старший научный сотрудник, ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН»
Корольков Олег Евгеньевич – научный сотрудник, ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН»

Original paper

Thermal phenomena induced by pulsed current in titanium during tensile deformation

A.A. Misochenko, O.E. Korolkov
Mechanical Engineering Research Institute of RAS, Moscow, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.072

Abstract: The study analyzes the thermal effect of pulsed current during tensile testing in Grade 2 and Grade 4 titanium in coarse-grained and ultrafine-grained states. The work demonstrates the determining role of the current duty cycle in the manifestation of electroplastic and thermal effects. It is shown that in the single-pulse mode (duty cycle 5000-10000), there is a correspondence between the onset of the temperature peak and the yield stress jump. In the multi-pulse current mode (duty cycle 10), the maximum temperatures increase linearly with increasing current density above 40 A/mm^2 and can reach approximately 170°C at a current density of 100 A/mm^2.When the duty cycle is below 5000, thermal effects become the dominant mechanisms. The results of comparing the electroplastic effect manifestation in coarse-grained and ultrafine-grained Grade 4 titanium are presented, demonstrating the structural sensitivity of the effect to grain size. A comparison was made of the reduction in the flow stress under the influence of current versus heating by an external source, demonstrating the presence of other contributions to the electroplastic effect beyond the thermal one. Notably, the thermal contribution of the current to the reduction of flow stress in ultrafine-grained titanium is smaller than in coarse-grained titanium.

© А.А. Мисоченко, О.Е. Корольков, 2026

Keywords: electroplastic effect, tension, pulsed current, titanium, thermal effect of pulsed current

Anna A. Misochenko – Ph. D., Senior Researcher, Mechanical Engineering Research Institute of RAS, ORCID: 0000-0002-2885-1996
Oleg E. Korolkov – Researcher, Mechanical Engineering Research Institute of RAS, ORCID: 0000-0001-7433-479X

Поступила в редакцию/received: 01.06.2026; после рецензирования/revised: 27.06.2026; принята/accepted: 01.07.2026.

1. Введение

Физические явления, возникающие при воздействии импульсного тока на твердые металлические материалы, хорошо известны. К ним относят тепловой нагрев (эффект Джоуля-Ленца), появление магнитного поля (и, как следствие, скин- и пинч- эффекты), вибрацию [1]. Часто такие явления возникают одновременно. Наиболее заметным среди перечисленных эффектов является тепловой эффект, который часто используется в технологиях электроимпульсной обработки (ЭИО) для изменения различных свойств за счет сопутствующих эффекту структурных изменений [2, 3]. В случае комбинированного воздействия на материал одновременно импульсного тока и пластической деформации (например, прокатки, волочения, прессования, изгиба, растяжения, сжатия) такие процессы в отличие от ЭИО называют электропластической деформацией (ЭПД) и вызваны электропластическим эффектом (ЭПЭ) [4]. Эффект зависит от скважности [5] и при низких ее значениях проявляется в виде общего снижения напряжений течения (например, при растяжении), а при высоких в виде характерного скачка в момент подачи импульса тока. При этом материал в наноструктурном состоянии, как правило, менее подвержен проявлению ЭПЭ.

Несмотря на увеличивающийся интерес к ЭПЭ до сих пор нет единой модели, описывающей процессы, происходящие в структуре металла при одновременном воздействии деформации и тока. Кроме того, одним из важнейших направлений исследований сегодня является определение этих процессов в мелкозернистых и наноструктурах. Одни исследователи видят причиной ЭПЭ преимущественно нагрев, другие – электрон-дислокационное взаимодействие [6]. Вероятно, механизм этого явления обусловлен совокупностью нескольких факторов, суммарное действие которых приводит к снижению напряжений течения в процессе деформации. Однако, математические модели, описанные в литературе, часто описывают поведение материала при деформации с электрическим током, учитывая только эффект нагрева, который является безусловным, но не единственным [7-10]. Оценка этого воздействия, а также его зависимость от уменьшения размера зерна вплоть до наноструктур важна для понимания роли тока и последующих исследований по разделению термического и атермического вкладов ЭПЭ. Так, в работе [11] показано, что при

растяжении с одновременным воздействием импульсов электрического тока плотностью $j = 1000$ А/мм^2 сплава с памятью формы на основе *TiNi* нагрев в момент пропускания тока в пике не превысил 45°С в крупнозернистом состоянии, а в мелкозернистом составил не более 17°С. Работа [12] также показывает зависимость тепловых эффектов тока от размера структурных элементов в сплаве *TiNi* и Д16.

Целью данной работы является исследование тепловых эффектов в процессе растяжения с импульсным током в технически чистом титане.

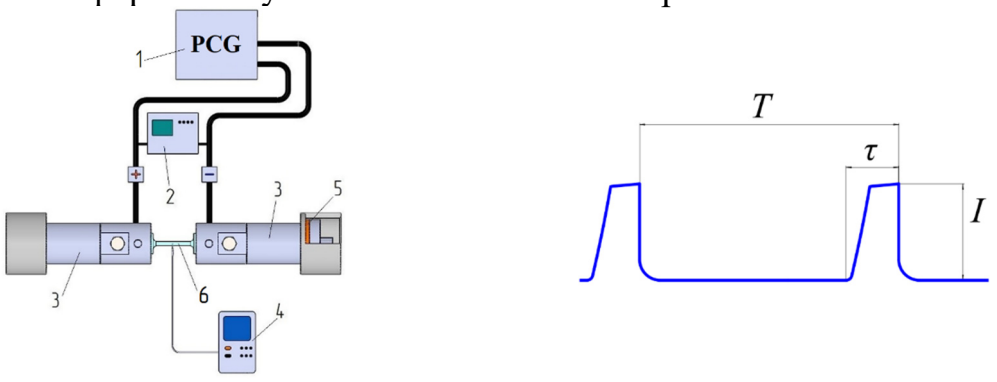
2. Материалы и методы

Материалами исследования были выбраны технически чистый титан Grade 2 и Grade 4 в крупнозернистом (КЗ) и ультрамелкозернистом (УМЗ) состояниях.

Таблица 1. Средний размер зерна исследуемых материалов.

	Grade 2	Grade 4
КЗ	60 мкм	15-25 мкм
МЗ	–	200-500 нм

Растяжение выполняли на горизонтальной разрывной машине ИР-5081/20 на образцах с размерами рабочей части Ø2×12 мм. Скорость испытания составляла 1 мм/мин. К зажимам разрывной машины от генератора подводился импульсный электрический ток. Захваты образцов изолировались от машины проставками из стеклотекстолита. Температуру образца в процессе растяжения контролировали прибором UNI-T UT320 Series и хромель-алюмелевой термопарой (тип К) в центре образца с точностью ±2°С. Термопара крепилась к рабочей зоне образца при помощи зажима. Амплитудную плотность тока контролировали с помощью цифрового осциллографа UNI-T UTD2025CL. Схема испытательного стенда установки и форма импульсов тока показаны на рис. 1.



а б

Рис. 1. Схема испытательной установки (а) и форма импульсов тока (б): 1 – генератор импульсного тока, 2 – осциллограф, 3 – захваты, 4 – термопара, 5 – изоляция, 6 – образец; T – период действия импульсов тока, τ – длительность импульса, I – амплитудная сила тока.

Диапазон исследуемой плотности тока составил $j = 10\text{-}1000$ А/мм^2, длительности импульса $\tau = 100\text{-}1000$ мкс. Скважность ($q = T/\tau$, где T – период действия импульсов тока) варьировалась в пределах $q = 10\text{-}50000$ за счет изменения частоты тока при постоянной длительности импульса или за счет изменения длительности импульса при постоянной частоте.

3. Описание результатов

Замер температуры при растяжении с током высокой скважности ($q = 5000\text{-}10000$) в титане Grade 2 в режиме одиночных импульсов показывает, что начало температурного пика совпадает по времени t со скачком напряжения σ, характерным при проявлении ЭПЭ. На рис. 2 приведен пример деформационной кривой при растяжении с током ($q = 10000$, $j = 1000$ А/мм^2, $\tau = 500$ мкс) с наложением температуры. При этом с окончанием подачи импульса тока материал остывает, но не до комнатной температуры, а до температуры $T = 32\text{-}33$°C. Максимальная температура в пике при этом не превышает 46,8°C. Повышение длительности импульса до 1000 мкс повышает эту температуру до 53,4; 74 и 180°C при скважности 5000, 2000 и 1000, соответственно. Снижение плотности тока до 600 А/мм^2 при сохранении длительности импульса 1000 мкс и скважности 5000 снижает максимальную температуру в пике до 38,2°C. Полные данные по исследуемым режимам тока при растяжении и максимальные температуры в пике приведены в Таблице 2. Зависимость температуры и амплитуды скачка напряжения σ_a от скважности при одной и той же плотности тока (1000 А/мм^2) показана на рис. 3

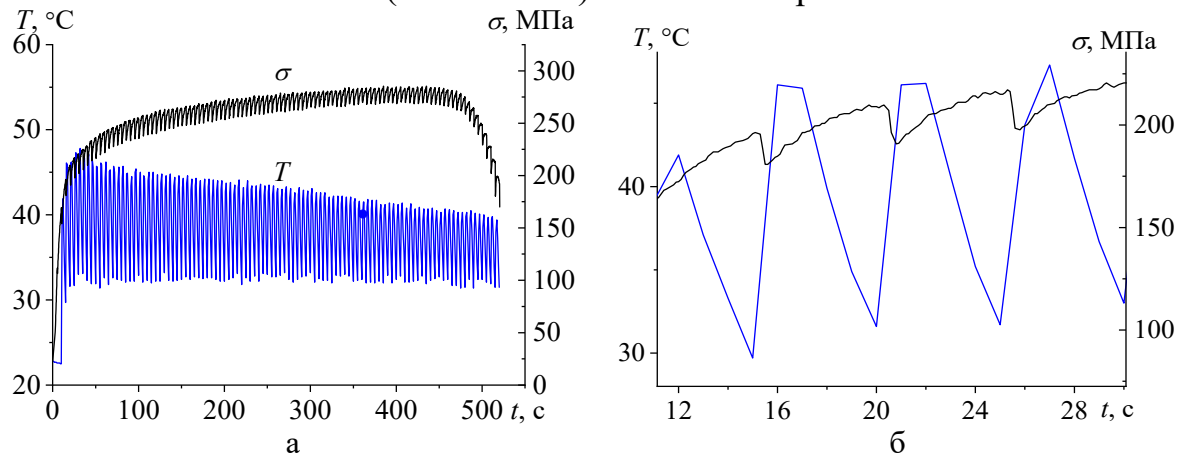


Рис. 2. Кривая «напряжение-деформация» (черная) при растяжении с током в режиме одиночных импульсов тока ($j = 1000$ А/мм^2, $q = 10000$, $\tau = 500$ мкс) с наложением температурной зависимости (синяя кривая) в титане grade 2: а – полная кривая, б – увеличенный фрагмент.

Видно закономерное снижение температуры с ростом скважности. При этом наиболее интенсивно это снижение происходит до $q = 5000$. Эта

же величина является критической при рассмотрении зависимости величины амплитуды скачка напряжения от скважности, которая носит немонотонный характер. Рост амплитуды скачка при скважности менее 5000 связан с изменением скважности при изменении частоты действия тока. При большей скважности частота оставалась постоянной, а изменение осуществляли за счет изменения длительности импульса (100-500 мкс).

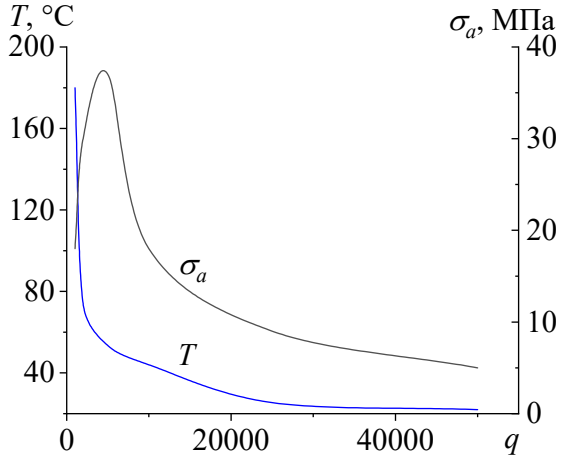


Рис. 3. Влияние скважности q на температуру T и аплитуду скачка напряжения σ_a в титане Grade 2.

Таблица 2. Максимальные температуры при растяжении с током высокой скважности в титане Grade 2.

Скважность	1000	2000	10000	25000	50000	5000				
Плотность тока, А/мм^2	1000					200	400	600	800	1000
Длительность импульса, мкс	1000		500	200	100	1000				
Температура, °С	180	74	46,8	25,4	22	23,3	26,7	38,2	46,1	53,4
Амплитуда скачка напряжения, МПа	18	30	18	9	5	3	6	23	34	35

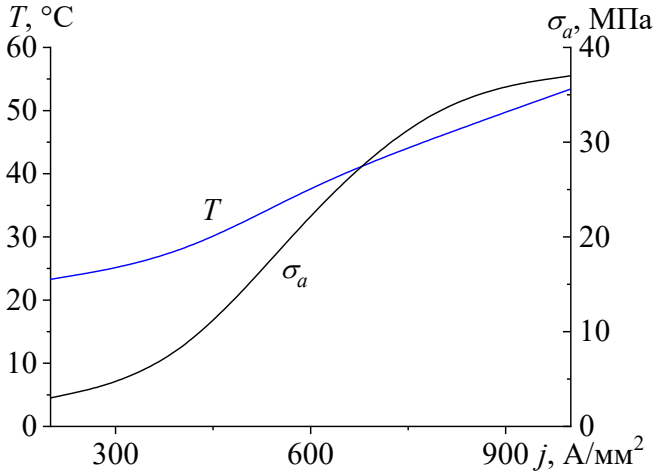


Рис. 4. Зависимость температуры (синяя) и амплитуды скачка напряжения (черная) при растяжении с током от плотности тока при одной скважности (q = 5000).

Скважность 5000 была рассмотрена более подробно (см. Таблицу 2, рис. 4). На рис. 4 представлены зависимости амплитуды скачка напряжения и температуры от плотности тока. Видно, что с ростом амплитуды скачка растет и температура, однако скорости этого роста различны. При

плотности тока в диапазоне $j = 400\text{-}800$ А/мм^2 наблюдается наиболее интенсивное изменение величины скачка напряжения, хотя скорость изменения температуры остается практически постоянной. Это является косвенным свидетельством проявления других механизмов ЭПЭ помимо нагрева.

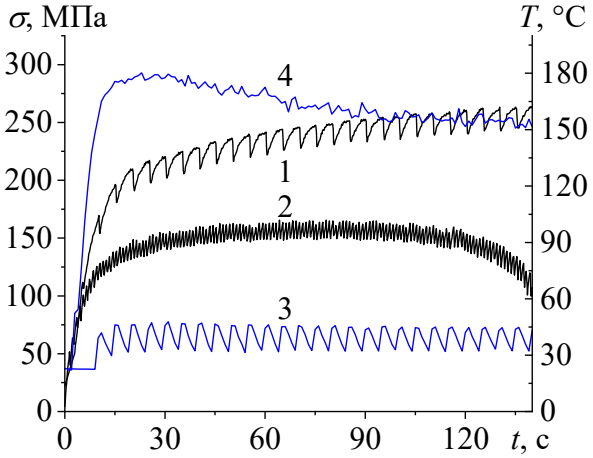


Рис. 5. Фрагмент диаграммы растяжения с наложением измерения температуры в титане grade 2: 1 и 2 – кривые изменения напряжения при растяжении с током плотностью 1000 А/мм^2 при длительности импульса 500 (1) и 1000 мкс (2) и скважности 1000 (2) и 10000 (1); 3 и 4 – температурные зависимости для кривых 1 и 2, соответственно.

Особый интерес представляет факт наличия режимов, при которых температуры различаются существенно, а разницы в амплитуде скачка напряжений не наблюдается (см. Таблицу 2, скважность 1000 и 10000 при длительности импульса 1000 и 500 мкс). На рис. 5 представлен фрагмент диаграммы растяжения с током при этих режимах с наложением температурных кривых в зависимости от времени (t). Кривая 1 соответствует растяжению с плотностью тока $j = 1000$ А/мм^2 при длительности импульса $\tau = 500$ мкс и скважности $q = 10000$. Амплитуда скачка напряжения соответствует $\sigma_a = 18$ МПа. Начало температурных скачков (см. рис. 5, кривая 3) в точности совпадает с началом скачка напряжения, при этом абсолютное значение температуры в скачке не превышает 44°С. При длительности импульса $\tau = 1000$ мкс и скважности $q = 1000$ на кривой растяжения (2) наблюдаются частые скачки, амплитуда которых совпадает с предыдущим режимом ($\sigma_a = 18$ МПа). При этом из-за снижения величины скважности на порядок материал не успевает остывать и характер температурной зависимости меняется (см. рис. 5, кривая 4). Скачков температуры уже не наблюдается, кривая носит монотонный характер, а нагрев в диапазоне 150-180°С наблюдается на протяжении всего эксперимента. При этом насыщение наблюдается практически сразу. Факт значительной разницы в нагреве при одной и той же величине скачка напряжения свидетельствует о различиях в наблюдаемых механизмах

снижения напряжений течения. Тепловые эффекты доминируют в случае меньшей скважности. И хотя величины скачков при данных режимах одинаковы, общей уровень напряжений при меньшей скважности значительно ниже (разница в напряжениях порядка 100 МПа). Таким образом, скважность имеет определяющее значение при рассмотрении механизмов ЭПЭ. Температура образца повышается одновременно с уменьшением скважности. Увеличение скважности смещает соотношение эффектов в пользу ЭПЭ и наоборот, уменьшение скважности приводит к преимущественно тепловому действию тока.

Рассмотрим режим многоимпульсного тока (см. рис. 6). При растяжении с током в режиме низкой скважности $q = 10$ при плотностях тока менее 40 А/мм^2 наблюдается плавный рост максимальной температуры, затем его скорость увеличивается, а максимальные температуры при этом могут достигать 170°С (при плотности тока 100 А/мм^2). Длительность импульса при этом постоянна и составляет 100 мкс. Снижение плотности тока до 20 А/мм^2 существенно снижают нагрев. Температуры немного превышают комнатную (нагрев до 35°С). Вероятно, это связано с тем, что данная плотность тока близка к критическому значению, при котором начинает проявляться ЭПЭ.

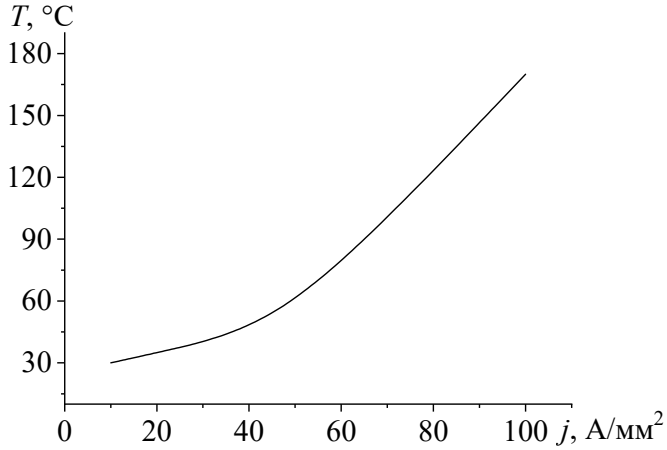


Рис. 6. Зависимость температуры при растяжении с током от плотности тока в режиме низкой скважности ($q = 10$).

На рис. 7 сравнивается влияние тока низкой скважности ($q = 10$) при одинаковых режимах для КЗ (15-25 мкм) и УМЗ (200-500 нм) титана Grade 4 на относительное изменение предела прочности $\Delta\sigma_{UTS}$ по сравнению с растяжением без тока. Принимаем во внимание установленный ранее факт, что при снижении скважности тепловое действие тока увеличивается. Видно, что при $j = 30$ А/мм^2 ЭПЭ меньше в УМЗ титане, чем в КЗ состоянии, независимо от длительности импульса (см. рис. 7 а, в). Нагрев при этом составляет порядка 40 и 35°С в КЗ и УМЗ состояниях, соответственно, при длительности импульса $\tau = 1000$ мкс. При длительности импульса $\tau = 100$

мкс температура близка к комнатной. При повышении плотности тока до j = 60 А/мм^2 при длительности импульса τ = 100 мкс тенденция сохраняется, однако при увеличении длительности импульса до τ = 1000 мкс эффект меняется на противоположный (см. рис. 7 б, г). Нагрев в КЗ состоянии при этом составляет 120 и 200°С, соответственно. В УМЗ состоянии тепловой эффект тока ниже и составляет 110 и 190°С, соответственно для указанных режимов тока. При сравнении режимов с током (j = 60 А/мм^2, τ = 1000 мкс) и при нагреве до той же температуры внешним источником видно, что при одном и том же значении температуры снижение напряжений течения выше при растяжении с током, что свидетельствует о наличии других вкладов в ЭПЭ помимо теплового. При этом тепловой вклад тока в снижение напряжения течения в УМЗ (21%) титане меньше, чем в КЗ (32%).

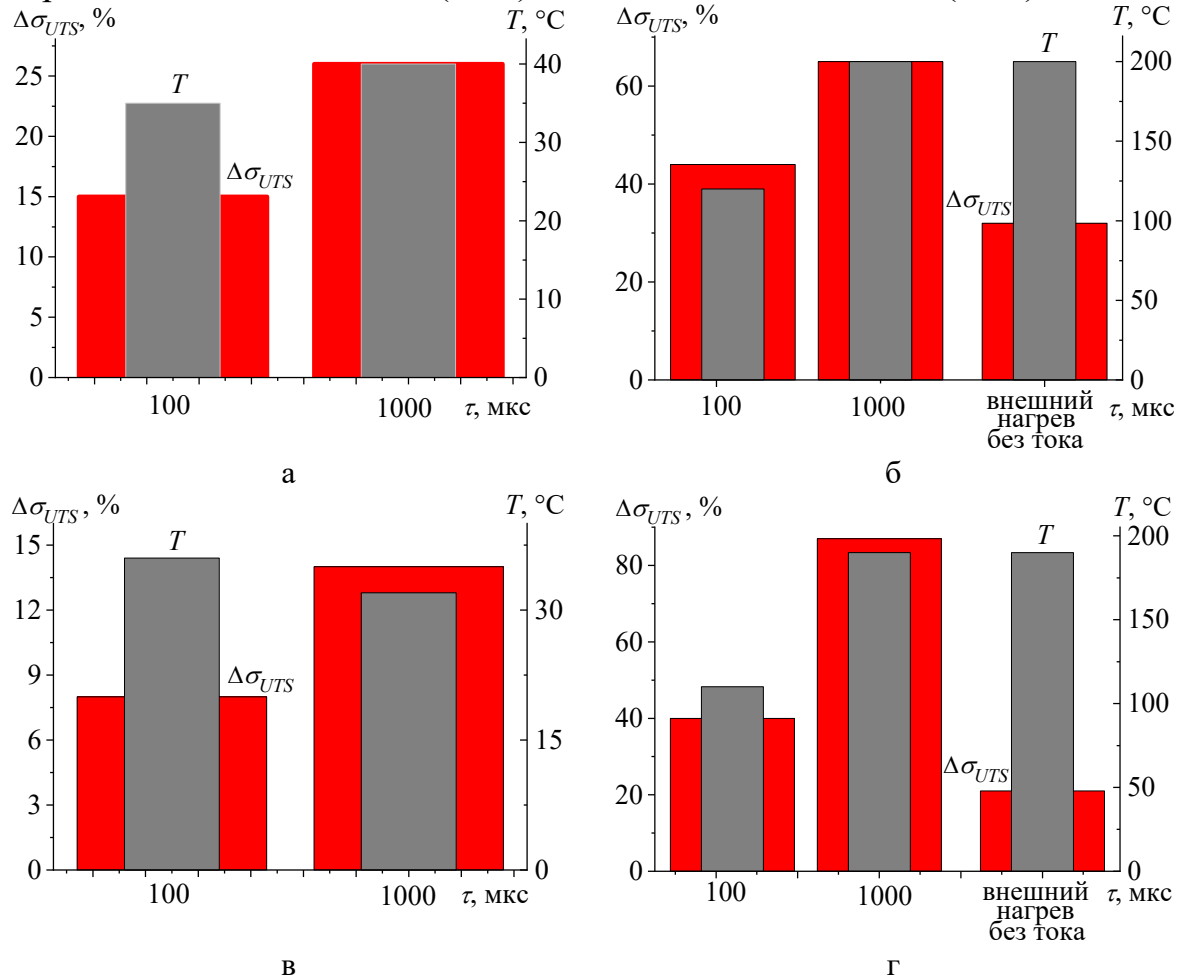


Рис. 7. Влияние импульсного тока низкой скважности (q = 10 при τ = 100 и 1000 мкс; j = 30 А/мм^2 (а, в) и j = 60 А/мм^2 (б, г)) на проявление ЭПЭ в КЗ (а, б) и УМЗ (в, г) титане Grade 4.

4. Заключение

Таким образом, в работе рассмотрено и проанализировано тепловое

действие импульсного тока при растяжении в титане Grade 2 и Grade 4 в крупнозернистом и ультрамелкозернистом состояниях. Показано, что в режиме *одиночных импульсов* (скважность q=5000-10000) наблюдается соответствие начала температурного пика и скачка напряжения течения. При этом по завершении подачи импульса тока материал успевает остывать до температуры 30-33°C. В режиме *многоимпульсного тока* (скважность q =10) в титане наблюдается стадия равномерного повышения температуры с выходом на установившееся значение. При этом максимальные температуры линейно увеличиваются при повышении плотности тока выше 40 А/мм^2 и могут достигать порядка 170°C при плотности тока 100 А/мм^2. В работе также показана определяющая роль скважности тока при проявлении механизмов ЭПЭ. При значениях скважности ниже 5000 тепловые эффекты становятся доминирующими механизмами. Полученные температурные зависимости в дальнейшем планируется использовать для моделирования теплового эффекта тока с целью разделения термического и атермического вкладов тока. Представленные результаты сравнения ЭПЭ в КЗ и УМЗ титане Grade 4 демонстрируют структурную чувствительность ЭПЭ к размеру зерен и позволяют прогнозировать тренд при уменьшении размера зерен в область наноразмеров. Растяжение УМЗ титана в сопровождении тока низкой скважности (q = 10, j = 30 А/мм^2) приводит к меньшему ЭПЭ, чем в КЗ состоянии. При сравнении режимов с током (q = 10, j = 60 А/мм^2) и при нагреве до той же температуры внешним источником видно, что снижение напряжений течения выше в первом случае, что свидетельствует о наличии других вкладов в ЭПЭ помимо теплового. При этом тепловой вклад тока в снижение напряжения течения в УМЗ титане меньше, чем в КЗ.

Работа выполнена за счет средств государственного задания (код научной темы FFGU-2026-0003).

Библиографический список:

1. **Sheng, Y.** Application of high-density electropulsing to improve the performance of metallic materials: mechanisms, microstructure and properties / Y. Sheng, Y. Hua, X. Wang et al. // Materials. – 2018. – V. 11. – I. 2. – Art. № 185. – 25 p. DOI: 10.3390/ma11020185.
2. **Lee, C.H.** Effect of electric current heat treatment on commercially pure titanium sheets / C.H. Lee, S.-W. Choi, P.L. Narayana et al. // Metals. – 2021. – V. 11. – I. 5. – Art. № 783. – 12 p. DOI: 10.3390/met11050783.
3. **Pan, D.** Grain refinement of Al–Mg–Si alloy without any mechanical deformation and matrix phase transformation via cyclic electro-pulsing treatment / D. Pan, Y. Wang, Q. Guo et al. // Materials Science and Engineering: A. – 2021. – V. 807. – Art. № 144510. – 14 p. DOI: 10.1016/j.msea.2021.140916.
4. **Troitskii, O.A.** Electromechanical effect in metals / O.A. Troitskii // Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters. – 1969. – V. 1. – № 1. – P. 18-22.
5. **Stolyarov, V.V.** Erratum to: role of the pulse current duty cycle during titanium tension / V. V. Stolyarov // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2024. – V. 53. – I. 3. – P. 300. DOI: 10.1134/S1052618824700146.
6. **Dimitrov, N.K.** Electroplasticity: A review of mechanisms in electro-mechanical coupling of ductile metals / N.K. Dimitrov, Y. Liu, M.F. Horstemeyer // Mechanics of advanced materials and structures. – 2020. – V. 29.

– I. 5. – P. 705-716. DOI: 10.1080/15376494.2020.1789925.
7. **Ruszkiewicz, B.J.** A review of electrically assisted manufacturing with emphasis on modeling and understanding of the electroplastic effect / B. J. Ruszkiewicz, T. Grimm, I. Ragai, L. Mears, J. T. Roth // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2017. – V. 139. – I. 11. – Art. № 110801. – 15 p. DOI: 10.1115/1.4036716.
8. **Hariharan, K.** Decoupling thermal and electrical effect in an electrically assisted uniaxial tensile test using finite element analysis / K. Hariharan, M.-G. Lee, M.-J. Kim et al. // Metallurgical and Materials Transactions. – 2015. – V. 46. – I. 7. – P.3043-3051. DOI: 10.1007/s11661-015-2879-3.
9. **Ruszkiewicz, B.J.** Investigation of heterogeneous joule heating as the explanation for the transient electroplastic stress drop in pulsed tension of 7075-T6 aluminum / B. J. Ruszkiewicz, L. Mears, J. T. Roth // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2018. – V.140. – I. 9. – Art. № 091014. – 11 p. DOI: 10.1115/1.4040349.
10. **Wang, X.** Modeling of thermal and mechanical behavior of a magnesium alloy AZ31 during electrically-assisted micro-tension / X. Wang, J. Xu, D. Shan, B. Guo, J. Cao // International Journal of Plasticity. – 2016. – V. 85. – P. 230-257. DOI: 10.1016/j.ijplas.2016.07.008.
11. **Ugurchiev, U.Kh.** Comparative analysis of measuring the thermal effect during extension without a current and with a current / U.Kh. Ugurchiev, N.N. Novikova // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2021. – V. 50. – I. 5. – P. 469-473. DOI: 10.3103/S1052618821050138.
12. **Мисоченко, А.А.** Тепловое действие импульсного тока в сплавах с различными теплофизическими свойствами / А.А. Мисоченко, В.В. Столяров // Станкоинструмент. – 2023. – Вып. 4. – Р. 34-41. DOI: 10.22184/2499-9407.2023.33.4.34.41.

References:

1. Sheng Y., Hua Y., Wang X. et al. Application of high-density electropulsing to improve the performance of metallic materials: mechanisms, microstructure and properties, *Materials,* 2018, vol. 11, issue 2, art. no. 185, 25 p. DOI: 10.3390/ma11020185.
2. Lee C.H., Choi S.-W., Narayana P.L. et al. Effect of electric current heat treatment on commercially pure titanium sheets, *Metals,* 2021, vol. 11, issue 5, art. no. 783, 12 p. DOI: 10.3390/met11050783.
3. Pan D., Wang Y., Guo Q. et al. Grain refinement of Al–Mg–Si alloy without any mechanical deformation and matrix phase transformation via cyclic electro-pulsing treatment, *Materials Science and Engineering: A,* 2021, vol. 807, art. no. 144510, 14 p. DOI: 10.1016/j.msea.2021.140916.
4. Troitskii O.A. Electromechanical effect in metals, *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters,* 1969, vol. 1, no. 1, pp. 18-22.
5. Stolyarov V.V. Erratum to: Role of the Pulse Current Duty Cycle during Titanium Tension, *Journal of Machinery Manufacture and Reliability,* 2024, vol. 53, issue 3, p. 300. DOI: 10.1134/S1052618824700146.
6. Dimitrov N.K., Liu Y., Horstemeyer M.F. Electroplasticity: A review of mechanisms in electro-mechanical coupling of ductile metals, *Mechanics of advanced materials and structures*, 2020, vol. 29, issue 5, pp. 705-716. DOI: 10.1080/15376494.2020.1789925.
7. Ruszkiewicz B. J., Grimm T., Ragai I., Mears L., Roth J. T. A review of electrically assisted manufacturing with emphasis on modeling and understanding of the electroplastic effect, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2017, vol. 139, issue 11, art. no. 110801, 15 p. DOI: 10.1115/1.4036716.
8. Hariharan K., Lee M.-G., Kim M.-J. et al. Decoupling thermal and electrical effect in an electrically assisted uniaxial tensile test using finite element analysis, *Metallurgical and Materials Transactions,* 2015, vol. 46, issue 7, pp. 3043-3051. DOI: 10.1007/s11661-015-2879-3.
9. Ruszkiewicz B. J., Mears L., Roth J. T. Investigation of heterogeneous joule heating as the explanation for the transient electroplastic stress drop in pulsed tension of 7075-T6 aluminum, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2018, vol. 140, issue 9, art. no. 091014, 11 p. DOI: 10.1115/1.4040349.
10. 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, vol. 85, pp. 230-257. DOI: 10.1016/j.ijplas.2016.07.008.
11. Ugurchiev U. Kh., Novikova N. N. Comparative analysis of measuring the thermal effect during extension without a current and with a current, *Journal of Machinery Manufacture and Reliability,* 2021, vol. 50, issue 5, pp. 469-473. DOI: 10.3103/S1052618821050138.
12. Misochenko A.A., Stolyarov V.V. Teplovoe dejstvie impul'snogo toka v splavakh s razlichnymi teplofizicheskimi svojstvami [Thermal effect of pulsed current in alloys with different thermophysical properties], *Stankoinstrument*, 2023, issue 4, pp. 34-41. DOI: 10.22184/2499-9407.2023.33.4.34.41. (In Russian).