
НАДЕЖНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ, ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ

УДК 538.951: 53.097

РОЛЬ СКВАЖНОСТИ ИМПУЛЬСНОГО ТОКА ПРИ РАСТЯЖЕНИИ ТИТАНА

© 2023 г. В. В. Столяров

*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия**e-mail: vlstol@mail.ru*

Поступила в редакцию 27.02.2023 г.

После доработки 07.04.2023 г.

Принята к публикации 20.04.2023 г.

Рассмотрено воздействие импульсного тока на деформационное поведение при растяжении титана, полученного постдеформационным отжигом после холодной прокатки крупнозернистого и ультрамелкозернистого состояний. Исследовано влияние скважности импульсного тока в широком интервале на форму кривых “напряжение–деформация” и механические свойства. Показано, что снижение скважности вызывает увеличение теплового эффекта тока, снижение напряжений течения, прочности и пластичности, а также усиленное шейкообразование. Повышение скважности приводит к отсутствию нагрева и проявлению электропластического эффекта, повышению прочности и пластичности, которое зависит от структурного состояния крупнозернистого титана и способа его получения. Рассмотрены возможные физические механизмы упрочнения, связанные с двойникованием, деформационным старением и малоциклового усталостью.

Ключевые слова: титан, импульсный ток, скважность, растяжение, микроструктура, упрочнение

DOI: 10.31857/S0235711923040168, **EDN:** XXEOOW

Известно, что электропластический эффект (ЭПЭ) наиболее сильно проявляется при воздействии импульсного тока в отличие от постоянного или переменного тока [1]. Поэтому в настоящей статье рассматривается случай пластической деформации растяжением в сопровождении импульсного тока, а не единичных импульсов. Роль амплитуды импульса (плотности и мощности тока) при растяжении ясна и прогнозируема. Она заключается, как правило, в наличии критической плотности $j_{кр} = 10\text{--}100 \text{ А/мм}^2$ и усилении всех сопровождающих ток эффектов при ее повышении: теплового, электропластического (ЭПЭ), скин- и пинч-магнитопластического при прочих равных условиях эксперимента [2]. Импульсные воздействия разной природы (механические, акустические, ударные, волновые, электрический ток) помимо амплитуды сигнала характеризуются временными параметрами, к которым относятся длительность и период импульсов, соответственно, τ и T . Соотношение параметров T/τ определяет важную для импульсных воздействий характеристику, называемую скважностью Q . Рассматривая интервал возможных величин скважности импульсного тока, можно считать, что она может изменяться от нуля (постоянный ток, $\tau = \infty$) до бесконечности. Применение режима постоянного тока из-за сильного нагрева наименее целесообразно, если предполагается сохранить стабильную исходную структуру и свойства. Повышение скважности, естественно, приведет к снижению теплового эффекта вследствие релаксации термических напряжений и повышению роли непосредственно самого тока, т.е. ЭПЭ. Можно оценить необходимую для релаксации величину Q , при которой роль тепло-

го эффекта в снижении напряжений течения будет минимальной, а роль самого тока максимальной.

В первых работах по ЭПЭ *при растяжении*, как правило, применяли постоянный ток, который соответствует нулевой скважности [3]. Позже, роль скважности косвенно была исследована при растяжении монокристаллов цинка. Повышение частоты импульса с 5×10^{-3} до 5×10^{-1} Гц при длительности импульса 10^{-4} с (что соответствовало снижению скважности на два порядка с 2×10^6 до 2×10^4) привело к снижению деформационного упрочнения и амплитуды скачка напряжения в 3–4 раза, хотя температура образца при этом практически не менялась [1]. В подавляющем большинстве статей по ЭПЭ при растяжении информация о скважности импульсного тока отсутствовала. В чистых металлах [4] или стабильных однофазных сплавах (например, Al–Mg–Si) [5] авторы наблюдали снижение напряжений течения, которое увеличивалось при повышении плотности тока. Напротив, в термически упрочняемом алюминиевом сплаве 2024 (Al–Cu–Mg), наблюдалось упрочнение под действием импульсного тока, как без деформации [6], так и при растяжении [7]. Внимание исследователей ЭПЭ было в основном сфокусировано на роли плотности тока и длительности импульса, оставляя в стороне роль частоты (скважности).

Напротив, в статьях по применению ЭПЭ *в процессах обработки давлением* данные по частоте импульса приводятся. Для повышения деформируемости при прокатке полос хрупкого при комнатной температуре магниевого сплава AZ31 была использована частота в интервале 200–700 Гц при $\tau = 80$ мкс, что соответствовало скважности $Q = 20$ –60 [8]. Применение импульсного тока при изгибе алюминиевого сплава 1050-H18 выполнялось при частоте 200–300 Гц и $\tau = 50$ мкс, что соответствовало $Q = 100$ [9]. При электропластической прокатке сплава Zr–Ti–Al–V также были использованы близкие параметры частоты и длительности импульса, которые соответствовали скважности $Q = 20$ [10]. В обзоре, посвященном *электроимпульсной обработке*, упоминается отдельное влияние длительности импульса 15–30 мкс и частоты 100–200 Гц, которые снижают напряжения течения и повышают пластичность для магниевых сплавов [11]. В последние годы в статьях по ЭПЭ при растяжении [12–14] стали приводится длительность импульса и частота, позволившие оценить скважность, которая находилась в интервале $10 \leq Q < 200$. В целом можно заключить, что выбор скважности происходил произвольным образом без анализа.

В работе [15] исследовано деформационное поведение при растяжении чистого титана в сопровождении постоянного тока ($Q = 0$). Авторы не только подтвердили наличие ЭПЭ, но и обнаружили рекристаллизацию и рост зерен при относительно небольших плотностях тока. Интересно, что структурные изменения не наблюдались при пропускании тока без деформации или при повышенной температуре с деформацией без тока.

Рассмотренные статьи дают представление о влиянии постоянного и импульсного тока в довольно узком интервале скважности, соответствующем довольно большому термическому эффекту и возможно не очень значительному вкладу атермического эффекта тока.

Целью настоящей статьи является исследование влияния скважности импульсного тока при растяжении в крупнозернистом технически чистом титане, полученном разными термомеханическими обработками, в более широком интервале, особенно при условиях, когда тепловой эффект практически отсутствует.

Материал и методы исследования Объектом исследования служил технически чистый титан BT1-0 (зарубежный аналог Grade-2) в виде прутка $\varnothing 40$ мм. В табл. 1 дан химический состав титана BT1-0 (Grade 2 для сравнения), а также силумина.

Титан был исследован в крупнозернистом (КЗ) состоянии, полученном двумя способами: 1) холодная прокатка (ХП) в калибрах и последующий отжиг при 700°C в течение 1 ч; 2) равноканальное угловое прессование (РКУП) с последующей холодной

Таблица 1. Химический состав (вес. %) сплавов

Материал	Si	Cr	Fe	C	O	N	H
BT1-0	—	—	0.1	0.2	0.25	0.02	0.010
Grade 2	—	—	0.1	0.2	0.15	0.02	0.015

Таблица 2. Режимы тока

№ обр.	Вид обработки	Вид тока	Плотность тока j , А/мм ²	Длительность импульса τ , мкс	Скважность, Q	$T_{\text{обр}}$, °C
1	ХП + 700°C	без тока	0	—	—	25
2		импульсный	250	1000	20000	26
3			95	100	10	130
4		постоянный	18	—	0	130
1	РКУП + + ХП + 700°C	—	0	—	—	25
2		импульсный	250	1000	40000	25
3			95	100	10	130
4		постоянный	18	—	0	130

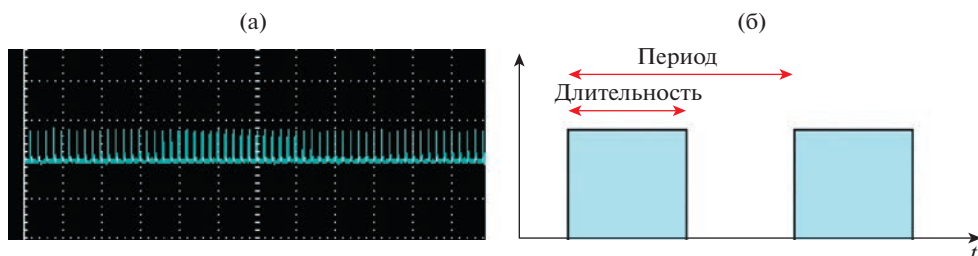
прокаткой и отжигом при 700°C в течение 1 ч. Детали РКУП процесса и последующей холодной прокатки описаны в [16]. В обоих случаях холодная прокатка выполнялась в калибрах со степенью деформации $\varepsilon = 73\%$.

Механические испытания на растяжение выполняли при комнатной температуре на горизонтальной машине ИР 5081-20 со скоростью 1 мм/мин. Образцы для испытания были изготовлены точением и имели размеры рабочей части $\varnothing 1.65 \times 25$ мм².

Режимы и вид тока были выбраны так, чтобы на кривых растяжения фиксировалась стадия деформационного упрочнения, а тепловой эффект и температура образца были бы минимальны. Использовали параметры импульсного и постоянного тока, которые позволяли варьировать скважность $Q = T/\tau$, где T , τ — период и длительность импульса, в интервале 0–40000 (рис. 1, табл. 2).

Предполагается, что постоянный ток ($Q = 0$) является частным случаем импульсного тока при бесконечно большой величине τ .

Растяжение выполняли после стабилизации температуры образца, повышение которой было вызвано введением тока. Температуру образца контролировали термопарой и инфракрасной камерой. Расхождение измеренных температур не превышало $\pm 5^\circ\text{C}$.

**Рис. 1.** Пример осциллограммы при $Q = 10$ (а) и схема импульсного тока (б).

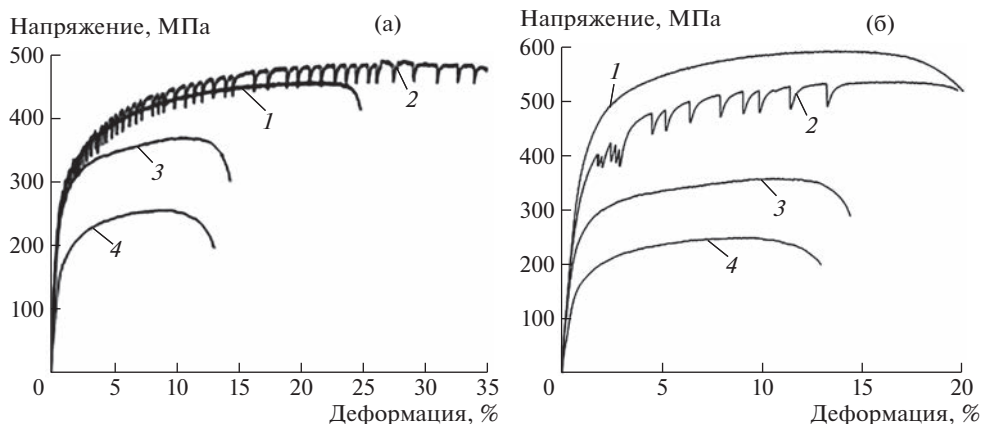


Рис. 2. Кривые “напряжение–деформация” титана в КЗ 1 (а) и КЗ 2 (б) состояниях: 1 – без тока, 25°C; 2 – импульсный ток, 27°C (а), 27°C (б), $Q = 2 \cdot 10^4$ (а), $Q = 4 \cdot 10^4$ (б); 3 – импульсный ток, 130°C, $Q = 10$; 4 – постоянный ток, 130°C, $Q = 0$.

Экспериментальные результаты. На рис. 2 представлены кривые растяжения с разными режимами тока в крупнозернистом титане, структурное состояние которого было получено разными термомеханическими обработками. Видно, что механические свойства титана в состоянии КЗ 1 (рис. 2а) при растяжении без тока (кривые 1) отличаются меньшим пределом прочности (на 140 МПа) и большим удлинением до разрушения (на 5%) по сравнению с титаном КЗ 2 (рис. 2б).

Введение импульсного тока скважностью $Q = (2-4) \times 10^4$ в обоих структурных состояниях титана приводит к появлению скачков напряжения вниз амплитудой около 30 МПа, практически без изменения температуры образца (кривые 2). Амплитуда скачка напряжения уменьшается в два раза при двукратном уменьшении длительности импульса с 1000 до 500 мкс (рис. 2а, область предела текучести, кривая 2). Однако расположение кривых растяжения при токе высокой скважности в обоих типах титана отличается. В титане КЗ1 наблюдается повышение одновременно прочности и удлинения до разрушения, соответственно, на 40–50 МПа и на 10%, а в титане КЗ2 – снижение прочности на 70 МПа в сравнении с растяжением без тока. Снижение скважности тока на три порядка в обоих структурных состояниях титана приводит к заметному повышению температуры до 130°C, исчезновению скачков напряжения, снижению прочности, по сравнению с растяжением без тока, на 100 МПа (в КЗ1) и 230 МПа (в КЗ2), и снижению удлинения до разрушения на 11% (КЗ1) и 8% (КЗ2) (кривые 3). Действие постоянного тока (кривые 4) также повышает температуру образца до 130°C и дополнительно снижает прочностные и пластические характеристики, соответственно, на 200 МПа (КЗ1) и 340 МПа (КЗ2) и 12% (КЗ1) и 10% (КЗ2).

Обсуждение. Представленные результаты свидетельствуют о двух важных следствиях применения электрического тока в процессе растяжения образцов титана. Деформационное поведение материала под током определяется режимом (видом) тока и структурным состоянием исследуемого титана.

Оказалось, что изменение в широком интервале значений такого параметра импульсного тока, как скважность, оказывает сильное влияние на форму деформационной кривой и ее относительное расположение по отношению к растяжению без тока. Снижение скважности фактически означает уменьшение времени релаксации, необ-



Рис. 3. Вид шейки образца на растяжение перед разрушением.

ходимой для восстановления падения напряжений течения, вызванного введением тока.

На всех кривых с низкой скважностью импульсного тока ($Q = 10$) и тем более при постоянном токе ($Q = 0$) сокращается область равномерного удлинения и увеличивается область сосредоточенной деформации (шейки) (рис. 3), что в целом приводит к уменьшению относительного удлинения почти вдвое.

Это в свою очередь смещает точки пиковых нагрузок в область меньших деформаций. Усиление шейкообразования в титане связано с кратным повышением плотности тока при уменьшении сечения и, как следствие, с повышением локальной температуры, возможно до температуры фазового $\alpha \rightarrow \beta$ -превращения. В этой связи, ускоренное разрушение образца может быть обусловлено изменением механизма деформации. Отмеченные особенности деформационного поведения согласуются с результатами для зарубежного аналога титана Grade 2 с меньшей прочностью и с меньшим размером зерен 9 мкм, чем титан ВТ1-0 в настоящей статье. Авторы наблюдали интенсивное шейкообразование при введении тока, сопровождавшееся уменьшением равномерной деформации [17].

Другим важным следствием воздействия импульсного тока является необычный, хотя и слабый, эффект одновременного повышения прочности и пластичности, который фиксировался только для структурного состояния КЗ1 и только для высокой скважности тока. Очевидно, что подобное изменение свойств нельзя связать с тепловым эффектом тока. Из литературы известны случаи упрочнения, вызванные током. Однако они относятся к сложным сплавам и сталям с гетерогенной многофазной структурой, в которых возможны старение [18] или возникновение виброакустических колебаний [19]. Наиболее близок к нашему случаю пример упрочнения при растяжении с током в однофазном сплаве Ti–Al, описанный в работе [20]. В чистых металлах слабый эффект упрочнения под действием постоянного тока был отмечен только для монокристаллического и технически чистого ГЦК алюминия [21], имеющего высокую энергию дефектов упаковки и высокую гомологическую температуру.

Предположительно, наблюдающееся упрочнение в настоящей статье связано с текстурными особенностями титана. Известно, что в силу низкой симметрии ГПУ структуры титана ($c/a < 1.633$, где c , a — параметры кристаллической решетки), деформационный механизм при комнатной температуре сильно зависит от конкуренции систем двойникования и дислокационного скольжения, ориентации и размера зерен, которые в свою очередь определяются схемой деформации и температурой отжига.

Известно, что кристаллографическая текстура КЗ титана после холодной прокатки ($\epsilon > 70\%$) характеризуется присутствием систем двойникования $\{10\bar{1}2\}$ (1011) , $\{11\bar{2}2\}$ (1123) и дислокационного скольжения $\{10\bar{1}0\}$ $(11\bar{2}0)$ [22]. В текстуре после холодной прокатки РКУП титана двойникование подавлено и присутствуют только системы скольжения [23]. Как показали наши эксперименты, дисперсность микроструктуры после прокатки РКУП состояния выше — деформационные полосы тоньше и короче (рис. 4а, б).

Различия в текстуре и микроструктуре деформированных состояний наследуются и в микроструктуре титана после отжига. Если текстура рекристаллизации и деформа-

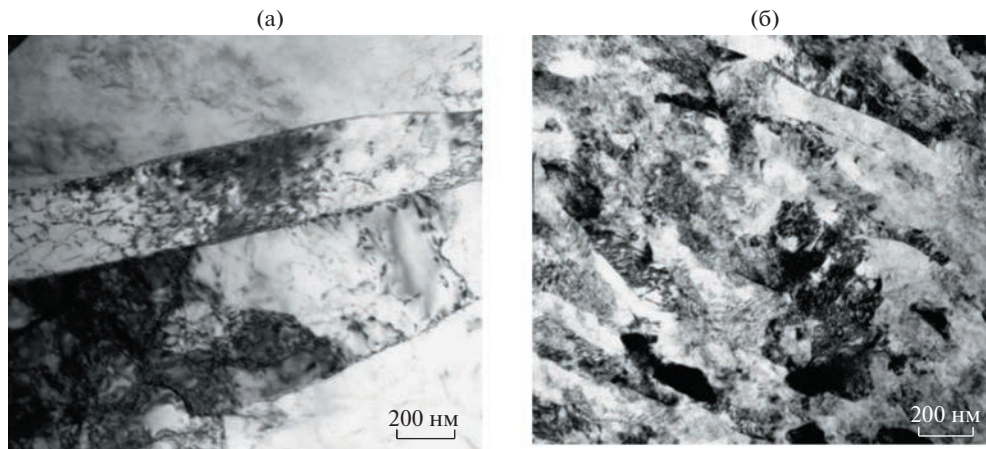


Рис. 4. Микроструктура титана в поперечном направлении: (а) – холодная прокатка 73%; (б) – РКУП + холодная прокатка 73%.

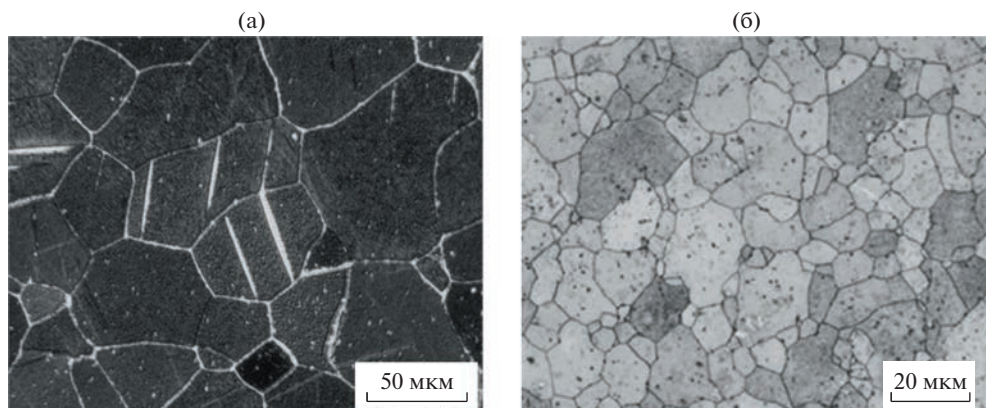


Рис. 5. Микроструктура титана в поперечном сечении после отжига при 700°C: (а) – К3 1; (б) – К3 2 [24].

ции совпадает, то в нашем случае после отжига при 700°C в К31 состоянии двойниковые ориентировки присутствуют (рис. 5а), а в К32 отсутствуют (рис. 5б). Кроме того, размер рекристаллизованного зерна в К31кратно больше, чем в К32 титане (рис. 5).

Поэтому, в состоянии К31 одиночные импульсы тока при растяжении могут стимулировать поперечное скольжение дислокаций и более высокие напряжения течения, что и наблюдалось для сплава Ti–Al в работе [20]. Другими вероятными механизмами возникающего упрочнения могут быть деформационное старение [25] или малоцикловая усталость при напряжениях выше напряжения течения. Все рассмотренные механизмы требуют постановки специальных исследований для выяснения причин упрочнения.

Практическое применение представленных результатов возможно в процессах обработки давлением для получения длинномерных полуфабрикатов тонкого сечения повышенной прочности и деформируемости.

Выводы. 1. Исследовано деформационное поведение при растяжении в сопровождении импульсного тока высокой скавжности технически чистого титана ВТ1-0, полученного рекристаллизационным отжигом холоднокатанного крупнозернистого и ультрамелкозернистого состояния. 2. Показано, что электропластический эффект проявляется независимо от теплового нагрева и способен приводить к упрочнению при одновременном повышении пластичности. 3. Предполагается, что физический механизм упрочнения связан с возможностью формирования в микроструктуре титана двойников и поперечного переползания дислокаций. 4. Потенциальное применение электропластического эффекта заключается в его применении к процессам обработки давлением труднодеформируемых материалов с низкой деформируемостью.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта по соглашению № 075-15-2021-709, уникальный идентификатор проекта RF-2296 61321X0037 (проведение контрольных измерений).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Троицкий О.А., Баранов Ю.В., Авраамов Ю.С., Шляпин А.Д. Физические основы и технологии обработки современных материалов (теория, технология, структура и свойства). В 2-х томах. Т. 1. Москва–Ижевск: Институт компьютерных технологий, 2004. 590 с.
2. Conrad H. Effects of electric current on solid state phase transformations in metals // Mater. Sci. Eng. A. 2000. 287 (2). P. 227.
3. Troitskii O.A. Electromechanical effect in metals // JETP Letters. 1969. № 1. P. 18.
4. Varma S.K., Cornwell L.R. The Electroplastic Effect in Aluminum // Scr. Metall. 1979. V. 13. P. 733.
5. Roh J.H., Seo J.J., Hong S.T., Kim M.J., Han H.N., Roth J.T. The mechanical behavior of 5052-H32 aluminum alloys under a pulsed electric current // Inter. J. of Plasticity 58. 2014. P. 84. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2014.02.002>
6. Xu X., Zhao Y., Ma B., Zhang M. Rapid precipitation of T-phase in the 2024 aluminum alloy via cyclic electropulsing treatment // J. of Alloys and Compounds. 2014. V. 610. P. 506. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.05.063>
7. Wu W., Wang Y., Wang J., Wei S. Effect of electrical pulse on the precipitates and material strength of 2024 aluminum alloy // Mater. Sci. Eng. A. 2014. V. 608. P. 190. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.04.071>
8. Li X., Tang G., Kuang J., Li X., Zhu J. Effect of current frequency on the mechanical properties, microstructure and texture evolution in AZ31 magnesium alloy strips during electroplastic rolling // Mater. Sci. Eng. A. 2014. V. 612. P. 406. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.06.075>
9. Sánchez Egea A.J., González Rojas H.A., Celentano D.J., Travieso-Rodríguez J.A., Llumà i Fuentes J. Electroplasticity-assisted bottom bending process // J. Mater. Process. Technol. 2014. V. 214. P. 2261. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.04.031>
10. Guo D., Deng W., Song P., Lv X., Shi Y., Qu Z., Zhang G. Effect of Strain Rate on Microstructure and Mechanical Properties of Electroplastic Rolled ZrTi Alloy // Adv. Eng. Mater. 2022. V. 24 (7). <https://doi.org/10.1002/adem.202101366>
11. Sheng Y., Hua Y., Wang X., Zhao X., Chen L., Zhou H., Wang J., Berndt C.C. Li W. Application of High-Density Electropulsing to Improve the Performance of Metallic Materials: Mechanisms, Microstructure and Properties // Materials. 2018. V. 11. P. 185. <https://doi.org/10.3390/ma11020185>
12. Kim M.J., Lee M.G., Hariharan K., Hong S.T., Choi I.S., Kim D., Oh K.H., Han H.N. Electric current-assisted deformation behavior of Al-Mg-Si alloy under uniaxial tension // Int. J. Plast. 2017. V. 94. P. 148. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2016>

13. *Indhiarto I., Shimizu T., Furushima T., Yang M.* Effect of DC pulsed-current on deformation behavior of magnesium alloy thin sheets // *Procedia Manufact.* 2018. V. 15. P. 1663.
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.270>
14. *Stolyarov V., Korolov O., Pesin A., Raab G.* Deformation Behavior under Tension with Pulse Current of Ultrafine-Grain and Coarse-Grain CP Titanium // *Materials.* 2023. V. 16. P. 191.
<https://doi.org/10.3390/ma16010191>
15. *Rudolf C., Goswami R., Kang W., Thomas J.* Effects of electric current on the plastic deformation behavior of pure copper, iron, and titanium // *Acta Mater.* 2021. V. 209 (1). P. 116776.
<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2021.116776>
16. *Stolyarov V.V., Zhu Y.T., Alexandrov I.V., Lowe T.C., Valiev R.Z.* Influence of ECAP routes on the microstructure and properties of pure Ti // *Mater. Sci. Eng. A.* 2001. V. 299. P. 59.
17. *Rudolf C., Goswami R., Kang W., Thomas J.* Effects of electric current on the plastic deformation behavior of pure copper, iron, and titanium // *Acta Mater.* 2021. V. 209. P. 116776.
<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2021.116776>
18. *Демлер О., Герштейн Г., Далингер А., Нюрнбергер Ф., Епишин А., Молодов Д.А.* Влияние импульсов электрического тока на деформационное поведение монокристаллов никелевого жаропрочного сплава смх-4 и подвижность малоугловой границы зерен в бикристаллах алюминия // *Изв. РАН. Серия физическая.* 2018. Т. 82. № 9. С. 1189.
<https://doi.org/10.1134/S0367676518090065>
19. *Савенко В.С., Троцкий О.А., Гуненко А.В.* Физические аспекты электропластической деформации металлов // *Вестник Брестского университета, Серия 4, Физика. Математика.* 2018. № 1. P. 40.
20. *Zhao S., Zhang R., Chong Y. et al.* Defect reconfiguration in a Ti–Al alloy via electroplasticity // *Nat. Mater.* 2021. V. 20. P. 468.
<https://doi.org/10.1038/s41563-020-00817-z>
21. *Pakhomov M.A., Stolyarov V.V.* Specific features of electroplastic effect in mono- and polycrystalline aluminum // *Metal Sci. Heat Treat.* 2021. V. 63. P. 236.
<https://doi.org/10.1007/s11041-021-00677-7>
22. *Lee H.P., Esling C., Bunge H.J.* Development of the Rolling Texture in Titanium // *Textures and Microstructures.* 1988. V. 7. P. 317.
23. *Zherebtsov S.V., Dyakonov G.S., Salem A.A., Malysheva S.P., Salishchev G.A., Semiatin S.L.* Evolution of grain and subgrain structure during cold rolling of commercial-purity titanium // *Mater. Sci. Eng. A.* 2011. V. 528 (9). P. 3474.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.01.039>
24. *Stolyarov V.V., Zeipper L., Mingler B., Zehetbauer M.* Influence of post-deformation on CP-Ti processed by equal channel angular pressing // *Mater. Sci. Eng. A.* 2008. V. 476. P. 98.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.04.069>
25. *Lee T., Magargee J., Kwan Ng M., Cao J.* Constitutive analysis of electrically-assisted tensile deformation of CP-Ti based on non-uniform thermal expansion, plastic softening and dynamic strain aging // *Int. J. Plast.* 2017. V. 94. P. 44.
<https://doi.org/10.1016/j.iplas.2017.02.012>