

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2022-88-10-73-82>

## ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В ТИТАНОВЫХ СПЛАВАХ ПРИ ИХ РАСТЯЖЕНИИ

© Олег Евгеньевич Корольков\*, Михаил Андреевич Пахомов, Владимир Владимирович Столяров

Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Россия, 101000, Москва, Малый Харитоньевский пер., д. 4;  
\*e-mail: korolkov\_oleg@vk.com

*Статья поступила 11 марта 2022 г. Поступила после доработки 29 апреля 2022 г.  
Принята к публикации 26 мая 2022 г.*

Электропластический эффект (ЭПЭ) — явление, при котором наблюдается снижение сопротивления металла деформации, а также улучшение его пластичности под влиянием электрического тока достаточно высокой плотности [1]. Цель работы — сравнение деформационного поведения однофазного технического чистого титана Grade 4 и двухфазного титанового сплава VT6 при растяжении с введением импульсного тока и внешним нагревом. Ток различной скважности и плотности подвели к захватам разрывной машины от импульсного генератора. Для оценки относительного вклада электропластического эффекта при пропускании тока в снижение напряжений течения на материалы воздействовали также тепловым источником. Микроструктуру образцов в головке образца и вблизи области разрушения в продольном сечении исследовали методом оптической микроскопии. Электропластический эффект в исследованных материалах проявлялся на кривой растяжения в виде отдельных скачков напряжения течения вниз при токе высокой скважности и в снижении напряжения течения и деформационного упрочнения, увеличении пластичности при импульсном токе низкой скважности. Установлено, что при растяжении образца с воздействием тока происходит большее снижение напряжений течения, чем при внешнем нагреве, при одинаковой температуре в обоих материалах. Это подтверждает атермическую природу влияния импульсного тока. Критическая плотность импульсного тока высокой скважности ( $q = 5000$ ), при которой проявляется электропластический эффект, для сплава VT6 в два раза ниже, чем для Grade 4. При одинаковых режимах импульсного тока напряжения течения для VT6 снижаются больше, чем для Grade 4. Импульсный ток высокой скважности в сплаве VT6 вызывал аномальный эффект упрочнения, физическая природа которого нуждается в дополнительном исследовании. Используемые режимы импульсного тока не привели к заметным при оптическом увеличении структурным изменениям растягиваемых образцов, кроме исчезновения двойников и выделения частиц примесей в Grade 4, а также сфероидизации зерен в VT6.

**Ключевые слова:** электропластический эффект; импульсный ток; растяжение; титан; микроструктура.

## THE ELECTROPLASTIC EFFECT IN TITANIUM ALLOYS UNDER TENSION

© Oleg E. Korolkov\*, Mikhail A. Pakhomov, Vladimir V. Stolyarov

A. A. Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, 4, Maly Kharitonievsky per., Moscow, 101990, Russia; \*e-mail: korolkov\_oleg@vk.com

*Received March 11, 2022. Revised April 29, 2022. Accepted May 26, 2022.*

The electroplastic effect (EPE) is a phenomenon which consists in a decrease in the strain resistance and enhancing of the plasticity of metals under the effect of the electric current of a sufficiently high density [1]. The goal of the study is to compare the deformation behavior of single-phase commercially pure titanium Grade 4 and two-phase VT6 alloy under tension and external heating with introduction of a pulsed current. Current of various pulse ratio and density was supplied to the grips of the tensile testing machine from a pulse generator. To estimate the relative contribution of the electroplastic effect during passage of current to the reduction of flow stresses, the materials were also exposed to external heating. The microstructure of the samples in the sample head and in the vicinity of the fracture region in the longitudinal section was studied using optical microscopy. The electroplastic effect in the studied materials is manifested on the tensile curve through individual jumps in the downward flow stress at a high pulse ratio, whereas at a low current pulse ratio a decrease in the flow stress and strain hardening and increase in the plasticity are observed. It is shown that tension of the sample under the effect of current results in a greater decrease in the flow stresses than that observed under external heating at the same temperature

for both materials. This confirms the athermal nature of the pulsed current effect. The critical density of the high pulse ratio current ( $q = 5000$ ) capable of providing manifestation of the electroplastic effect is two times lower for a VT6 alloy than for pure titanium Grade 4. Under the same pulsed current modes, the flow stresses for VT6 decrease more than for Grade 4. Pulsed current of high pulse ratio caused an anomalous hardening effect in a VT6 alloy, but the physical nature of this effect requires an additional study. The pulsed current modes used in the study did not lead to any structural changes noticeable under optical magnification in the samples under tension, except for the disappearance of twins and separation of the impurity particles in Grade 4 and spheroidization of grains in VT6.

**Keywords:** electroplastic effect; pulsed current; tension; titanium; microstructure.

## Введение

Существование ЭПЭ впервые было установлено при деформации растяжением монокристаллов цинка в ускорителе частиц [1]. В работе [2] рассмотрены вопросы теплового разупрочнения и подробно разобраны механизмы, лежащие в основе ЭПЭ. Отмечены такие эффекты, как сила электронного увлечения и электронный ветер, динамический пинч-эффект, механическое напряжение около поверхности раздела и динамическое температурное поле. В работе [3] показано, что пондеромоторный пинч-эффект, возникающий от сжатия образцов собственным магнитным полем, вызывает виброакустические колебания в цилиндрических образцах титанового сплава ВТ6. Авторы [4] использовали различные режимы импульсного тока при растяжении дуплексной нержавеющей стали. В зависимости от выбранных режимов наблюдались как отдельные скачки напряжения течения, так и общее снижение напряжения течения на 25 – 30 %.

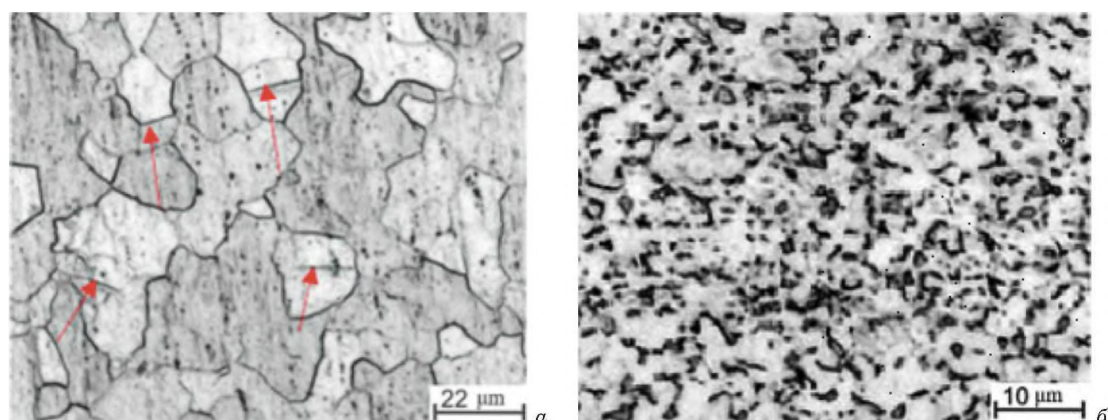
В настоящее время существуют три основные теории, объясняющие действие ЭПЭ: электронно-дислокационное взаимодействие, локальный нагрев на структурных неоднородностях и магнитопластичность [5]. Электронно-дислокационное взаимодействие и магнитопластичность подробно рассмотрены в работах [1, 2]. Исследуя локальный нагрев на границах зерен в латуни 70/30, авторы [6] отмечали, что материал с меньшим размером зерна (большей протяженностью границ зерен) сильнее разогревается за счет Джоулева эффекта, что способствует снижению напряжения течения в процессе деформации с током. Авторами работы [7] разработаны математические модели на основе плотности дислокаций, хорошо предсказывающие результаты экспериментов с постоянным и импульсным током.

В ряде работ ЭПЭ подвергается сомнению. В [8] показано, что импульсный ток высокой плотности позволяет избежать появления трещин, уменьшить напряжение течения и улучшить деформируемость при изгибе титанового сплава Ti–6Al–4V, что авторы связывают в основном с Джоулевым нагревом. Авторы [9] отмечают отсутствие ЭПЭ при высоких скоростях деформации, предполагая, что существует некоторая конечная скорость движения дислокаций.

Возможность практического применения ЭПЭ в разных материалах рассмотрена в работе [1]. Большинство авторов сходится на том, что, используя технологию электропластической деформации, можно при достаточно низких температурах деформировать металлические материалы. Нагрузка при этом снижается до 30 %, микродефекты заживают, пружинение уменьшается [8].

Особый интерес представляет ЭПЭ при деформации титана и сплавов на его основе. Благодаря отличному комплексу физико-механических свойств эти материалы широко применяют в аэрокосмической, химической промышленности, приборостроении, а также для производства медицинских имплантатов. Особенность деформации титана и его сплавов заключается в необходимости нагрева заготовок перед формоизменением. Однако нагрев выше 350 °С сопровождается образованием окислов на поверхности полуфабриката, ростом зерен и образованием альфированного слоя. Пластическая деформация заготовок без использования высокой температуры часто сопровождается трещинообразованием и высоким пружинением. Введение дополнительных технологических операций, связанных с рекристаллизационным отжигом, удалением окисной пленки и альфированного слоя, усложняет производство титановых полуфабрикатов. Деформация с использованием ЭПЭ при более низких температурах могла бы значительно улучшить технологичность производства изделий из титана и его сплавов.

Электропластический эффект в чистом титане описан авторами [10], которые анализировали величину критической плотности тока, при которой проявляется этот эффект. Отдельное внимание уделено скачкам в упругой области кривой растяжения, которые авторы объясняли тепловым расширением ввиду отсутствия движения дислокаций. Следует отметить, что это одна из немногочисленных работ по изучению отдельных импульсов тока в титане. Изучению ЭПЭ в сплаве Ti–6Al–4V уделено внимание в работе [11], в которой рассмотрено влияние импульсного тока на структуру сплава. В исследовании использовали режимы тока с различной скважностью, плотностью и скоростью деформации. Установле-



**Рис. 1.** Микроструктура титана: *a* — Grade 4; *b* — VT6

**Fig. 1.** Titanium microstructure: *a* — Grade 4; *b* — VT6

но, что импульсный ток способствует растворению  $\beta$ -фазы и динамической рекристаллизации  $\alpha$ -фазы. Показано, что напряжения течения во всех случаях снижаются, тогда как удлинение ведет себя неоднозначно — уменьшается при плотности тока менее 8,1 А/мм<sup>2</sup>, а при больших плотностях увеличивается почти в два раза. Конкретные выводы о влиянии скважности в работе не приведены. В работе [12] рассмотрены особенности растяжения никелида титана с импульсным током. Показаны скачки напряжения течения вверх, которые объясняются обратимым фазовым превращением, происходящим в результате действия тока.

Цель данного исследования — сравнение деформационного поведения и микроструктуры однофазного технически чистого титана Grade 4 и двухфазного сплава VT6 при их растяжении с введением импульсного тока разной скважности, а также при растяжении с внешним нагревом.

### Материалы и методы исследований

Исследования проводили на технически чистом титане Grade 4 (ASTM F67-06) в виде прутка Ø6 мм и двухфазном титановом сплаве VT6 (ГОСТ 22178–76) в форме пластин толщиной 2 мм. Химический состав материалов представлен в табл. 1. Оба материала находились в отожженном при температурах соответственно 650 и 700 °С состояниях.

На рис. 1 показаны исходные микроструктуры Grade 4 и VT6. Зерна Grade 4 имеют равноос-

ную форму и средний размер 20 мкм (рис. 1, *a*). Внутри зерен заметны частицы оксидов и интерметаллидов элементов, входящих в состав материала. Отмечается наличие тонких двойников (показаны стрелками). Структура сплава VT6 состоит из матричных  $\alpha$ -зерен размером 2–5 мкм и зернограничной  $\beta$ -фазы (не более 15 %).

Цилиндрические и плоские образцы для растяжения изготавливали соответственно точением и электроискровой обработкой. Форма и размеры образцов для растяжения показаны на рис. 2.

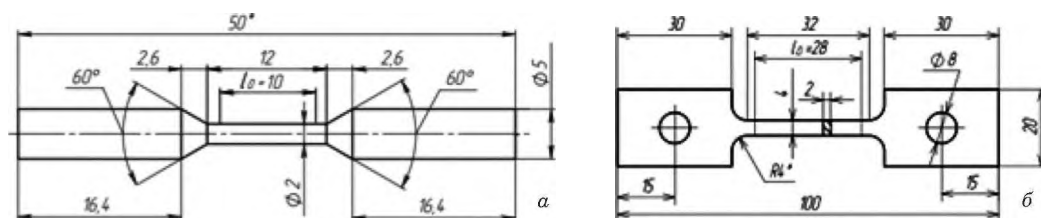
Растяжение выполняли на горизонтальной разрывной машине ИР-5081/20. Начальные скорости испытания составляли 1,3 и 0,9 мм/мин для Grade 4 и VT6 соответственно. К зажимам разрывной машины от генератора подводился импульсный ток, скважность которого  $q = 1/\nu\tau = T/\tau = 10, 5000, 10000$  и  $20000$ , где  $\nu$ ,  $T$  и  $\tau$  — частота, период и длительность импульса соответственно. Скважность изменяли за счет вариации частоты и длительности импульса.

Режимы тока для разных материалов варьировали по длительности импульса ( $\tau = 100–1000$  мкс) и амплитудной плотности ( $j = 10–860$  А/мм<sup>2</sup>) таким образом, чтобы температура образца не превышала 300 °С. Захваты образцов изолировали от машины проставками из стеклотекстолита. Температуру образца контролировали прибором Digital Thermometers UT320 Series и хромель-алюмелевой термопарой в центре образца с точностью  $\pm 2$  °С, амплитудную плотность тока — с помощью осциллографа АКИМ-

**Таблица 1.** Химический состав Grade 4 и VT6, % масс.

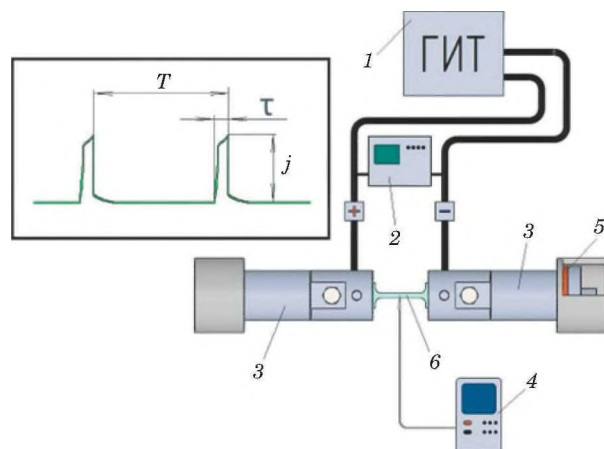
**Table 1.** Chemical composition Grade 4 and VT6, wt.%

| Материал | N    | C    | H     | Fe  | O   | V   | Al  | Zr  | Si  | Ti        |
|----------|------|------|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----------|
| Grade 4  | 0,05 | 0,08 | 0,015 | 0,5 | 0,4 |     |     |     |     | Остальное |
| VT6      | 0,05 | 0,1  | 0,015 | 0,6 | 0,2 | 4,2 | 5,9 | 0,3 | 0,1 | Остальное |



**Рис. 2.** Форма и размеры образцов: *a* — цилиндрические (Grade 4); *b* — плоские (BT6)

**Fig. 2.** Shape and dimensions of samples: *a* — cylindrical (Grade 4); *b* — flat (VT6)



**Рис. 3.** Схема испытательной установки (1 — генератор импульсного тока; 2 — осциллограф; 3 — захваты; 4 — термопара; 5 — изоляция; 6 — образец) и осциллограмма импульсного тока

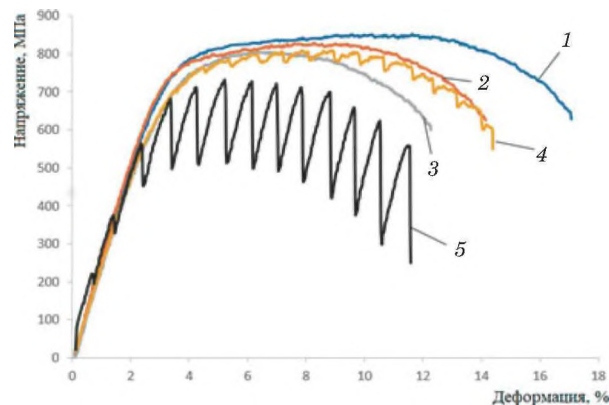
**Fig. 3.** Scheme of the test setup: 1 — pulse current generator; 2 — oscilloscope; 3 — clamps; 4 — thermocouple; 5 — insulation; 6 — sample. In the insert is an oscillogram of the pulsed current

4131/2. Ток вводился в образец до начала растяжения, которое начиналось после стабилизации температуры. Для нагрева образца воздухом использовали технический фен MAKITA HG6530VK. Схема испытательного стенда показана на рис. 3.

Микроструктуру образцов в головке образца (недеформированной зоне) и вблизи области разрушения (деформируемой зоне) в продольном сечении исследовали методом оптической микроскопии (Olympus Vx-51). Образцы предварительно подготавливали механической шлифовкой и полировкой, затем электрополировкой при напряжении 35 – 50 В в растворе хлорной и уксусной ледяной кислот в соотношении 1:4 и химическим травлением в растворе плавиковой и азотной кислот в воде в соотношении 1:2:47.

## Результаты испытаний

Поскольку деформационное поведение материала зависит не только от его природы, но и от интенсивности вводимого импульсного тока, то



**Рис. 4.** Кривые растяжения титана Grade 4 при высокой скажности тока: 1 — без тока; 2 — 220 А/мм², 250 мкс; 3 — 220 А/мм², 500 мкс; 4 — 220 А/мм², 1000 мкс; 5 — 860 А/мм², 1000 мкс

**Fig. 4.** Tensile curves of Grade 4 titanium at high current pulse ratio: 1 — without current; 2 — 220 A/mm², 250 μsec; 3 — 220 A/mm², 500 μsec; 4 — 220 A/mm², 1000 μsec; 5 — 860 A/mm², 1000 μsec

отдельно рассмотрим результаты, полученные при высокой ( $q = 5000 - 20000$ ) и низкой ( $q = 10$ ) скажности тока для обоих материалов. Режимы отличались и температурой деформации, которую повышали от комнатной до 300 °С при снижении скажности.

*Титан марки Grade 4.* На рис. 4 показаны кривые растяжения Grade 4 без тока (кривая 1), а также при воздействиях импульсов тока высокой скажности (кривые 2 – 5).

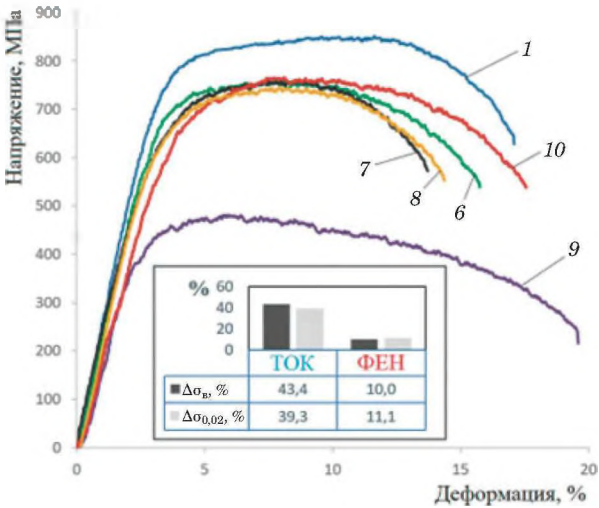
Наиболее ярким проявлением ЭПЭ при выбранной моде тока является возникновение на кривой деформации скачков напряжения вниз в упругой и пластической зонах, каждый из которых соответствует отдельному импульсу тока. Отметим, что амплитуда скачков напряжения в упругой области всегда меньше, чем в пластической. При растяжении без тока (кривая 1) и с минимальной плотностью 220 А/мм² и длительностью импульсов 250, 500 мкс скачки отсутствуют (кривые 2, 3). С увеличением плотности тока и длительности импульса появляются скачки, амплитуда которых повышается от десятков до сотен МПа (кривые 4 и 5). Можно считать, что

критическая плотность тока для появления скачков напряжения при скважности  $q = 5000$  (длительности 1000 мкс) составляет 220 А/мм<sup>2</sup>. Видно, что профиль скачка несимметричен и состоит из стадий быстрого спада (~0,2 с) и медленного повышения (~4,5 с) напряжения, обусловленных разной скоростью нагрева и охлаждения образца. Очевидно, что длительность импульса тока на три порядка ниже времени воспроизведения скачка. Уровень восстановленного напряжения зависит от стадии деформации и может быть выше, ниже или равным исходному напряжению.

Другим проявлением ЭПЭ является изменение формы кривой растяжения и уменьшение напряжений течения в целом по сравнению с растяжением без тока. Кривые растяжения с током характеризуются снижением деформационного упрочнения, равномерного (общего) удлинения и увеличением деформации в шейке, возрастающей при повышении плотности тока и снижении скважности.

Уменьшение скважности импульсного тока на несколько порядков позволило выявить дополнительные особенности деформационного поведения Grade 4 (рис. 5). Наблюдается большее снижение напряжений течения (100 – 380 МПа) при меньшей плотности тока (20 – 60 А/мм<sup>2</sup>) по сравнению с током высокой скважности (кривые 6 и 9), при этом длительность импульса в интервале 100 – 1000 мкс практически не влияет на деформационное поведение (кривые 6 и 7). Тепловой нагрев феном до температуры 110 °С способствовал снижению напряжения течения, которое оказалось в несколько раз меньше, чем при нагреве с током (кривые 9, 10). Относительный вклад теплового и электропластического эффекта также показан на рис. 5.

Механические свойства и режимы испытаний титана Grade 4 представлены в табл. 2.



**Рис. 5.** Кривые растяжения титана Grade 4 при низкой скважности тока: 1 — без тока; 6 — 20 А/мм<sup>2</sup>, 1000 мкс; 7 — 20 А/мм<sup>2</sup>, 100 мкс; 8 — 30 А/мм<sup>2</sup>, 100 мкс; 9 — 60 А/мм<sup>2</sup>, 100 мкс; 10 — фен; в рамке — относительные снижения пределов прочности и текучести для теплового и токового воздействий при 110 °С

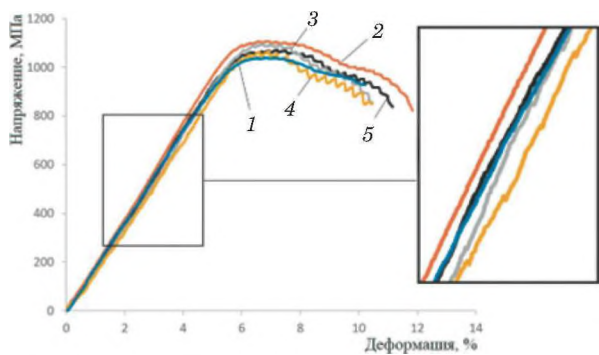
**Fig. 5.** Titanium tensile curves of Grade 4 at low current pulse ratio: 1 — without current; 6 — 20 А/мм<sup>2</sup>, 1000 μsec; 7 — 20 А/мм<sup>2</sup>, 100 μsec; 8 — 30 А/мм<sup>2</sup>, 100 μsec; 9 — 60 А/мм<sup>2</sup>, 100 μsec; 10 — fan; Inset: relative reduction in the tensile strength and yield stress for thermal and current exposure at 110°C

**Сплав ВТ6.** На рис. 6 показаны кривые растяжения сплава ВТ6 без тока (кривая 1) и с введением импульсного тока высокой скважности (кривые 2 – 5). В отличие от Grade 4, введение тока в сплав ВТ6 повышает предел прочности на 25 – 70 МПа. Ток практически не влияет на относительное удлинение, но способствует появлению в пластической и упругой зонах кривой растяжения скачков напряжения вниз амплитудой до 30 и 4 МПа соответственно. Амплитуда скачков становится больше с увеличением плотности

**Таблица 2.** Механические свойства и режимы тока для Grade 4

**Table 2.** The mechanical properties and current modes (Grade 4)

| Номер образца | Воздействие    | $q$    | $j$ , А/мм <sup>2</sup> | $\tau$ , мкс | $T$ , °С | $\sigma_b$ , МПа | $\sigma_{0.2}$ , МПа | $\delta$ , % | Примечание  |
|---------------|----------------|--------|-------------------------|--------------|----------|------------------|----------------------|--------------|-------------|
| 1             | Без тока       | —      | —                       | —            | 25       | 850              | 610                  | 15           | Нет скачков |
| 2             | Импульсный ток | 20 000 | 220                     | 250          |          | 820              | 610                  | 12           |             |
| 3             |                | 10 000 | 220                     | 500          |          | 800              | 560                  | 10           |             |
| 4             |                | 5 000  | 220                     | 1000         |          | 810              | 560                  | 12           | Есть скачки |
| 5             |                |        | 860                     | 1000         | 58       | 730              | 360                  | 11           |             |
| 6             |                | 10     | 20                      | 1000         | 34       | 760              | 580                  | 14           | Нет скачков |
| 7             |                |        | 20                      | 100          | 25       | 760              | 500                  | 12           |             |
| 8             |                |        | 30                      | 100          | 30       | 745              | 510                  | 13           |             |
| 9             |                |        | 60                      | 100          | 110      | 480              | 370                  | 19           |             |
| 10            | Фен            | —      | —                       | —            | 110      | 765              | 540                  | 16           |             |

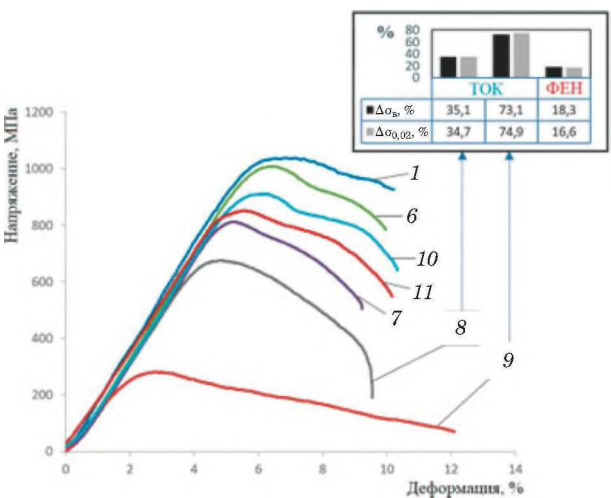


**Рис. 6.** Кривые растяжения сплава ВТ6 при высокой скважности тока: 1 — без тока; 2 — 220 А/мм<sup>2</sup>, 250 мкс; 3 — 220 А/мм<sup>2</sup>, 500 мкс; 4 — 220 А/мм<sup>2</sup>, 1000 мкс; 5 — 120 А/мм<sup>2</sup>, 1000 мкс; справа — скачки напряжения в упругой области

**Fig. 6.** Tensile curves of a VT6 alloy at high current pulse ratio: 1 — without current; 2 — 220 A/mm<sup>2</sup>, 250  $\mu$ sec; 3 — 220 A/mm<sup>2</sup>, 500  $\mu$ sec; 4 — 220 A/mm<sup>2</sup>, 1000  $\mu$ sec; 5 — 120 A/mm<sup>2</sup>, 1000  $\mu$ sec. Insert: stress jumps in the elastic region

и длительности импульса. При скважности  $q = 5000$  критическая плотность тока, при которой появляются первые скачки напряжения, составляет  $j_{кр} = 120$  А/мм<sup>2</sup>, что почти в два раза меньше, чем для Grade 4.

На рис. 7 представлены кривые растяжения без тока (кривая 1), с током низкой скважности (кривые 6 – 9) и при нагреве феном (кривые 10, 11). По сравнению со сплавом Grade 4 наблюдаются более высокие напряжения течения, низкое относительное удлинение, практически отсутствует стадия равномерной деформации, а вся деформация сосредоточена в шейке. Повышение плотности до 30 А/мм<sup>2</sup> (кривые 6, 7, 9) или длительности импульса от 100 до 500 мкс (кривые 7 и 8) эффективно способствует снижению напряжений течения. Снижение напряжений течения



**Рис. 7.** Кривые растяжения сплава ВТ6 при низкой скважности тока: 1 — без тока; 6 — 10 А/мм<sup>2</sup>, 100 мкс; 7 — 20 А/мм<sup>2</sup>, 100 мкс; 8 — 20 А/мм<sup>2</sup>, 500 мкс; 9 — 30 А/мм<sup>2</sup>, 100 мкс; 10, 11 — фен; в рамке — относительное снижение пределов прочности и текучести при электропластическом и тепловом (в 300 °С) воздействиях

**Fig. 7.** Tensile curves of a VT6 alloy at low current pulse ratio: 1 — without current; 6 — 10 A/mm<sup>2</sup>, 100  $\mu$ sec; 7 — 20 A/mm<sup>2</sup>, 100  $\mu$ sec; 8 — 20 A/mm<sup>2</sup>, 500  $\mu$ sec; 9 — 30 A/mm<sup>2</sup>, 100  $\mu$ sec; 10, 11 — fan. Insert: relative decrease in the tensile strength and yield stress under electroplastic and thermal exposure at 300 °C

при одних и тех же температурах 230 и 300 °С при введении тока (кривые 7, 9) выше, чем при нагреве феном (кривые 10, 11). Относительное снижение пределов прочности и текучести при воздействии нагрева до 300 °С и тока также показано на рис. 7.

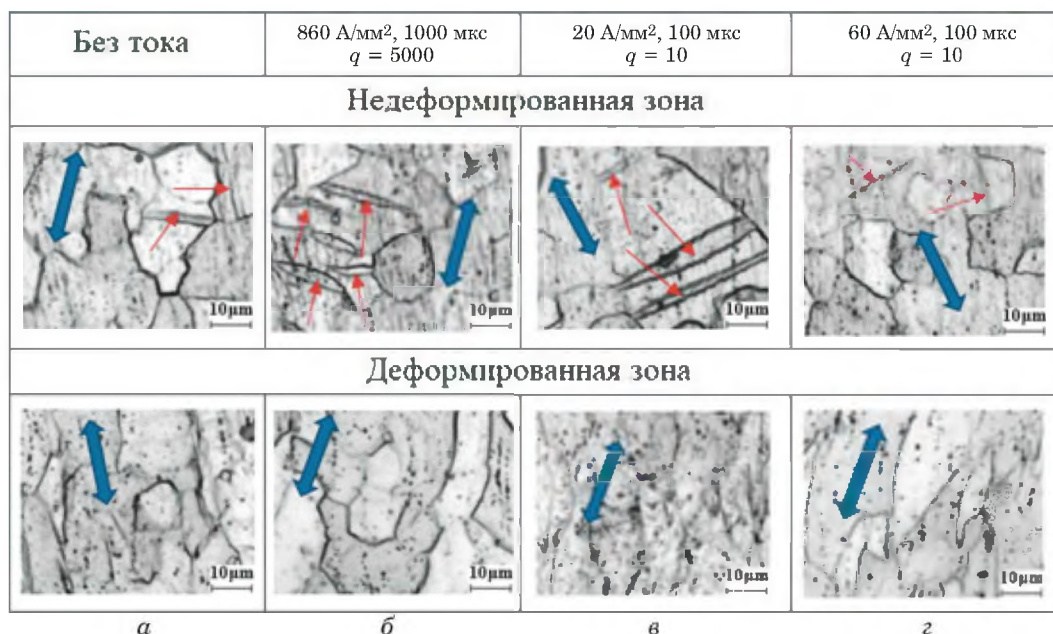
Механические свойства и режимы испытаний титанового сплава ВТ6 приведены в табл. 3.

Микроструктура исследуемых материалов. На рис. 8 показаны микроструктуры образцов

**Таблица 3.** Механические свойства сплава ВТ6

**Table 3.** The mechanical properties of a VT6 alloy

| Номер образца | Воздействие    | $q$    | $j$ , А/мм <sup>2</sup> | $\tau$ , мкс | $T$ , °С | $\sigma_B$ , МПа | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\delta$ , % | Примечание  |
|---------------|----------------|--------|-------------------------|--------------|----------|------------------|----------------------|--------------|-------------|
| 1             | Без тока       | —      | —                       | —            | 25       | 1040             | 995                  | 7            | Нет скачков |
| 2             | Импульсный ток | 20 000 | 220                     | 250          | 35       | 1110             | 1070                 | 9            | Есть скачки |
| 3             |                | 10 000 | 220                     | 500          | 50       | 1100             | 1065                 | 8            |             |
| 4             |                | 5 000  | 220                     | 1000         | 70       | 1065             | 1025                 | 7            |             |
| 5             |                |        | 120                     | 1000         | 33       | 1070             | 1000                 | 8            |             |
| 6             |                | 10     | 10                      | 100          | 60       | 1010             | 1000                 | 7            |             |
| 7             | Фен            |        | 20                      | 100          | 230      | 810              | 800                  | 7            | Нет скачков |
| 8             |                |        | 20                      | 500          | 300      | 675              | 650                  | 9            |             |
| 9             |                |        | 30                      | 100          | 300      | 280              | 250                  | 12           |             |
| 10            |                | —      | —                       | —            | 230      | 910              | 865                  | 5            |             |
| 11            |                | —      | —                       | —            | 300      | 850              | 830                  | 5            |             |



**Рис. 8.** Микроструктура Grade 4 после растяжения с током высокой (*a*, *б*) и низкой (*в*, *г*) скважности; толстыми и тонкими стрелками показаны направление растяжения и двойники деформации

**Fig. 8.** The microstructure of Grade 4 upon tensile at high (*a*, *b*) and low (*c*, *d*) pulse ratio. Bold and thin arrows show the direction of tension and deformation twins, respectively

Grade 4, испытанных без тока и с током в деформированной и недеформированной зонах. Исходная структура в недеформированной зоне, описанная ранее, не изменяется при введении тока высокой скважности (рис. 8, *a*, *б*), однако укрупняется при токе низкой скважности (рис. 8, *в*, *г*). В деформируемой зоне оба вида тока способствуют исчезновению двойников, удлинению зерен в направлении растяжения на 40 – 50 % и выделению частиц примесей, особенно заметному для низкой скважности.

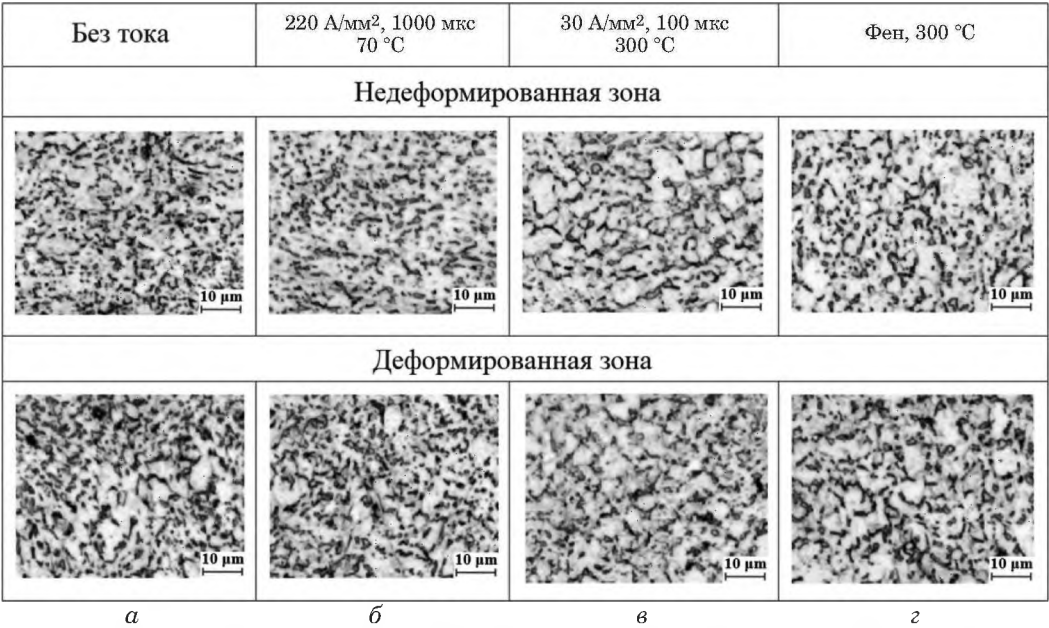
На рис. 9 приведены микроструктуры образцов сплава ВТ6, испытанных без тока (*a*), с различными режимами тока (*б*, *в*) и с нагревом феном (*г*). Структурных изменений образцов при растяжении в разных условиях, кроме сфероидизации и слабого роста матричных  $\alpha$ -зерен, не обнаружено.

### Обсуждение результатов

Исходная микроструктура сплава ВТ6 отличается от Grade 4 на порядок меньшим размером  $\alpha$ -зерен и наличием зернограницной  $\beta$ -фазы. Используемые при растяжении режимы импульсного тока не вызвали заметных при оптическом увеличении изменений в исходной структуре деформированных и недеформированных зон, кроме исчезновения двойников и выделения частиц примесей в Grade 4 и сфероидизации зерен в ВТ6. Поскольку температура образца была относительно низкой для титана, особенно для

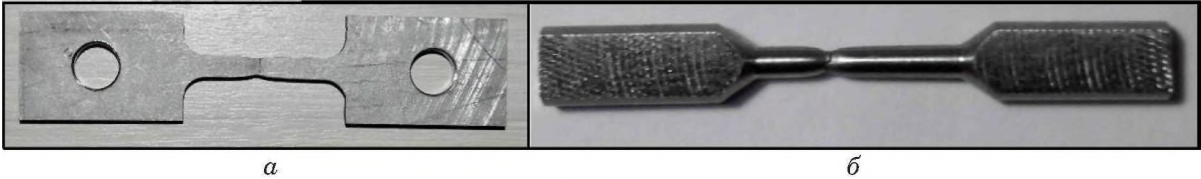
ВТ6 ( $< 300$  °С), то можно считать, что структурные изменения вызваны непосредственно током, а не влиянием деформации. Так как структурные изменения минимальны, то очевидно, что значительные изменения в механическом поведении сплавов (см. рис. 4, 5, 7, 8) обусловлены атермическим действием тока, т.е. ЭПЭ. Авторы [11] обнаружили заметное повышение относительного удлинения до разрушения и растворение  $\beta$ -фазы с одновременной рекристаллизацией под действием тока. В проведенном исследовании подобные явления не наблюдались, поскольку условия растяжения отличались более низкими значениями плотности тока, температуры испытаний, большими скоростью деформации и скважностью тока.

В зависимости от скважности импульсного тока ЭПЭ проявляется в виде скачков напряжения, снижения напряжений или того и другого одновременно. Это происходит по нескольким причинам. В случае низкой скважности (высокая частота импульса) инерция системы образец – машина не позволяет регистрировать отдельные импульсы и на кривой деформации скачки напряжения отсутствуют (см. рис. 5, кривые 6 – 9; рис. 7, кривые 6 – 9). Другая причина — плотность тока, величина которой ниже критической (см. рис. 4, кривые 2, 3). Такая плотность тока в сплаве связана со значительным вкладом теплового эффекта, обусловленного более высоким



**Рис. 9.** Микроструктура ВТ6 после растяжения: *a* — без тока; *б* — ток высокой скважности; *в* — ток низкой скважности; *г* — нагрев феном

**Fig. 9.** The VT6 microstructure after tension: *a* — without current; *b* — high pulse ratio current; *c* — low pulse ratio current; *d* — heating with a fan



**Рис. 10.** Шейки на образцах сплава ВТ6 (*a*) и Grade 4 (*б*) после растяжения с импульсным током плотностью 20 А/мм<sup>2</sup>, скважностью 10

**Fig. 10.** Necks in samples of VT6 alloy (*a*) and titanium Grade 4 (*b*) after tensile with a pulsed current with a density of 20 A/mm<sup>2</sup> and pulse ratio 10

удельным электросопротивлением и большей протяженностью границ зерен.

Импульсный ток в однофазном Grade 4 для всех режимов растяжения сопровождается уменьшением напряжений течения и прочности с повышением плотности тока и уменьшением скважности. Аналогично плотность тока влияла на прочность поликристаллического титана [10] и Ti-6Al-4V [11], что связано с повышением вводимой электрической энергии [2, 3, 5]. Снижение скважности на несколько порядков фактически означает переход от одиночных импульсов к их множеству и, соответственно, к усилению теплового эффекта тока [13]. При этом пластичность образца повышается незначительно (см. табл. 2). Низкое относительное удлинение обусловлено локализацией деформации в шейке и соответствующим повышением исходной плотности тока (рис. 10). Сильное шейкообразование в ти-

тановых сплавах связано с низким числом плоскостей скольжения в ГПУ решетке.

Другими проявлениями ЭПЭ являются снижение деформационного упрочнения [11] и отдельные скачки напряжения на кривой растяжения вниз, которые в нашем случае наблюдались при высокой скважности и плотности тока выше критической. В работе [10] отдельные скачки напряжения течения в чистом (99,97 %-ном) титане проявлялись при большей плотности тока и имели меньшую в три раза амплитуду, что объясняется разными длительностью импульса и степенью чистоты материалов. Амплитуда скачков напряжения повышается пропорционально увеличению плотности тока [11]. Отличие амплитуд скачков напряжения в упругой и пластической зонах объясняется их разной природой, а соответственно, тепловым и электропластическим эффектами тока. Подобные скачки напряжения

наблюдали и ранее [2, 10], при этом авторы выделяли скачки в упругой и пластической областях, объясняя первые чисто тепловым расширением ввиду отсутствия движения дислокаций. В пластической же области тепловой и электропластический эффекты тока суммируются. Амплитуда скачков имеет обратную зависимость от жесткости машины и, как следствие, от скорости деформации на стадии релаксации напряжения после прохождения импульса тока [14].

Более высокое относительное удлинение при растяжении с воздействием тока, чем с нагревом феном, свидетельствует о дополнительном разупрочняющем действии тока и согласуется с результатами работы [11]. Наличие структурных особенностей, разница в удельных электросопротивлениях и теплопроводности [15] приводят к отличиям в деформационном поведении сплавов.

Аномальное упрочнение сплава ВТ6 при высокой скважности может быть связано с малоцикловой ( $N \geq 10$ ) механической и термической усталостью, а также с залечиванием микротрещин, что продемонстрировано в работе [16]. Меньшая амплитуда скачков в ВТ6 и большая скважность, при которой они появляются, по сравнению с Grade 4 объясняются упомянутыми выше структурными особенностями сплава [17, 18].

Низкая скважность тока в сплаве ВТ6 способствует более сильному снижению напряжений течения, чем в Grade 4. Это связано с дополнительным действием ЭПЭ и микронагрева на границах зерен, площадь которых у ВТ6 больше [6]. Повышение плотности тока и длительности импульса приводит сначала к слабому, а потом резкому снижению напряжений течения, являющемуся следствием их типичной температурной зависимости [15].

Вклад Джоулева тепла в снижение прочностных характеристик обоих сплавов оказался меньше вклада ЭПЭ при одинаковой температуре. Этот факт свидетельствует о наличии существенного атермического действия тока и подтверждает нетепловую природу ЭПЭ.

Следует отметить, что в ряде работ авторы ставят проявление ЭПЭ под сомнение или даже отрицают его. Так, в [19] авторы объясняют влияние тока в Grade 2 при растяжении рассеиванием дислокаций на фонах и электронах, которые сопровождают объемные тепловые потоки от Джоулева тепла. Авторы [8] исследовали ЭПЭ при изгибе образца из сплава Ti-6Al-4V при температуре около 620 °С и скважности тока порядка 139 и сделали вывод, что основным разупрочняющим механизмом являлся тепловой нагрев. Авторы [9] провели динамические испытания сплава ВТ6 на растяжение со скоростью деформации  $10^3 \text{ с}^{-1}$ , которая заметно больше максимально возможной скорости дислокаций. Результа-

ты показали, что электропластический эффект не наблюдается. С нашей точки зрения, высокие температуры и скорость деформации, как и сама схема деформации изгибом, не являются оптимальными для сравнения, поскольку вклад ЭПЭ при этих условиях резко снижается.

## Выводы

1. Электропластический эффект в исследованных материалах проявляется в отдельных скачках напряжения течения вниз для тока высокой скважности и в снижении напряжения течения и деформационном упрочнении, увеличении пластичности для импульсного тока низкой скважности.

2. Вклад электропластического эффекта в снижение напряжений течения при растяжении при одинаковой температуре больше, чем теплового эффекта как в чистом титане, так и в сплаве ВТ6. Это подтверждает атермическую природу влияния импульсного тока.

3. Критическая плотность импульсного тока высокой скважности ( $q = 5000$ ), при которой проявляется электропластический эффект, для сплава ВТ6 в два раза ниже, чем для Grade 4.

4. При одинаковых режимах импульсного тока снижение напряжений течения для ВТ6 больше, чем для Grade 4, что связано с присутствием второй фазы, на порядок меньшим размером зерен в сплаве ВТ6, разницей удельного сопротивления и, как следствие, меньшей теплопроводностью сплавов.

5. Импульсный ток высокой скважности в сплаве ВТ6 вызывает аномальный эффект упрочнения, физическая природа которого нуждается в дополнительном исследовании.

6. Используемые режимы импульсного тока не приводят к заметным при оптическом увеличении структурным изменениям растягиваемых образцов, кроме исчезновения двойников и выделения частиц примесей в Grade 4, а также сфероидизации зерен в ВТ6.

## Благодарности

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).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Троицкий О. А. Электропластический эффект в металлах. — М.: Ким Л. А., 2021. — 468 с.
2. Moon-Jo K., Sangmoon Y., Siwook P., et al. Elucidating the origin of electroplasticity in metallic materials / Applied Materials Today. 2020. Vol. 1. 100874. DOI: 10.1016/j.apmt.2020.100874

3. Троицкий О. А., Сташенко В. И., Скворцов О. Б. Вибрации проводников при пропускании импульсного электрического тока и неразрушающий контроль / Инженерный журнал: наука и инновации. 2018. № 3. С. 1 – 15.
4. Gennari C., Calliari I., Stolyarov V. Electroplastic effect in specimens of duplex stainless steel under tension / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2020. Т. 86. № 10. P. 41 – 45. DOI: 10.26896/1028-6861-2020-86-10-41-45
5. Минько Д. В. Анализ перспектив применения ЭПЭ в процессах ОМД / Литье и металлургия. 2020. № 4. С. 125 – 130. DOI: 10.21122/1683-6065-2020-4-125-130
6. Fan R., Magargee J., Hu P., Cao J. Influence of grain size and grain boundaries on the thermal and mechanical behavior of 70/30 brass under electrically-assisted deformation / Materials Science and Engineering A. 2013. N 574. P. 218 – 225. DOI: 10.1016/j.msea.2013.02.066
7. Tiwari J., Balaji V., Krishnaswamy H., Amirthalingam M. Dislocation density based modelling of electrically assisted deformation process by finite element approach / International Journal of Mechanical Sciences. 2022. N 227. 107433. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2022.107433
8. Ao D., Chu X., Yang Y., Lin S., Gao J. Effect of electropulsing on springback during V-bending of Ti-6Al-4V titanium alloy sheet / The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018. N 96. P. 3197 – 3207. DOI: 10.1007/s00170-018-1654-1
9. Kinsey B., Cullen G., Jordan A., Mates S. Investigation of electroplastic effect at high deformation rates for 304SS and Ti-6Al-4V / CIRP Annals. 2013. Vol. 62. N 1. P. 279 – 282. DOI: 10.1016/j.cirp.2013.03.058
10. 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. N 45. P. 109 – 116.
11. Ao D., Chu X., Lin S., Yang Y., Gao J. Hot Tensile Behaviors and Microstructure Evolution of Ti-6Al-4V Titanium Alloy Under Electropulsing / Acta Metallurgica Sinica (English Letters). 2018. N 31. P. 1287 – 1296. DOI: 10.1007/s40195-018-0735-3
12. Столяров В. В. Особенности диаграмм растяжения сплавов с памятью формы при воздействии тока / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2013. Т. 79. № 9. С. 64 – 67.
13. Pakhomov M., Stolyarov V. Specific Features of Electroplastic Effect in Mono- and Polycrystalline Aluminum / Metal Science and Heat Treatment. 2021. N 63. P. 236 – 242. DOI: 10.1007/s11041-021-00677-7
14. Adabala S., Cherukupally S., Guha S., et al. Importance of machine compliance to quantify electro-plastic effect in electric pulse aided testing: An experimental and numerical study / Journal of Manufacturing Processes. 2022. Vol. 75. P. 268 – 279. DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.12.027
15. Titanium Alloys — Physical Properties. AZO Materials. Доступно: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1341>
16. Zhao S., Zhang R., Li X., et al. Defect reconfiguration in a Ti-Al alloy via electroplasticity / Nature Materials. 2021. N 20. P. 468 – 472. DOI: 10.1038/s41563-020-00817-z
17. Stolyarov V. V. Electroplastic effect in nanocrystalline and amorphous alloys / Materials Science and Technology. 2015. Vol. 31. N 13a. P. 1536 – 1540. DOI: 10.1179/1743284715Y.0000000008
18. Столяров В. В. Влияние химического и фазового состава на проявление электропластического эффекта в титановых сплавах / Изв. РАН. Серия физическая. 2014. Т. 78. № 3. С. 356 – 358.
19. Rudolf C., Goswami R., Kang W., Thomas J. Effects of electric current on the plastic deformation behavior of pure copper, iron, and titanium / Acta Materialia. 2021. Vol. 209. N 116776. DOI: 10.1016/j.actamat.2021.116776
20. Moon-Jo K., Sangmoon Y., Siwook P., et al. Elucidating the origin of electroplasticity in metallic materials / Applied Materials Today. 2020. Vol. 1. 100874. DOI: 10.1016/j.apmt.2020.100874
21. Troitsky O. A., Stashenko V. I., Skvortsov O. B. Vibrations of conductors during the transmission of pulsed electric current and non-destructive testing / Inzh. Zh. Nauka Innov. 2018. N 3. P. 1 – 15 [in Russian].
22. Gennari C., Calliari I., Stolyarov V. Electroplastic effect in specimens of duplex stainless steel under tension / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2020. Vol. 86. N 10. P. 41 – 45. DOI: 10.26896/1028-6861-2020-86-10-41-45
23. Minko D. V. Analysis of the prospects for the use of EPE in OMD processes / Lit'ye Metallurgiya. 2020. N 4. P. 125 – 130 [in Russian]. DOI: 10.21122/1683-6065-2020-4-125-130
24. Fan R., Magargee J., Hu P., Cao J. Influence of grain size and grain boundaries on the thermal and mechanical behavior of 70/30 brass under electrically-assisted deformation / Materials Science and Engineering A. 2013. N 574. P. 218 – 225. DOI: 10.1016/j.msea.2013.02.066
25. Tiwari J., Balaji V., Krishnaswamy H., Amirthalingam M. Dislocation density based modelling of electrically assisted deformation process by finite element approach / International Journal of Mechanical Sciences. 2022. N 227. 107433. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2022.107433
26. Ao D., Chu X., Yang Y., Lin S., Gao J. Effect of electropulsing on springback during V-bending of Ti-6Al-4V titanium alloy sheet / The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018. N 96. P. 3197 – 3207. DOI: 10.1007/s00170-018-1654-1
27. Kinsey B., Cullen G., Jordan A., Mates S. Investigation of electroplastic effect at high deformation rates for 304SS and Ti-6Al-4V / CIRP Annals. 2013. Vol. 62. N 1. P. 279 – 282. DOI: 10.1016/j.cirp.2013.03.058
28. 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. N 45. P. 109 – 116.
29. Ao D., Chu X., Lin S., Yang Y., Gao J. Hot Tensile Behaviors and Microstructure Evolution of Ti-6Al-4V Titanium Alloy Under Electropulsing / Acta Metallurgica Sinica (English Letters). 2018. N 31. P. 1287 – 1296. DOI: 10.1007/s40195-018-0735-3
30. Stolyarov V. V. Peculiarities of tension diagrams of shape memory alloys under the influence of current / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2013. Vol. 79. N 9. P. 64 – 67 [in Russian].
31. Pakhomov M., Stolyarov V. Specific Features of Electroplastic Effect in Mono- and Polycrystalline Aluminum / Metal Science and Heat Treatment. 2021. N 63. P. 236 – 242. DOI: 10.1007/s11041-021-00677-7
32. Adabala S., Cherukupally S., Guha S., et al. Importance of machine compliance to quantify electro-plastic effect in electric pulse aided testing: An experimental and numerical study / Journal of Manufacturing Processes. 2022. Vol. 75. P. 268 – 279. DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.12.027
33. Titanium Alloys — Physical Properties. AZO Materials. <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1341>
34. Zhao S., Zhang R., Li X., et al. Defect reconfiguration in a Ti-Al alloy via electroplasticity / Nature Materials. 2021. N 20. P. 468 – 472. DOI: 10.1038/s41563-020-00817-z
35. Stolyarov V. V. Electroplastic effect in nanocrystalline and amorphous alloys / Materials Science and Technology. 2015. Vol. 31. N 13a. P. 1536 – 1540. DOI: 10.1179/1743284715Y.0000000008
36. Stolyarov V. V. Influence of chemical and phase composition on the manifestation of the electroplastic effect in titanium alloys / Izv. RAN. Ser. Fiz. 2014. Vol. 78. N 3. P. 356 – 358 [in Russian].
37. Rudolf C., Goswami R., Kang W., Thomas J. Effects of electric current on the plastic deformation behavior of pure copper, iron, and titanium / Acta Materialia. 2021. Vol. 209. N 116776. DOI: 10.1016/j.actamat.2021.116776

## REFERENCES