

РЕЛАКСАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ СОПРОВОЖДАЕМОМ ТОКОМ В УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОМ ТИТАНЕ

О.Е. Корольков, В.В. Столяров

ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук»

101000, Россия, Москва, Малый Харитоньевский пер., д. 4

korolkov_oleg@vk.com

DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.135

Аннотация: В статье изучается влияние релаксации напряжений, вызванной остановками деформации и импульсным током, на деформационное поведение при растяжении ультрамелкозернистого титана Grade 4. Образцы растягивались по режимам: без тока; непрерывно с током; с периодическим подводом тока; периодическим подводом тока во время остановок деформации. Исследовалась микротвердость рабочей зоны испытанных образцов. Выполнены фрактографические исследования зоны разрушения. Показано, что в результате непрерывного введения тока в процессе растяжения напряжения течения снижаются, а удлинение до разрушения повышается. Периодическое введение тока, сопровождаемое остановками деформации, приводит к максимальному повышению относительного удлинения до разрушения за счет релаксации напряжений. Релаксационное влияние импульсного тока проявляется в снижении микротвердости и переходе характера разрушения от ямочно-чашечного излома к преимущественно ямочному излому.

Ключевые слова: релаксация напряжений, растяжение, титан, наноструктура, электропластический эффект, импульсный ток, микротвердость, фрактография.

1. Введение

Релаксация в металлических материалах представляет собой процесс снижения механических напряжений во времени при постоянной деформации [1]. Физической причиной релаксации является избыточная энергия, смещение частиц от положения равновесия в твёрдом теле и стремление к равновесию. Механизмами релаксации являются миграция дефектов (вакансий, дислокаций, микропор), диффузия примесных или самодиффузия собственных атомов. Релаксация может быть самопроизвольной и длительной, но заметно ускоряется внешними воздействиями, например, нагревом [2], облучением [3], магнитным полем [4], ультразвуком [5], электрическим током [6]. Особый интерес представляет релаксация в наноструктурных материалах, как высокопрочных, но обладающих недостаточной пластичностью материалах [7, 8]. Электрический ток также может вызывать релаксацию напряжений, например, при использовании электроимпульсной обработки до или после пластической деформации [6, 9].

Выбор титана в качестве объекта исследования в данной работе обусловлен несколькими причинами. Одна из них широкое применение в судостроении, аэрокосмической технике и медицине. Другая связана с

особенностью кристаллической ГПУ решетки, в которой ограниченное количество систем деформации приводят к ограниченной пластичности. Данное обстоятельство затрудняет холодную деформацию титана, особенно в УМЗ состоянии [10] и вынуждает искать способы повышения деформируемости. Препятствием является низкая температура начала рекристаллизации (не выше 400°C) наноструктурного титана и соответственно рост зерен, которые не позволяют использовать теплую или горячую деформацию [11]. Улучшение пластичности УМЗ титана является актуальной задачей, которая может быть решена при помощи деформации с релаксацией напряжений импульсным током. Вместе с тем, имеющихся исследований по релаксации напряжений под действием электрического тока в крупнозернистом [12] и тем более, в УМЗ титане [13] крайне мало.

Цель данной работы проведения исследования влияния периодического воздействия деформации и тока на релаксацию напряжений в УМЗ титане.

2. Материалы и методы исследований

Материалом исследования был выбран технически чистый титан Grade 4 в форме прутка сечением 10x10 мм² полученного интенсивной пластической деформации методом РКУП (2 прохода) [13] и последующего отжига при 350°C в течение часа. Прутки были изготовлены Институтом физики перспективных материалов при Уфимском государственном авиационном техническом университете. Химический состав материала представлен в Таблице 1.

Таблица 1. Химический состав Grade 4, вес. %

Материал	<i>N</i>	<i>C</i>	<i>H</i>	<i>Fe</i>	<i>O</i>	<i>Ti</i>
Grade 4	0,01	0,04	0,012	0,42	0,36	остальное

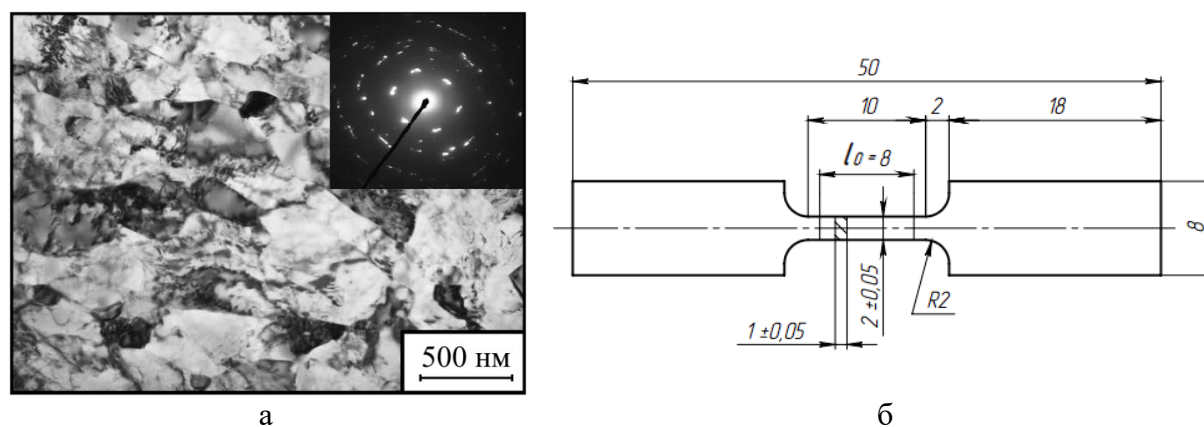


Рис. 1. Микроструктура УМЗ Grade 4 в поперечном сечении (а) и размеры образца для растяжения (б). Во вставке картина микродифракции.

На рис. 1 а показана микроструктура Grade 4 в исходном состоянии.

Зерна средним размером 300 нм имеют слегка вытянутую форму и прямолинейные границы, свидетельствующие о предварительной интенсивной пластической деформации материала (см. рис. 1). Двойные рефлексы на снимке микродефракции могут свидетельствовать о наличии микродвойников (см. рис. 1 а, вставка). Плоские образцы для растяжения были вырезаны в продольном направлении прутка электроэрозионным методом, форма и размеры образцов для растяжения показаны на рис. 1 б.

Растяжение выполняли на разрывной машине Instron 1115, позволяющей останавливать процесс растяжения без снятия нагрузки. Скорость растяжения составляла $2 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ (1 мм/мин). К зажимам разрывной машины от генератора подводился импульсный ток плотностью $j = 60 \text{ А/мм}^2$, длительностью импульса $\tau = 100 \text{ мкс}$ и скважностью $q = 1/\nu\tau = T/\tau = 10$, где ν , T и τ частота, период и длительность импульса, соответственно (см. рис. 2, вставка).

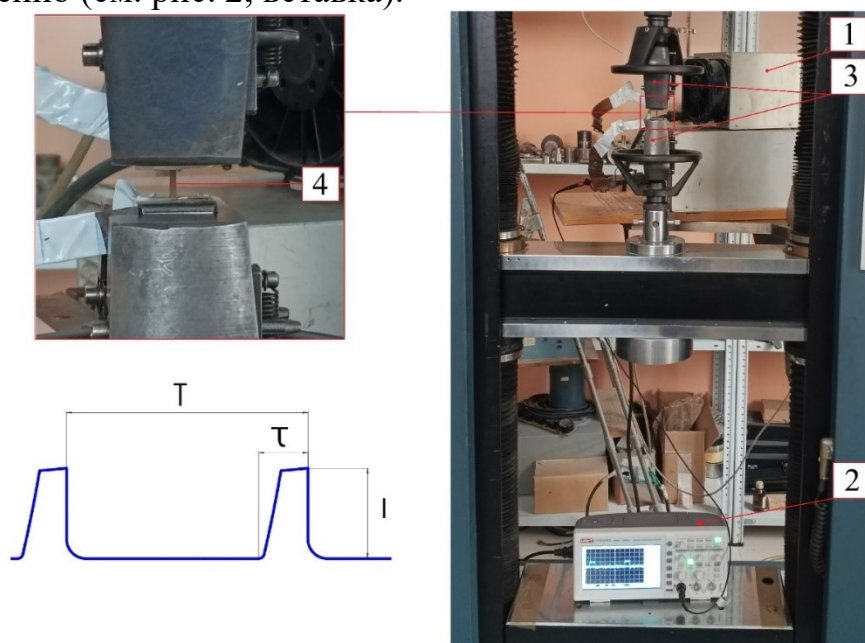


Рис. 2. Фото испытательной установки: 1 – Генератор импульсного тока; 2 – Осциллограф; 3 – Захваты; 4 – Образец. На вставке схема осциллограммы импульсного тока.

Захваты образцов изолировались от машины проставками из стеклотекстолита. Температуру образца в процессе растяжения контролировали прибором Digital Thermometers UT320 Series и хромель-алюмелевой термопарой в центре образца с точностью $\pm 2^\circ \text{C}$. Амплитудную плотность тока контролировали с помощью осциллографа UNI-T UTD2025CL. Фотография испытательного стенда, смонтированного на вертикальной разрывной машине Instron 1115, показана на рис. 2.

При растяжении до разрушения были использованы четыре режима, которые отличались последовательностью деформации и действия

импульсного тока: 1 – растяжение без тока; 2 – растяжение с током после стабилизации температуры образца; 3 – растяжение с периодическим включением-выключением тока (каждые 5 сек); 4 - растяжение с периодическими остановками (каждые 5 сек) с включением-выключением тока (каждые 5 сек) во время остановок. Для наглядности эти режимы показаны на подробной блок-схеме (см. рис. 3).

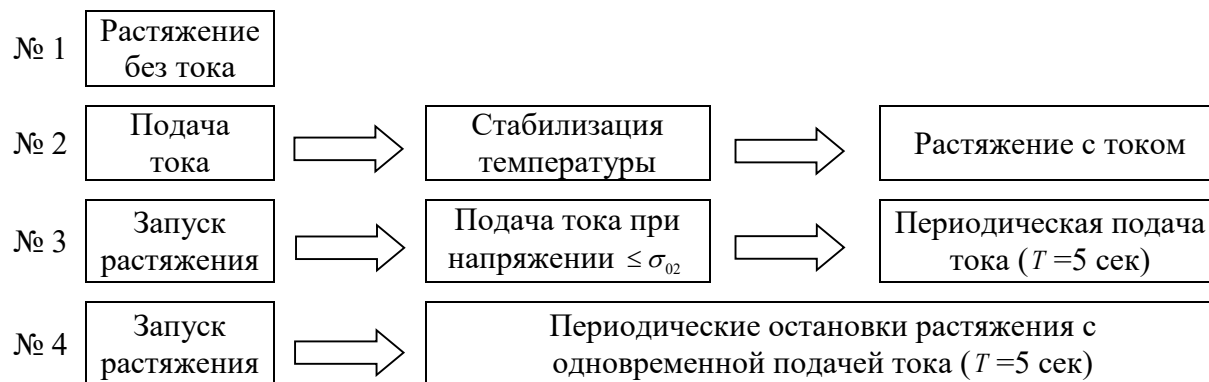


Рис. 3. Блок-схема режимов испытаний.

Измерение микротвердости выполняли с использованием прибора ПМТ-3, при нагрузке 1 Н, длительности выдержки 15 с, не менее десяти измерений на точку, точность измерения $\pm 5\%$ в зоне шейки (1), рабочей зоне (2) и головке (3) образца. Фрактографические изображения мест разрыва получены при помощи растрового сканирующего электронного микроскопа Tescan Mira 3 LMU. Микроструктура тонких слоев образцов анализировалась с помощью просвечивающего электронного микроскопа JEM 2100. Заготовки для фольг были вырезаны электроэрозионным способом и с помощью абразивной бумаги механически утонены до толщины 100 мкм. Затем двусторонней струйной электролитической полировкой на TenuPol-5 (Struers LLC, USA) в растворе 5% хлорной кислоты, 35% бутанола и 60% метанола при температуре -30°C подготовлены фольги.

3. Результаты испытаний

Растяжение. На рис. 4 показаны кривые напряжение-деформация, полученные при растяжении без тока (см. рис. 4, кривая 1) и с током $j = 60 \text{ А/мм}^2$; $Q = 10$; $\tau = 100 \text{ мкс}$ (см. рис. 4, кривые 2, 3, 4). Температура для всех режимов испытаний с током не превышала $70 \pm 2^{\circ}\text{C}$.

Растяжение без тока УМЗ титана (см. рис. 4, кривая 1) характеризуется практически полным отсутствием деформационного упрочнения и равномерного удлинения. Пластическая деформация локализована в шейке, пределы прочности и текучести отличаются незначительно. Сопровождение процесса растяжения импульсным током

(см. рис. 4, кривая 2) на всем протяжении испытания не сильно повлияло на форму кривой. Различия заключались в снижении напряжений течения, увеличении разницы в пределах прочности и текучести, увеличении относительного удлинения до разрушения. Прирост удлинения происходил за счет локализации деформации в шейке.

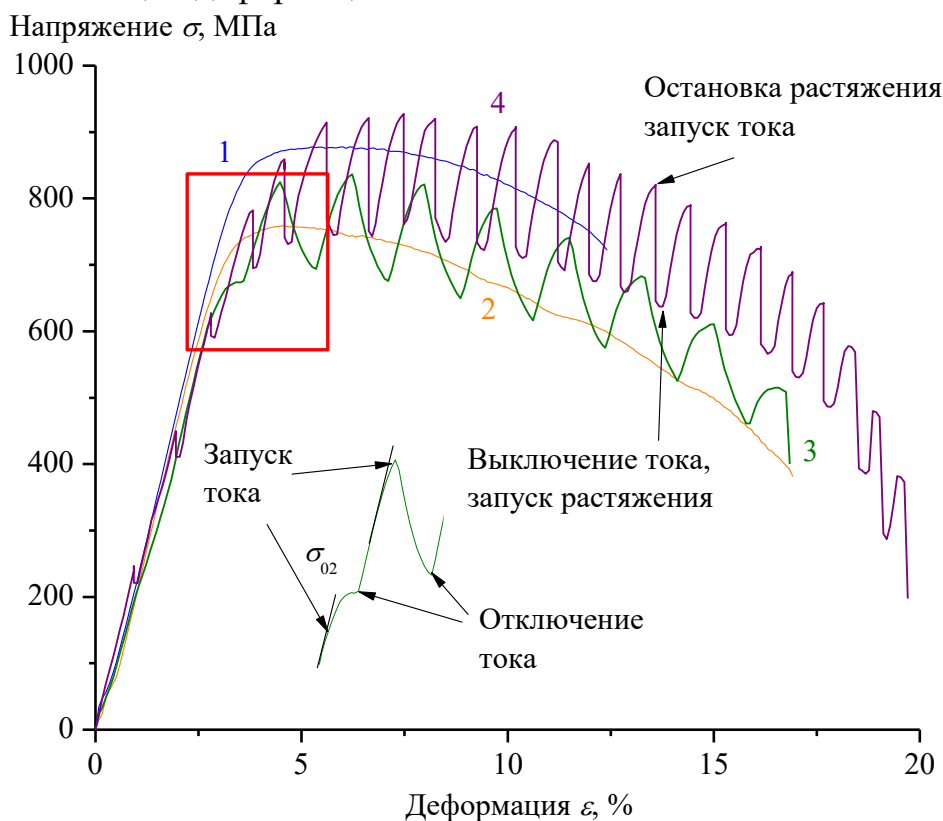


Рис. 4. Кривые напряжение-деформация УМЗ Grade 4 при растяжении: 1 – без тока; 2 – с током (режим №2); 3 – с периодическим включением тока (режим №3); 4 – с периодическими остановками и включениями тока (режим №4). Во вставке: первый «Скачок» на кривой 3.

Введение тока на упругом участке кривой 3 при напряжении $\leq \sigma_{02}$ способствует переходу от упругой деформации к пластической, с образованием площадки текучести (см. рис. 4, вставка). При выключении тока напряжение продолжает возрастать до следующего введения тока. По сравнению с кривой 2, периодическое введение тока сопровождалось образованием «скачков» напряжения вниз (нисходящая ветвь), а отключение тока приводило к повышению напряжений (восходящая ветвь) и постепенному переходу к напряжению течения. Амплитуда «скачков» была максимальной в области предела прочности, а затем уменьшалась с увеличением деформации. Отметим, что скачкообразное поведение кривой 3 соответствовало области напряжений несколько выше, чем на кривой 2.

Введение тока с предварительными остановками растяжения (кривая 4) способствует появлению «скачков» в упругой зоне. Амплитуда

«скачков» постепенно растет с деформацией от 25-40 МПа в упругой зоне до 190 МПа в пластической области. С образованием шейки амплитуда «скачков» уменьшается, при этом остается большей, чем на кривой 3. Для каждого «скачка» после достижения предела прочности наблюдается зона пластического течения (восходящая часть). Периодическое введение импульсного тока во время остановок процесса растяжения сопровождается слабым повышением прочности и значительным увеличением относительного удлинения до разрушения по сравнению с растяжением без тока. Кроме того, повышается степень деформационного упрочнения, максимум напряжений смещается в сторону больших деформаций. Изменение режима нагружения привело не только к изменению формы деформационных кривых, но и к изменению механических свойств (см. Таблицу 2).

Таблица 2. Режимы испытания и механические свойства УМЗ Grade 4.

№ режима	Вид нагружения	Введение тока	$T, ^\circ\text{C}$	$\sigma_B, \text{МПа}$	$\sigma_{0.2} (\sigma_r), \text{МПа}$	$\delta, \%$
1	Непрерывно	Без тока	RT	875	840	10
2	Непрерывно	Непрерывно	70	756	720	15
3	Непрерывно	Периодическое	≤ 70	836	630	15
4	Периодическое	Периодическое		927	870	19
КЗ [14]	–	–	–	550	483	15

Непрерывное сопровождение растяжения импульсным током (кривая 2) повышает относительное удлинение до разрушения до 15% (на 50%) и снижает предел прочности до 756 МПа (на 14%). Периодическое введение импульсного тока (кривая 3) приводит к меньшему снижению напряжений течения, но такому же повышению удлинения по сравнению с растяжением без тока. Введение тока с предварительными остановками растяжения (кривая 4) сопровождается повышением относительного удлинения до разрушения до 19% (на 90%) и предела прочности до 927 МПа (на 6%). По сравнению с табличными значениями для КЗ Grade 4 [14] УМЗ титан значительно прочнее, но менее пластичен. Введение импульсного тока позволило не только восстановить пластичность до уровня КЗ титана в состоянии поставки (режимы 2 и 3), но и повысить на треть (по режиму 4).

Микротвердость. На рис. 5 показаны результаты измерения микротвердости испытанных образцов.

Для режима №1 отмечается упрочнение образца в рабочей зоне и в шейке. Образцы, испытанные по режиму 2, 3 и 4, также упрочняются в рабочей зоне, однако в шейке их твердость сильно отличается между собой и по сравнению с образцом, испытанным без тока. Микротвердость образца, испытанного по режиму 2, имеет наименьшее значение в шейке.

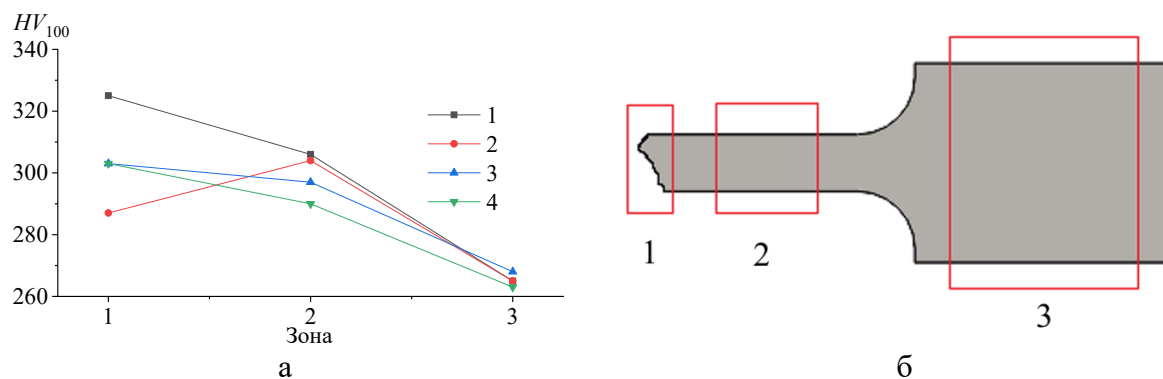


Рис. 5. Распределение микротвердости (а) и зоны измерения (б) на образце: а – режимы тока 1, 2, 3, 4; б – шейка (1); рабочая зона (2); головка (3).

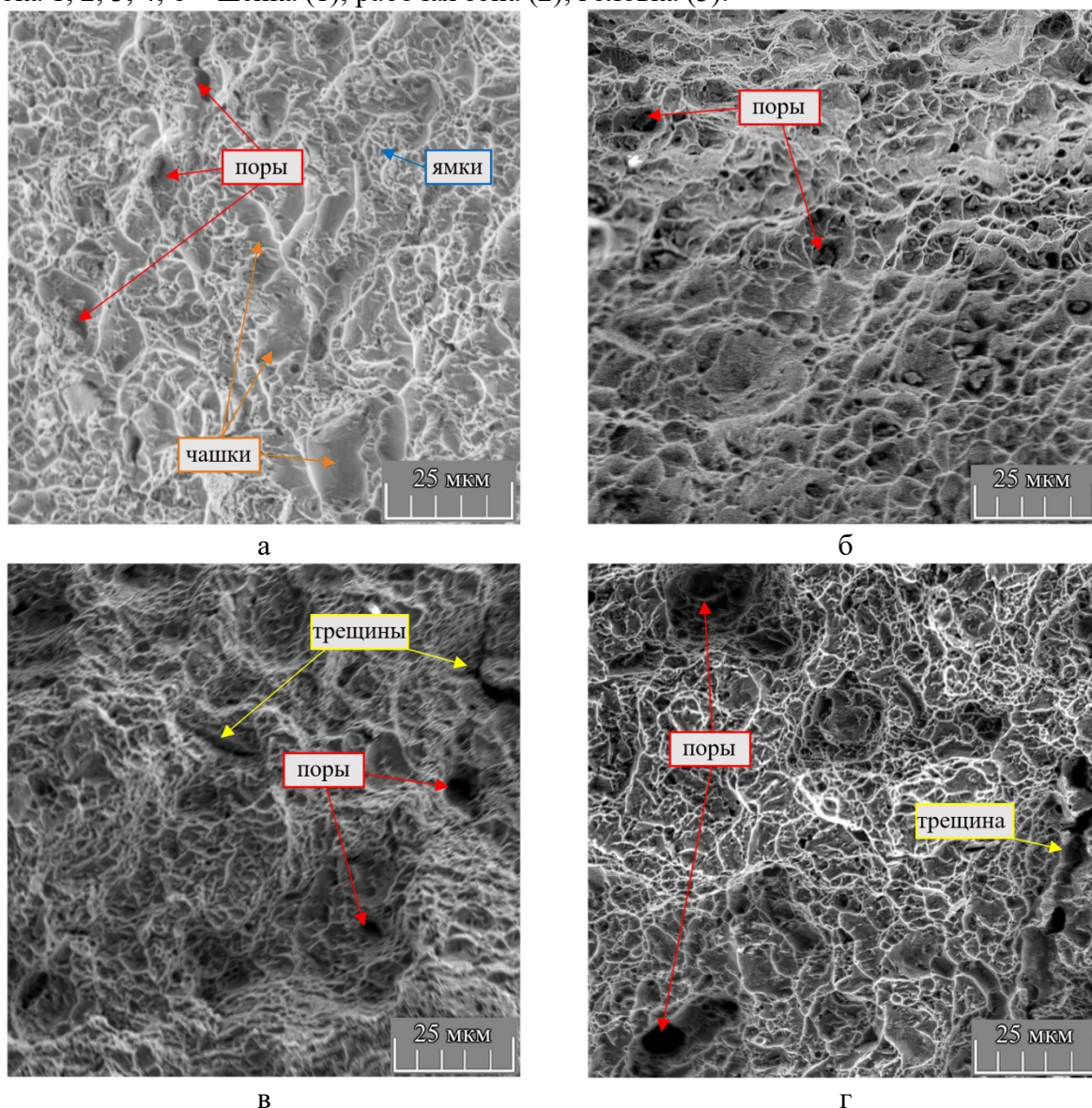


Рис. 6. Фрактографические изображения для образцов: а – режим 1; б – режим 2; в – режим 3; г – режим 4.

Все режимы растяжения привели к заметному повышению микротвердости от 263 до 324 HV при измерении вдоль рабочей длины от

головки до зоны разрушения образца. Можно отметить также, что средние значения микротвердости в пределах ошибки (5%) измерения для разных режимов растяжения были одинаковыми, как в головке, так и в рабочей зоне образца.

Фрактографические исследования. На рис. 6 показаны фрактографические изображения поверхности разрушения образцов, подвергнутых растяжению по разным режимам. Наблюдается типичный вязкий ямочно - чашечный излом для образцов, испытанных по режиму 1 и 2 (см. рис. 6 а, б), однако количество чашек при введении тока сокращается (см. рис. 6 б). Для режимов 3 и 4 чашки полностью исчезают, а мелкие поры сливаются и образуются микротрещины (см. рис. 6 в, г). На всех испытанных образцах присутствуют микропоры, количество и размер которых при введении тока увеличивается (см. рис. 6 в, г).

4. Обсуждение результатов

Наблюдаемое в работе снижение напряжений течения под действием импульсного тока (режим 2 и 3) является хорошо известным фактом, наблюдаемым в алюминиевых, магниевых, цинковых, титановых сплавах, сталях, сплавах с памятью формы [15, 16, 17]. Как правило, для титановых сплавов этот процесс не сопровождается увеличением пластичности, часто наоборот, происходит ее снижение, особенно при температурах, не сильно превышающих комнатную [15, 18]. В работе [19] увеличение относительного удлинения упорядоченного титанового сплава $Ti-7Al$ (7 ат.% Al) было реализовано при непрерывном воздействии импульсного тока, который привел к изменению дислокационного механизма деформации. В настоящем исследовании импульсный ток плотностью 60 A/mm^2 с длительностью импульса 100 мкс привел к увеличению относительного удлинения до разрушения, как при непрерывном воздействии (на 50%), так и при периодических остановках и включении тока (на 90%) в чистом титане с УМЗ структурой. Только тепловым действием тока [18] данный факт не может быть объяснен, поскольку температура испытания не превышала 70°C . В работе [19] авторы специально выбрали сплав, который при высокой температуре имел низкую пластичность и позволил продемонстрировать ЭПЭ. Известно, что при относительно низкой температуре атермический вклад тока может сильно превышать тепловой эффект [20, 21, 22]. Этому способствуют и выбор длительности импульса тока $\tau = 100$ мкс, которая в отличие от аналогичных исследований является минимальной для разогрева, но достаточной для заметного атермического вклада тока. Интересно, что первое введение тока на упругом участке кривой 3 (см. рис. 4, вставка) вместо ожидаемого «скачка» напряжения вниз, связанного с тепловым расширением, привело к появлению площадки текучести, вызванной более

ранним началом движения дислокаций. Возможно, дилатометрический эффект разупрочнения полностью был скомпенсирован деформационным упрочнением.

Последующее отключение тока привело к продолжению упругой деформации, которая заканчивается пределом текучести равным для растяжения без тока (см. рис. 4, кривая 1). Косвенно, это свидетельствует в пользу механизма электронного «ветра», который работает «in situ» без внесения значительных изменений в структуру. Последующий плавный спад нисходящей части «скачка» отличается от резкого спада, продемонстрированного в работах [22], поскольку в данной работе используется не мощный единичный импульс, а серия коротких импульсов ($Q = 10$). Амплитуда «скачка» постепенно снижается и полностью исчезает в области максимальных деформаций, что может быть связано с процессом образования новых дислокаций, тормозящих движение имеющихся. Восходящая часть «скачка» соответствует обычному поведению при растяжении в отсутствие тока с частичным (см. рис. 4, кривая 3) или, полным (см. рис. 4, кривая 4) восстановлением напряжений течения до уровня кривой 1, что указывает на обратимое действие импульсного тока. Попеременное действие деформации и тока на упругом участке позволяет продемонстрировать релаксационные явления материала в моменты прекращения действия того или иного фактора. Как следует из вида кривых, релаксация напряжений сильнее проявляется при раздельном действии деформации и тока (см. рис. 4, кривая 4). Растяжение с возрастающей нагрузкой периодически сменялось режимом ползучести при постоянной нагрузке, в результате чего напряжения с течением времени снижаются, т.е. происходит релаксация напряжений, дополнительно стимулированная током [12]. Введение тока сопровождалось релаксационными процессами, свойственными электроимпульсной обработке [9]. Увеличение пластичности связано с локальным характером действия тока на дефекты кристаллической структуры и примесные атмосферы (Котрелла, Снука, Сузуки). Такое воздействие способствует срыву дислокаций с локальных стопоров, которое проявляется в виде «скачка» напряжения вниз. Данные «скачки» в пластической области имеют большую амплитуду за счет более активного процесса движений дислокаций.

Отмечается воздействие тока на величину микротвердости в зонах, испытывающих пластическую деформацию. Микротвердость значительно снизилась только в случае непрерывного воздействия тока, поскольку пластическая деформация в данном случае была сфокусирована в шейке, происходило значительное увеличение плотности тока и температуры по мере уменьшения сечения разрываемого образца. Снижение

микротвердости для образцов, испытанных с периодическим включением обусловлено релаксацией микроструктуры.

В отличие от работ, демонстрирующих залечивание микротрещин током, в настоящем исследовании, ввиду низкой температуры и плотности тока, это не наблюдается [23, 9]. Более того, образующиеся микропоры увеличиваются в количестве и размере, сливаются и образуют трещины. Трансформация преимущественно чашечного излома в преимущественно ямочный излом под действием релаксационного действия тока может быть одной из причин улучшения пластичности.

5. Выводы

Непрерывное и периодическое сопровождение растяжения импульсным током снижает напряжение течения и повышает относительное удлинение до разрушения в УМЗ Grade 4. Периодическое сопровождение импульсным током при остановках растяжения дополнительно повышает удлинение до разрушения при слабом повышении напряжений течения. ЭПЭ сопровождается снижением микротвердости в шейке и переходом вида вязкого разрушения от преимущественно чашечного к полностью ямочному типу.

Библиографический список:

1. **Hariharan, K.** Stress relaxation and its effect on tensile deformation of steels / K. Hariharan, O. Majidi, C. Kim et al. // *Materials & Design* (1980-2015). – 2013. – V. 52, – P. 284-288. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.05.088.
2. **Fox, A.** Effect of temperature on stress relaxation of several metallic materials / A. Fox // *Residual Stress and Stress Relaxation*. In: *Sagamore Army Materials Research Conference Proceedings*; ed. by E. Kula, V. Weiss. – New York, Springer, 1982. – V. 28. – Ch. 11. – P. 181-203. DOI: 10.1007/978-1-4899-1884-0_11.
3. **Klunnikova, Yu.V.** The thermoelastic stresses during laser annealing of titanium dioxide on a sapphire substrate / Yu. V. Klunnikova, M. V. Anikeev, A. V. Filimonov // *St. Petersburg Polytechnic University Journal - Physics and Mathematics*. – 2022. – V. 15. – I. 3. – P. 100-110. DOI: 10.18721/JPM.15308.
4. **Zhang, X.** Effects of magnetic field on the residual stress and structural defects of Ti-6Al-4V / X. Zhang, Q. Zhao, Z. Cai, J. Pan // *Metals*. – 2020. – V. 10. – I. 1. – Art. № 141. – 12 p. DOI: 10.3390/met10010141
5. **Балтаев, Т.А.** Ультразвуковой метод стабилизации механических и геометрических параметров изделий / Т.А. Балтаев, Д.К. Кушалиев, Б.А. Ерманова // *Вестник Восточно-Казахстанского государственного технического университета им. Д. Серикбаева*. – 2019. – № 2. – С. 99-104.
6. **Liang, P.C.** Non-deformation recrystallization of metal with electric current stressing / P. C. Liang, K.L. Lin // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2017. – V. 722. – P. 690-697 DOI: 10.1016/j.jallcom.2017.06.032.
7. **Комаристая, К.О.** О релаксации напряжений и разрушения в наноструктурных твердых телах / К.О. Комаристая // 2-я Международной научно-практической конференции «Ресурсосбережение и экология строительных материалов, изделий и конструкций»: сборник научных трудов в 2 томах, 1 октября 2019, Курск. – Курск: Юго-Западный государственный университет, – 2019. – Т. 1. – С. 197-199.
8. **Krasnikov, V.** Effect of copper segregation at low-angle grain boundaries on the mechanisms of plastic relaxation in nanocrystalline aluminum: an atomistic study / V. Krasnikov, A. Mayer, P. Bezborodova, M. Gazizov // *Materials*. – 2023. – V. 16. – I. 8. – Art. № 3091. – 18 p. DOI: 10.3390/ma16083091
9. **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.
10. **Semenova, I.** Ultrafine-grained titanium-based alloys: structure and service properties for engineering

- applications. / I. Semenova, V. Polyakova, G. Dyakonov, A. Polyakov // *Advanced Engineering Materials*. – 2022. – V. 22. – I. 1. – Art. № 1900651. – 13 p. DOI: 10.1002/adem.201900651.
11. **Majchrowicz, K.** Thermal stability and mechanical behavior of ultrafine-grained titanium with different impurity content / K. Majchrowicz, A. Sotniczuk, J. Malicka et al. // *Materials*. – 2023. – V. 16. – I. 4. – Art. № 1339. – 13 p. DOI: 10.3390/ma16041339.
12. **Eipert, I.** Improvement in ductility in commercially pure titanium alloys by stress relaxation at room temperature / I. Eipert, G. Sivaswamy, R. Bhattacharya et al. // *Key Engineering Materials*. – 2014. – V. 611-612. – P. 92-98. DOI: 10.4028/www.scientific.net/kem.611-612.92.
13. **Поляков, А.В.** Эволюция микроструктуры титана Grade 4 с изменением степени деформации при РКУП-CONFORM / А. В. Поляков, Д. В. Гундеров, Г. И. Рааб, Е. П. Сошникова // *Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета*. – 2011. – Т. 15. – № 1 (41). – С. 95-100.
14. **ASTM F67-06.** Standard specification for unalloyed titanium, for surgical implant applications (UNS R50250, UNS R50400, UNS R50550, UNS R50700). – Режим доступа: <https://www.astm.org/f0067-06.html>. – 01.09.2023.
15. **Stolyarov, V.** Features of the interaction of plastic deformation and pulse current in various materials / V. Stolyarov, I. Calliari, C. Gennari // *Materials Letters*. – 2021. – V. 299. – Art. № 130049. – 9 p. DOI: 10.1016/j.matlet.2021.130049.
16. **Kim, M.-J.** Elucidating the origin of electroplasticity in metallic materials / M.-J. Kim, S. Yoon, S. Park et al. // *Applied Materials Today*. – 2020. – V. 21. – Art. № 100874. – 13 p. DOI: 10.1016/j.apmt.2020.100874.
17. **Conrad, H.** Electroplasticity in metals and ceramics / H. Conrad // *Materials Science and Engineering*. – 2000. – V. 287. – I. 2. – P. 276-287. DOI: 10.1016/S0921-5093(00)00786-3.
18. **Ao, D.-W.** Hot tensile behaviors and microstructure evolution of Ti-6Al-4V titanium alloy under electropulsing / D.-W. Ao, X.-R. Chu, S.-X. Lin et al. // *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*. – 2018. – V. 31. – I. 12. – P. 1287-1296. DOI: 10.1007/s40195-018-0735-3.
19. **Zhao, S.** Minor defect reconfiguration in a Ti–Al alloy via electroplasticity / S. Zhao, R. Zhang, Y. Chong // *Nature Materials*. – 2021. – V. 20. – P. 468-472. DOI: 10.1038/s41563-020-00817-z.
20. **Корольков, О.Е.** Электропластический эффект в титановых сплавах при их растяжении / О.Е. Корольков, М. А. Пахомов, В. В. Столяров // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. – 2022. – Т. 88. – № 10. – С. 73-82. DOI: 10.26896/1028-6861-2022-88-10-73-82.
21. **Stolyarov, V.V.** Deformation behavior under tension with pulse current of ultrafine-grain and coarse-grain CP titanium / V.V. Stolyarov, O.E. Korolkov, A.M. Pesin, G.I. Raab // *Materials*. – 2023. – V. 16. – I. 1. – Art. № 191. – 10 p. DOI:10.3390/ma16010191.
22. **Корольков, О.Е.** Влияние размера зерна и скважности на механическое поведение титана при растяжении с импульсным током / О.Е. Корольков, М.А. Пахомов, А.В. Поляков и др. // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. – 2022. – Вып. 14. – С. 639-651. DOI: 10.26456/pcascnn/2022.14.639.
23. **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 et al. // *Journal of Manufacturing Science & Engineering*. – 2017. – V. 139. – I. 11. – Art. № 110801. – 15 p. DOI: 10.1115/1.4036716.

References:

1. Hariharan K., Majidi O., Kim C. et al. Stress relaxation and its effect on tensile deformation of steels, *Materials & Design (1980-2015)*, 2013, vol. 52, pp. 284-288. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.05.088.
2. Fox A. Effect of temperature on stress relaxation of several metallic materials, *Residual Stress and Stress Relaxation, Sagamore Army Materials Research Conference Proceedings*, ed. by E. Kula, V. Weiss, New York, Springer, 1982, vol. 28, chapter 11, pp. 181-203. DOI: 10.1007/978-1-4899-1884-0_11.
3. Klunnikova Yu.V., Anikeev M.V., Filimonov A.V. The thermoelastic stresses during laser annealing of titanium dioxide on a sapphire substrate, *St. Petersburg Polytechnic University Journal - Physics and Mathematics*, 2022, vol. 15, issue 3, pp. 100-110. DOI: 10.18721/JPM.15308.
4. Zhang, X. Zhao Q., Cai Z., Pan J. Effects of magnetic field on the residual stress and structural defects of Ti-6Al-4V, *Metals*, 2020, vol. 10, issue 1, art. no. 141, 12 p. DOI: 10.3390/met10010141.
5. Baltayev T.A., Kushaliyev D.K., Yermanova B.A. Ul'trazvukovoy metod stabilizatsii mekhanicheskikh i geometricheskikh parametrov izdeliy [Ultrasonic method of stabilization of mechanical and geometric parameters of products], *Vestnik Vostochno-Kazakhstanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. D. Serikbayeva [Bulletin of D. Serikbayev East Kazakhstan technical university]*, 2019, no. 2, pp. 99-104 (In Russian).

6. Liang P. C., Lin K.L. Non-deformation recrystallization of metal with electric current stressing, *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, vol. 722, pp. 690–697. DOI: 10.1016/j.jallcom.2017.06.032.
7. Komaristaya K.O. O relaksatsii napryazhenij i razrusheniya v nanostrukturnykh tverdykh telakh [On stress relaxation and fracture in nanostructured solids], *2-ya Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii «Resursosberezhenie i ekologiya stroitel'nykh materialov, izdelij i konstruksij» [2nd International Scientific and Practical Conference «Resource Conservation and Ecology of Building Materials, Products and Structures»]: proceedings in 2 vol.*, Kursk, October 1, Kursk: The Southwest State University, 2019, vol. 1, pp. 197-199. (In Russian).
8. Krasnikov V., Mayer A., Bezborodova P., Gazizov M. Effect of copper segregation at low-angle grain boundaries on the mechanisms of plastic relaxation in nanocrystalline aluminum: an atomistic study, *Materials*, 2023, vol. 16, issue 8, art. no. 3091, 18 p. DOI: 10.3390/ma16083091.
9. 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.
10. Semenova I., Polyakova V., Dyakonov G., Polyakov A. Ultrafine-grained titanium-based alloys: structure and service properties for engineering applications, *Advanced Engineering Materials*, 2022, vol. 22, issue 1, art. no. 1900651, 13 p. DOI: 10.1002/adem.201900651.
11. Majchrowicz K., Sotniczuk A., Malicka J., et al. Thermal stability and mechanical behavior of ultrafine-grained titanium with different impurity content. *Materials*, 2023, vol. 16, issue 4, art. no. 1339, 13 p. DOI: 10.3390/ma16041339.
12. Eipert I., Sivaswamy G., Bhattacharya R. et al. Improvement in ductility in commercially pure titanium alloys by stress relaxation at room temperature, *Key Engineering Materials*, 2014, vol. 611-612, pp. 92-98. DOI: 10.4028/www.scientific.net/kem.611-612.92.
13. Polyakov A.V., Gunderov D.V., Raab G.I., Soshnikova Ye.P. Evolyutsiya mikrostruktury titana Grade 4 c izmeneniyem stepeni deformatsii pri RKUP-CONFORM [Evolution of the Grade 4 titanium microstructure with a change in the degree of deformation during ECAP-CONFORM]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta [Vestnik USATU]*, 2011, vol. 15, no 1 (41). pp. 95-100 (In Russian).
14. ASTM F67-06. Standard specification for unalloyed titanium, for surgical implant applications (UNS R50250, UNS R50400, UNS R50550, UNS R50700). Available at: <https://www.astm.org/f0067-06.html>. (accessed 01.09.2023).
15. Stolyarov V., Calliari I., Gennari C. Features of the interaction of plastic deformation and pulse current in various materials. *Materials Letters*, 2021, vol. 299, art. no. 130049, 9 p. DOI: 10.1016/j.matlet.2021.130049.
16. Kim M. -J., Yoon S., Park S. et al. Elucidating the origin of electroplasticity in metallic materials. *Applied Materials Today*, 2020, vol. 21, art. no. 100874, 13 p. DOI: 10.1016/j.apmt.2020.100874.
17. Conrad H. Electroplasticity in metals and ceramics. *Materials Science and Engineering*, 2000, vol. 287, issue 2, pp. 276-287. DOI: 10.1016/S0921-5093(00)00786-3.
18. Ao D.-W., Chu X.-R., Lin S.-X. et al. Hot tensile behaviors and microstructure evolution of Ti-6Al-4V titanium alloy under, *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2018, vol. 31, issue12, pp. 1287-1296. DOI: 10.1007/s40195-018-0735-3.
19. Zhao S., Zhang R., Chong Y. et al. Minor defect reconfiguration in a Ti–Al alloy via electroplasticity, *Nature Materials*, 2021, vol. 20, pp. 468-472. DOI: 10.1038/s41563-020-00817-z.
20. Korolkov O. E., Pakhomov M. A., Stolyarov V. V. Elektroplasticheskiy effekt v titanovykh splavakh pri ikh rastyazhenii [The electroplastic effect in titanium alloys under tension], *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov [Industrial laboratory. Diagnostics of materials]*, 2022, vol. 88, no. 10, pp. 73-82. DOI: 10.26896/1028-6861-2022-88-10-73-82 (In Russian).
21. Stolyarov V.V., Korolkov O.E., Pesin A.M., Raab G.I. Deformation behavior under tension with pulse current of ultrafine-grain and coarse-grain CP titanium. *Materials*, 2023, vol. 16, art. no. 191, 10 p. DOI: 10.3390/ma16010191.
22. Korolkov O.E., Pakhomov M.A., Polyakov A.V. et al. Vliyaniye razmera zerna i skvazhnosti na mekhanicheskoye povedeniye titana pri rastyazhenii s impul'snym tokom [Effect of grain size and duty ratio on the mechanical behavior of titanium under tension with pulsed current]. *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2022, issue 14, pp. 639-651. DOI: 10.26456/pcascnn/2022.14.639. (In Russian).
23. Ruzkiewicz B.J., Grimm T., Ragai I. et al. A review of electrically-assisted manufacturing with emphasis on modeling and understanding of the electroplastic effect, *Journal of Manufacturing Science & Engineering*, 2017, vol. 139, issue 11, art. no. 110801, 15 p. DOI: 10.1115/1.4036716.

**STRESS RELAXATION UNDER TENSION BY ACCOMPANIED CURRENT IN
ULTRAFINE-GRAIN TITANIUM**

O.E. Korolkov, V.V. Stolyarov

Mechanical Engineering Research Institute of RAS, Moscow, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.135

Abstract: The article studies the effect of stress relaxation caused by strain stops and pulsed current on the tensile deformation behavior of Grade 4 ultrafine-grained titanium. The samples were deformed in the following modes: without current; continuously with current; with periodic current supply, periodic current supply during stops of strain. The microhardness of the working zone of the tested specimens was studied. Fracture studies of the failure zone were carried out. It is shown that, as a result of the continuous introduction of current during tension, the flow stresses decrease, and the elongation to failure increases. Periodic introduction of current, accompanied by strain stops, leads to a maximum increase in the relative elongation to failure due to stress relaxation. The relaxation effect of the pulsed current is manifested in a decrease in microhardness and the transition of the fracture type from a dimple-cup fracture to a predominantly dimple fracture.

Keywords: stress relaxation, tension, titanium, nanostructure, electroplastic effect, pulsed current, microhardness, fractography.

Корольков Олег Евгеньевич – младший научный сотрудник ФГБУН «Институт машиноведения Российской академии наук»

Столяров Владимир Владимирович – д.т.н, профессор, главный научный сотрудник ФГБУН «Институт машиноведения Российской академии наук»

Oleg E. Korolkov – Junior Researcher, Mechanical Engineering Research Institute of RAS

Vladimir V. Stolyarov – Dr. Sc., Chief Researcher, Mechanical Engineering Research Institute of RAS

Поступила в редакцию/received: 06.09.2023; после рецензирования/reviced: 08.10.2023; принята/accepted: 10.10.2023.