

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА ЗЕРНА И СКВАЖНОСТИ НА МЕХАНИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ ТИТАНА ПРИ РАСТЯЖЕНИИ С ИМПУЛЬСНЫМ ТОКОМ

О.Е. Корольков¹, М.А. Пахомов¹, А.В. Поляков², Р.З. Валиев³, В.В. Столяров¹

¹*ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН»*

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

²*ФГБОУ ВО «Башкирский государственный университет»*

450076, Россия, Республика Башкортостан, Уфа, ул. Заки Валиди, 32

³*ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет»*

450008, Россия, Республика Башкортостан, Уфа, ул. Карла Маркса, 12

korolkov_oleg@vk.com

DOI: 10.26456/pcascn/2022.14.639

Аннотация: В статье исследовано влияние импульсного тока высокой плотности на деформационное поведение титана с различной дисперсностью структуры. Проведено сравнение особенностей деформационных кривых крупнозернистого и наноструктурированного технически чистого титана Grade 4 при растяжении с введением импульсного тока. Ток различной скважности и плотности от импульсного генератора подводили к образцу, находящемуся в захватах разрывной машины. Микроструктуру образцов крупнозернистого титана в головке образца и вблизи области разрушения в продольном сечении исследовали методом оптической микроскопии. Для исследования микроструктуры фольг наноструктурированного титана использовали метод просвечивающей электронной микроскопии. Электропластический эффект в исследованных материалах проявлялся на кривой растяжения в виде отдельных скачков напряжения вниз. При одинаковых режимах импульсного тока высокой скважности амплитуда скачков напряжения в крупнозернистом титане выше, чем в наноструктурном титане. Для тока низкой скважности скачки напряжения одинаковы в пластической области. Импульсный ток высокой скважности в наноструктурированном титане приводил к аномальному эффекту упрочнения, физическая природа которого нуждается в дополнительном исследовании. Использованные режимы импульсного тока не привели к заметным при оптическом увеличении структурным изменениям растягиваемых образцов, кроме исчезновения двойников и выделения частиц примесей в крупнозернистом титане. Фрактографические картины разрушения наноструктурированного титана, деформированного с током и без тока свидетельствуют о вязком разрушении без существенных изменений, что свидетельствует о минимальном тепловом вкладе в процессе экспериментов.

Ключевые слова: *растяжение, титан, наноструктура, электропластический эффект, импульсный ток, фрактография.*

1. Введение

Электропластический эффект (ЭПЭ) – явление, при котором наблюдается снижение сопротивления металла деформации, а также повышение его пластичности под влиянием электрического тока достаточно высокой плотности [1]. Явление электропластичности открыто достаточно давно, однако механизмы, действующие в процессе электропластической деформации (ЭПД) обсуждаются до сих пор. В

работе [2] рассматриваются такие механизмы, как тепловой нагрев, электронно-дислокационное взаимодействие, магнитопластиичность, пинч-эффект, электрический заряд на дефектах кристаллической структуры. Пондеромоторное действие тока (пинч-эффект и скин-эффект) рассматривалось в работах [3; 4], где авторы обсуждают природу виброакустических колебаний, возникающих под действием тока, а также условия, при которых пондеромоторное действие тока может вносить существенный вклад в ЭПД. В работе [5] рассматривается возможность восстановления деформированной микроструктуры при эксплуатации сталей 301L / 316L и сверхупругого сплава *NiTi* за счет залечивания микродефектов методом электроимпульсной обработки.

В ряде работ выполнены исследования влияния режимов импульсного тока и условий растяжения на ЭПЭ. Авторы работы [6] рассматривали механическое поведение алюминиевого сплава при растяжении с импульсным током высокой скважности и соответствующие структурные изменения. Было установлено, что под действием электрического тока удлинение резко увеличивалось при уменьшении напряжения течения. Микроструктурные наблюдения подтвердили, что влияние Джоулева нагрева на механическое поведение не было доминирующим, но имела место аннигиляция дислокаций. В работе [7] показано, что жесткость испытательной машины значительно влияет на снижение напряжений течения, абсолютная величина которого в упругой области в основном связана с тепловыми эффектами. Для холоднодеформированной и гомогенизированной дуплексной нержавеющей стали показано, что снижение скважности и увеличение плотности тока и длительности импульса снижает напряжение течения на 25-30% по сравнению с растяжением без тока при сохранении достаточной пластичности [8].

В редких исследованиях было рассмотрено влияние размера зерен на ЭПЭ. Так, в [9] исследовано деформационное поведение моно- и поликристаллического алюминия при растяжении в сопровождении тока. В монокристалле одиночные импульсы относительно малой амплитудной плотности приводят к упрочнению, а в поликристалле – к разупрочнению. Увеличение плотности тока и снижение скважности в обоих материалах способствовало снижению коэффициента деформационного упрочнения и не влияло на анизотропию прочностных свойств в монокристалле. В латуни 70/30 исследовано влияние размера и границ зерен на термомеханическое поведение при растяжении, в которых электрический ток применялся в сочетании с механической деформацией [10]. Отмечалось, что для материала с меньшим размером зерна Джоулев нагрев способствует большему снижению напряжения. Большее снижение

напряжения течения материала наблюдалось и по сравнению с растяжением в печи при аналогичных температурах. Это подтверждает присутствие дополнительного электромеханического вклада при испытании с током. Исследования микроструктуры выявили возникновение локальной межзеренной кавитации, а также локальное плавление границ зерен, во время экспериментов с высокой плотностью тока.

Использование ЭПЭ для деформации титана и его сплавов вызывает особый интерес и является актуальной задачей. Физико-механические свойства данных материалов позволяют их применять в аэрокосмической промышленности. Наличие прочной оксидной пленки на поверхности титана является причиной высокой коррозионной стойкости и биосовместимости, что позволяет использовать титан в химической промышленности, а также для производства медицинских имплантатов. Улучшение механических свойств титана возможно через добавление в состав легирующих элементов, а также через измельчение зерна [11; 12]. Высокая прочность титана и его сплавов является препятствием при формообразовании и необходимостью существенного нагрева заготовок. Температура выше 350°C способствует образованию окислов на поверхности полуфабриката, ростом зерен и образованием альфирированного слоя, а пластическая деформация заготовок без использования высокой температуры, часто сопровождается трещинообразованием и высоким пружинением. В наноструктурированном (НС) титане рост зерен при нагреве препятствует применению термомеханической обработки из-за снижения прочностных свойств. Очевидным решением упомянутых проблем может стать деформация с использованием ЭПЭ при температурах не выше 350°C.

Для технически чистого титана была установлена критическая плотность тока, при которой проявляется ЭПЭ [13]. Скачки в упругой области кривой растяжения объяснялись авторами тепловым расширением ввиду отсутствия движения дислокаций. В сплаве *Ti-7Al* [14] было показано, что при растяжении с током происходит упрочнение за счет поперечного скольжения дислокаций и соответствующего двойникования [14]. Установлено, что такое деформационное поведение происходит из-за реконфигурации микроструктуры на уровне дефектов, что не может быть объяснено простым джоулевым нагревом. В работе [15] сравнивалось поведение образцов меди, железа и титана при растяжении с разной плотностью тока и температурой нагрева. Результаты показали, что только для титана проявился ЭПЭ, который вызвал значительное снижение напряжений. Отметим, что в литературе практически отсутствуют сведения об ЭПЭ в НС материалах.

Цель статьи состоит в сравнительном исследовании влияния импульсного тока большой скважности на структуру и механическое поведение при растяжении крупнозернистого (КЗ) и НС титана.

2. Материалы и методы исследований

Материалом исследования был выбран технически чистый титан Grade 4 в двух состояниях: а – в состоянии поставки (ASTM F67-06) в форме прутка \varnothing 6 мм; б – после термомеханической обработки методом РКУП-КОНФОРМ и последующего отжига при 200°C. Химический состав материала представлен в Таблице 1.

Таблица 1. Химический состав Grade 4, вес.%

Материал	N	C	H	Fe	O	Ti
Grade 4	0,01	0,04	0,015	0,14	0,36	остальное

Цилиндрические образцы для растяжения были вырезаны в продольном направлении прутка, форма и размеры образцов для растяжения показаны на рис. 1.

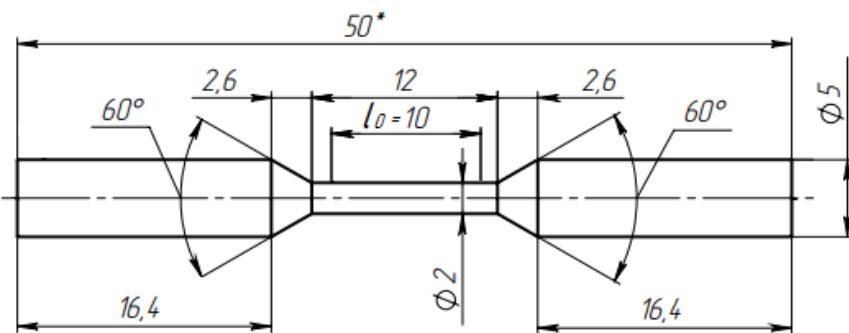


Рис. 1. Форма и размеры образцов для растяжения.

Растяжение выполняли на горизонтальной разрывной машине ИР-5081/20. Скорость испытания составляла 1 мм/мин. К зажимам разрывной машины от генератора подводился импульсный ток плотностью $j = 220$ и 860 A/mm^2 , скважность которого составляла $q = 1/v\tau = T/\tau = 2000$ и 5000, где v , T и τ частота, период и длительность импульса, соответственно (см. рис. 3). Скважность варьировалась за счет изменения частоты тока при постоянной длительности импульса $\tau = 1000 \text{ мкс}$.

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 АКИМ – 4131/2. Схема испытательного стенда показана на рис. 2.

Микроструктура образцов в головке образца (недеформированная

зона) и вблизи области разрушения (деформируемая зона) в продольном сечении исследовалась методом оптической микроскопии (Olympus BX-51). Подготовку образцов для оптической микроскопии осуществляли последовательно механической шлифовкой и полировкой, затем электрополировкой при напряжении 35-50 В в растворе хлорной и уксусной ледяной кислот в соотношении 1:4. Выявление микроструктуры выполняли химическим травлением в растворе плавиковой и азотной кислот в воде в соотношении 1:2:47 частей.

Микроструктура тонких слоев образцов анализировалась с помощью просвечивающего электронного микроскопа JEOL JEM 2100. Заготовки для фольг были вырезаны электроэррозионным способом и 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.

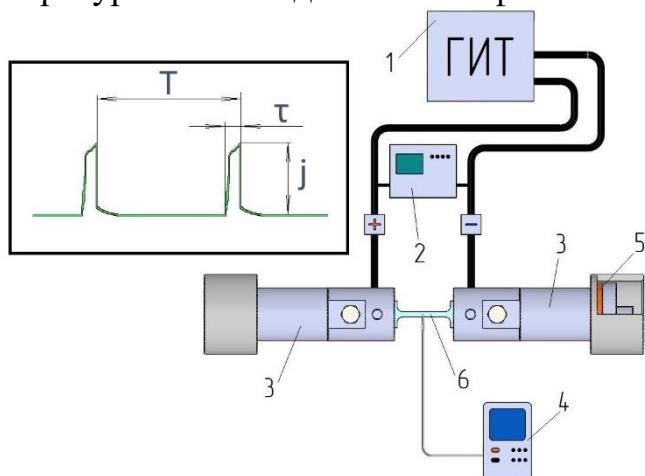


Рис. 2. Схема испытательной установки: 1 – Генератор импульсного тока; 2 – Осциллограф; 3 – Захваты; 4 – Термопара; 5 – Изоляция; 6 – Образец. На вставке схема осциллограммы импульсного тока.

3. Результаты испытаний

Микроструктура. На рис. 3 показаны микроструктуры титана в состоянии поставки и после РКУП-КОНФОРМ. Структура исходного титана характеризуется крупнозернистым (КЗ) состоянием и равноосной формой зерен со средним размером 20 мкм (см. рис. 3 а). Внутри зерен заметны редкие тонкие двойники и частицы оксидов или интерметаллидов элементов, входящих в состав титана (см. Таблицу 1).

Состояние титана после РКУП-КОНФОРМ является НС, в котором зерна средним размером 200 нм имеют слегка вытянутую форму и прямолинейные границы, свидетельствующие о предварительной интенсивной пластической деформации материала (см. рис. 3 б).

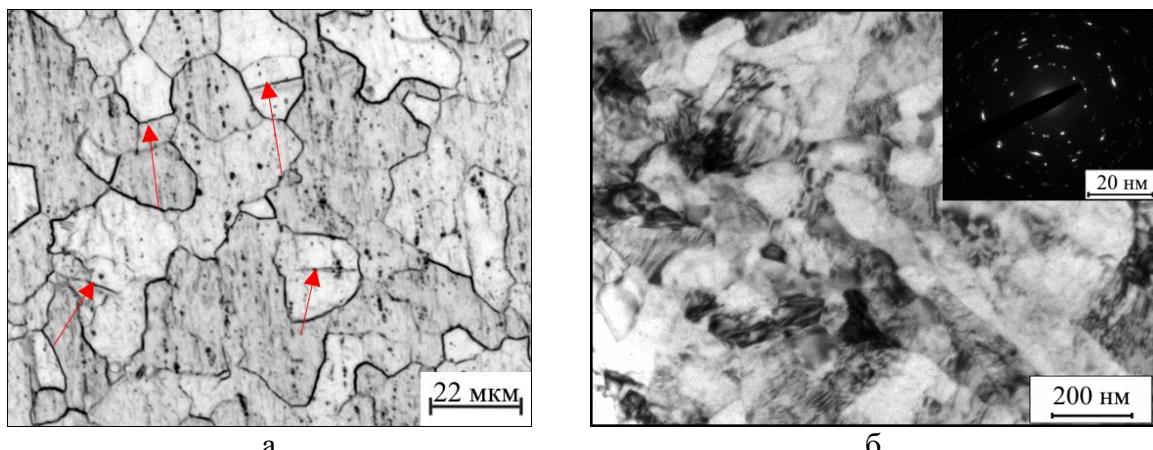


Рис. 3. Микроструктура титана: а – КЗ титан; б – НС титан. Двойники отмечены красными стрелками. Во вставке показана картина микродифракции.

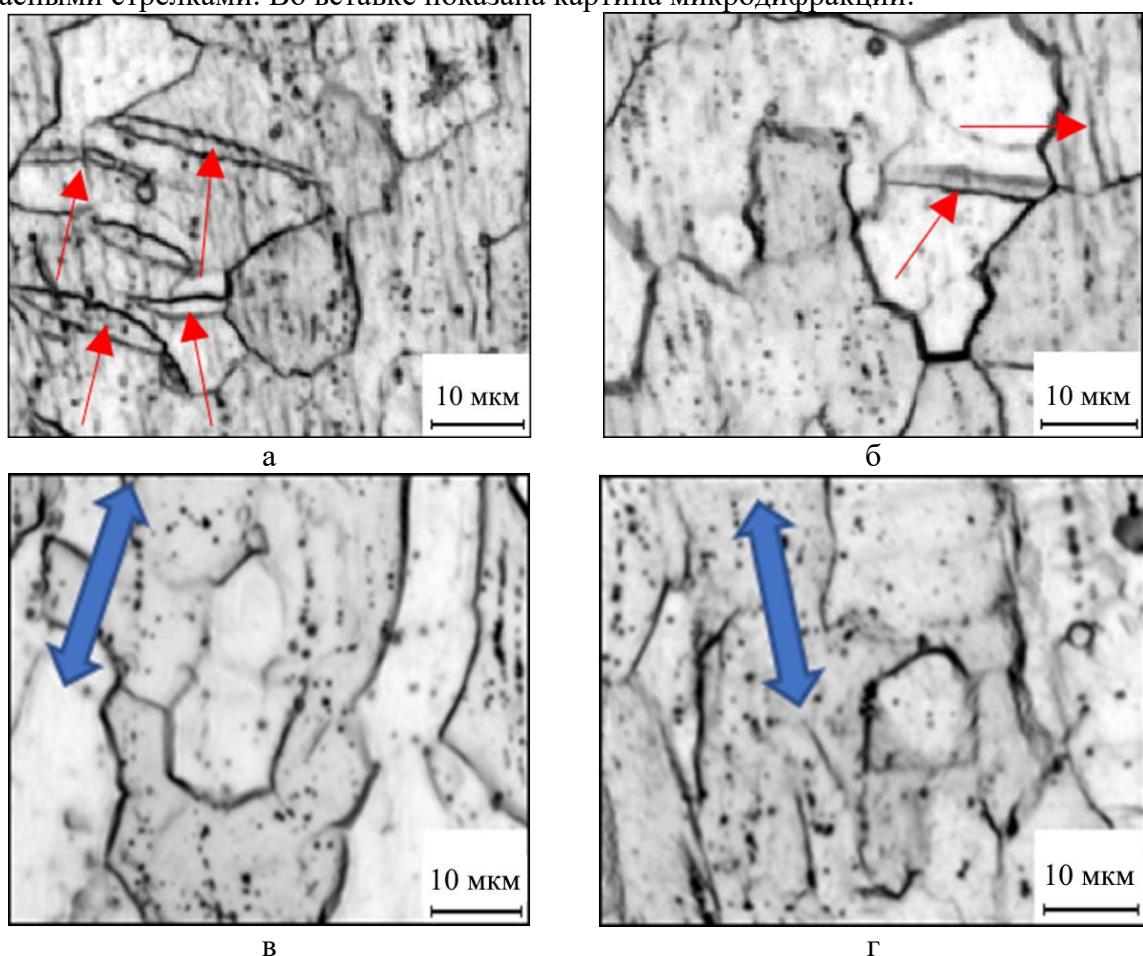


Рис. 4 Оптическая микроструктура КЗ титана в недеформированной (а, б) и деформированной (в, г) зонах: а – без тока; б – $j = 860 \text{ А/мм}^2$, $q = 5000$; в – без тока; г – $j = 860 \text{ А/мм}^2$, $q = 5000$. Двойной и одинарной стрелкой обозначено направление растяжения, и двойники деформации, соответственно.

Кольцевое расположение многочисленных электронных рефлексов на картине микродифракции свидетельствует о хаотической ориентации кристаллитов, что может подтверждать НС состояние титана.

Азимутальное размытие рефлексов указывает на малоугловую разориентировку сильно развитую субструктурту.

На рис. 4 показаны оптические изображения микроструктуры образцов КЗ титана, испытанных без тока и с током в деформированной и не деформированной зонах.

Исходная структура в недеформированной зоне, описанная ранее, не изменяется при растяжении с током высокой плотности (см. рис. 4 а, б). В деформируемой зоне ток способствует исчезновению двойников, удлинению зерен в направлении растяжения на 40-50% и выделению частиц примесей (см. рис. 4 в, г).

На рис. 5 показано фрактографическое изображение зоны разрушения образца НС титана, испытанного без тока и с током. Характер разрушения в обоих случаях соответствует вязкому излому, видны гребни и крупные ямки отрыва размером 2-3 мкм, внутри которых наблюдаются более мелкие ямки размером до 500 нм. Введение импульсного тока не привело к изменению характера разрушения (см. рис. 6 б).

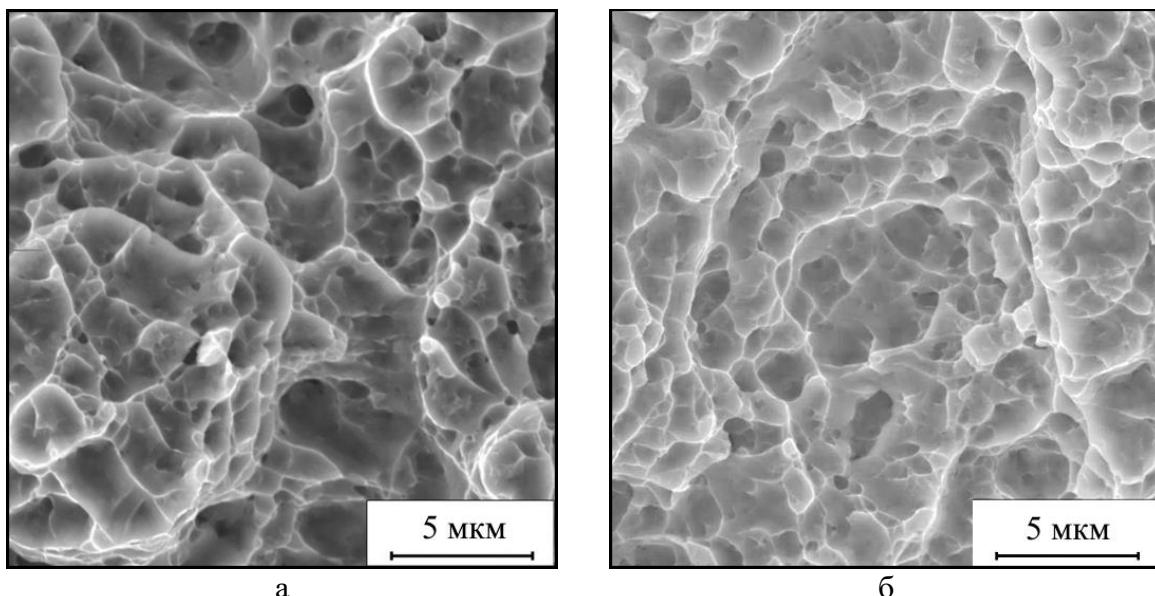


Рис. 5. Фрактографическое изображение излома НС титана при растяжении: а – без тока, б – $j = 860 \text{ A/mm}^2$, $q = 5000$.

Растяжение. На рис. 6 показаны кривые КЗ и НС при растяжении без тока и с током различной скважности и плотности. Введение импульсного тока в КЗ титане сопровождается снижением деформационного упрочнения, равномерного и общего относительного удлинения, и напряжений течения на 50 и 120 МПа по сравнению с испытанием без тока. Кроме того, в упругой и пластической области появляются скачки напряжения вниз, амплитуда которых возрастает от 20 до 320 МПа с увеличением плотности тока (см. рис. 6, кривые 2, 3). Отметим, что амплитуда скачков в упругой области меньше, чем в

пластической области. Повышение плотности тока приводит также к тому, что в зоне пластической деформации, напряжение течения в скачке не полностью возвращается к значению, предшествующему введению импульса. Снижение скважности с 5000 до 2000 сопровождается многократным снижением напряжения течения (см. рис. 6, кривые 3 и 4) и увеличением пластичности.

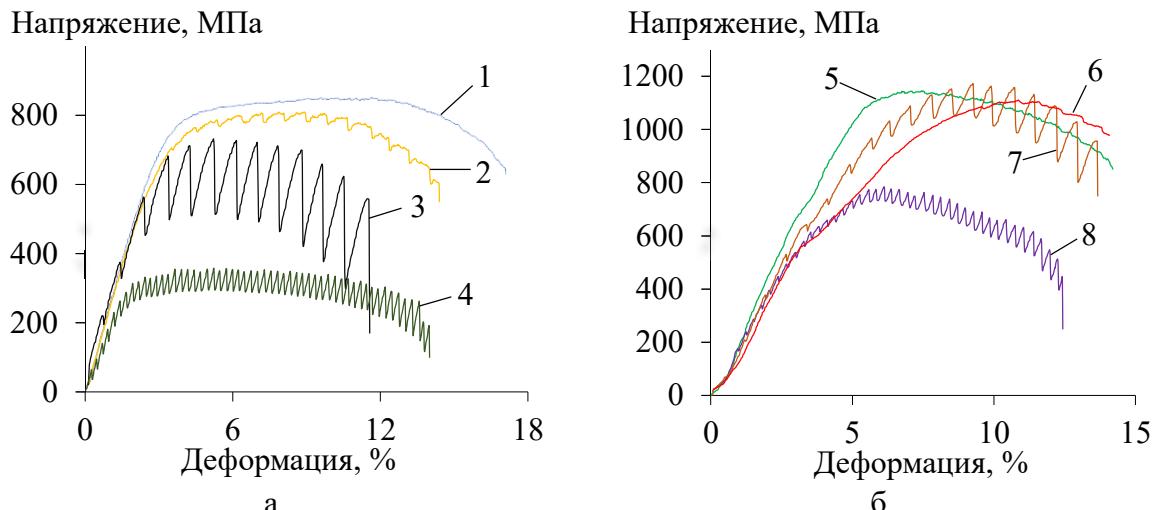


Рис. 6. Кривые напряжение-деформация КЗ (а) и НС (б) титана: 1, 5 – без тока; 2, 6 – $j = 220 \text{ A/mm}^2, q = 5000$; 3, 7 – $j = 860 \text{ A/mm}^2, q = 5000$; 4, 8 – $j = 860 \text{ A/mm}^2, q = 2000$

Таблица 2. Механические свойства и режимы тока испытанных образцов.

№	Структура	Воздействие	j , A/mm^2	q	T , $^\circ\text{C}$	σ_b , МПа	$\sigma_{02}(\sigma_T)$, МПа	δ , %	Примечание
1	КЗ	без тока			25	850	610	15	
2		импульсный ток	220	5000		800	560	10	
3			860	58	730	360	11	Есть скачки	
4				2000	130	354	270		14
5	НС	без тока			25	1145	725	11	
6		импульсный ток	220	5000	32	1105	720	11	
7			860		52	1170	690	10	Есть скачки
8				2000	82	745	660	12	

Здесь j – амплитудная плотность тока, σ_b – предел прочности, $\sigma_{02}(\sigma_T)$ – условный (физический) предел текучести, δ – относительное удлинение.

Введение импульсного тока в НС титане также сопровождается появлением скачков напряжения вниз, проявляющихся при низкой плотности тока только в области шейки (см. рис. 6, кривая 6). С повышением плотности тока скачки появляются на упругом и пластическом участке (см. рис. 6, кривые 7, 8). Для всех кривых с током отмечается снижение деформационного упрочнения, что способствует повышению равномерного удлинения (см. рис. 6, кривые 6, 7). Как и в КЗ титане, снижение скважности сопровождается резким уменьшением

напряжения течения (см. рис. 6, кривая 8) и относительного удлинения. В отличие от КЗ титана на всех кривых растяжения НС титана с током и без тока присутствует площадка текучести. В НС титане амплитуда скачков для тока высокой скважности ниже, чем в КЗ титане (см. рис. 6, кривые 2 и 6; 3 и 7). При низкой скважности амплитуда скачков в КЗ и НС титане отличается на упругом участке и одинакова на пластическом (см. рис. 6, кривые 4 и 8).

В Таблице 2 показаны механические свойства и режимы тока для испытанных образцов. Видно, что в КЗ и НС титане пределы прочности и текучести снижаются с увеличением плотности тока и уменьшением скважности. Введение импульсного тока заметно снижает относительное удлинение в КЗ титане и практически не влияет на удлинение НС титана.

4. Обсуждение результатов

Микроструктура. Отсутствие заметных структурных изменений в недеформированной зоне в КЗ титане указывает на то, что микронагрев при данной плотности тока на границах зерен был незначительным, чтобы вызвать рост зерен или рекристаллизацию (см. рис 4 г), что подтверждает результаты работы [2]. Присутствие единичных двойников связано с неполным отжигом титана в состоянии поставки и, как следствие, неполном снятии внутренних напряжений (см. рис 4 а). Исчезновение двойников в деформированной зоне под действием тока свидетельствует о прошедшем отжиге и наблюдалось в работе [16]. Изображения поверхности излома НС титана показывают присутствие ямок отрыва разного размера. Крупные ямки с хорошо видимыми гребнями представляют зерна с большеугловыми границами, тогда как мелкие ямки соответствуют субзернам с малоугловой ориентацией. Отсутствие изменений на фрактографических изображениях НС титана, испытанного с током и без тока, указывает на стабильность микроструктуры и низкую температуру нагрева образца.

Растяжение. Приведенные результаты показали, что ЭПЭ проявляется в скачках напряжения вниз и в общем снижении напряжений течения и удлинения до разрушения. При этом деформационное поведение титана зависит от режима тока (скважность, плотность тока) и от дисперсности структуры. Изменение скважности регулирует соотношение теплового и ЭПЭ тока. В случае повышения скважности тепловой вклад уменьшается, действие ЭПЭ увеличивается. Пологие участки между соседними импульсами на деформационной кривой (см. рис. 6, кривая 2) исчезают при повышении плотности и снижении скважности, что связано с заметным вкладом теплового эффекта. Об этом же свидетельствует снижение напряжения течения и предела текучести в результате уменьшения скважности.

Скачки напряжения в упругой зоне, в отличие от скачков в пластической зоне, обусловлены только тепловым расширением титана [7, 13]. При этом большая амплитуда скачков соответствует большему размеру зерен в связи с более высокой тепло- и электропроводностью в КЗ материалах [17]. Увеличение амплитуды скачков напряжения в пластической зоне связано с дополнительным действием ЭПЭ [2, 13]. Поскольку оба эффекта аддитивны и действуют в одном направлении, то скачки в пластической области имеют большую амплитуду. Зависимость амплитуды скачка напряжения от плотности тока и размера зерна [2, 13] подтверждает наличие пороговой (критической) плотности тока j_c , которая для НС выше, чем для КЗ титана. Интересно, что введение импульсного тока высокой плотности и скважности может приводить к слабому упрочнению (см. рис. 6, кривая 7), вероятно вызванному малоцикловой механической и термической усталостью (число циклов $N \geq 10$) и залечиванием микротрещин [14].

Снижение относительного удлинения при введении импульсного тока связано с уменьшением сечения в шейке образца, которое свойственно большинству материалов, но особенно сильно выражено в титане. В результате плотность тока в шейке резко возрастает, что приводит к преждевременному разрушению образца. Снижение в металлах деформационного упрочнения, равномерного и общего относительного удлинения, а также напряжений течения под действием тока является известным явлением и ранее наблюдалось в работе [18]. Введение импульсного тока заметно снижает относительное удлинение в КЗ титане и практически не влияет на пластичность в НС титане.

Площадка текучести на деформационных кривых НС титана, испытанного без тока и с током, обусловлена постдеформационным отжигом для снятия напряжений при 200°C после РКУП-КОНФОРМ. Напротив, отсутствие площадки текучести в КЗ титане связано с неполным отжигом исходных заготовок.

5. Заключение

Выбранные режимы импульсного тока обеспечили отсутствие существенного нагрева и заметных структурных изменений в КЗ и НС титане. Предполагается, что исчезновение двойников в КЗ титане связано с электростимулированным действием тока. ЭПЭ в титане проявляется в скачках напряжения вниз на деформационных кривых и в общем снижении напряжений течения и удлинения до разрушения. Показано, что деформационное поведение титана зависит от дисперсности структуры, скважности и плотности импульсного тока. Повышение скважности и уменьшение плотности тока снижают тепловой эффект и уменьшают

снижение напряжений течения тем сильнее, чем меньше размер зерен в титане. Установлено, что критическая плотность тока проявления ЭПЭ зависит от скважности и дисперсности микроструктуры так, что она кратно выше для НС титана, чем для КЗ титана. Показано, что при плотности тока выше критической и высокой скважности в НС титане может приводить к нетипичному упрочнению, механизм которого требует дополнительного структурного изучения

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках проекта по соглашению № 075-15-2021-709, уникальный идентификатор проекта RF-2296.61321X0037 (проведение контрольных измерений). Структурные исследования выполнены с помощью ЦКП «Авиационно-космические материалы и технологии» МАИ.

Библиографический список:

1. Троицкий, О.А. Электропластический эффект в металлах: монография / О.А. Троицкий. – М.: «Ким Л.А.», 2021. – 468 с.
2. 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.
3. Троицкий, О.А. Вибрации проводников при пропускании импульсного электрического тока и неразрушающий контроль / О.А. Троицкий, В.И. Сташенко, О.Б. Скворцов // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2018. – № 3. – С. 1-16.
4. Савенко, В.С. Расчет пондеромоторных факторов в условиях электропластической деформации металлов / В.С. Савенко, Е.Н. Галенко, Д.А. Зерница // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2022. – № 1. – С. 24-32.
5. Jeong, H.-J. Microstructure reset-based self-healing method using sub-second electric pulsing for metallic materials / H.-J. Jeong, M.-J. Kim, S.-J. Choi et al. // Applied Materials Today. – 2020. – V. 20. – Art. № 100755. – 14 p. DOI: 10.1016/j.apmt.2020.100755.
6. Kim, M.-J. Electric current-induced annealing during uniaxial tension of aluminum alloy / M.-J. Kim, K. Lee, K.H. Oh et al. // Scripta Materialia. – 2014. – V. 75. – P. 58-61. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2013.11.019.
7. Adabala, S. Importance of machine compliance to quantify electro-plastic effect in electric pulse aided testing: An experimental and numerical study / S. Adabala, S. Cherukupally, S. Guha et al. // Journal of Manufacturing Processes. – 2022. – V. 75. – P. 268-279. DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.12.027.
8. Gennari, C. Electroplastic effect in specimens of duplex stainless steel under tension / C. Gennari, I. Calliari, V. Stolyarov // Industrial Laboratory. Materials Diagnostics. – 2020. – V. 86. – № 10. – P. 41-45. DOI: 10.26896/1028-6861-2020-86-10-41-45.
9. Pakhomov, M. Specific features of electroplastic effect in mono- and polycrystalline aluminum / M. Pakhomov, V. Stolyarov // Metal Science and Heat Treatment. – 2021. – V. 63. – I. 5-6. – P. 236-242. DOI: 10.1007/s11041-021-00677-7.
10. Fan, R. Influence of grain size and grain boundaries on the thermal and mechanical behavior of 70/30 brass under electrically-assisted deformation / R. Fan, J. Magargee, P. Hu, J. Cao // Materials Science and Engineering A. – 2013. – V. 574. – P. 218-225. DOI: 10.1016/j.msea.2013.02.066.
11. Li, Z. The effects of ultra-fine-grained structure and cryogenic temperature on adiabatic shear localization in titanium / Z. Li, S. Zhao, B. Wang et al. // Acta Materialia. – 2019. – V. 181. – P. 408-422. DOI: 10.1016/j.actamat.2019.09.011.
12. 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.
13. Okazaki, K. An evaluation of the contributions of skin, pinch and heating effects to the electroplastic effect in titanium / K. Okazaki, M. Kagawa, H. Conrad // Materials Science and Engineering. – 1980. – V. 45. – I. 2. – P. 109-116. DOI: 10.1016/0025-5416(80)90216-5.
14. 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.
15. Rudolf, C. Effects of electric current on the plastic deformation behavior of pure copper, iron, and titanium /

- C. Rudolf, R. Goswami, W. Kang, J. Thomas // *Acta Materialia*. – 2021. – V. 209. – Art. № 116776. – 13 p. DOI: 10.1016/j.actamat.2021.116776.
16. **Magargee, J.** Characterization of flow stress for commercially pure titanium subjected to electrically assisted deformation / J. Magargee, F. Morestin, J. Cao // *Journal of Engineering Materials and Technology*. – 2013. – V. 135. – I. 4. – Art. № 041003. – 10 p. DOI: 10.1115/1.4024394.
17. **Валиев, Р.З.** Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией / Р.З. Валиев, И.В. Александров. – М.: Логос, 2000. – 272 с.
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

References:

1. Troitsky O.A. *Elektroplasticheskiy effekt v metallakh: monografiya* [Electroplastic effect in metals: monograph], Moscow, Kim L.A. Publ., 2021, 468 p. (in Russian).
2. 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.
3. Troitsky O.A., Stashenko V.I., Skvortsov O.B. Vibratsii provodnikov pri propuskanii impul'snogo elektricheskogo toka i nerazrushayushchij kontrol' [Vibration of conductors when passing pulsed electric current through them and non-destructive testing], *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2018, no. 3. pp. 1-15. (In Russian).
4. Savenko V.S., Galenko Ye.N., Zernitsa D.A. Raschet ponderomotornykh faktorov v usloviyakh elektroplasticheskoy deformatsii metallov [Calculation of ponderomotor factors in conditions of electroplastic deformation metals], *Vestnik GGTU im. P. O. Sukhogo* [Bulletin of GSTU after P.O. Sukhoi], 2022, no. 1, pp. 24-32. (In Russian).
5. Jeong H.-J., Kim M.-J., Choi S.-J. et al. Microstructure reset-based self-healing method using sub-second electric pulsing for metallic materials, *Applied Materials Today*, 2020, vol. 20, art. no. 100755, 14 p. DOI: 10.1016/j.apmt.2020.100755.
6. Kim M.-J., Lee K., Oh K.H. et al. Electric current-induced annealing during uniaxial tension of aluminum alloy, *Scripta Materialia*, 2014, vol. 75, pp. 58-61. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2013.11.019.
7. 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, pp. 268-279. DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.12.027.
8. Gennari C., Calliari I., Stolyarov V. Electroplastic effect in specimens of duplex stainless steel under tension, *Industrial Laboratory. Materials Diagnostics*, 2020, vol. 86, no. 10, pp. 41-45. DOI: 10.26896/1028-6861-2020-86-10-41-45.
9. Pakhomov M., Stolyarov V. Specific features of electroplastic effect in mono- and polycrystalline aluminum, *Metal Science and Heat Treatment*, 2021, vol. 63, issue 5-6, pp. 236-242. DOI: 10.1007/s11041-021-00677-7.
10. 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, vol. 574, pp. 218-225. DOI: 10.1016/j.msea.2013.02.066.
11. Li Z., Zhao S., Wang B. et al. The effects of ultra-fine-grained structure and cryogenic temperature on adiabatic shear localization in titanium, *Acta Materialia*, 2019, vol. 181, pp. 408-422. DOI: 10.1016/j.actamat.2019.09.011.
12. 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.
13. Okazaki K., Kagawa M., Conrad H. An evaluation of the contributions of skin, pinch and heating effects to the electroplastic effect in titanium, *Materials Science and Engineering*, 1980, vol. 45, issue 2, pp. 109-116. DOI: 10.1016/0025-5416(80)90216-5.
14. 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.
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 Materialia*, 2021, vol. 209, art. no. 116776, 13 p. DOI: 10.1016/j.actamat.2021.116776.
16. Magargee J., Morestin F., Cao J. Characterization of flow stress for commercially pure titanium subjected to electrically assisted deformation, *Journal of Engineering Materials and Technology*, 2013, vol. 135, issue 4, art. no. 041003, 10 p. DOI: 10.1115/1.4024394.

17. Valiev R.Z., Aleksandrov I.V. *Nanostrukturye materialy, poluchennye intensivnoj plasticheskoy deformatsie* [Nanostructural materials obtained by severe plastic deformation], Moscow, Logos Publ., 2000, 272 p. (In Russian).

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.

Original paper

**EFFECT OF GRAIN SIZE AND DUTY RATIO ON THE MECHANICAL BEHAVIOR
OF TITANIUM UNDER TENSION WITH PULSED CURRENT**

O.E. Korolkov¹, M.A. Pakhomov¹, A.V. Polyakov², R.Z. Valiev³, V.V. Stolyarov¹

¹Mechanical Engineering Research Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Bashkir State University, Ufa, Russia

³Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2022.14.639

Abstract: The influence of a high-density pulsed current on the deformation behavior of titanium with different structure refinement is studied. A comparison of the features of the deformation curves has been carried out of coarse-grained and nanostructured commercial pure *Ti* Grade 4 under tension with the introduction of a pulsed current. A current of various duty ratio and densities was supplied from a pulse generator to a sample in the grips of a tensile testing machine. The microstructure of a coarse-grained titanium in the sample head and near the fracture region in the longitudinal section was studied by optical microscopy. To study the microstructure of nanostructured titanium foils, the transmission electron microscopy was used. The electroplastic effect in the studied materials manifested itself in the tensile curve in the form of separate downward stress jumps. Under the same regimes of high-duty ratio pulsed current, the amplitude of stress jumps in the coarse-grained titanium is higher than in the nanostructured titanium. For a low duty ratio current the stress jumps are the same in the plastic region. A high duty ratio pulsed current in nanostructured titanium led to an anomalous hardening effect, the physical nature of which needs a further investigation. The used modes of the pulsed current did not lead to structural changes noticeable under optical magnification of the tensile samples, except for the disappearance of twins and the separation of impurity particles in the coarse-grained titanium. The fractographic fracture patterns of nanostructured titanium tested with and without current indicate ductile fracture without significant changes, which testified a minimal thermal contribution during the experiments.

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

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

Пахомов Михаил Андреевич – младший научный сотрудник ФГБУН «Институт машиноведения Российской академии наук»

Александр Вадимович Поляков – к.т.н. старший научный сотрудник ФГБОУ «Башкирский государственный университет»

Валиев Руслан Зуфарович – д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой нанотехнологий ФГБОУ «Уфимский государственный авиационный технический университет»

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 the Russian Academy of Sciences

Mikhail A. Pakhomov – Junior Researcher, Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences

Alexander V. Polyakov – Ph. D. Senior Researcher, Bashkir State University

Ruslan Z. Valiev – Dr. Sc., Professor, Head of the Nanotechnology Department, Ufa State Aviation Technical University

Vladimir V. Stolyarov – Dr. Sc., Chief Researcher, Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences

Поступила в редакцию/received: 09.09.2022; после рецензирования/revised: 11.10.2022; принята/accepted 15.10.2022.