

УДК 620.171.2:620.186.8

Оригинальная статья

Электростимулированная пластичность титана при растяжении

О.Е. Корольков, А.А. Мисоченко, В.В. Столяров

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

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

korolkov_oleg@vk.com

DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.658

Аннотация: В работе подтверждена возможность электростимулирования пластичности, обнаруженная ранее в ультрамелкозернистом титане. Экспериментально определены режимы импульсного тока при растяжении, позволяющие значительно повысить относительное удлинение до разрушения в технически чистом крупнозернистом титане Grade 4. Показано, что введение одиночных импульсов тока амплитудной плотностью 300-400 А/мм² с переменной длительностью от 100 до 1000 мкс и скважностью от 1000 до 10000 в процессе растяжения способствует снижению предела прочности с 845 до 750 МПа и одновременному повышению относительного удлинения с 10 до 21%. Структурные исследования методом оптической микроскопии показали, что растяжение с током не влияет на средний размер зерен, однако приводит к измельчению крупных частиц и частичному растворению мелких включений. Результаты структурных исследований, измерения температуры и особенности деформационного поведения при отключении тока подтверждают преимущественно атермическую природу повышения пластичности.

Ключевые слова: *электропластический эффект, растяжение, импульсный ток, титан, деформационное поведение, пластичность, структура, релаксация.*

1. Введение

Возможность управления механическими свойствами металлов и сплавов является одной из первоочередных задач для исследователей в области материаловедения и обработки металлов давлением (ОМД). Титан и его сплавы являются одним из основных конструкционных материалов, применяемых в настоящее время во многих отраслях промышленности и в медицине. Широкое их использование связано с присущими титану комплексу свойств – высокая удельная прочность, коррозионная стойкость, биосовместимость [1]. Особенностью кристаллической ГПУ решетки титана является ограниченное количество систем скольжения при комнатной температуре в отличие от ГЦК металлов, что приводит к пониженной пластичности/деформируемости и необходимости применения горячей деформации. Однако горячая деформация приводит к росту зерен, снижая прочностные свойства и эксплуатационные характеристики. Кроме того, высокотемпературный нагрев вызывает рост окисной пленки и необходимость ее удаления, что усложняет и удорожает технологию изготовления готового изделия [1]. Одним из перспективных направлений повышения пластичности титана может быть совместное использование пластической деформации и импульсного тока [2]. Известно, что импульсный ток в процессе пластической деформации повышает деформируемость труднообратываемых и хрупких сплавов [3]

© О.Е. Корольков, А.А. Мисоченко, В.В. Столяров, 2024

без воздействия нагрева и промежуточных отжигов [4], а также способствует улучшению качества поверхности (снижению шероховатости, отсутствию окалины и трещин) [5]. Предполагается, что это обусловлено атермическим вкладом электропластического эффекта (ЭПЭ) [2]. Тем не менее, в действительности часто возникают ситуации, когда при растяжении с током ожидаемого повышения пластичности не наблюдается из-за локализации деформации и образования шейки [6]. Более того, наблюдаются «аномалии» деформационного поведения в виде эффекта упрочнения в титановых сплавах при использовании тока высокой скважности [6, 7]. Наблюдаемые особенности вызывают интерес и перспективы дальнейшего исследования титана. Актуальной остается необходимость поиска оптимальных режимов импульсного тока, которые обеспечат не только должное качество поверхности чистого титана, но и приведут к повышению его деформируемости при сохранении/повышении прочности. Одним из вариантов решения этой задачи может быть растяжение с остановками [8] и/или попеременным отключением тока в процессе деформирования [9], что может способствовать релаксации внутренних напряжений и повышению пластичности, обнаруженному авторами ранее на ультрамелкозернистом (УМЗ) титане [9]. Предполагается, что попеременное изменение параметров тока при растяжении, прежде всего скважности, может иметь похожий эффект.

Целью работы является исследование деформационного поведения титана при растяжении с током различной плотности с переменной длительностью импульса (скважностью).

2. Материалы и методы исследований

Материалом исследования был выбран технически чистый титан Grade 4 в виде прутка диаметром 6 мм. Для снятия внутренних напряжений прутки подвергались отжигу при 350°C в течение часа. Химический состав сплава 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

Форма и размеры образцов для растяжения показана на рис. 1. Для растяжения была использована горизонтальная разрывная машина ИР - 5081/20. Скорость растяжения составляла 0,8 мм/мин. Испытания проводились согласно блок-схеме (см. рис. 2) в следующей последовательности: без тока (образец № 1), затем при плотности $j = 200, 300$ и 400 А/мм^2 (образцы № 2-4). Отдельные импульсы длительностью 100; 500; 1000 мкс при одинаковой частоте 1 Гц последовательно вводились в процессе растяжения каждого образца. Генератор

импульсного тока включался одновременно с запуском растяжения. Скважность составляла $q = T / \tau = 1 / \nu \tau = 10000; 2000; 1000$, где ν , T , τ – частота, период и длительность импульса, соответственно (см. рис. 2). Плотности тока выбирались, исходя из условия $j > j_{crit}$ (критическая плотность тока, ниже которой не наблюдается проявление ЭПЭ).

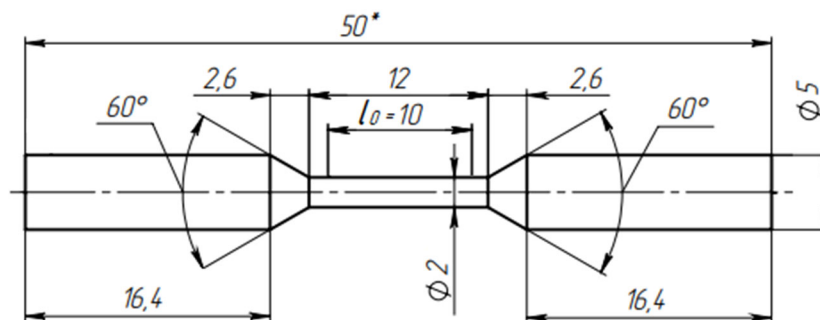


Рис. 1. Форма и размеры образцов для растяжения.

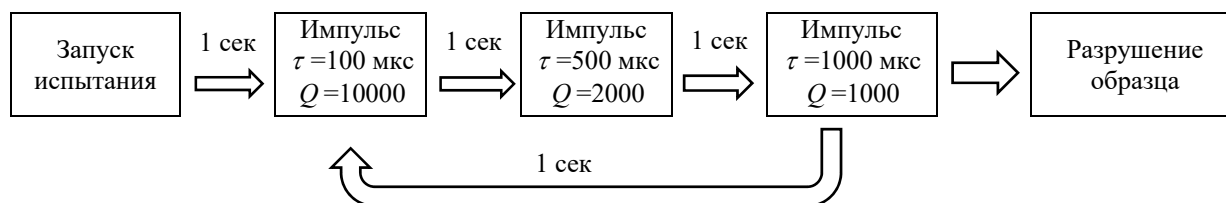


Рис. 2. Блок-схема последовательности изменения режима тока при растяжении с постоянной плотностью тока.

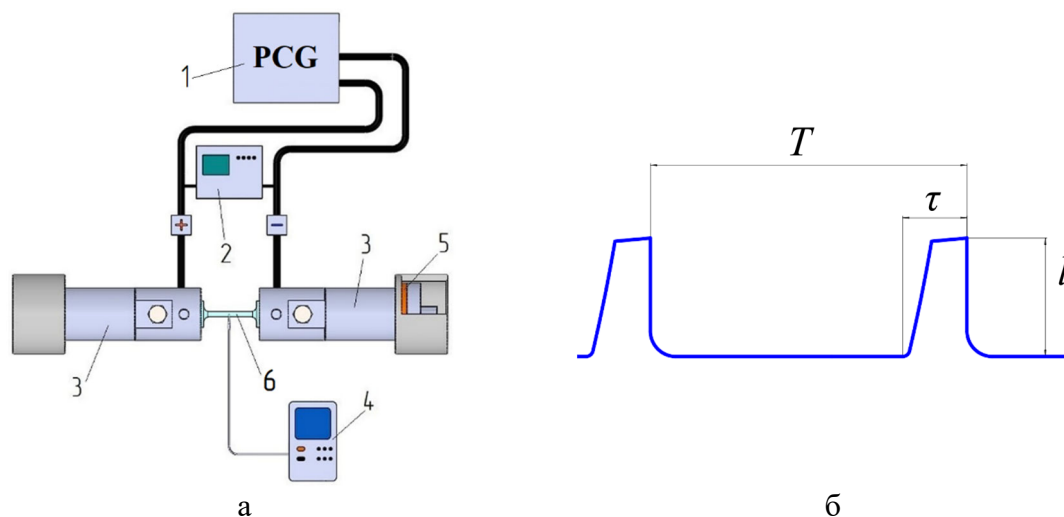


Рис. 3. Схема испытательной установки: 1 – генератор импульсного тока, 2 – осциллограф, 3 – захваты, 4 – термопара, 5 – изоляция, 6 – образец.

Захваты образцов изолировались от машины проставками из стеклотекстолита. Температуру образца в процессе растяжения контролировали прибором UNI-T Digital Thermometers UT320 Series и хромель-алюмелевой термопарой в центре образца с точностью $\pm 2^\circ\text{C}$. Амплитудную плотность тока контролировали с помощью цифрового

осциллографа INSTRUSTAR ISDS205. Схема испытательного стенда установки показана на рис. 3.

Микроструктура образцов исследовалась в исходном и деформированном (вблизи области разрушения) состояниях в продольном и поперечном сечении методом оптической микроскопии на микроскопе Dr. Focal при увеличении $\times 500$. Образцы предварительно подготавливали механической шлифовкой, полировкой и химическим травлением в смеси плавиковой и азотной кислот в воде в соотношении 1:3:6.

3. Результаты исследования

На рис. 4 показаны результаты *механических испытаний* титана Grade 4 при растяжении без тока и с током разных режимов. Растяжение без тока (см. рис. 4, кривая 1) характеризуется максимальным пределом прочности ($\sigma_v = 845$ МПа), наличием площадки текучести, заметным деформационным упрочнением, относительно высокой локализацией деформации в шейке и минимальным относительным удлинением до разрушения $\delta = 10\%$. Введение импульсного тока плотностью $j = 200$ А/мм² (см. рис. 4, кривая 2) приводит к снижению напряжения течения на 30 МПа и сопровождается отдельными скачками напряжения вниз амплитудой σ_a до 7 МПа при длительности импульса $\tau = 1$ мс. При меньшей длительности импульса скачки не наблюдались. Дальнейшее повышение плотности тока до $j = 300$ А/мм² (см. рис. 4, кривая 3) сопровождается повышением σ_a до 15 МПа, при этом скачки напряжения возникают только при $\tau = 500$ и 1000 мкс. Кривая также характеризуется снижением напряжения течения, но этот эффект становится больше (≈ 40 МПа) по сравнению с меньшей плотностью тока. Особенностью этого режима является длительная стадия установившихся напряжений, снижение коэффициента деформационного упрочнения и увеличение относительного удлинения до разрушения до 21 %. Выключение тока на установившейся стадии сопровождается неожиданным скачкообразным увеличением напряжения течения, формированием шейки и последующим разрушением.

Увеличение плотности тока до $j = 400$ А/мм² (см. рис. 4, кривая 4) привело к дополнительному снижению напряжения течения на 110 МПа по сравнению с растяжением без тока и выходом на плато. Минимальная длительность импульса 100 мкс, как и в ранее упомянутых режимах, не привела к скачкам напряжения. На кривой 4 ток не отключался, что привело к росту амплитуды скачков на стадии образования шейки, предшествующему разрушению образца. Отметим, что использование плотности тока $j = 300$ и 400 А/мм² (см. рис. 4, кривые 3 и 4) привело к

сдвигу формирования шейки в область более высоких деформаций, что сопровождается двукратным ростом относительного удлинения до разрушения.

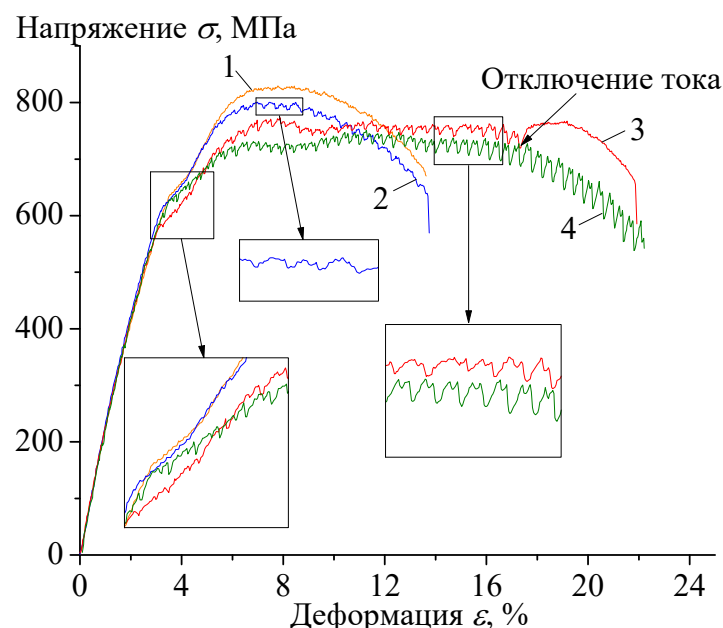


Рис. 4. Кривые напряжение-деформация К3 Grade 4: 1 – без тока, $T = 25^{\circ}\text{C}$; 2 – $j = 200 \text{ A/mm}^2$, $T = 32^{\circ}\text{C}$; 3 – $j = 300 \text{ A/mm}^2$, $T = 50^{\circ}\text{C}$; 4 – $j = 400 \text{ A/mm}^2$, $T = 72^{\circ}\text{C}$.

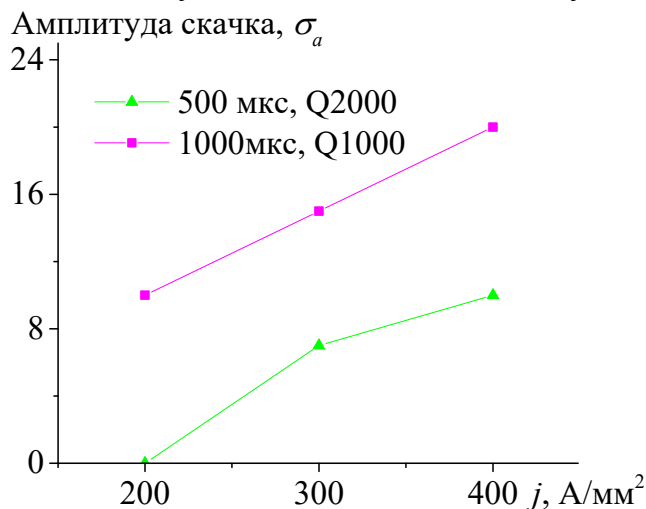


Рис. 5. Амплитуда скачков напряжения в Grade 4 в зависимости от плотности тока и длительности (скважности) импульса.

Амплитуда скачков σ_a в зависимости от плотности тока и длительности импульса (скважности) показана на рис. 5. Видно ее закономерное повышение при повышении плотности тока. При этом увеличение скважности с 1000 до 2000 повышает j_{crit} до 200 A/mm^2 , соответственно.

В Таблице 2 показаны режимы тока и механические свойства Grade 4. Температура образца при повышении плотности тока

увеличивается от 32°C при 200 А/мм² до 72°C при 400 А/мм². Относительное удлинение до разрушения слабо изменяется при $j=200$ А/мм², но двукратно повышается при увеличении плотности тока до 300 и 400 А/мм². Пределы прочности и текучести снижаются постепенно с повышением j .

Таблица 2. Режимы испытаний, амплитуда скачка напряжений и механические свойства Grade 4.

№	j , А/мм ²	t , °C	σ_a , МПа			σ_v , МПа	$\sigma_{0.2}$, МПа	δ , %
			$\tau=100\text{мкс}$ ($q=10000$)	$\tau=500\text{мкс}$ ($q=2000$)	$\tau=1000\text{мкс}$ ($q=1000$)			
1	0	23	0	0	0	845	612	10
2	200	32		7	10	800	611	11
3	300	50			15	770	584	19
4	400	72			20	751	610	21

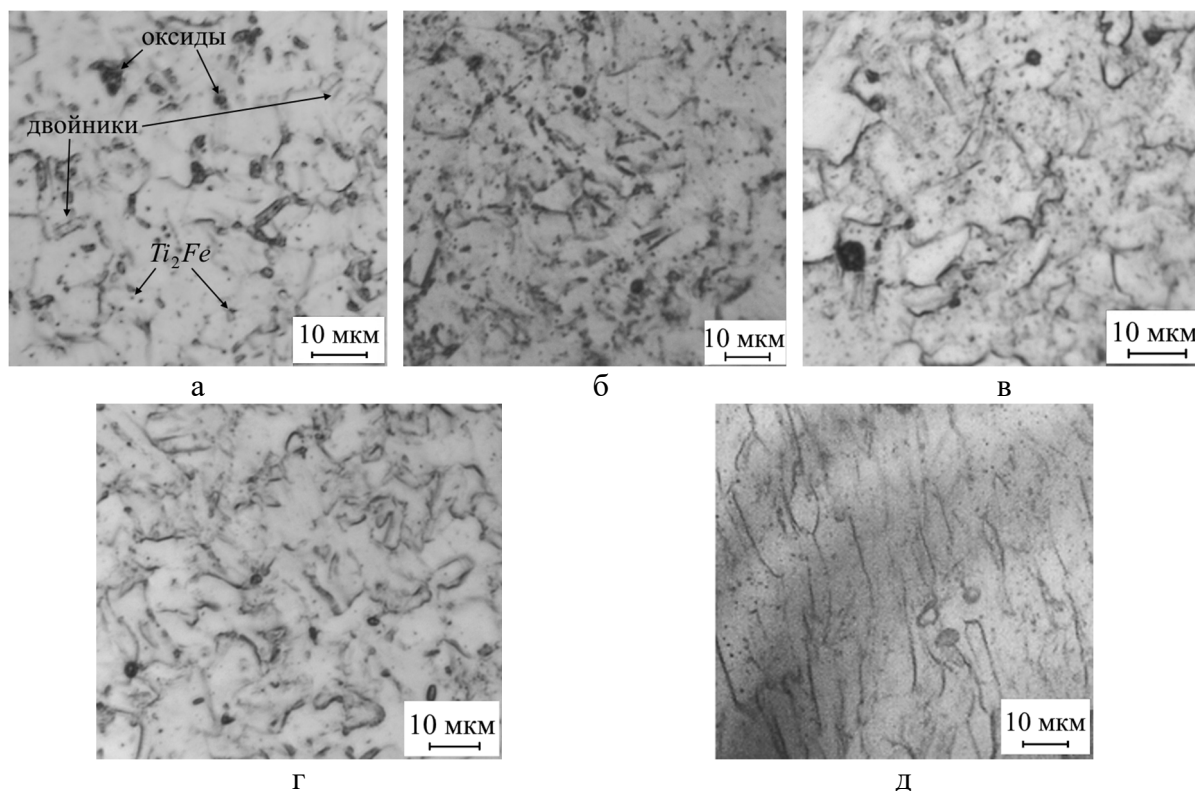


Рис. 6. Микроструктура сплава Grade 4 в исходном состоянии (а) и после растяжения: б – без тока (поперечное сечение), в – с током $j = 200$ А/мм² (поперечное сечение), г – с током $j = 400$ А/мм² (поперечное сечение), д – с током $j = 400$ А/мм² (продольное сечение).

На рис. 6 а показана микроструктура титана Grade 4 в исходном состоянии, которая характеризуется равноосными рекристаллизованными зернами со средним размером 9 мкм, наличием внутризеренных двойников и мелкодисперсных включений внутри и на границах зерен в количестве

не более 3%. Заметны также отдельные крупные включения размерами порядка 0,5 – 1 мкм.

Растяжение без использования тока приводит к изменению формы и уменьшению размера зерен в поперечном сечении до 5-6 мкм, повидимому это связано с их слабым удлинением в направлении растяжения (см. рис. 6 б). Объемная доля частиц визуально не изменилась, однако заметно измельчение интерметаллидов под действием деформации и их преимущественное расположение по границам зерен. Микроструктура после растяжения с током ($j = 200$ А/мм²) характеризуется неоднородным распределением зерен по размерам в диапазоне 8-15 мкм (см. рис. 6 в), что близко к размерам исходного недеформированного состояния и заметно крупнее, чем после растяжения без тока. Характерным является общая тенденция к измельчению включений и их частичному растворению, особенно внутри наиболее крупных зерен. Повышение плотности тока до 400 А/мм² усиливает процесс растворения мелких включений внутри зерен, но не влияет на форму и размер зерен (см. рис. 6 г). При этом в продольном сечении вытянутость зерен сохраняется (см. рис. 6 д). Одиночные крупные включения сохраняются в структуре в независимости от наличия тока, мелкие частицы почти полностью растворены.

4. Обсуждение результатов

Как и в предыдущих работах [6, 9], ЭПЭ при растяжении проявляется в снижении напряжений течения и/или появлении скачков напряжения. При этом характерным является зависимость критической плотности тока не только от материала, но и от других характеристик тока (длительности импульса и скважности) (см. рис. 5). Различия в величине критической плотности могут достигать значительных величин в литературе. Так, например, в работе [10] критическая плотность тока была на порядок выше, поскольку в настоящей работе, использовались большие длительности импульса. К критическим параметрам проявления ЭПЭ можно отнести и длительность импульса, поскольку скачки напряжения в данной работе появляются при $\tau > 100$ мкс (см. Таблицу 2), а при плотности тока 200 А/мм² скачки напряжения появляются только для длительности импульса 1000 мкс. Особенностью режима при $j = 300$ А/мм² является выключение тока при достижении деформации 17%. При этом наблюдаемый резкий рост напряжений в момент отключения подтверждает ранее установленный механизм действия тока *in situ* [11] и свидетельствует об обратимости ЭПЭ. Это подтверждают и структурные исследования, которые указывают на идентичность структуры после растяжения с плотностью тока 200 и 400 А/мм² (см. рис. 6 в, г). Увеличение амплитуды скачков на участке шейкообразования объясняется

увеличением плотности тока, связанного с уменьшением площади поперечного сечения образца.

Несмотря на устоявшееся мнение о стимулирующем влиянии электрического тока на пластичность материалов при растяжении [12-14], в реальности часто наблюдается противоположное явление [6] – заметное уменьшение относительного удлинения при растяжении, иногда обусловленное образованием шейки. В данной работе импульсный ток в виде одиночных импульсов плотностью 300 и 400 А/мм² привел к незначительному снижению напряжений течения, сопровождающемуся двукратным повышением относительного удлинения. Рассмотрим некоторые причины, которые могли бы привести к такому результату: нагрев образца до температур первичной и собирательной рекристаллизации (в нашем случае не наблюдается), выделение/растворение вторичных фаз (частицы интерметаллидов, оксидов), изменение дислокационной структуры/плотности дислокаций, компенсирующее действие деформации и тока.

Температура образца при самом интенсивном воздействии тока составляла 72°C и не могла вызвать значимые структурные изменения, что предполагает преимущественно атермическую природу наблюдаемых явлений. Структурные исследования в оптическом микроскопе подтверждают этот вывод. Сохранившиеся даже при самом интенсивном режиме тока вытянутые в продольном сечении зерна являются свидетельством отсутствия рекристаллизации и значительного температурного воздействия. Однако, уровни напряжения, величина амплитуды «скачка» и относительного удлинения отличаются заметно (см. рис. 4, кривые 3 и 4). Для объяснения причин различного поведения необходим более тонкий структурный анализ с привлечением методов просвечивающей электронной микрокопии, однако уже сейчас можно сделать вывод о нетепловой природе наблюдаемых явлений.

Введение импульсов тока в процессе растяжения не приводит к росту зерна, однако ведет к растворению мелких частиц, по-видимому интерметаллидов железа Ti_2Fe [15]. При это более крупные частицы, по-видимому оксиды, сохраняются. Несмотря на то, что средняя температура образца достаточно низкая для растворения интерметаллидов (32-72°C при $j = 200-400$ А/мм²), авторы не исключают возможность более высоких локальных температур на структурных неоднородностях в момент действия импульса тока. Короткого импульса большой плотности может оказаться достаточно для растворения предварительно измельченных деформацией интерметаллидов. Этот факт может способствовать релаксации напряжений и воздействовать на деформационное поведение, облегчая деформацию, поскольку любая частица является концентратором

напряжений и местом закрепления дислокаций в процессе деформации.

Однако наиболее интересной на наш взгляд причиной наблюдаемого аномального прироста относительного удлинения может быть влияние электрического поля на дислокационную структуру материала. Подобное влияние отмечено, например, в работе [16], где авторы изучали влияние приложенного электрического потенциала в процессе ползучести чистого алюминия. Отмечается образование более совершенной дислокационной структуры при наличии электрического поля (сетчатая дислокационная структура по сравнению с хаотической без тока). В нашем случае в процессе растяжения происходит попеременное включение и выключение тока, что ведет к постоянному процессу перестройки дислокационной структуры из более хаотической к более совершенной и наоборот. При этом происходит отсрочка процессов разрушения и прирост пластичности. Такое, своего рода циклическое воздействие тока наблюдали ранее в работе [7], где при растяжении чистого титана в режиме одиночных импульсов наблюдалась другая аномалия – упрочнение под действием тока.

Еще одной предполагаемой причиной повышения относительного удлинения может быть компенсирующее действие тока и деформационного упрочнения при данных режимах. Деформация сопровождается накоплением дислокаций, а импульсы тока приводят к уменьшению их плотности. При этом разная длительность импульса с постепенным ее повышением способствует «смягчению» такого режима, сдвигу процесса шейкообразования в область больших деформаций и, как следствие, приросту пластичности.

Авторы не исключают возможность проявления механизма зернограницного проскальзывания, несмотря на низкую температуру и большой размер зерен, как дополнительного механизма деформации. Действительно, тепловой эффект на границах зерен может способствовать локальному их разогреву до температур, характерных для сверхпластичности микрозернистого титана [11].

5. Заключение

В работе экспериментально определены режимы импульсного тока при растяжении, повышающие относительное удлинение до разрушения в сплаве Grade 4. Показано, что введение импульсов тока плотностью 300-400 А/мм² с попеременно увеличивающейся длительностью от 100 до 1000 мкс и скважностью от 1000 до 10000 в процессе растяжения способствует двукратному повышению относительного удлинения при снижении прочности не более чем на 12%. ЭПЭ в форме снижения напряжений течения и скачков напряжения вниз в титане Grade 4

проявляется при длительности импульса $\tau = 500$ и 1000 мкс и критической плотности тока 200 А/мм^2 . Проявляемый ЭПЭ сопровождается растворением частиц вторых фаз и имеет преимущественно атермическую природу, поскольку максимальная температура образца в условиях эксперимента не сильно отличалась от комнатной, а зёрненная структура практически не изменяется. Двукратное увеличение относительного удлинения до разрушения указывает на возможность применения импульсного тока для повышения деформируемости титана в процессах обработки металлов давлением. При этом явление электростимулированного прироста пластичности обнаружено как в крупнозернистом титане, так и в УМЗ [9]. Однако выбор оптимальных режимов тока требует дальнейшего изучения с привлечением более тонких структурных методов исследования.

Библиографический список:

1. **Илларионов, А.Г.** Технологические и эксплуатационные свойства титановых сплавов / А.Г. Илларионов, А.А. Попов. – Екатеринбург: Изд-во Урал. фед. ун-та, 2014. – 137 с.
2. **Stolyarov, V.** A pulsed current application to the deformation processing of materials / V. Stolyarov, A. Misochenko // *Materials*. – 2023. – V. 16. – I. 18. – Art. № 6270. – 20 p. DOI: 10.3390/ma16186270.
3. **Wang, R.** Design high-performance AZ31 ultrathin strip through multi-pass electroplastic rolling without off-line annealing / R. Wang, Z. Xu, Y. Jiang et al. // *Materials Science and Engineering: A*. – 2022. – V. 862. – Art. № 144510. – 8 p. DOI: 10.1016/j.msea.2022.144510.
4. **Ghiotti, A.** Electroplastic effect on AA1050 aluminium alloy formability / A. Ghiotti, S. Bruschi, E. Simonetto et al. // *CIRP Annals*. – 2018. – V. 67. – I. 1. – P. 289-292. DOI: 10.1016/j.cirp.2018.04.054.
5. **Корольков, О.Е.** Исследование и применение электрического тока для медицинских имплантатов / О.Е. Корольков, В. В. Столяров // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. – 2021. – № 6. – С. 96-104. DOI: 10.31857/S0235711921060122.
6. **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.
7. **Stolyarov, V.V.** Atypical hardening caused by current and plastic deformation / V.V. Stolyarov // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. – 2024. – V. 53. – I. 3. – P. 212-217. DOI: 10.1134/S1052618824700080.
8. **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.
9. **Корольков, О.Е.** Релаксация напряжений при растяжении, сопровождаемом током в ультрамелкозернистом титане / О.Е. Корольков, В.В. Столяров // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. – 2023. – Вып. 15. – С. 135-147. DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.135.
10. **Herbst, S.** Electroplasticity Mechanisms in hcp Materials / S. Herbst, E. Karsten, G. Gerstein et al. // *Advanced Engineering Materials*. – 2023. – V. 25. – Art. № 2201912. – 12 p. DOI: 10.1002/adem.202201912.
11. **Tang, Y.** Microstructural modification and mechanical improvement of ultrafine-grained Ti alloy through electron wind force: An innovative approach / Y. Tang, Y. Ju, S. Gu et al. // *Materials Science and Engineering: A*. – 2024. – V. 891. – Art. № 145845. – 10 p. DOI: 10.1016/j.msea.2023.145845.
12. **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.
13. **Jiang, B.** Numerical simulation and experiment of electrically-assisted incremental forming of thin TC4 titanium alloy sheet / B. Jiang, W. Yang, Z. Zhang et al. // *Materials*. – 2020. – V. 13. – I. 6. – Art. № 1335. – 8 p. DOI: 10.3390/ma13061335.
14. **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.

15. **Резяпова, Л.Р.** Исследование выделений вторых фаз в наноструктурном технически чистом титане / Л.Р. Резяпова, Р.Р. Валиев, В.Д. Ситдилов, Р.З. Валиев // *Письма о материалах*. – 2021. – Т. 11. – № 3. – С. 345-350. DOI: 10.22226/2410-3535-2021-3-345-350.

16. **Столбоушкина, О.А.** Особенности формирования дислокационной субструктуры при ползучести алюминия в условиях приложенного потенциала / О.А. Столбоушкина, С.В. Коновалов, Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов // *Перспективные материалы*. – 2011. – №1. – С. 47-52.

References:

1. Illarionov A.G., Popov A.A. *Tekhnologicheskie i ekspluatatsionnye svoystva titanovykh splavov* [Technological and operational properties of titanium alloys], Ekaterinburg, Ural Federal University Publ., 2014, 137 p. (in Russian).
2. Stolyarov V., Misochenko A. A pulsed current application to the deformation processing of materials, *Materials*, 2023, vol. 16, issue 18, art. no. 6270, 20 p. DOI: 10.3390/ma16186270.
3. Wang R., Xu Z., Jiang Y. et al. Design high-performance AZ31 ultrathin strip through multi-pass electroplastic rolling without off-line annealing, *Materials Science and Engineering: A*, 2022, vol. 862, art. no.144510, 8 p. DOI: 10.1016/j.msea.2022.144510.
4. Ghiotti A., Bruschi S., Simonetto E. et al. Electroplastic effect on AA1050 aluminium alloy formability, *CIRP Annals*, 2018, vol. 67, issue 1, pp. 289-292. DOI: 10.1016/j.cirp.2018.04.054.
5. Korol'kov O.E., Stolyarov V.V. Study and application of an electric current for medical implants, *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2021, vol. 50, issue 6. pp. 554-561. DOI: 10.3103/S1052618821060121.
6. 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).
7. Stolyarov V.V. Atypical hardening caused by current and plastic deformation, *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2024, vol. 53, issue 3, pp. 212-217. DOI: 10.1134/S1052618824700080.
8. 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.
9. Korolkov O.E., Stolyarov V.V. *Relaksatsiya napryazhenij pri rastyazhenii, soprovozhdaemom tokom v ul'tramelkozernistom titane* [Stress relaxation under tension by accompanied current in ultrafine-grain titanium], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov* [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials], 2023, issue 15, pp. 135-147. DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.135. (In Russian).
10. Herbst S., Karsten E., Gerstein G. et al. Electroplasticity mechanisms in hcp materials, *Advanced Engineering Materials*, 2023, vol. 25, art. no. 2201912, 12 p. DOI: 10.1002/adem.202201912.
11. Tang Y., Ju Y., Gu S. et al. Microstructural modification and mechanical improvement of ultrafine-grained Ti alloy through electron wind force: An innovative approach, *Materials Science and Engineering: A*, 2024, vol. 891, art. no. 145845, 10 p. DOI: 10.1016/j.msea.2023.145845.
12. 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.
13. Jiang B., Yang W., Zhang Z. et al. Numerical simulation and experiment of electrically-assisted incremental forming of thin TC4 titanium alloy sheet, *Materials*, 2020, vol. 13, issue 6, art. no. 1335, 8 p. DOI: 10.3390/ma13061335.
14. 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, issue 12, pp. 1287-1296. DOI: 10.1007/s40195-018-0735-3.
15. Rezyapova L.R., Valiev R.R., Sittikov V.D., Valiev R.Z. Issledovanie vydelenij vtorykh faz v nanostrukturnom tekhnicheski chistom titane [Study of second phase precipitates in nanostructured commercially pure titanium], *Pis'ma o materialakh* [Letters on Materials], 2021, vol. 11, no. 3, pp. 345-350. DOI: 10.22226/2410-3535-2021-3-345-350. (In Russian).
16. Stolboushchina O.A., Kononov S.V., Ivanov Yu.F., Gromov V.E. Osobennosti formirovaniya dislokatsionnoj substrukturny pri polzuchesti alyuminiya v usloviyakh prilozhennogo potentsiala [Features of the

formation of a dislocation substructure during creep of aluminum under conditions of an applied potential], *Perspektivnye Materialy [Prospective materials]*, 2011, no 1. pp. 47-52. (In Russian).

Original paper

Electrostimulated plasticity of titanium under tension

O.E. Korolkov, A.A. Misochenko, V.V. Stolyarov

Mechanical Engineering Research Institute of RAS, Moscow, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.658

Abstract: The paper confirms the possibility of electrical stimulation of plasticity, previously discovered in ultrafine-grained titanium. The regimes of pulsed current during tension have been experimentally determined, which make it possible to significantly increase the elongation to failure in commercially pure coarse-grained titanium Grade 4. It is shown that the introduction of single current pulses with an amplitude density of 300-400 A/mm² with a variable duration from 100 to 1000 μ s and a duty cycle from 1000 to 10000 during tension helps to reduce the ultimate tensile strength from 845 to 750 MPa and simultaneously increase the elongation from 10 to 21%. Structural studies using optical microscopy have shown that tension accompanied current does not affect the average grain size, but leads to reducing large particles and a partial dissolution of small inclusions. The results of structural studies, temperature measurements and features of deformation behavior when the current is turned off confirm the predominantly athermal nature of the increase in plasticity.

Keywords: *electroplastic effect, tension, pulsed current, titanium, deformation behavior, plasticity, microstructure, stress relaxation*

Корольков Олег Евгеньевич – научный сотрудник ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН»

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

Столяров Владимир Владимирович – д.т.н., профессор, главный научный сотрудник ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН»

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

Anna A. Misochenko – PhD, Senior Researcher, Mechanical Engineering Research Institute of RAS

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

Поступила в редакцию/received: 16.07.2024; после рецензирования/revised: 13.08.2024; принята/accepted: 15.08.2024.