

УДК 669.539.620

ДЕФОРМАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ И АМОРФНЫХ СПЛАВОВ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ С ТОКОМ

© Владимир Владимирович Столяров

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук

vlstol@mail.ru

Аннотация

Представлены результаты влияния структурно-фазовых особенностей крупнозернистых, ультрамелкозернистых, нанокристаллических и аморфных сплавов на проявление электропластического эффекта при растяжении. Показано, что уменьшение размера зерен, появление вторых фаз и аморфизация в сплавах приводит к уменьшению или полному исчезновению электропластического эффекта. В сплавах с обратимым термоупругим мартенситным превращением эффект памяти формы может подавлять проявление электропластического эффекта.

Ключевые слова: растяжение, импульсный ток, наноструктура, деформация

DEFORMATION BEHAVIOR OF NANOCRYSTALLINE AND AMORPHOUS ALLOYS DURING TENSION WITH CURRENT

V.V. Stolyarov

Mechanical Engineering Research Institute, Moscow, Russia

Abstract

Results on influence of structure-phase features of course-grain, ultrafine-grain, nanocrystalline and amorphous alloys on electroplastic effect are presented. It has been shown that decreases grain size, second phases and amorphization lead to decreases or disappearing of electroplastic effect. In reverse thermoelastic martensite transformation alloys shape memory effect can suppress electroplastic effect.

Key words: tension, pulse current, nanostructure, deformation

Введение

Известно, что совместное действие пластической деформации и электрического тока большой плотности ($\sim 10^3 \text{ A/mm}^2$) приводит к снижению приложенных напряжений, называемому электропластическим эффектом (ЭПЭ) [1]. Он проявляется в скачкообразном сбросе напряжений на кривой растяжения при прохождении по образцу одиночного импульса тока без существенного теплового эффекта и тепловой дилатации образцов. Предполагается, что преимущественным механизмом ЭПЭ является электрон-дислокационное взаимодействие, в результате которого происходит релаксация напряжений в областях скопления линейных дефектов в кристалле [2]. Феноменология ЭПЭ достаточно полно исследована в моно и крупнозернистых (КЗ) однофазных металлах [1]. Показано, что ЭПЭ существует лишь во время

пластической деформации материала, а его величина по отношению к напряжению течения варьируется от нескольких процентов для поликристаллов до десятков процентов для монокристаллов. Однако ЭПЭ слабо изучен в современных материалах, например, ультрамелкозернистых (УМЗ) сплавах [3], а для аморфных сплавов эти сведения вообще отсутствуют. Особый интерес представляет исследование влияния на ЭПЭ таких структурных факторов как размер зерен, фазовый состав. В работе делается попытка восполнить этот пробел демонстрацией экспериментальных данных, полученных при деформации растяжением в условиях введения импульсного тока в материалах с разной микроструктурой (аморфных, нанокристаллических), а также в сплавах, испытывающих мартенситные превращения в области комнатных температур.

Материалы и методы исследования

Исследуемыми материалами были: технически чистый титан ВТ1-0, сплавы с памятью формы на основе TiNi в аустенитном ($Ti_{49,3}Ni_{50,7}$) и мартенситном ($Ti_{50}Ni_{50}$) состояниях, с КЗ (до 50 мкм), УМЗ (менее 1 мкм) и нанокристаллической (НК) (менее 100 нм) структурами. КЗ состояния в сплавах были получены термической обработкой (отжиг или закалка), тогда как для получения УМЗ и наноструктуры были использованы деформационные методы РКУП [4], многосторонняя ковка [5] и прокатка с током [6], соответственно. Кроме того, исследовались быстрозакаленные сплавы (БЗС) ($Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$, $Fe_{78}Si_{13}B_9$) с аморфной структурой. Образцы сплавов подвергались растяжению без тока и с током в форме одиночных импульсов различной плотности j (100 – 1500 А/мм²) и длительности τ (100 - 1000 мкс) импульса.

Экспериментальные результаты

Обнаружено, что в кристаллических сплавах при введении импульса тока на диаграммах растяжения появляются скачки напряжения вниз, связанные с ЭПЭ, (рис.1а, б). Амплитуда скачков зависит от плотности и длительности импульса тока, а также от размера зерен в структуре сплавов.

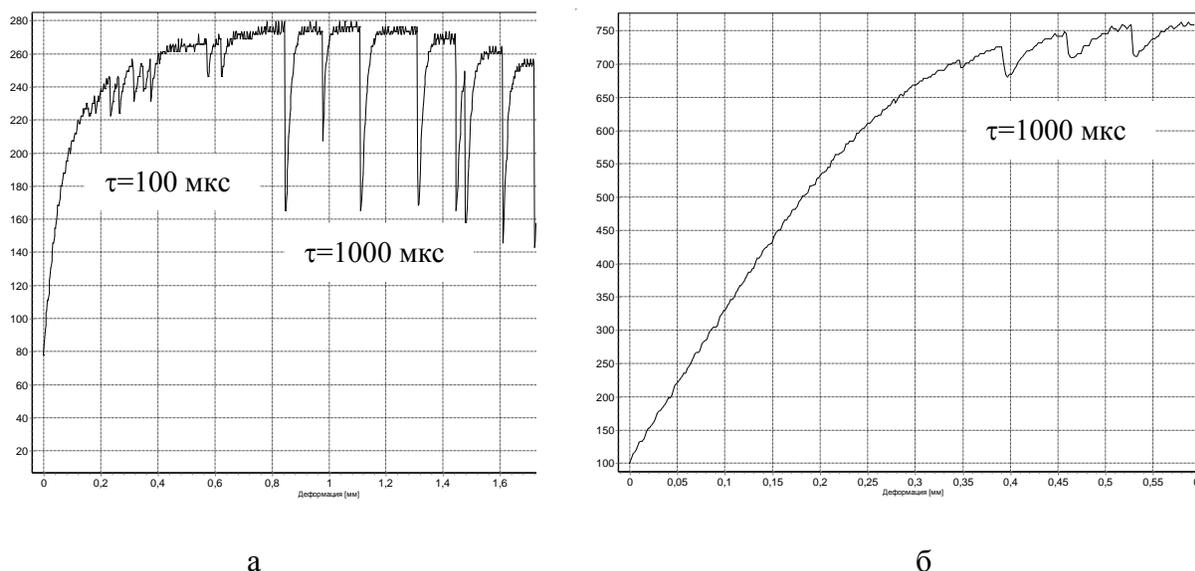


Рис.1 Кривые растяжения с током ($j = 1500$ А/мм²) в титане с КЗ (а) и УМЗ (б) структурами.

Например, в однофазном КЗ титане, отожжённом при 700 °С, при плотности тока $j = 1500$ А/мм² она увеличивается в 4-5 раз с увеличением длительности импульса от 100 до 1000 мкс

(рис.1а). В УМЗ титане, полученном теплым РКУП, при той же плотности тока и длительности импульса 100 мкс скачки напряжения не регистрируются и наблюдаются только при $\tau \geq 1000$ мкс (рис.1б). Видно также, что амплитуда скачка чувствительна к структурному состоянию, она уменьшается с уменьшением размера зерен от 100-150 МПа в КЗ состоянии (рис.1а) до 25-50 МПа в УМЗ состоянии (рис.1б). Аналогичная тенденция в уменьшении величины ЭПЭ с уменьшением размера зерен наблюдается и в сплаве ВТ6 с двухфазной ($\alpha + \beta$) структурой (рис.2а, б).

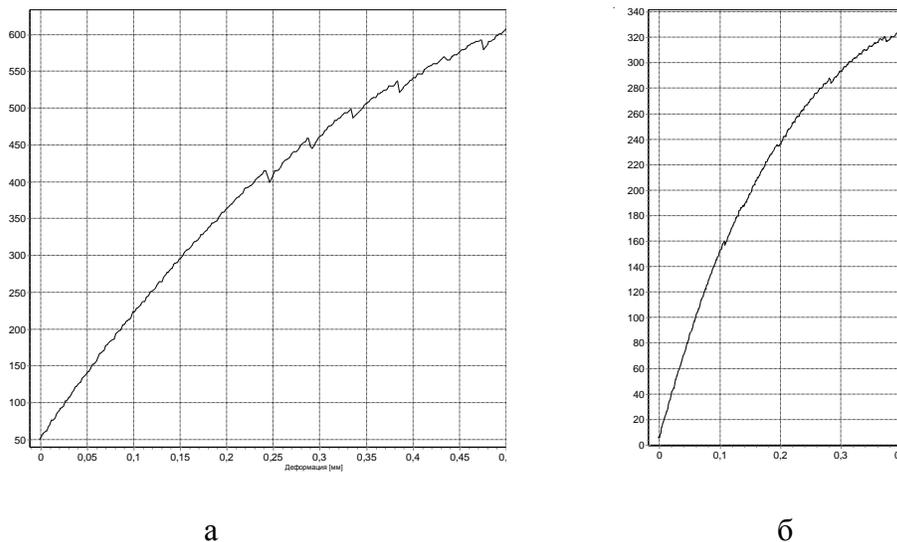


Рис.2 Кривые растяжения с током ($j = 1500 \text{ А/мм}^2$) в сплаве ВТ6 с КЗ (а) и УМЗ (б) структурами.

Особый интерес представляет ЭПЭ в сплавах с фазовым превращением, протекающим в области температур, близких к комнатным. Примером таких материалов является сплав с памятью формы TiNi, в котором в зависимости от химического состава в интервале температур $-150 \text{ }^\circ\text{C}$ $\square 100 \text{ }^\circ\text{C}$ происходит обратимое термоупругое превращение аустенита в мартенсит и обратно. Впервые было обнаружено, что в КЗ сплаве Ti49.3Ni50.7 импульсный ток приводит к появлению скачков не только вниз, но и вверх (рис.3а, б).

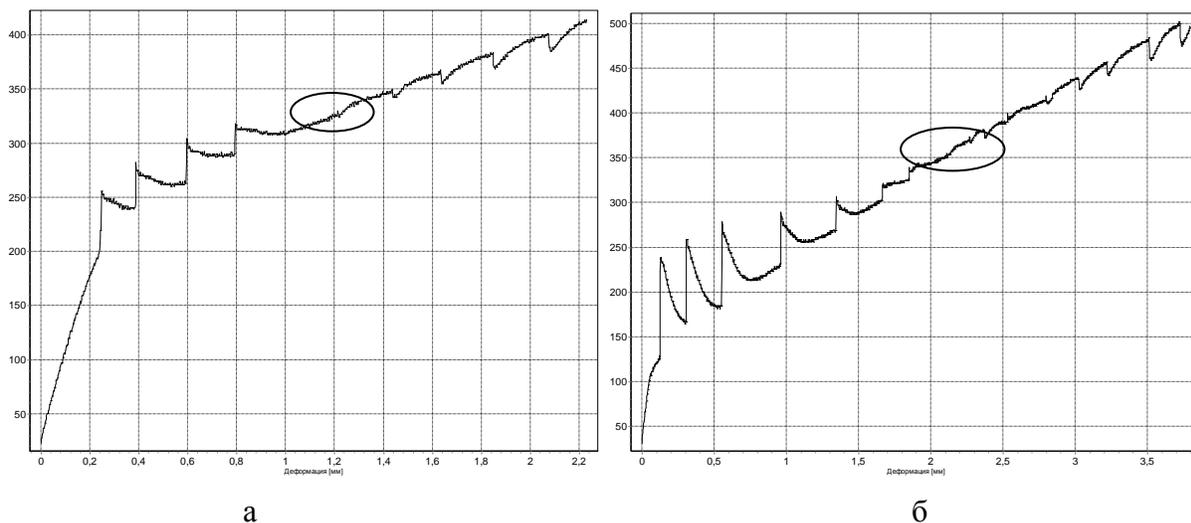


Рис.3 Кривые растяжения в КЗ сплаве $Ti_{49.3}Ni_{50.7}$ с плотностью тока 1500 A/mm^2 (а) и 3000 A/mm^2 (б)

При этом амплитуда скачков вверх с увеличением плотности тока повышается, а для скачков вниз остается неизменной. Другой особенностью для данного сплава является наличие на кривой растяжения области (обозначена на рисунках в виде эллипса), в которой отсутствуют оба вида скачков напряжения, несмотря на введение одиночного импульса в этом месте. В НК сплаве $Ti_{49.3}Ni_{50.7}$ вместо прыжков напряжения вниз, которые полностью исчезают, появляются прыжки вверх с уменьшающейся амплитудой с деформацией (рис.4).

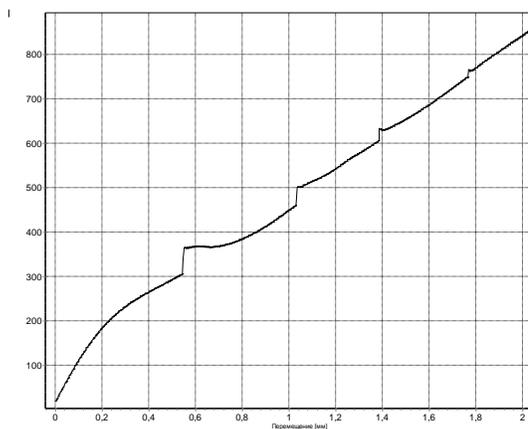


Рис.4 Кривая растяжения НК сплава $Ti_{49.3}Ni_{50.7}$ с плотностью тока 1500 A/mm^2

Рассмотрим ЭПЭ в БЗС с исходно аморфной структурой. В $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$ от введения одиночных импульсов с $j = 600 \text{ A/mm}^2$, $\tau \leq 800 \text{ мкс}$ ЭПЭ на кривой растяжения практически не наблюдается (рис.5а), однако в состоянии после кристаллизационного отжига появляются значительные по амплитуде прыжки вниз (рис.5б).

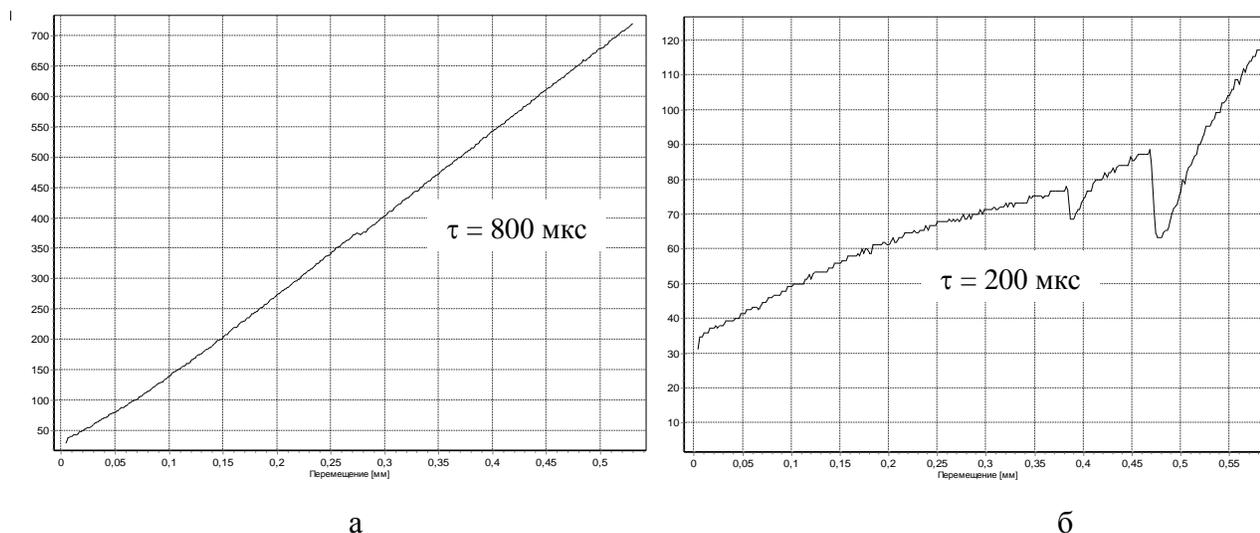


Рис.5 Кривые растяжения с током 600 A/mm^2 в БЗС $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$ до (а) и после (б) отжига

В БЗС Fe78Si13B9 наблюдается аналогичное поведение, при котором ЭПЭ при $j = 350 \text{ А/мм}^2$ отсутствует при коротких ($\tau \leq 100 \text{ мкс}$) импульсах тока (рис.6а), но появляется при увеличении длительности импульса от 150 до 1000 мкс. При этом амплитуда прыжков вниз увеличивается с 10 МПа до 50 МПа с увеличением длительности импульса.

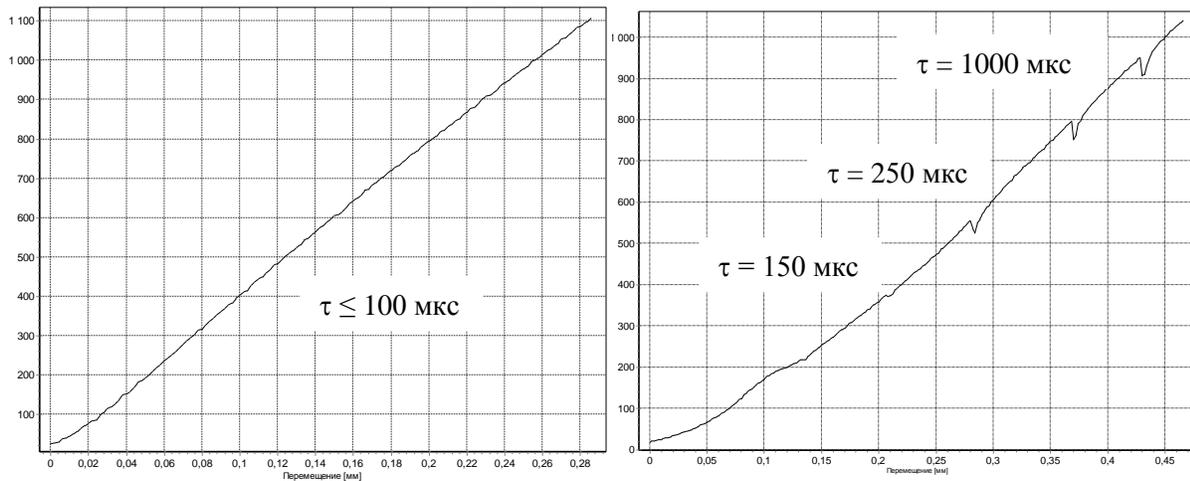


Рис.6 Кривые растяжения с током 350 А/мм^2 в БЗС Fe₇₈Si₁₃B₉: а - $\tau \leq 100 \text{ мкс}$; б - $\tau \geq 150 \text{ мкс}$

Обсуждение

Приведенные результаты ясно показывают чувствительность ЭПЭ к структуре и фазовому составу исследуемых материалов. Прежде всего, это относится к влиянию размера зерен на ЭПЭ. В кристаллических титановых сплавах (BT1-0 и BT6) уменьшение размера зерен от нескольких десятков микрон до нескольких долей микрона ведет к многократному уменьшению амплитуды скачка и следовательно величины ЭПЭ (рис.1 и 2). Увеличение числа фаз также уменьшает величину ЭПЭ. Так, наличие 20% объемной доли зернограничной β фазы в $(\alpha+\beta)$ сплаве BT6 способствует уменьшению ЭПЭ по сравнению с однофазным сплавом BT1-0, как в КЗ (рис.1а и 2а), так и в УМЗ (рис.1б и 2б) состояниях.

Поскольку один из механизмов ЭПЭ реализуется за счет взаимодействия свободных электронов с дислокациями, то наблюдаемая зависимость ЭПЭ от степени дисперсности структурных элементов и многофазности сплава хорошо объясняется мобильностью и способностью зарождения внутривитрических дислокаций, которые резко падают с уменьшением зерен до наноразмеров и наличием межфазных границ.

Исследование ЭПЭ в сплаве TiNi с фазовым превращением показало, что направление скачка напряжения при введении импульса тока может быть не только вниз, но и вверх (рис.3а). Более того, измельчение структуры в сплаве приводит к исчезновению скачков вниз и появлению скачков только вверх (рис.3б). Тщательный анализ природы скачков в сплаве TiNi позволил установить, что направление и амплитуда скачка определяется суммой двух разных по

знаку эффектов – ЭПЭ (скачок вниз) и эффект памяти формы ЭПФ (вверх). Последний обусловлен повышением напряжения течения фазы В2 в момент обратного мартенситного превращения В19'→В2, вызванного тепловым эффектом тока. Поскольку в наноструктурном состоянии ЭПЭ заметно меньше ЭПФ или даже близок нулю, то результатом является скачок напряжения вверх. Уменьшение амплитуды повышений напряжения в никелиде титана в НС состоянии от импульсов тока с увеличением степени деформации связано с изменением соотношения аустенитной и мартенситной фаз, а также со стабилизацией одной из этих фаз (рис.4).

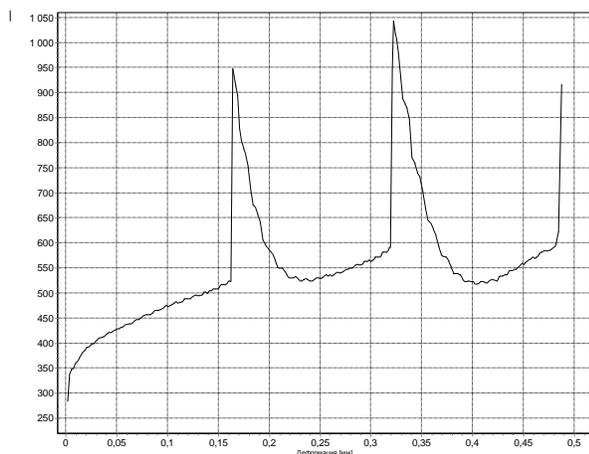


Рис.7 Кривая растяжения с многоимпульсным током в НС сплаве $Ti_{49,3}Ni_{50,7}$

В БЗС сплавах $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$, $Fe_{78}Si_{13}B_9$, как следует из рис.5 и 6, ЭПЭ отсутствует в аморфном состоянии и проявляется в кристаллическом состоянии, полученном либо отжигом в печи, либо пропусканием импульсов тока большой длительности. Этот факт хорошо согласуется с уменьшением и исчезновением ЭПЭ в нанокристаллических структурах. Действительно, из-за отсутствия в аморфных материалах свободных дислокаций в областях с ближним порядком ЭПЭ не наблюдается. Напротив, кристаллизация сплавов при отжиге или за счет теплового эффекта тока способствует появлению дислокаций, а значит и проявлению ЭПЭ.

Режимы и вид тока также влияют на ЭПЭ. Поскольку повышение плотности тока и длительности импульса увеличивают энергию импульса, то эти параметры повышают амплитуду прыжков напряжения. По этой же причине переход от одиночных импульсов к многоимпульсному току приводит к такому же эффекту. Например, ранее для сплава $Ti_{49,3}Ni_{50,7}$ было показано, что тепловой эффект тока в случае применения многоимпульсного тока (до нескольких сотен импульсов в пачке) может приводить к более значительным прыжкам напряжения рис.7 (до 500 МПа), чем при применении одиночных импульсов.

Заключение

Исследовано влияние исходного структурно-фазового состояния в различных сплавах и параметров импульсного тока на деформационное поведение при растяжении. Импульсный ток приводит к появлению на диаграмме растяжения скачков напряжения, связанных с проявлением электропластического эффекта или фазовым превращением. Показано, что амплитуда и направление скачков напряжения зависят от количества фаз, дисперсности микроструктуры, наличия мартенситных превращений в сплавах, а также режимов импульсного тока.

Список литературы

1. Троицкий О.А., Баранов Ю.В., Авраамов Ю.С., Шляпин А.Д. Физические основы и технологии обработки современных материалов (теория, технология, структура и свойства). в 2-х томах. Т. 1, Москва – Ижевск, Институт компьютерных технологий, 2004. 590 с.
2. Sprecher A.F., Mannan S.L., Conrad H., Acta Met. 1986. V.34, №7, 1145-1162.
3. Stolyarov V.V., Electroplastic effect in nanostructured titanium alloys // Rev. Adv. Mater. Sci., 31 2012. P.14-34.
4. Stolyarov V.V., Valiev R.Z., Production of metastable ultrafine-grained alloys by equal-channel angular pressing // Russian Metallurgy (Metally), 2, 2004. P.110-115.
5. Zharebtsov S., Salishchev G., Galeev R., Maekawa K. Mechanical properties of Ti–6Al–4V titanium alloy with submicrocrystalline structure produced by severe plastic deformation // Materials Transactions, 46, No. 9. 2005. P. 2020-2025.
6. Столяров В.В., Угурчиев У.Х., Трубицына И.Б., Прокошкин С.Д., Прокофьев Е.А. Интенсивная электропластическая деформация сплава TiNi // ФТВД, 4, 16 2006. С.48-51.