

Электропластический эффект в крупнозернистом и ультрамелкозернистом титане

В. В. Столяров, М. С. Смаковский

Электропластический эффект изучается в крупнозернистом и ультрамелкозернистом титане под совместным воздействием деформации растяжения и электрического тока различных типов и режимов. Показано, что уменьшение размера зерна влияет не только на увеличение прочностных характеристик, но также и на снижение электропластического эффекта, механизм которого тесно связан с плотностью подвижных дислокаций.

Ключевые слова: титан, размер зерна, растяжение, напряжение, деформация, электропластический эффект, электрический ток, одиночные импульсы, многоимпульсный ток, постоянный ток

УДК 620.1 | ВАК 2.6.17

DOI: 10.22184/2499-9407.2022.27.2.66.72

Введение

Открытый более пятидесяти лет назад электропластический эффект (ЭПЭ) проявляется в значительном уменьшении напряжений течения металлических материалов при деформации в присутствии тока большой плотности [1, 2]. В силу этого, первоначально внимание исследователей было сосредоточено на практическом применении ЭПЭ, которое оказалось достаточно широким и представлено в работах [3, 4]. Эти работы главным образом концентрируются на формовке металла (штамповке, прокатке, волочении, прессовании), сварке в твердом состоянии и резке хрупких и труднодеформируемых материалов для снижения шероховатости.

Более того, была продемонстрирована возможность измельчения микроструктуры в длинномерных материалах, позволяющая контролировать функциональные свойства материалов [5]. Ограничения, препятствующие широкому распространению ЭПЭ, связаны с высокой критической плотностью тока ($j_{кр}$), необходимого для достижения заметного воздействия на деформируемость: для многих промышленных материалов должно достигаться значение $j_{кр} > 10^2 \text{ A/mm}^2$ [2]. Вот почему рабочие поперечные сечения различных полуфабрикатов, например проволоки, прутка,

листового металла, не превышают 1–10 мм², что связано с необходимостью создания мощных генераторов тока.

Другой областью исследования является физическая природа ЭПЭ. Расчеты, приведенные в работе [6], показали, что единственной причиной ЭПЭ является тепловой эффект, определяемый электропроводными и теплопроводными свойствами образца. Однако даже в самых первых работах было ясно, что обычный тепловой эффект не может полностью объяснить ЭПЭ, поскольку снижение напряжений было значительно более заметным, чем могло бы быть в результате влияния температуры на напряжение пластического течения. В обзоре [7] было показано, что основной вклад в ЭПЭ происходит от электронного «ветра», который вызывает мобильность дислокаций и тепловой эффект тока. Другие эффекты – электромагнитные (поверхностный, пинч-эффект) и магнитострикционные – на порядок слабее.

В последнее время появились статьи, в которых объяснение ЭПЭ связывается с солитонами (структурно устойчивыми уединенными волнами, распространяющимися в нелинейной среде) типа бризеры (солитоны огибающие) [8] или с неравновесными процессами в электронной и фотонной подсистемах, когда электрический ток большой плотности

протекает через металл [9]. Эти процессы ведут к отклонению значения средней энергии колебания дислокаций от того, что соответствует температуре кристаллической решетки. В результате увеличивается частота колебаний, превосходящих помехи, создаваемые дислокациями [10]. Более общая точка зрения состоит в том, что все механизмы могут действовать одновременно, а их соотношение зависит от материала, внешних условий, размера и формы образцов и других факторов [11].

Что касается изучаемых материалов, то первоначально это были монокристаллы чистых металлов (Zn, Cd, Sn), затем поликристаллы (Pb, In, Ni, Fe, Nb, Ti, Al, Cu, W) и промышленные конструкционные материалы: сплавы на основе алюминия и меди, стали. Интересно, что характер деформационного поведения под током в одном и том же материале, например чистом алюминии, может быть прямо противоположным – сопровождаться упрочнением в монокристалле и разупрочнением в поликристалле [12]. Относительно недавно были исследованы нано- и аморфные материалы [13], ТРИП-стали с пластичностью, обусловленной мартенситным превращением [14], функциональные материалы с памятью формы, в которых направление скачка напряжения было направлено не только вниз, но и вверх [15]. Титан [2, 16–18, 20] и титановые сплавы [5, 12, 14, 19], будучи главными материалами авиационной технологии и медицинских имплантатов, особенно в наноструктурном состоянии, занимают важное место среди изучаемых материалов. Следует заметить, что большинство вышеупомянутых исследований ЭПЭ проводились, за редким исключением, на материалах в крупнозернистом состоянии, с размером зерна более 1–10 мкм [21].

Учитывая важность воздействия размера зерна на механические свойства и деформируемость титана, целью настоящей работы является сравнение деформационного поведения крупнозернистого и ультрамелкозернистого титана под воздействием различных видов и режимов тока.

Материалы и методы эксперимента

Материалом исследования служил технический чистый титан ВТ1–0, содержание примесей в котором приведено в табл. 1. Исходный материал был представлен в форме прутка диаметром 10 мм.

Конечный образец в форме проволоки с сечением $1,55 \times 1,85 \text{ мм}^2$ был изготовлен многопроходной электропластической прокаткой в калибрах по схеме «круг – шестиугольник – ромб» (рис. 1 а). Подробности электропластической прокатки можно найти в работе [5]. Общая степень деформации и скорость прокатки составили 90% и 50 мм/с соответственно. Прокатка в оправках выполнялась с введением многоимпульсного тока скважностью 10, плотностью 100 А/мм², длительностью импульса 10^{-4} с и частотой 1000 Гц (рис. 1 б). Проволока исследовалась в двух структурных состояниях, сформированных отжигом при температурах 700 и 500 °С в течение 30 мин, соответственно.

Механические испытания на разрыв проводились на горизонтальной разрывной машине ИР-5047–50 при комнатной температуре, скорости 1 мм/мин и по следующим режимам (плотность j , частота ν и длительность импульса τ): 1 – нет тока; 2 – одиночные импульсы $j=400 \text{ А/мм}^2$, $\tau=1 \text{ мс}$; 3 – многоимпульсный ток $j=100 \text{ А/мм}^2$, $\tau=0,1 \text{ мс}$, $\nu=1000 \text{ Гц}$; 4 – постоянный ток, $j=12 \text{ А/мм}^2$. Измерительная база при механических испытаниях составляла 25 мм. Во время натяжения температура образца измерялась термопарой в середине измерительной базы.

Таблица 1. Химический состав титана (% об.)

	C	Fe	Si	O	N	H	Al
ВТ1-0	0,07	0,18	0,10	0,12	0,04	0,01	0,6

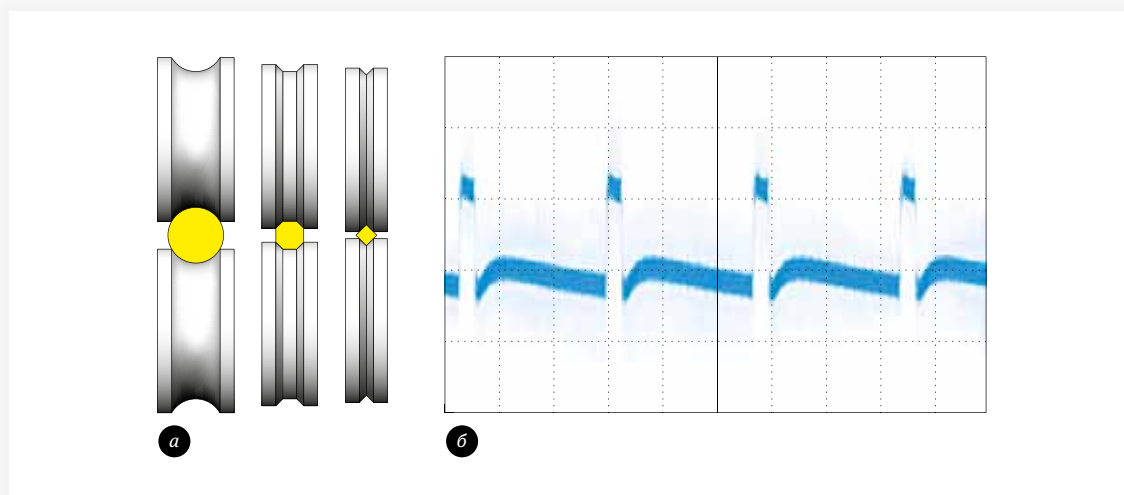


Рис. 1. Схема прокатки в оправках (а) и осциллограмма импульсного тока (б)

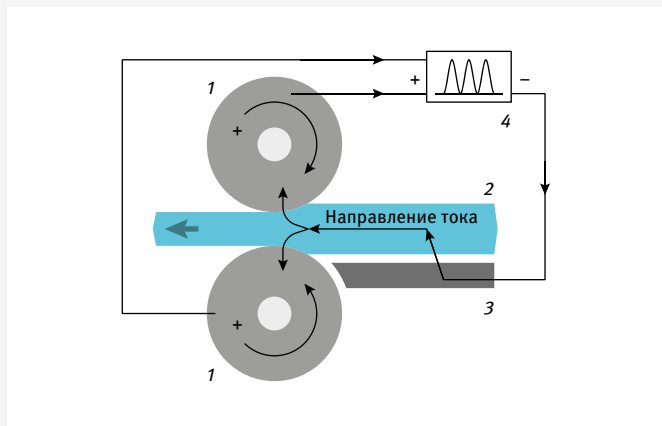


Рис. 2. Схема подачи тока при электропластической прокатке: 1 – валки; 2 – проволока; 3 – подающий стол; 4 – генератор импульсного тока

Схемы подачи импульсного тока на образец во время электропластической прокатки в оправках и во время растяжения показаны на рис. 2 и 3. В обоих случаях использовался генератор импульсного тока мощностью 7 кВт, что позволило воспроизводить ток в различных видах (одиночные импульсы, многоимпульсный и постоянный ток) и режимах ($J=500-5000$ А, $t=30-1000$ мкс, частота 1-1000 Гц). Чтобы предотвратить утечку тока во время испытания на разрыв, захваты были изолированы полистиролом.

Результаты эксперимента

Микроструктуры образцов, отожженных при температурах 500 и 700 °С, показаны на рис. 4. Видно большое различие в размере зерна, составляющее два порядка.

Отжиг глубоко обработанного титана при 700 °С вызвал рекристаллизацию, которая частично обладает характеристиками собирательной рекристаллизации (рис. 4 а). Границы зерен прямые, а внутри зерен присутствует

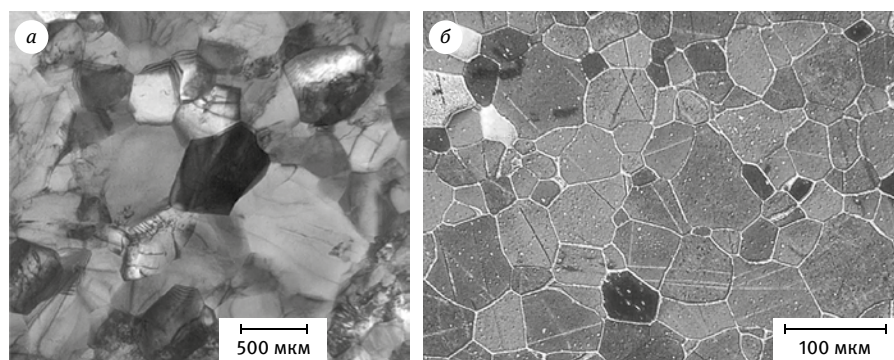


Рис. 4. Вид микроструктуры титана: а – ультрамелкозернистый (просвечивающая электронная микроскопия), б – крупнозернистый (оптическая микроскопия)

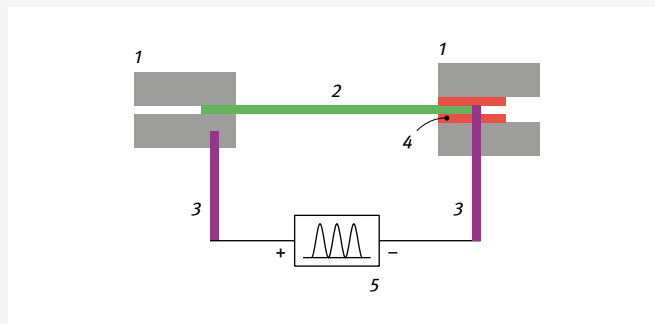


Рис. 3. Схема подачи тока при растяжении: 1 – захваты; 2 – образец; 3 – электроды; 4 – изоляция; 5 – генератор импульсного тока

незначительное количество двойников и частиц примесных элементов, главным образом оксидов и алюминидов. Средний размер зерна составляет 50 мкм. Структура титана может быть классифицирована, как крупнозернистая.

Отжиг интенсивно деформированного титана при 500 °С привел к образованию частично рекристаллизованной структуры со средним размером субзерен 500 нм и довольно высокой плотностью дислокаций внутри зерен (рис. 4 б). Структура титана может быть классифицирована как зерно-субзернистая ультрамелкозернистая.

На рис. 5 показаны кривые в координатах «напряжение растяжения – относительная деформация» при различных условиях испытаний титана в крупнозернистом (рис. 5 а) и ультрамелкозернистом (рис. 5 б) состояниях. Прежде всего видно, что напряжение текучести для ультрамелкозернистого титана для всех видов тока выше, чем для крупнозернистого титана. При растяжении без тока уменьшение размера зерна на два порядка привело к почти двукратному увеличению прочности и трехкратному снижению деформируемости (табл. 1), что непосредственно связано с хорошо известным эффектом размера зерна (эффект Холла – Петча).

Приложение тока любого вида, за исключением одиночных импульсов, ведет к снижению напряжения течения и уменьшению относительного удлинения до разрыва. Если снижение пластичности у титана обусловлено сильным шейкообразованием и, соответственно, многократным ростом реальной плотности тока, то уменьшение напряжения течения вызывается общим действием теплового и электропластического эффектов. В этом случае влияние теплового эффекта в сравнении с электропластическим эффектом должно быть значительно

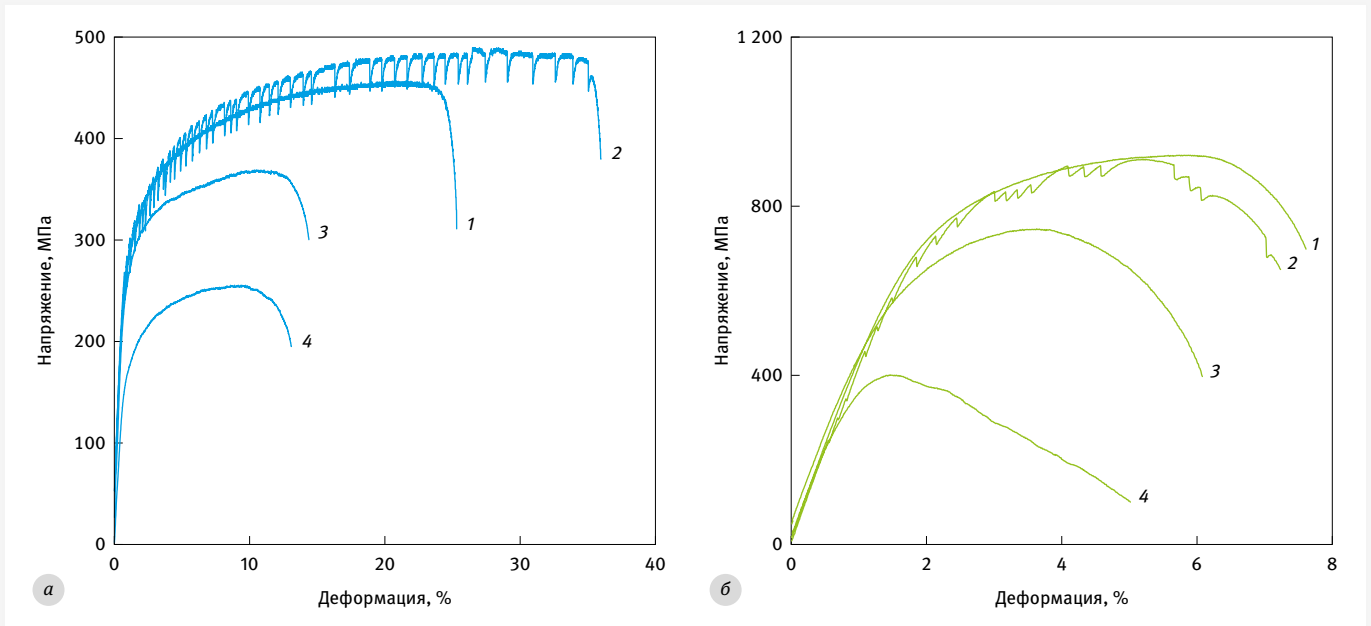


Рис. 5. Кривые «напряжение – деформация» для крупнозернистого (а) и ультрамелкозернистого (б) титана при различных режимах приложения тока: 1 – без тока; 2 – одиночные импульсы; 3 – многоимпульсный ток; 4 – постоянный ток

ниже, поскольку температура образца не поднималась выше 130–215 °С. Другой особенностью воздействия многоимпульсного и постоянного тока является резкое сокращение однородной деформации титана и рост локализации деформации, что особенно ярко проявляется в случае ультрамелкозернистого титана.

В противоположность многоимпульсному и постоянному току, режим одиночных импульсов в крупнозернистом титане приводит к упрочнению и заметному росту пластичности (кривая 2, рис. 5 а). Можно предположить, что физической природой такого упрочнения является малоцикловая деформация. Стоит заметить, что упрочнение, как результат воздействия тока, является аномальным явлением для чистых металлов, поскольку почти во всех случаях авторы фиксируют только снижение напряжения течения, то есть разупрочнение. Вероятно, что в этой работе аномальный эффект упрочнения стал возможным по причине такого режима рекристаллизации титана, при котором образуются зерна очень большого размера. Этот факт согласуется с упрочнением монокристаллического алюминия, о котором сообщают авторы работы [22].

В ультрамелкозернистом титане этот эффект не наблюдается, вероятно из-за высоких значений напряжения течения. Аналогичное явление уже фиксировалось для сплава Ti – 7% Al [23], где авторы связывают упрочнение с изменением дислокационного механизма со скольжения на переползание под воздействием тока. Влияние тока зависит от вида: оно тем сильнее, чем выше энергия прикладываемого

тока, которая увеличивается с переходом от одиночных импульсов к многоимпульсному и постоянному току.

Другой особенностью кривых «напряжение – деформация» под воздействием одиночных импульсов тока является появление направленных вниз скачков напряжения, амплитуда которых уменьшается с 50 МПа для крупнозернистого титана до 25 МПа и менее для ультрамелкозернистого титана. Поскольку в этом режиме приложения тока практически нет теплового эффекта (табл. 2), можно предположить, что электропластический эффект реально существует и деградирует с уменьшением размера зерна.

Интересно, что скачки напряжения наблюдались не только в зоне пластической деформации, где они вызваны взаимодействием мобильных дислокаций с электронами проводимости. Похожие скачки, но плохо фиксируемые из-за намного меньшей амплитуды (около 5 МПа), также присутствуют на упругой части кривых «напряжение – деформация». Поскольку во время упругой деформации отсутствуют свободные дислокации, можно предположить, что единственной причиной появления скачков напряжения является тепловой эффект и, как следствие, расширение и удлинение образца.

Наконец, обращает на себя внимание асимметричная форма скачков, которая характеризует отличающиеся механизмы снижения и повышения напряжения в самом скачке. Почти моментальное снижение напряжения вызывается ультрабыстрым импульсом тока, а последующий рост напряжения – относительно медленным остыванием образца.

Таблица 2. Механические свойства при растяжении крупнозернистого (КЗ) и ультрамелкозернистого (УМЗ) титана

Состояние	Вид тока	Амплитуда скачка, МПа	Длительность тока, с	Температура образца, °С	Предел прочности, МПа	Удлинение, %
КЗ	Без тока	–	–	Комнатная	600	21,5
	Одиночные импульсы	25–50	<0,1	30	535	20,0
	Многоимпульсный ток	–	270	130	360	13,7
	Постоянный ток	–	234	130	250	12,7
УМЗ	Без тока	–	–	Комнатная	1010	7,0
	Одиночные импульсы	5–20	<0,1	30	995	6,0
	Многоимпульсный ток	–	102	160	815	5,0
	Постоянный ток	–	96	160–215	435	4,5

Таким образом, было показано, что проявление электропластического эффекта в титане зависит от размера зерна, уменьшение которого ведет к его деградации и, как было ранее показано в [13], к полному исчезновению в аморфном состоянии в связи с уменьшением плотности свободных дислокаций.

Литература

1. **Troitsky O. A.** Electromechanical Effect in Metals, Letter to JETP. 10(1) (1969) 18–22.
2. **Conrad H.** Electroplasticity in Metals and Ceramics, Mater. Sci. Eng. A287 (2000) 276–287.
3. **Adams D., Jeswie J.** Single-point incremental forming of 6061-T6 using electrically assisted forming method, Proceedings of the Inst. of Mech. Eng., Part B: J. of Eng. Manuf. (2014) 1–8.
4. **Egea A. J. S., Rojas H. A. G., Montana C. A. M., Echeverri V. K.** Effect of electroplastic cutting on the manufacturing process and surface properties, J. of Mater. Proc. Tech. 222 (2015) 327–334.
5. **Potapova A. A., Stolyarov V. V.** Deformability and shape memory properties in Ti50Ni50 rolled with electric current, Mater. Sci. Forum. 738–739 (2013) 383–387.
6. **Bilyka S. R., Rameshb K. T., Wright T. W.** Finite deformations of metal cylinders subjected to electromagnetic fields and mechanical forces, J. of Mech. & Phys. Solids. 53 (2005) 525–544.
7. **Sprecher A. F., Mannant S. L., Conrad H.** On the mechanisms for the electroplastic effect in metals, Acta Metall. 34, 7 (1986) 1145–1162.
8. **Dubinko V. I., Dovbnya A. N., Kushnir V. F., Khodak I. V., Lebedev V. P., Krylovsky V. S., Lebedev S. V., Klepikov V. F., Ostapchuk P. N.** Plastification FCC-metals during of electron radiation, Phys. Solid State. 54(12) (2012) 2314–2320.
9. **Dubinko V. I., Klepikov V. F.** Kinetic mechanism of metals electroplasticity, Izv. RAS. Physics. 72 (2008) 1257–1258.
10. **Kim M-Jo, Yoon S., Park S., Jeong H-J., Park J. W., Kim K., Heo J. Jo. T., Hong S. T., Cho S. H., Kwon Y. K., Choi I. S., Kim M., Han H. N.** Elucidating the origin of electroplasticity in metallic materials, Appl. Mater. Today 21 (2020) 100874.
11. **Lahiri A., Shanthraj P., Roters F.** Understanding the mechanisms of electroplasticity from a crystal plasticity perspective, Modell. Simul. Mater. Sci. Eng. 27 (2019) 085006.
12. **Пахомов М. А., Столяров В. В.** Разрушение монокристалла под воздействием тока // СТАНКОИНСТРУМЕНТ 2020. 4 (020). С. 54–55.
13. **Stolyarov V. V.** Electroplastic Effect in Nanocrystal and Amorphous Alloys, Inorg. Mater. 52(15) (2016) 1541–1544.
14. **Stolyarov V. V., Klyatskina E. A., Terentyev V. F.** Suppression of TRIP effect in metastable steel by electrical current, Lett. Mater. 6 (4) (2016) 355–359.
15. **Stolyarov V. V.** Electroplastic effect in nanostructured titanium alloys, Rev. Adv. Mater. Sci. 31 (2012) 163–166.
16. **Okazaki K., Kagawa M., Conrad H.** A study of the electroplastic effect in metals, Scr. Metal. 12 (1978) 1063–1068.
17. **Okazaki K., Kagawa M., Conrad H.** Additional results on the electroplastic effect in metals, Scr. Metal.13 (1979) 277–280.
18. **Okazaki K., Kagawa M., Conrad H.** An Evaluation of the Contributions of Skin, Pinch and Heating Effects to

При поддержке:



Организатор:



**8-11
НОЯБРЯ 2022**

**МОСКВА,
ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»**

Место проведения:



Генеральный
информационный партнер:



Оборудование и технологии
для металлургии
и металлообработки
МеталлургМаш*2022



Металлопродукция
и металлоконструкции
для строительной отрасли
МеталлСтройФорум*2022



Транспортные
и логистические услуги
для предприятий ГМК
МеталлТрансЛогистик*2022

12+

Оргкомитет выставки:
тел./факс +7 (495) 734-99-66

**28-Я МЕЖДУНАРОДНАЯ
ПРОМЫШЛЕННАЯ ВЫСТАВКА**

МЕТАЛЛ ЭКСПО 2022

www.metal-expo.ru

- the Electroplastic Effect in Titanium, Mater. Sci. Eng. 45 (1980) 109–116.
19. **Salandro W. A., Bunget C., Mears L.** Thermo-mechanical investigations of the electroplastic effect, Proc. ASME 2011, Corvallis, Oregon, USA, 1–10.
 20. **Magargee J., Morestin F., Cao J.** Characterization of Flow Stress for Commercially Pure Titanium Subjected to Electrically Assisted Deformation, J. Eng. Mater. Technol. 135 (2013) 1–10.
 21. **Stolyarov V. V.** Role of External Impacts in Nanostructured Titanium Alloys, Bulletin of the Russian Acad. Sci. Physics, 76 (2012) 96–101.
 22. **Пахомов М. А., Столяров В. В.** Особенности электропластического эффекта в моно- и поликристаллическом алюминии // Металловедение и термическая обработка. 2021. № 5. С. 8–14.
 23. **Zhao S., Zhang R., Chong Y., Li X., Abu-Odeh A., Rothchild E., Chrzan D. C., Asta M., Morris J. W., Minor A. M.** Defect reconfiguration in a Ti–Al alloy via electroplasticity, Natur. Mater. 20 (2021) 468–472.

Авторы

Столяров Владимир Владимирович –

доктор технических наук, профессор, Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН

Смаковский Михаил Сергеевич –

генеральный директор АО «Машиностроительный завод «Армалит»

НОВЫЕ КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»



Цена 1090 руб.

НОВЫЕ МЕХАНИЗМЫ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Под редакцией В. А. Глазунова, С. В. Хейло

М.: ТЕХНОСФЕРА,
2022. – 244 с.,
ISBN 978-5-94836-647-0

Данная монография является третьей в серии, посвященной новым механизмам, предназначенным для перспективных робототехнических и измерительных систем.

Первая книга была посвящена 80-летию Института машиноведения им. А. А. Благонравова РАН (ИМАШ РАН) и содержала работы исследователей, связанных с институтом. Во второй монографии были представлены труды авторов, работающих в различных учебных, научных и промышленных организациях.

Третья монография содержит новые результаты, связанные с синтезом и анализом механизмов, применяемых для перспективных робототехнических и измерительных систем. Рассматриваются вопросы, связанные с характеристиками и функциональными возможностями новых механизмов, применяемых в сельскохозяйственной и сварочной технике, а также в измерительных и диагностических системах.

Круг авторов данной монографии представляет разные организации: ИМАШ РАН, ФНАЦ ВИМ, МГТУ им. Н. Э. Баумана, РГАУ-МСХА, Университет ИТМО, РГУ им. А. Н. Косыгина, ЮЗГУ, научно-производственную компанию «Шторм», НТЦ «Эталон».

Издание предназначено для широкого круга читателей – студентов, аспирантов, инженеров и научных работников, занимающихся вопросами синтеза и анализа механизмов, применяемых в робототехнических системах.

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 495 234-0110; 📠 +7 495 956-3346; knigi@technosphera.ru, sales@technosphera.ru



ТЕРМООБРАБОТКА

Пятнадцатая международная специализированная выставка

Единственная в России выставка
термического оборудования и технологий

13 - 15 сентября 2022

Россия, Москва, ЦВК "Экспоцентр", павильон 7



Основные разделы:

- Термическое и химико-термическое оборудование
- Промышленные печи, сушильные шкафы
- Индукционное оборудование
- Жаропрочная оснастка
- Вакуумная техника и компоненты вакуумных систем
- Огнеупоры, теплоизоляция и футеровка тепловых агрегатов
- Изделия из графита, углеродного волокна и углерод-углеродных композитов
- Установки нанесения покрытий
- Диагностическое и измерительное оборудование

Независимый
выставочный
аудит



Информационная поддержка:



Факты о выставке 2021 года: 50 экспонентов из 11 стран мира - Россия, Беларусь, Германия, Австрия, Италия, Швейцария, Польша, Китай, Словения, Франция, Турция; 3022 кв.м. экспозиции, 2150 посетителей-специалистов.

Официальный сайт выставки:
www.htexporus.ru

Организатор:

