

Влияние режимов многоимпульсного тока и теплового нагрева на механическое поведение при растяжении титана Grade 4

О. Е. Корольков, В. В. Столяров

Показано влияние длительности импульса и плотности многоимпульсного тока, а также теплового нагрева на деформационное поведение и механические свойства при растяжении технически чистого титана Grade 4. Сравниваются вклады теплового и электропластического эффекта в снижение напряжений течения при одинаковой температуре. Отмечается, что наблюдаемые эффекты реализуются в отсутствие структурных изменений при выбранных режимах воздействия.

Ключевые слова:

электропластический эффект, деформация титана и его сплавов, импульсный ток

УДК 620.18 | ВАК 2.6.17

DOI: 10.22184/2499-9407.2022.29.4.62.67

Электропластический эффект (ЭПЭ) – явление, при котором наблюдается снижение сопротивления металла деформации, а также улучшение его пластичности под влиянием электрического тока достаточно высокой плотности [1]. Существование ЭПЭ в металле впервые было установлено при деформации растяжением монокристаллов цинка в потоке ускорителя частиц [1]. Затем аналогичные исследования были выполнены на многих конструкционных металлах и сплавах, включая чистый титан и его сплавы.

В настоящее время существует несколько механизмов, объясняющих ЭПЭ: тепловой эффект, электронно-дислокационное взаимодействие, скин-эффект, пинч-эффект, локальный нагрев на структурных неоднородностях и магнитопластичность [2, 3]. Стоит отметить, что ряд авторов по-прежнему считают действие ЭПЭ полностью тепловым [4]. Однако большая часть исследователей считает, что ЭПЭ является следствием различного вклада совокупности перечисленных выше механизмов, вносящих различный вклад.

Особый интерес представляет использование ЭПЭ при деформации титана и его сплавов. Данный материал обладает высокой коррозионной стойкостью за счет прочной оксидной пленки и биосовместимостью. Титановые сплавы отличаются выдающимися механическими свойствами, однако трудно деформируются в холодном состоянии и налипают на инструмент при нагреве. Нагрев титана выше температур 350–400 °С увеличивает химическую активность, в результате чего происходит насыщение поверхностного слоя кислородом, негативно сказывающееся на механических свойствах материала. Поэтому разработка технологий обработки металлов давлением с использованием электрического тока и температур, не превышающих указанных выше, является актуальной задачей.

В работе [5] авторы показали, что при растяжении образцов из сплава Ti-6Al-4V ЭПЭ увеличивается с ростом амплитудной плотности тока. Авторы работы [6] изучали влияние ЭПЭ при изгибе титана Grade 4 и титанового

сплава ВТ6. Показано, что ЭПЭ снижает максимальное напряжение изгиба и увеличивает деформацию до разрушения при относительно невысоких температурах. Повышение амплитудной плотности позволяет избежать появления трещин в сплаве ВТ6.

В работе [7] обсуждается воздействие электрического тока при растяжении и изгибе сплавов ВТ1–0 и Grade 4 и демонстрируется снижение напряжений течения, повышение деформируемости и возможность использования ЭПЭ для промышленной технологии гибки имплантатов при относительно невысоких температурах.

Авторы исследования [8] показали, что импульсный ток высокой плотности позволяет избежать появления трещин, уменьшить напряжение течения и улучшить деформируемость при гибке титанового сплава Ti-6Al-4V. В другой работе [9] обнаружено, что увеличение плотности тока и частоты следования импульсов существенно снижает упругий возврат, напряжение течения, изгибающий момент и уменьшает радиус нейтрального слоя изгибаемых образцов сплава Ti-6Al-4V. При одинаковом тепловом эффекте образцы, изогнутые с более высокой плотностью тока, демонстрируют меньшую упругость и усилие. Авторы связывают данный факт со способностью атермического эффекта разблокировать скопления дислокаций.

В работе [10] растяжение меди, железа и титана было выполнено при трех уровнях плотности постоянного тока и соответствующих температурах, чтобы обеспечить одинаковые условия по всей длине образца. Результаты показали атермический эффект тока только для титана.

Среди указанных выше режимов импульсного тока важным параметром является скважность импульсов, определяющая отношение периода следования импульсов к длительности импульса. Анализ литературы свидетельствует, что влияние плотности тока и длительности импульса при одинаковой скважности импульсного тока на ЭПЭ практически не исследовалось. Кроме того, важной задачей является наблюдение структурных изменений и сравнительная оценка вкладов теплового действия тока и ЭПЭ в снижение напряжений течения при растяжении. Такие данные в литературе для технически чистого титана Grade 4 при относительно невысоких температурах не известны.

Цель работы – исследование влияния режимов импульсного тока на деформационное поведение, микроструктуру и атермический вклад в снижение напряжений течения при растяжении технически чистого титана Grade 4.

Материал и методы исследований

Материалом исследования был выбран титан Grade 4 (ASTM F67-06) в форме холоднокатаного листа толщиной 2 мм в отожженном состоянии (650 °С, 1 ч), используемый для изготовления имплантатов [11]. Химический состав сплава и его микроструктура в состоянии поставки представлены в табл. 1 и на рис. 1 а соответственно. Зерна средним размером 15 мкм в исходном состоянии имеют равноосную форму. Внутри зерен хорошо различимы включения соединений элементов, указанных в табл. 1.

Стандартные плоские образцы для испытаний на растяжение вырезались в направлении прокатки электроэрозионным методом. Размеры показаны на рис. 1 б.

Для растяжения была использована горизонтальная разрывная машина ИР-5081/20. Скорость растяжения составляла 1,7 мм/мин. К изолированным стеклотекстолитовым вставкам зажимам разрывной машины от генератора подводился многоимпульсный ток скважностью $q = T/\tau = 10$ (где T и τ – период и длительность импульса). Длительность импульса τ – 100 и 500 мкс. Выбор амплитудной плотности тока j – 10, 20 и 30 А/мм² соответствовал критерию проявления электропластического эффекта $j > j_{кр}$ [12] и температуре <300 °С. Контроль и регулирование температуры образца с точностью ±5 °С осуществляли прибором Digital Thermometers UT320 Series и хромель-алюмелевой термопарой, устанавливаемой в середине расчетной длины. Амплитудную плотность тока ($j = A/S$, где A и S – амплитуда тока и поперечное сечение образца) контролировали с помощью осциллографа АКИМ-4131/2.

Ток вводился в образец перед растяжением, которое начиналось после стабилизации температуры. Для нагрева образца воздухом до температуры, аналогичной температуре растяжения с импульсным током, был использован

Таблица 1. Химический состав титана

| N | C | H | Fe | O | Ti |
|------|------|--------|-----|-----|-----------|
| 0,05 | 0,10 | 0,0125 | 0,5 | 0,4 | Остальное |

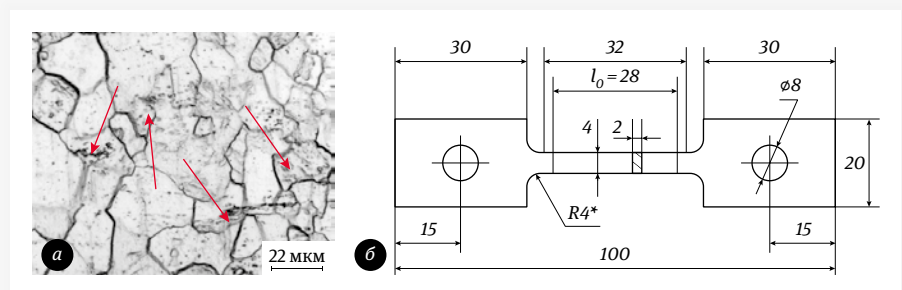


Рис. 1. Оптическая микроструктура Grade 4 в продольном сечении листа (а), форма и размеры образца на растяжение (б)

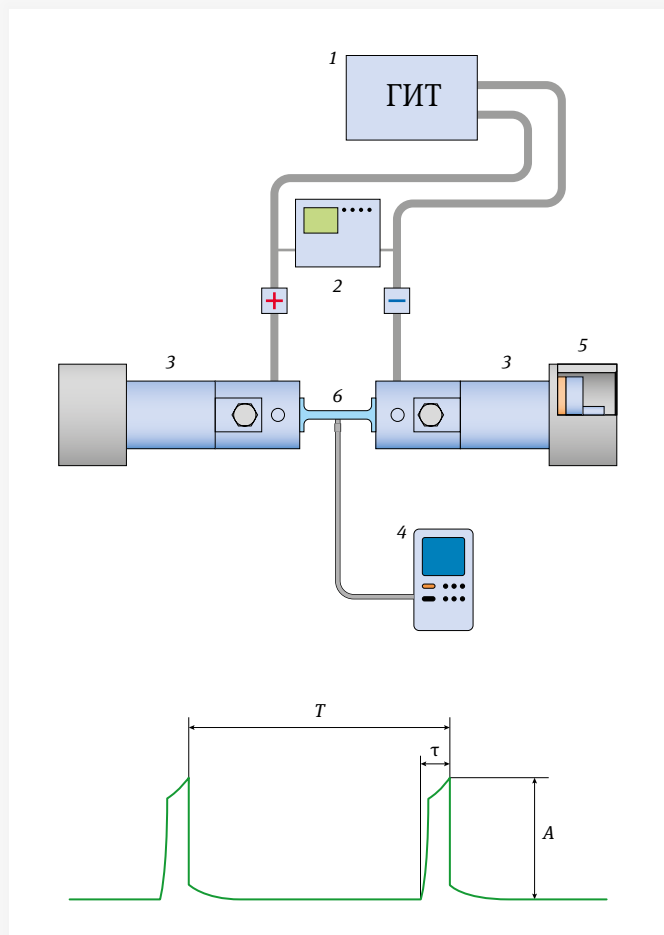


Рис. 2. Схема испытательного стенда: 1 – генератор импульсного тока; 2 – осциллограф; 3 – образец; 4 – термопара; 5 – изоляция; 6 – зажимы испытательной машины; T – период импульса; τ – длительность импульса; A – амплитуда тока

технический фен MAKITA HG6530VK. В этом случае производился нагрев до температуры 200 °С, которая была выбрана исходя из испытаний с током плотностью 20 А/мм² и длительностью импульса 100 мкс.

Анализ микроструктуры проводился с помощью оптического микроскопа Olympus Vx-51 в продольном сечении образца при увеличении $\times 500$. Подготовка образцов заключалась в последовательных операциях шлифовки, механической полировки и электрополировки в растворе хлорной и уксусной кислот в соотношении 1:4 при напряжении 35–50 В. Химическое травление проводилось при комнатной температуре в водном растворе плавиковой и азотной кислот в соотношении 1:2:47.

Микроструктура исследовалась в головке образца (недеформированная зона) и рабочей части вблизи зоны разрушения (деформируемая зона).

Результаты испытаний

Механические свойства

На рис. 3 представлены кривые напряжение-деформация при растяжении без тока (кривая 1), с различными режимами многоимпульсного тока (кривые 2, 3, 4, 5) и при нагреве феном (кривая 6). Вид кривых отличается характером деформационного упрочнения и поведением в шейке. Во вкладке рис. 3 показана зависимость напряжения течения от плотности тока.

При минимальной плотности тока 10 А/мм² деформационное поведение образцов с током и без тока не отличается (кривые 1 и 2). Повышение плотности тока (кривые 3 и 4) или длительности импульса (кривые 3 и 5) резко снижает коэффициент деформационного упрочнения, относительное удлинение до разрушения, вызывает дополнительную локализацию деформации в шейке и, соответственно, повышение истинной плотности тока и температуры в ней (кривые 3, 4, 5). Деформационное поведение образцов при нагреве феном (кривая 6) и током (кривая 5) при одинаковой температуре 200 °С сильно отличается. Вклад в снижение напряжений течения при нагреве током больше, чем при нагреве феном. При этом относительное удлинение ведет себя противоположным способом.

Кроме того, кривые растяжения показали присутствие зуба текучести, который при повышении режимов тока уменьшается и исчезает при температуре 280 °С (кривая 4). Отметим, что угол наклона кривых на участке упругой деформации для всех кривых сохраняется неизменным.

Описанное выше деформационное поведение Grade 4 под влиянием различных условий растяжения подтверждается количественными изменениями в механических свойствах (табл. 2).

Повышение плотности тока и/или длительности импульса ведет к многократному уменьшению пределов текучести

Таблица 2. Режимы испытаний и механические свойства титана

| № | Воздействие | j , А/мм ² | τ , мкс | T , °С | σ_b , МПа | $\sigma_{0,2}$, МПа | δ , % | Ψ , % |
|---|-------------|-------------------------|--------------|----------|------------------|----------------------|--------------|------------|
| 1 | Без тока | – | – | RT | 583 | 502 | 14,5 | 43 |
| 2 | МТ | 10 | 100 | 40 | 585 | 517 | 15,0 | 45 |
| 3 | МТ | 20 | 100 | 130 | 358 | 352 | 15,5 | 53 |
| 4 | МТ | 30 | 100 | 290 | 175 | 140 | 14,5 | 70 |
| 5 | МТ | 20 | 500 | 200 | 221 | 218 | 16,5 | 75 |
| 6 | Фен | – | – | 200 | 330 | 306 | 27,5 | 64 |

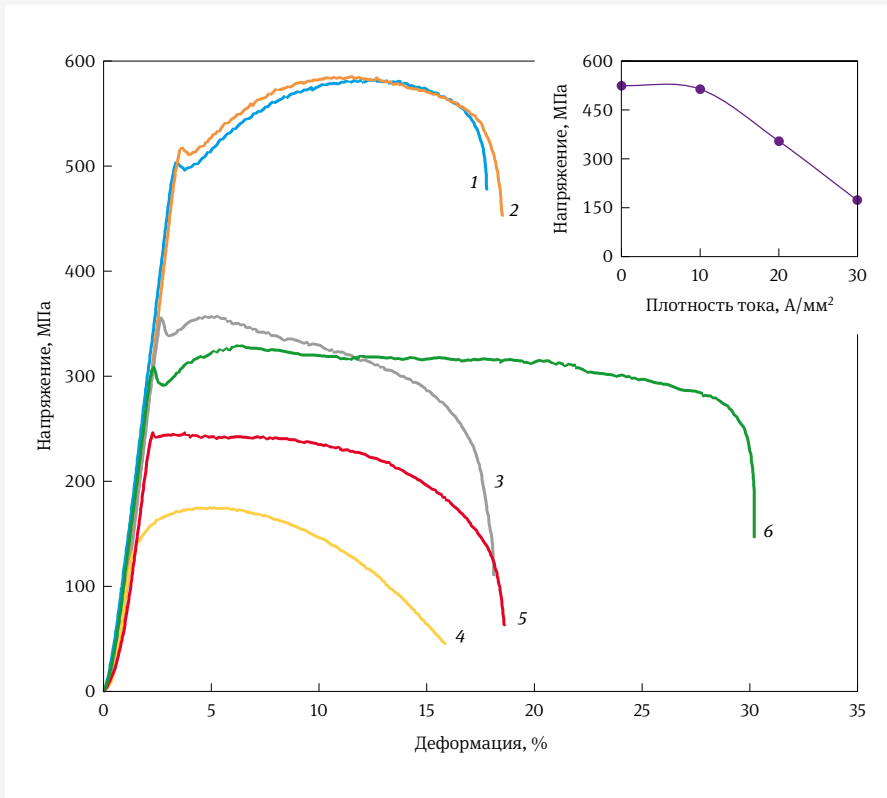


Рис. 3. Кривые растяжения титана: 1 – без тока; 2–10 А/мм², 100 мкс, 40 °С; 3–20 А/мм², 100 мкс, 130 °С; 4–30 А/мм², 100 мкс, 280 °С; 5–20 А/мм², 500 мкс, 200 °С; 6 – фен, 200 °С. Во вкладке показана зависимость напряжения течения от плотности тока

и прочности, слабому росту относительного удлинения и заметному повышению сужения. Видно также, что при одинаковой температуре испытания 200 °С, снижение предела текучести, вызванное нагревом феном, значительно меньше, а относительное удлинение в два раза выше, чем при пропускании многоимпульсного тока. Относительное сужение повышается с увеличением режимов тока, причем длительность импульса имеет большее влияние, чем плотность тока.

Микроструктура

В рис. 4 представлены фотографии микроструктуры в недеформированной (головка) и деформированной (рабочая длина) зоне образцов, испытанных по разным режимам.

Видно, что в недеформированных зонах образцов (головки) ток не приводит к каким-то структурным изменениям при различных режимах или нагреве феном. Размер и форма зерен, а также частицы примесей остаются неизменными. В некоторых случаях изредка наблюдаются

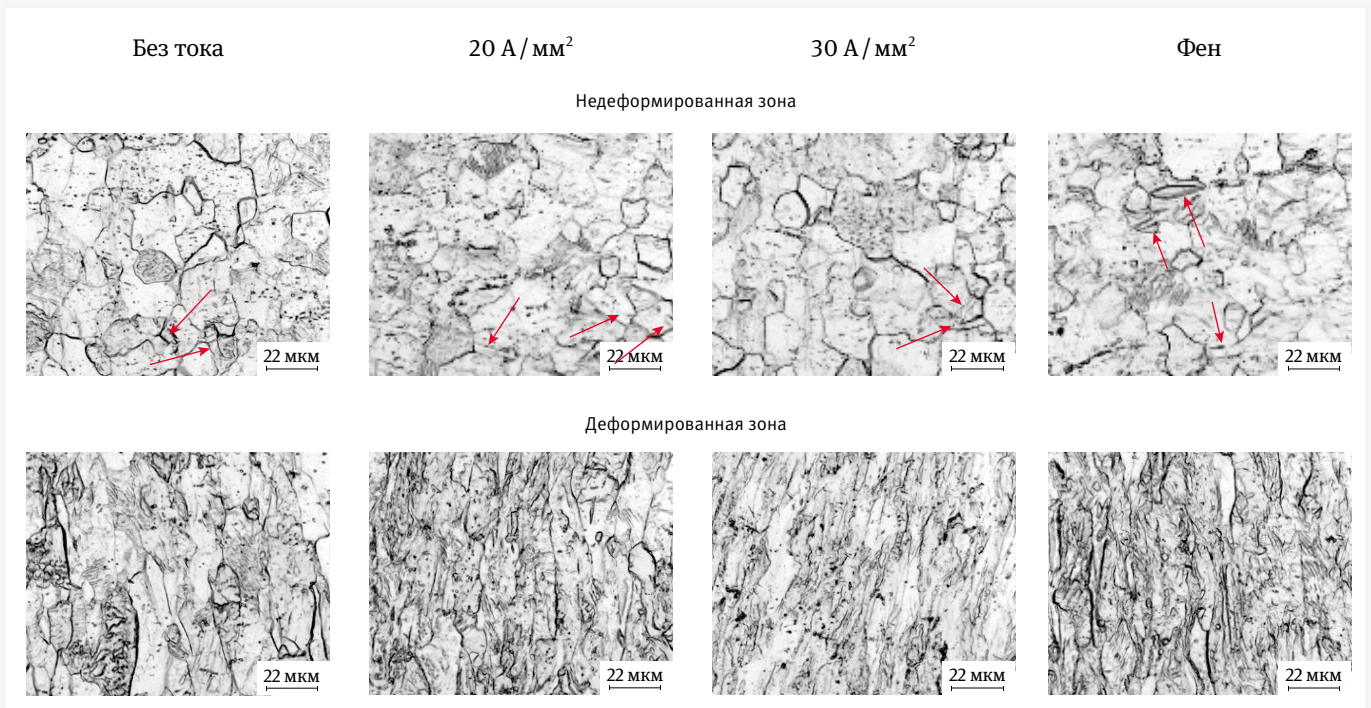


Рис. 4. Микроструктура Grade 4 для различных зон образца и режимов испытания. Стрелки указывают на двойники деформации

двойники деформации. Что касается деформированных зон образцов, то растяжение сопровождается фрагментацией структуры, появлением субграниц и удлинением зерен в направлении растяжения для образцов, испытанных с током и с феном на ~17 и 30% соответственно. Указанные особенности структуры усиливаются с повышением плотности и длительности тока.

Обсуждение результатов

Отсутствие различий в кривых 1, 2 и, напротив, их появление на кривой 3 свидетельствует о существовании критической плотности тока, выше которой начинает проявляться ЭПЭ [12]. Однако, в работе [6] при изгибе листового Grade 4 авторами была использована амплитудная плотность тока 12 А / мм² при длительности импульса 110 мкс, и снижение напряжения течения составило 25%. Такое расхождение в результатах может говорить как о различии микроструктуры образцов, так и о возможном преодолении границы проявления ЭПЭ в работе [6]. Сравнение кривых 5 и 6 при одной и той же температуре позволяет утверждать, что растяжение с импульсным током сопровождается дополнительным, атермическим действием тока, снижающим напряжение течения на 30%. Данный факт согласуется с работами, выполненными на чистом титане VT1-0 [7] и сплаве Ti-6Al-4V [5, 6]. Присутствие зуба текучести на кривых без тока и с током плотностью менее 30 А / мм² связано с неполным отжигом исходного титана при 650 °С, что подтверждается наличием остаточных механических двойников (рис. 4). Увеличение плотности тока до 30 А / мм², по-видимому, снимает внутренние напряжения и приводит к исчезновению зуба текучести [13]. Физической причиной исчезновения «зуба» текучести может быть повышение температуры, способствующей релаксации двойников и ускоренной миграции атомов кислорода в атмосферах Котрелла. В результате чего возможна смена механизма деформации [14].

Особенностью кривых растяжения является резкое снижение и даже отсутствие деформационного упрочнения. Похожее поведение кривых наблюдается при сверхпластичности, когда процессы упрочнения компенсируются термическим действием тока или внешнего источника тепла.

Сильное снижение напряжения течения на 40% и увеличение относительного сужения при повышении длительности импульса с 100 до 500 мкс и одинаковой плотности тока 20 А / мм² и скважности (кривые 3, 5) может быть следствием повышенной температуры [15] и дополнительного атермического действия тока, реализованного по одному из механизмов ЭПЭ (электронно-дислокационное взаимодействие, локальный нагрев на структурных неоднородностях, магнитопластичность) или их совокупности [3].

Значительное увеличение пластичности при испытании с феном обусловлено отсутствием шейки

и сосредоточенной деформации в ней, по сравнению с растяжением с током. В деформируемой зоне образцов происходит удлинение зерен, появление субграниц и фрагментация структуры независимо от режимов тока. Эти процессы нельзя отнести к влиянию тока, поскольку аналогичные структурные изменения видны и для растяжения с феном.

Выводы

1. Увеличение плотности или длительности импульса при одинаковой скважности приводит к значительному снижению напряжений течения и практически не влияет на удлинение до разрушения. ЭПЭ в титане Grade 4 проявляется при критической плотности импульсного тока выше 10 А / мм².
2. В титане Grade 4 наблюдается выраженный атермический эффект действия тока, вклад которого в снижение напряжений течения выше теплового на 30%.
3. Влияние исследованных режимов тока – плотности и длительности импульса на оптическую микроструктуру не обнаружено.

Структурные исследования выполнены с помощью Центра коллективного пользования «Авиационно-космические материалы и технологии» МАИ.

Литература

1. **Троицкий О. А.** Электропластический эффект в металлах: монография. М.: Ким Л. А., 2021. 468 с.
2. **Troickij O. A., Korol'kov O. E., Stashenko V. I., Skvorcov O. B.** (2017) Electroplastic Processing of Titanium Implants» in 15th International School-Conference «New materials – Materials of innovate energy: development, characterization methods and applications, Materials Science, pp. 603–610. <https://doi.org/10.18502/kms.v4i1.2215>.
3. **Минько Д. В.** Анализ перспектив применения ЭПЭ в процессах ОМД // Литье и металлургия. 2020. № 4. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-125-130>.
4. **Jordan A., Kinsey B. L.** Investigation of thermal and mechanical effects during electrically-assisted microbending // Journal of Materials Processing Technology / Vol. 221, July 2015, pp. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.01.021>.
5. **Dong-Wei Ao, Xing-Rong Chu, Shu-Xia Lin, Yang Yang, Jun Gao** Hot Tensile Behaviors and Microstructure Evolution of Ti-6Al-4V Titanium Alloy Under Electropulsing. Acta Metallurgica Sinica (English Letters) (2018) 31:1287–1296. <https://doi.org/10.1007/s40195-018-0735-3>
6. **Корольков О. Е., Столяров В. В., Шляпин А. Д.** Деформируемость титановых сплавов под током // Машиностроение и инженерное образование. 2020. № 1 (62). С. 21–27.

7. **Корольков О. Е., Столяров В. В.** Исследование и применение электрического тока для медицинских имплантатов // Проблемы машиностроения и надежности машин 2021, 6 96–104.
8. **Xifeng Li, Qiang Zhou, Shuangjun Zhao, Jun Chen.** Effect of pulse current on bending behavior of Ti6Al4V alloy / Procedia Engineering 81 (2014) 1799–1804. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.235>
9. **Dong-Wei Ao, Xing-Rong Chu, Yang Yang, Shuxia Lin, Jun Gao.** Effect of electropulsing on springback during V-bending of Ti-6Al-4V titanium alloy sheet // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2018) 96:3197–3207. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1654-1>
10. **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 209 (2021) 116776 <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2021.116776>
11. ГОСТ Р ИСО 5832-2-2014 Имплантаты для хирургии // Металлические материалы. Часть 2. Нелегированный титан.
12. **Hans Conrad.** Electroplasticity in metals and ceramics // Materials Science and Engineering A287 (2000) 276–287.
13. **Кузнецов Н. Н.** Влияние электро-магнитноимпульсного воздействия на заготовку // Обработка материалов давлением № 3 (24), 2010.
14. **Комиссарова И. А., Косинов Д. А., Коновалов С. В., Феоктистов А. В., Иванов Ю. Ф., Громов В. Е.** Изменение при многоциклового усталости структуры титанового сплава BT1-0, подвергнутого токовому импульсному воздействию // Ползуновский вестник. 2018. № 3. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2018.03.024>
15. **Кристал М. М.** Неустойчивость и мезоскопическая неоднородность пластической деформации (аналитический обзор). Часть 1. Феноменология зуба текучести и прерывистой текучести // Физ. мезомех. 2004. № 5.
16. Materials Properties Handbook Titanium Alloys, ASM International Materials Park, OH, 1994.

Авторы

Корольков Олег Евгеньевич – младший научный сотрудник ИМАШ РАН

Столяров Владимир Владимирович – доктор технических наук, главный научный сотрудник ИМАШ РАН

КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»



ОБРАБОТКА РЕЗАНИЕМ СТАЛЕЙ, ЖАРОПРОЧНЫХ И ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ С УЧЕТОМ ИХ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Райхельсон В. А.

М.: ТЕХНОСФЕРА,
2020. – 508 с.,
ISBN 978-5-94836-476-6

Цена 1210 руб.

В книге освещены основные виды механической обработки резанием современных конструкционных сталей, жаропрочных и титановых сплавов лезвийными инструментами: точение, строгание, сверление, фрезерование, протягивание, разрезка заготовок и прорезка пазов.

Книга содержит большой научно-практический и справочный материал, рассчитана на инженерно-технических работников предприятий машиностроения, авиакосмической отрасли, энерго- и автостроения, оборонной промышленности. Она также послужит учебным пособием для студентов и преподавателей высших и средних учебных заведений машиностроительных специальностей.

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

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