

---

---

**НАДЕЖНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ,  
ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ**

---

---

УДК 538.951: 53.097

**СРАВНЕНИЕ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ С ИМПУЛЬСНЫМ ТОКОМ  
ГОМОГЕННЫХ И ГЕТЕРОСТРУКТУРНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

© 2021 г. В. В. Столяров

*Институт машиноведения РАН им. А.А. Благодравова, Москва, Россия**e-mail: vlstol@mail.ru*

Поступила в редакцию 05.02.2021 г.

Принята к публикации 24.06.2021 г.

Исследуется деформационное поведение гетероструктурного композиционного сверхпроводника при растяжении с введением мощных одиночных импульсов тока в сравнении с моноструктурным сплавом аналогичного химического состава.

*Ключевые слова:* титан-ниобиевый сплав, композит, импульсный ток, деформация, гетероструктура

**DOI:** 10.31857/S0235711921050126

В последнее десятилетие интерес к давно открытому электропластическому эффекту (ЭПЭ) не только не потерял, но даже увеличился [1–3]. Прежде всего, это связано с потенциальным практическим применением, позволяющим значительно уменьшить механические напряжения, пружинение и повысить деформируемость заготовок в процессах обработки штамповкой, прессованием, прокаткой и волочением [4]. Другой причиной является необходимость более полного понимания физических процессов, сопровождающих неэластическую деформацию в присутствии тока. Некоторыми исследованиями установлено, что большое влияние на значимость ЭПЭ оказывают не только вид и режимы тока, но и природа деформируемого материала, и особенно его микроструктура, фазовый состав [5–7]. Предполагается, что особая роль может принадлежать композиционным материалам с различной проводимостью или даже отсутствием проводящих фаз. По-видимому, их объемное распределение в материале может оказывать определенное влияние на проявление ЭПЭ. К таким материалам относятся многожильные сверхпроводники, различные фазы которых могут обладать разной проводимостью, а также быть связными или нет. К настоящему времени отсутствуют данные об особенностях ЭПЭ в подобных материалах. Целью статьи является сравнение деформационного поведения гомогенного и гетерогенного сверхпроводников при воздействии импульсным током.

**Материал и методика исследования.** Исследования проводились на одножильном и многожильном композиционном прутках  $\text{Cu-TiNb}$  диаметром 6.1 мм, изготовленных по технологии ВНИИНМ им. А.А. Бочвара. Одножильный прутки из двухкомпонентного сплава  $\text{Nb-47вес.\%Ti}$  изолирован снаружи тонким слоем ниобия и очехлован медной оболочкой. Конструкция многожильного сверхпроводника описана в [8] и представляет собой композит, состоящий из медной матрицы и сверхпроводящих волокон. Материалом волокон служит сплав  $\text{Nb-47вес.\%Ti}$ . Готовые прутки были получены путем операций сборки композита, прессования, прокатки и волочения с промежуточными и финишным отжигами. Для формирования необходимой структуры на промежуточном размере прутки подвергались прокатке с истинной деформацией

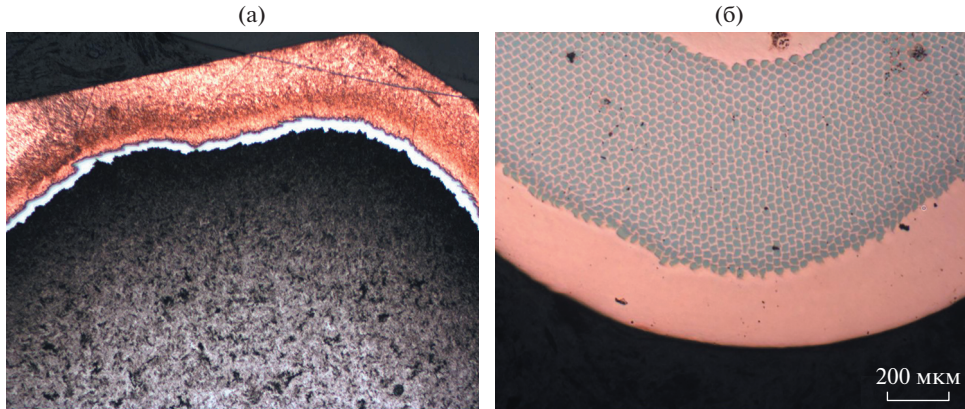


Рис. 1. Изображение макроструктуры в поперечном сечении одножильного (а) и многожильного (б) прутков в оптическом микроскопе при увеличении  $\times 50$ .

$e = 1.5$  в ромбовидных ручьевых калибрах с импульсным током и последующему отжигу при  $380^\circ\text{C}$  один час. Деформационная схема прокатки одноволоконного прутка описана в [9]. На размере  $\varnothing 3$  мм выполнены структурные исследования методами оптической микроскопии (ОМ, Axiovert 40 MAT) и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ, JEM-2100).

Испытания на растяжение проводились при комнатной температуре, скорости деформации  $0.5 \times 10^{-3} \text{ c}^{-1}$ , с введением одиночных импульсов тока плотностью  $j = 1600 \text{ A/mm}^2$  и длительностью импульса  $\tau = 500$  мкс. Образцы с размерами рабочей части  $\varnothing 3 \times 20$  мм вырезали из прутка, при этом наружный слой меди полностью удалялся.

**Результаты исследований и их обсуждение. Макро- и микроструктура.** Исследование обоих типов сверхпроводников на макроуровне показало, что они принципиально отличаются степенью структурной однородности: гомогенная структура в одножильном образце и гетерогенная структура в композиционном многожильном образце (рис. 1). Последняя обусловлена наличием медной матрицы с объемным соотношением медь/сверхпроводник равным 1.64 (рис. 1б).

*Микроструктура* поперечного сечения обоих типов прутков, показана на рис. 2.

В одножильном проводнике хорошо видна (рис. 2а) однородная на микроуровне ультрамелкозернистая (размер зерен/субзерен 100–200 нм), практически однофазная структура, состоящая из темно-серых областей  $\beta\text{-TiNb}$  (ОЦК) твердого раствора. Вид электронограммы соответствует структуре, являющейся промежуточной между крупнозернистой и нанозернистой. Частицы второй фазы, присутствующие в исходном прутке, отсутствуют.

В отличие от одножильного образца в многожильном сверхпроводнике (рис. 2б) на микроуровне заметна неоднородность: на фоне более крупных зерен основной фазы  $\beta\text{-TiNb}$  размером  $200 \times 400$  нм в темном поле видны светящиеся частицы фазы  $\alpha\text{-Ti}$ , размером до 25 нм, преимущественно в теле зерен. Это подтверждается и появлением на электронограмме характерных колец, рефлексы на которых соответствуют  $\alpha\text{-Ti}$ .

**Растяжение с током.** На рис. 3 приведены кривые растяжения с одноимпульсным током одножильного (рис. 3а) и многожильного (рис. 3б).

Общим для обоих типов сверхпроводника является одинаковый вид деформационного упрочнения и низкая пластичность, связанная с формированием ультрамелкозернистой микроструктуры. В каждом из проводников введение одиночных импуль-

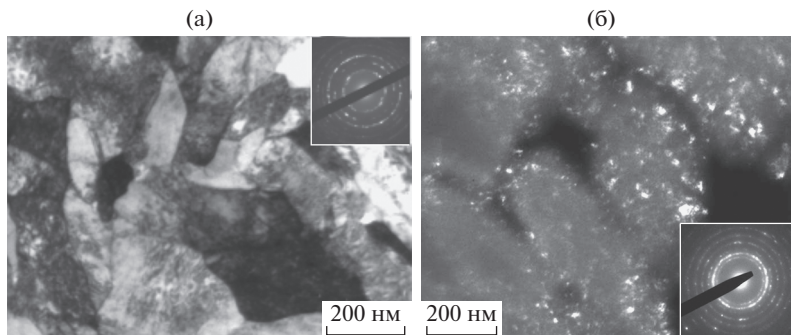


Рис. 2. Изображение микроструктуры и электроннограмм в поперечном сечении одножильного – (а), светлое поле; и многожильного – (б), темное поле, прутков в просвечивающем электронном микроскопе.

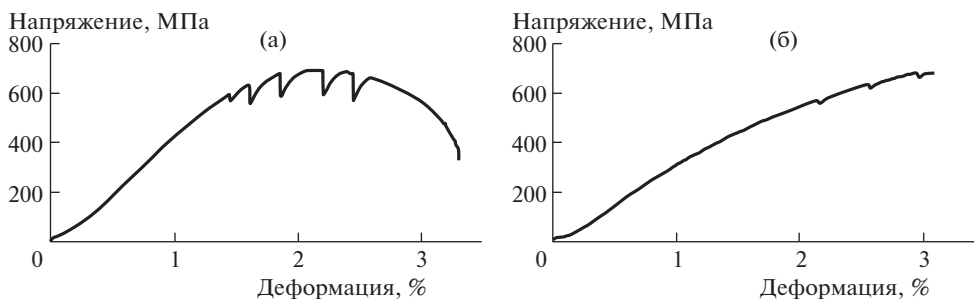


Рис. 3. Кривые напряжение–деформация при растяжении с одиночными импульсами тока одножильного – (а) и многожильного – (б) образца.

сов вызывает характерные для многих металлов скачки напряжения вниз, являющиеся основным признаком электропластического эффекта. Отличием в поведении является амплитуда скачка напряжения, которая для макро- и микрооднородной структуры одножильного проводника многократно выше, чем в многожильном проводнике, что свидетельствует о подавлении электропластического эффекта.

**Обсуждение.** Несмотря на одинаковые стадии и режимы деформационно-термической обработки, применение интенсивной прокатки с током для одножильного и многожильного сверхпроводника приводит к отличающимся по фазовому составу микроструктурам и, соответственно, механическому поведению при растяжении с током. Логично предположить, что основная причина наблюдающихся различий связана с композиционной природой многожильного образца, в котором тонкие сверхпроводящие волокна около 8 мкм в диаметре разделены такими же тонкими прослойками меди. Структурные изменения при Джоулевом нагреве в процессе прокатки с током в подобном композите из-за сильно отличающихся характеристик электро- и теплопроводности меди и TiNb сплава могут приводить к разным эффектам – растворению и выделению частиц  $\alpha$ -Fe, соответственно для одножильного и многожильного образца. Расчеты показали, что при используемой плотности импульсного тока  $j = 100 \text{ А/мм}^2$  температура одножильного проводника в процессе прокатки может достигать  $500^\circ\text{C}$  и

способствовать динамической рекристаллизации и процессам растворения/выделения. Действительно, повышение температуры  $\Delta T$  по закону Джоуля–Ленца

$$\Delta T = Nj^2\rho_e\tau/C\rho_v, \quad (1)$$

где  $N$  – число импульсов тока;  $j$  – плотность тока, А/мм<sup>2</sup>;  $\rho_e$  – удельное электросопротивление, Ом · м;  $\tau$  – длительность импульса, с;  $C$  – теплоемкость, Дж/(кг · К);  $\rho_v$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>.

При выбранных параметрах:  $N = 2000$ ;  $j = 100$  А/мм<sup>2</sup>;  $\rho_e = 0.65 \times 10^{-6}$  Ом м;  $\tau = 10^{-4}$  с;  $C = 392$  Дж/(кг К);  $\rho_v = 6535$  кг/м<sup>3</sup>,  $\Delta T = 500^\circ\text{C}$ . В соответствии с диаграммой состояния Ti–Nb эта температура выше температуры выделения частиц (350–400°C) и близка к температуре рекристаллизации в данном сплаве [10]. Для многожильного сверхпроводника из-за наличия контакта с медью повышение температуры будет заметно меньше.

Растяжение с током показало, что одножильный сверхпроводник проявляет электропластический эффект (ЭПЭ) (прыжки напряжения вниз), что согласуется с полученными ранее результатами в других титановых сплавах [7]. В отличие от одножильного образца в многожильном сверхпроводнике амплитуда прыжков вниз настолько мала, что при использованных режимах тока практически не наблюдается. Возможно, этот факт связан с масштабным фактором, т.е. с малым диаметром жил (около 10 мкм) и их большим количеством. В этом случае происходит мгновенная диссипация вводимой тепловой энергии в окружающую хорошо проводящую медную матрицу, объемная доля которой в 1.6 раза превышает долю волокон. Одним из направлений потенциального использования полученных результатов может быть модернизация традиционной технологии получения сверхпроводниковых проводов с заменой на финишных этапах обычной прокатки (волочения) и термического отжига на прокатку с током и электроимпульсную обработку. Это позволит сократить число операций и трудоемкость получения композиционных сверхпроводников.

**Выводы.** Введение одиночных импульсов тока при растяжении образца одножильного и многожильного композиционного сверхпроводника сопровождается отличительными особенностями в деформационном поведении и проявлении электропластического эффекта. В одножильном проводнике амплитуда скачков напряжения, связанных с импульсом тока, многократно выше амплитуды аналогичных скачков напряжения в многожильном проводнике. Анализ данных свидетельствует, что подавление электропластического эффекта в многожильном проводнике связано с влиянием структурной неоднородности в распределении микроволокон и выделением дисперсных частиц сверхпроводящей фазы.

#### БЛАГОДАРНОСТЬ

Автор выражает благодарность к.т.н. Фроловой за помощь в проведении структурных исследований.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Park H.G., Kang B.S., Kim J. Numerical Modeling and Experimental Verification for High-Speed Forming of Al5052 with Single Current Pulse // *Metals*. 2019. V. 9. P. 1311.
2. Демлер О., Герштейн Г., Далингер А., Нюрнбергер Ф., Епишин А., Молодов Д.А. Влияние импульсов электрического тока на деформационное поведение монокристаллов никелевого жаропрочного сплава sm5x-4 и подвижность малоугловой границы зерен в бикристаллах алюминия // *Известия РАН. Серия физическая*. 2018. № 82. (9). С. 1189.
3. Lv H., Zhou R., Li L., Ni H., Zhu J., Feng T. Effect of Electric Current Pulse on Microstructure and Corrosion Resistance of Hypereutectic High Chromium Cast Iron // *Materials*. 2018. V. 11. P. 2220.

4. *Nguyen-Tran H., Oh H., Hong S., Han H.N., Cao J., Ahn S., Chun D.* A review of electrically-assisted manufacturing // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. 2005. V. 2 (4). P. 365.
5. *Gennari C., Pezzato L., Tarabotti G., Zambon A., Schino A.D., Calliari I.* Influence of Electropulsing Treatments on Mechanical Properties of UNS S32750 Duplex Stainless Steel // *Materials*. 2020. V. 13 (7). P. 1613.
6. *Ruszkiewicz B.J., Grimm T., Ragai I., Mears L., Roth J.T.* A Review of Electrically-Assisted Manufacturing with Emphasis on Modeling and Understanding of the Electroplastic Effect // *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*. 2017. V. 139 (11). P. 110801.
7. *Stolyarov V.V.* Electroplastic effect in nanocrystalline and amorphous alloys // *Materials Science and Technology*. 2015. V. 31 (13a). P. 1536.
8. *Lee P.J., Larbalestier D.C.* Niobium-Titanium Superconducting Wires: Nanostructures by Extrusion and Wire Drawing // *Invited presentation at Interwire*. 2001. P. 1.
9. *Потанина Л.В.* Исследование качества двойных NbTi и тройных NbTiTa сплавов и разработка сверхпроводников на их основе для различных технических применений. Автореф. канд. дисс. М.: ВНИИНМ, 2006. 175 с.
10. *Диаграммы состояния двойных металлических систем / Под ред. Н.П. Лякишева. М.: Машиностроение, 2001. 872 с.*