



Оригинальная статья

УДК 669.620.172.2

DOI 10.17073/0368-0797-2022-10-693-698

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2412>



## ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ В ТРИП СТАЛИ

В. В. Столяров

■ Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (Россия, 101000, Москва, Малый Харитоньевский пер., 4)

**Аннотация.** В работе представлены результаты исследования электропластического эффекта в метастабильной высоколегированной аустенитно-мартенситной стали в виде тонкой ленты толщиной 0,3 мм при пластической деформации с током разных мод и режимов. Выбор материала исследования обусловлен проявлением в нем ТРИП-эффекта, вызываемом мартенситным превращением при деформации. Соотношение объемных фракций аустенита и мартенсита в стали до деформации составляет 50:50. В работе изучены деформационное поведение стали в форме кривых напряжение – деформация и механические свойства при комнатной температуре при статическом растяжении с током в виде коротких одиночных импульсов большой плотности, а также многоимпульсного тока с частотой 1000 Гц и постоянного тока. Микроструктура в исходном, до растяжения, состоянии исследована методами оптической и просвечивающей микроскопии. Микроструктура представляет собой крупные равноосные зерна аустенита и двойникового мартенсита размером до 80 мкм. Фазовый состав стали до и после растяжения с током и без тока изучен методом рентгеновской дифракции. Деформация растяжением без тока способствует интенсивному мартенситному превращению и повышает объемную долю мартенсита с 50 до 82 %. Введение одиночных импульсов тока не влияет на ТРИП-эффект, вызывает скачки напряжения вниз и подтверждает возникновение электропластического эффекта. Показано, что мода тока оказывает сильное влияние на проявление ТРИП-эффекта, подавляет его при многоимпульсном и постоянном токе и вызывает резкое уменьшение пределов прочности, текучести и пластичности. Растяжение с током стабилизирует аустенит и уменьшает содержание образующегося мартенсита до 72 % при многоимпульсном режиме и до 50 % при использовании постоянного тока.

**Ключевые слова:** ТРИП сталь, электропластический эффект, растяжение, электрический ток, микроструктура, аустенит, мартенсит

**Благодарности:** Автор благодарен доктору В.Ф. Терентьеву за презентацию исследовательского материала, к.м.н. А.А. Мисоченко за помощь в механических испытаниях и проф. К. Падманабхан и его группе в Университете Анны (Индия) за проведенные исследования.

**Для цитирования:** Столяров В.В. Электропластический эффект при растяжении в ТРИП стали // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 10. С. 693–698. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-10-693-698>

Original article

## ELECTROPLASTIC EFFECT AT TENSION IN TRIP STEEL

V. V. Stolyarov

■ Mechanical Engineering Research Institute, Russian Academy of Sciences (4 Malyi Khariton'evskii Lane, Moscow 101000, Russian Federation)

**Abstract.** The paper presents the results of a study of electroplastic effect in metastable high-alloyed austenitic-martensitic steel in strip form with the thickness of 0.3 mm during plastic deformation with current of different modes and regimes. Choice of the research material is due to manifestation of the TRIP effect in it, caused by martensitic transformation during deformation. The ratio of volume fractions of austenite and martensite in the steel before deformation was 50:50. Deformation behavior of the steel was studied by stress-strain curves and mechanical properties at room temperature in static tension with current by short single pulses of large density, as well as multipulse current with frequency of 1000 Hz and direct current. Microstructure in the initial, before tension, state was investigated by optical and transmission microscopy. It consists of large equiaxed grains of austenite and twinned martensite up to 80 μm in size. Phase composition of the steel before and after tension with and without current was studied by X-ray diffraction. Tensile deformation without current promotes martensitic transformation and increases the volume fraction of martensite from 50 to 82 %. The introduction of single current pulses does not influence the TRIP effect, causes power surges and confirms the occurrence of electroplastic effect. Current mode has a strong influence on manifestation of the TRIP effect, suppressing it at multipulse and direct current and causing a sharp decrease in tensile strength, yield stress, and elongation to failure. Tension with current stabilizes the austenite and reduces content of the formed martensite up to 72 % in multi-pulse mode and up to 50 % when using direct current.

**Keywords:** TRIP steel, electroplastic effect, tension, electric current, microstructure, austenite, martensite

**Acknowledgments:** The author expresses his gratitude to Terent'ev V.F. for presentation of the research material, A.A. Misochenko for assistance in mechanical testing and prof. K. Padmanabhan and his group from the Anna University (India) for structure research.

**For citation:** Stolyarov V.V. Electroplastic effect at tension in TRIP steel. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 10, pp. 693–698. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-10-693-698>

## ВВЕДЕНИЕ

Электропластический эффект (ЭПЭ) – явление, заключающееся в снижении напряжений течения и в повышении пластичности материала при воздействии электрического тока [1]. Это позволяет достичь повышенной деформируемости материала при обработке давлением, например, при прессовании, прокатке, волочении, изгибе. На диаграмме деформации растяжением проявление ЭПЭ фиксируется, как правило, в виде скачков напряжения вниз [2].

Наиболее подробно изучен ЭПЭ чистых металлов и крупнозернистых однофазных сплавов [3], а также титановых сплавов [4], в том числе с памятью формы [5]. Исследуется ЭПЭ многих материалов на основе алюминия [6], меди [7], магния [8]. Ряд работ посвящен ЭПЭ в таких экзотических материалах, как оксидные керамики MgO и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [9, 10], стекла [11], аморфные сплавы [12], тонкие пленки [13].

В последнее время много работ публикуется по исследованию ЭПЭ в различных сталях. Например, в duplexной феррит + аустенит и аустенитной 316L сталях подтверждено проявление ЭПЭ [14, 15]. Однако в стали 316L было установлено, что ЭПЭ при растяжении приводит к охрупчиванию за счет двойникования в структуре [16]. Оказалось, что воздействие тока может стимулировать или подавлять фазовые превращения [17]. Этот аспект наиболее интересен в приложении к ТРИП сталям, в которых прямое мартенситное превращение аустенит – мартенсит индуцируется пластической деформацией. В работе [18] показано, что ЭПЭ в ТРИП стали существует и проявляется при плотности тока выше критической, а эффективность ЭПЭ возрастает при охлаждении образца воздухом. Продемонстрировано, что основанная на ЭПЭ технология может быть применена даже в процессе сварки трением с перемешиванием [19].

К настоящему времени нет признанной всеми единой теории, объясняющей механизм ЭПЭ. Считается, что есть несколько возможных явлений, которые одновременно могут действовать при введении тока: взаимодействие электронов проводимости с дислокациями, тепловой нагрев, скин-, пинч- и магнитопластический эффекты и другие [20]. В многофазных нестабильных сплавах (ТРИП сталь является как раз таким) понимание ЭПЭ еще более затруднено, поскольку в них могут происходить фазовые превращения не только в процессе нагрева, но и при пластической деформации.

Целью настоящей работы являлось исследование особенностей проявления ЭПЭ в метастабильной аустенитно-мартенситной ТРИП стали при статическом растяжении и воздействии тока разных мод и режимов.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являлась ТРИП сталь ВНС9-Ш (23X15H5AM3-Ш), образцы в форме ленты толщиной 0,3 мм. По фазовому составу холоднокатанная сталь в исходном состоянии представляла смесь нагартованного метастабильного аустенита и мартенсита деформации, отношение объемных фракций 50:50. Микроструктурный анализ выполнен методами оптической и просвечивающей электронной (JEOL JEM 2100) микроскопии. Фазовый рентгеноструктурный анализ проводили с использованием дифрактометра Rigaku Smart Lab. Образцы с рабочей частью размерами 0,3×3×30 мм испытывали на растяжение при скорости  $0,3 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$  (0,6 мм/мин) при введении тока по следующим модам и режимам: 1 – без тока; 2 – одиночные импульсы тока, плотность ( $j$ ) 350 А/мм<sup>2</sup>, длительность  $t$  импульса  $0,5 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ ; 3 – многоимпульсный ток,  $j = 100 \text{ А/мм}^2$ ,  $t = 100 \text{ мс}$ , частота 1000 Гц; 4 – постоянный ток,  $j = 12 \text{ А/мм}^2$ . Отметим, что в процессе растяжения реальная плотность тока повышается в связи с уменьшением исходного сечения, особенно сильно при образовании шейки. Температуру образца измеряли с точностью  $\pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$  хромель-алюмелевой термопарой, устанавливаемой в середине расчетной длины образца.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

### Структура и фазовый состав

Исходная микроструктура ТРИП стали перед растяжением состояла из равноосных зерен средним размером 80 мкм почти равных объемных долей аустенита ( $\gamma$ ) и мартенсита ( $\alpha$ ), которые в оптическом микроскопе хорошо различаются своей морфологией (рис. 1, а). При изучении на просвечивающем электронном микроскопе ясно видна граница между зернами аустенита и мартенсита в виде микродвойников (рис. 1, б).

Растяжение без тока способствует ТРИП-эффекту и увеличению содержания мартенсита деформации. Рентгеноструктурные исследования показали, что растяжение без тока и с одиночными импульсами тока наиболее сильно (до 82 %) повышает объемную долю мартенсита деформации в испытанном образце (рис. 2).

Растяжение с многоимпульсным током снижает образование мартенсита до 72 %, а с постоянным током – до 50 %. Иными словами, мартенситное превращение аустенита в мартенсит тормозится под действием импульсного тока и становится невозможным при постоянном токе. Подобный эффект тока, по-видимому, связан с повышением температуры и распадом мартенсита.

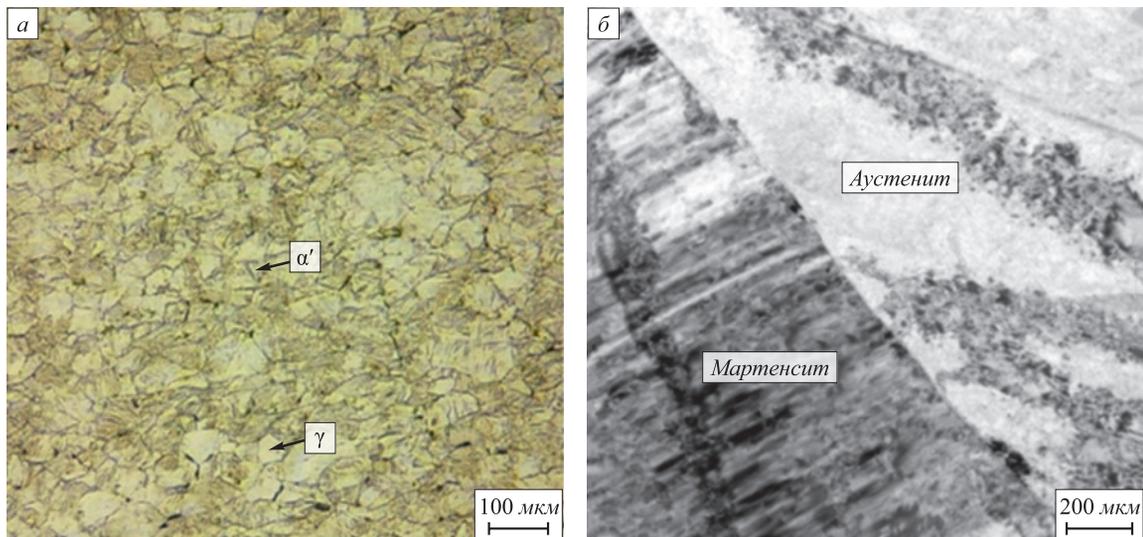


Рис. 1. Микроструктура ТРИП стали в исходном состоянии:  
 а – оптическая микроскопия; б – просвечивающая электронная микроскопия

Fig. 1. Microstructure of TRIP steel in its initial state:  
 a – optical microscopy; б – transmission electron microscopy

### Механические свойства и деформационное поведение

Механические свойства ТРИП стали в аустенитно-мартенситном состоянии при растяжении с током и без тока приведены в таблице. Введение тока приводит к уменьшению длительности испытания, снижению пределов прочности и текучести на 10–20%, а также относительного удлинения до разрушения от 2 до 10 раз, особенно сильному для многоимпульсного и постоянного тока. Такое изменение прочностных характеристик не удивительно, так как температура образцов повышается более чем на 100 °С. Аномальное снижение пластичности при этом может свидетельствовать о вызванных током структурно-фазовых превращениях. Особенности кривых напряжение – деформация подтверждают это (рис. 3). При растяжении без тока наблюдаются зуб и протяженная площадка текучести с последующим низким скачкообразным деформационным упрочнением, которое обусловлено ТРИП-эффектом (рис. 1, а). Прочность и пластичность наиболее высокие для этого режима растяжения (см. таблицу).

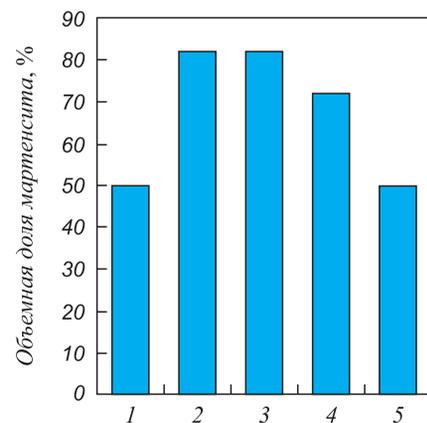


Рис. 2. Фракция мартенсита до и после растяжения при разных внешних условиях:  
 1 – исходное; 2 – растяжение; 3 – растяжение одиночными импульсами; 4 – растяжение многоимпульсным током; 5 – растяжение постоянным током

Fig. 2. Martensite fraction before and after stretching under different external conditions:  
 1 – initial; 2 – stretching; 3 – stretching by single pulses; 4 – stretching by multi-pulse current; 5 – stretching by direct current

### Механические свойства ТРИП стали при разных режимах тока

#### Mechanical properties of TRIP steel at different current modes

Моды тока	Длительность испытания, мин	Температура, °С	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0.2}$ , МПа	$\delta$ , %
Без тока	13,5	20	1650	1500	23,0
Одиночные импульсы	8,0	20	1500	1190	12,0
Многоимпульсный ток	3,0	120	1465	1150	2,8
Постоянный ток	2,0	130	1360	1150	2,0

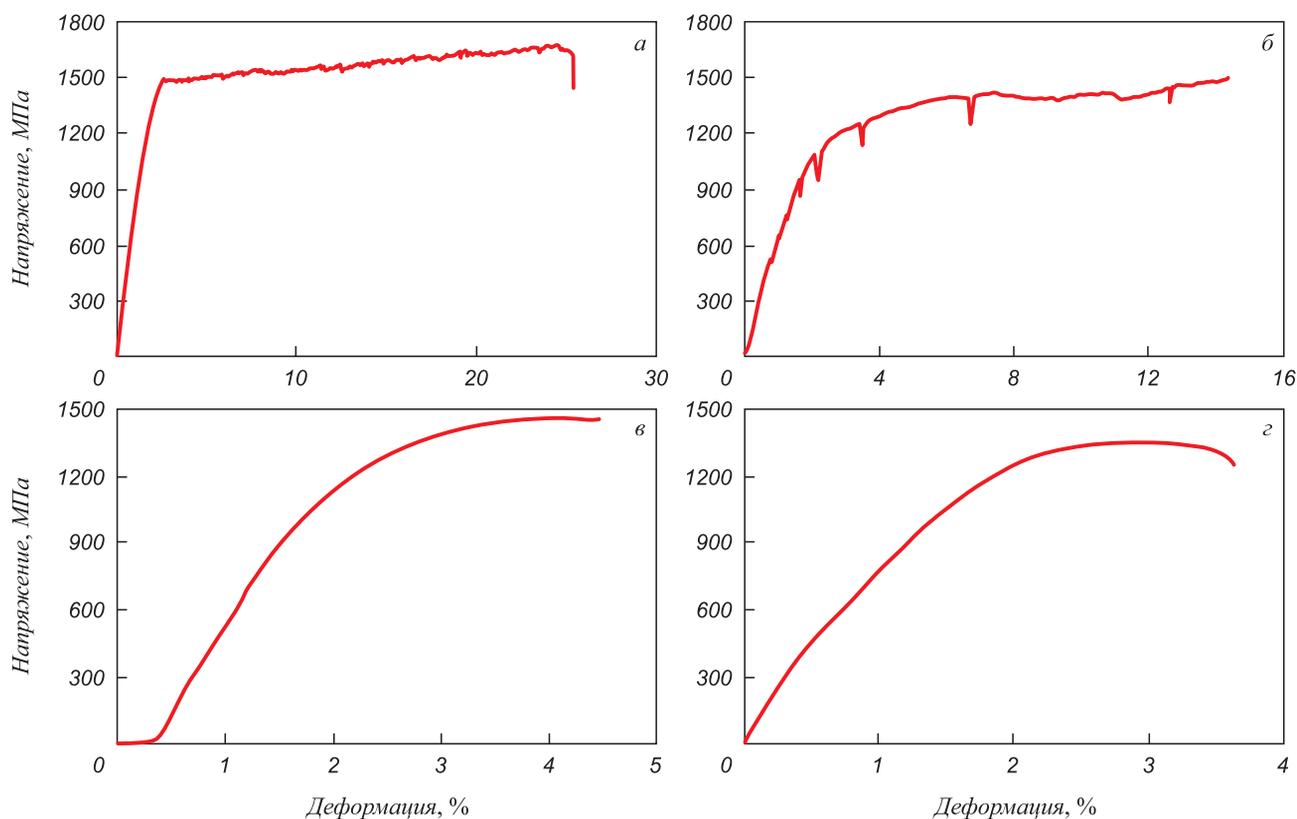


Рис. 3. Кривые напряжение – деформация при растяжении ТРИП стали:  
 а – без тока; б – одиночные импульсы; в – многоимпульсный ток; г – постоянный ток

Fig. 3. Stress – strain curves during tension of TRIP steel:  
 а – without current; б – single pulses; в – multi-pulse current; г – direct current

При всех других изученных режимах тока наблюдается снижение прочности и пластичности, особенно сильное при использовании многоимпульсного и постоянного тока. Одиночные импульсы тока приводят к исчезновению зуба текучести, появлению в упругой области и на стадии деформационного упрочнения скачков напряжения вниз амплитудой до 50 и 140 МПа соответственно, без существенного повышения температуры (рис. 1, б). Поскольку амплитуда скачков увеличивается при переходе из упругой зоны в пластическую, то предполагается, что механизм скачков в этих зонах отличается. В упругой области скачки напряжений обусловлены тепловым эффектом тока, а в пластической зоне они вызваны суммарным действием теплового эффекта и ЭПЭ. Из визуального сравнения амплитуды скачков в упругой и пластической зонах можно заключить, что ЭПЭ заметно больше теплового эффекта.

При воздействии многоимпульсного и постоянного тока скачки напряжения отсутствуют, возрастает коэффициент деформационного упрочнения (рис. 3, в, г). Кривая статического растяжения приобретает вид, характерный для стабильной высоколегированной аустенитной стали, что обусловлено большим тепловым эффектом (несколько сотен градусов).

## Выводы

Электропластический эффект в исследуемой ТРИП стали проявляется в снижении напряжений течения и, особенно, удлинения до разрушения при всех режимах и модах электрического тока. Дегградация ТРИП-эффекта связана со стабилизацией аустенитного состояния, вызванного сопровождающим ток нагревом.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

## REFERENCES

1. Мисоченко А.А., Столяров В.В. Деформируемость, структура и свойства титановых сплавов, подвергнутых прокатке с током. Гл. 15. В кн.: Перспективные материалы и технологии. В 2 т. Т. 1 / Под ред. В.В. Клубовича. Витебск: Изд-во УО «ВГТУ», 2015. С. 268–278.
2. Физические основы и технологии обработки современных материалов (теория, технология, структура и свойства) /

1. Misochenko A.A., Stolyarov V.V. Deformability, structure and properties of titanium alloys subjected to rolling with current. Chapter 15. In: *Promising Materials and Technologies. In 2 vols. Vol. 1.* Klubovich V.V. ed. Vitebsk: Izd-vo VSTU, 2015, pp. 268–278. (In Russ.).
2. Troitskii O.A., Baranov Yu.V., Avraamov Yu.S., Shlyapin A.D. *Physical Foundations and Technologies of Processing Modern Ma-*

- O.A. Троицкий, Ю.В. Баранов, Ю.С. Авраамов, А.Д. Шляпин. Т. 1. Москва – Ижевск: Институт компьютерных технологий, 2004. 590 с.
3. Conrad H. Electroplasticity in metals and ceramics // *Materials Science and Engineering: A*. 2000. Vol. 287. No. 2. P. 276–287. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)00786-3](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)00786-3)
  4. Ao D.-W., Chu X.-R., Lin S.-X., Yang Y., Gao J. Hot tensile behaviors and microstructure evolution of Ti-6Al-4V titanium alloy under electropulsing // *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*. 2018. Vol. 31. No. 12. P. 1287–1296. <https://doi.org/10.1007/s40195-018-0735-3>
  5. Stolyarov V.V. Influence of pulse current on deformation behavior during rolling and tension of Ti–Ni alloys // *Journal of Alloys and Compounds*. 2013. Vol. 577. Suppl. 1. P. S274–S276. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.04.022>
  6. Dobras D., Bruschi S., Simonetto E., Rutkowska-Gorczyca M., Ghiotti A. The effect of direct electric current on the plastic behavior of AA7075 aluminum alloy in different states of hardening // *Materials*. 2021. Vol. 14. No. 1. Article 73. <https://doi.org/10.3390/ma14010073>
  7. Fan R., Magargee J., Hu P., Cao J. Influence of grain size and grain boundaries on the thermal and mechanical behavior of 70/30 brass under electrically-assisted deformation // *Materials Science and Engineering: A*. 2013. Vol. 574. P. 218–225. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.02.066>
  8. Xie H.-y., Wang Q., Peng F., Liu K., Dong X.-h., Wang J.-f. Electroplastic effect in AZ31B magnesium alloy sheet through uniaxial tensile tests // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2015. Vol. 25. No. 8. P. 2686–2692. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(15\)63892-4](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(15)63892-4)
  9. Yang D., Conrad H. Plastic deformation of fine-grained Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in the presence of an electric field // *Scripta Materialia*. 1999. Vol. 41. No. 4. P. 397–401. [https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(99\)00126-8](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(99)00126-8)
  10. Conrad H., Yang D. Influence of an electric field on the plastic deformation of fine-grained MgO at high homologous temperatures // *Acta Materialia*. 2000. Vol. 48. No. 16. P. 4045–4052. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(00\)00203-2](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(00)00203-2)
  11. Яковлев А.В., Федоров В.А. Проявление электропластического эффекта в металлических стеклах // *Вектор науки Тольяттинского государственного университета*. 2013. № 3. С. 99–102.
  12. Pluzhnikova T.N., Fedorov V.A., Yakovlev A.V., Pluzhnikov S.N., Fedotov D.Y. Changing of mechanical characteristics of Co-based amorphous alloy and Fe-based nano-crystalline alloy in the hydrogenous medium under the influence of impulse electric current // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1400. No. 5. Article 055031. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1400/5/055031>
  13. Zhu Y., Lai W. Effects of electropulsing induced microstructural changes on THz-reflection and electrical conductivity of Al-doped ZnO thin-films // *Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology*. 2016. Vol. 6. No. 3. P. 106–117. <https://doi.org/10.4236/jsemat.2016.63010>
  14. Gennari C., Pezzato L., Simonetto E., Gobbo R., Forzan M., Calliari I. Investigation of electroplastic effect on four grades of duplex stainless steels // *Materials*. 2019. Vol. 12. No. 12. Article 1911. <https://doi.org/10.3390/ma12121911>
  15. Breda M., Michieletto F., Beridze E., Gennari C. Experimental study on electroplastic effect in AISI 316L austenitic stainless steel // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 792. P. 568–571. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.792.568>
  16. Zeng Z., He J., Xiang Z., Sun Q., Wu Y., Wang S. Embrittlement of 316L stainless steel in electropulsing treatment // *Journal Materials Research and Technology*. 2020. Vol. 9. No. 5. P. 10669–10678. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.07.064>
  17. Stolyarov V.V., Klyatskina E.A., Terentyev V.F. Suppression of TRIP effect in metastable steel by electrical current // *Letters on Materials*. 2016. Vol. 6. No. 4. P. 355–359. <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2016-4-355-359>
  3. Conrad H. Electroplasticity in metals and ceramics. *Materials Science and Engineering: A*. 2000. Vol. 287, no. 2, pp. 276–287. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)00786-3](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)00786-3)
  4. Ao D.-W., Chu X.-R., Lin S.-X., Yang Y., Gao J. Hot tensile behaviors and microstructure evolution of Ti-6Al-4V titanium alloy under electropulsing. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*. 2018, vol. 31, no. 12, pp. 1287–1296. <https://doi.org/10.1007/s40195-018-0735-3>
  5. Stolyarov V.V. Influence of pulse current on deformation behavior during rolling and tension of Ti–Ni alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 2013, vol. 577, suppl. 1, pp. S274–S276. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.04.022>
  6. Dobras D., Bruschi S., Simonetto E., Rutkowska-Gorczyca M., Ghiotti A. The effect of direct electric current on the plastic behavior of AA7075 aluminum alloy in different states of hardening. *Materials*. 2021, vol. 14, no. 1, article 73. <https://doi.org/10.3390/ma14010073>
  7. Fan R., Magargee J., Hu P., Cao J. Influence of grain size and grain boundaries on the thermal and mechanical behavior of 70/30 brass under electrically-assisted deformation. *Materials Science and Engineering: A*. 2013, vol. 574, pp. 218–225. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.02.066>
  8. Xie H.-y., Wang Q., Peng F., Liu K., Dong X.-h., Wang J.-f. Electroplastic effect in AZ31B magnesium alloy sheet through uniaxial tensile tests. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2015, vol. 25, no. 8, pp. 2686–2692. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(15\)63892-4](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(15)63892-4)
  9. Yang D., Conrad H. Plastic deformation of fine-grained Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in the presence of an electric field. *Scripta Materialia*. 1999, vol. 41, no. 4, pp. 397–401. [https://doi.org/10.1016/S1359-6462\(99\)00126-8](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(99)00126-8)
  10. Conrad H., Yang D. Influence of an electric field on the plastic deformation of fine-grained MgO at high homologous temperatures. *Acta Materialia*. 2000, vol. 48, no. 16, pp. 4045–4052. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(00\)00203-2](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(00)00203-2)
  11. Yakovlev A.V., Fedorov V.A. Manifestation of electroplastic effect in metal glasses. *Vektor nauki Tol'yatinskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2013, no. 3, pp. 99–102. (In Russ.).
  12. Pluzhnikova T.N., Fedorov V.A., Yakovlev A.V., Pluzhnikov S.N., Fedotov D.Y. Changing of mechanical characteristics of Co-based amorphous alloy and Fe-based nano-crystalline alloy in the hydrogenous medium under the influence of impulse electric current. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019, vol. 1400, no. 5, article 055031. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1400/5/055031>
  13. Zhu Y., Lai W. Effects of electropulsing induced microstructural changes on THz-reflection and electrical conductivity of Al-doped ZnO thin-films. *Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology*. 2016, vol. 6, no. 3, pp. 106–117. <https://doi.org/10.4236/jsemat.2016.63010>
  14. Gennari C., Pezzato L., Simonetto E., Gobbo R., Forzan M., Calliari I. Investigation of electroplastic effect on four grades of duplex stainless steels. *Materials*. 2019, vol. 12, no. 12, article 1911. <https://doi.org/10.3390/ma12121911>
  15. Breda M., Michieletto F., Beridze E., Gennari C. Experimental study on electroplastic effect in AISI 316L austenitic stainless steel. *Applied Mechanics and Materials*. 2015, vol. 792, pp. 568–571. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.792.568>
  16. Zeng Z., He J., Xiang Z., Sun Q., Wu Y., Wang S. Embrittlement of 316L stainless steel in electropulsing treatment. *Journal Materials Research and Technology*. 2020, vol. 9, no. 5, pp. 10669–10678. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.07.064>
  17. Stolyarov V.V., Klyatskina E.A., Terentyev V.F. Suppression of TRIP effect in metastable steel by electrical current. *Letters on Materials*. 2016, vol. 6, no. 4, pp. 355–359. <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2016-4-355-359>

18. Liu X., Lan S., Ni J. Experimental study of electro-plastic effect on advanced high strength steels // *Materials Science and Engineering: A*. 2013. Vol. 582. P. 211–218.  
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.03.092>
19. Liu X., Lan S., Ni J. Electrically assisted friction stir welding for joining Al 6061 to TRIP 780 steel // *Journal of Materials Process Technology*. 2015. Vol. 219. P. 112–123.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.12.002>
20. Kim M.-J., Yoon S., Park S., Jeong H.-J., Park J.-W., Kim K., Jo J., Heo 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 // *Applied Materials Today*. 2020. Vol. 21. Article 100874.  
<https://doi.org/10.1016/j.apmt.2020.100874>
18. Liu X., Lan S., Ni J. Experimental study of electro-plastic effect on advanced high strength steels. *Materials Science and Engineering: A*. 2013, vol. 582, pp. 211–218.  
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.03.092>
19. Liu X., Lan S., Ni J. Electrically assisted friction stir welding for joining Al 6061 to TRIP 780 steel. *Journal of Materials Process Technology*. 2015, vol. 219, pp. 112–123.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.12.002>
20. Kim M.-J., Yoon S., Park S., Jeong H.-J., Park J.-W., Kim K., Jo J., Heo 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. *Applied Materials Today*. 2020, vol. 21, article 100874.  
<https://doi.org/10.1016/j.apmt.2020.100874>

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Владимир Владимирович Столяров**, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН  
**ORCID:** 0000-0001-7604-3961  
**E-mail:** vlstol@mail.ru

**Vladimir V. Stolyarov**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Chief Researcher, Mechanical Engineering Research Institute, Russian Academy of Sciences  
**ORCID:** 0000-0001-7604-3961  
**E-mail:** vlstol@mail.ru

Поступила в редакцию 24.03.2022  
После доработки 29.03.2022  
Принята к публикации 04.04.2022

Received 24.03.2022  
Revised 29.03.2022  
Accepted 04.04.2022