

**Оригинальная статья**

УДК 669.620.172.2

**АНОМАЛЬНЫЙ ЭФФЕКТ УПРОЧНЕНИЯ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ,  
СОПРОВОЖДАЕМОМ ИМПУЛЬСНЫМ ТОКОМ**

**В. В. Столяров**

**Институт машиноведения РАН (Россия, 101990, Москва, Малый Харитоньевский пер., 4)**

**Аннотация.** Работа посвящена изучению внешних воздействий на деформационное поведение металлических материалов. На основе литературных источников кратко рассмотрены эффекты, сопровождающие прохождение импульсного тока и связанные с ними структурные изменения в металлах и сплавах. Особая роль во вкладе каждого эффекта принадлежит виду (постоянный, импульсный) и режимам (плотность, скважность) тока, а также природе материала. Представлены результаты собственных исследований взаимодействия импульсного тока большой скважности ( $Q \geq 10^3$ ) и пластической деформации квазистатическим растяжением в материалах разной физической природы: чистые металлы (титан и алюминий), сплавы с памятью формы TiNi с обратимым мартенситным превращением (стехиометрического и застехиометрического составов), феррито-перлитная (Ст3) и нержавеющая аустенитная (0X18H10T) стали. Используется импульсный ток плотностью выше критической и большой скважности, позволяющий наблюдать электропластический эффект в виде скачков напряжения при минимальном тепловом эффекте. В отличие от известного классического проявления электропластического эффекта в виде снижения напряжений течения и повышения пластичности демонстрируется проявление аномального упрочнения от нескольких десятков до сотен МПа. Предполагается, что причинами видимых эффектов являются внешние и внутренние факторы: высокая скважность тока, термомеханическое циклирование, смена дислокационного механизма деформации, мартенситное превращение, измельчение структуры, растворение частиц избыточных фаз. При снижении скважности (повышении частоты импульсного тока до  $10^3$  Гц) и переходе от одиночных импульсов тока к многоимпульсному току эффекты упрочнения на этих же материалах исчезают и заменяются традиционным снижением напряжений течения из-за теплового эффекта тока.

**Ключевые слова:** импульсный ток, скважность, растяжение, упрочнение, титан, алюминий, сталь, сплавы

**Для цитирования:** Столяров В.В. Аномальный эффект упрочнения при растяжении, сопровождаемом импульсным током // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2022. № 3 (41). С. 11 – 17.

**Original article**

**ANOMALOUS STRENGTHENING EFFECT IN TENSION  
ACCOMPANIED BY IMPULSE CURRENT**

**V. V. Stolyarov**

**Mechanical Engineering Research Institute of Russian Academy of Sciences (4 M. Kharitonyevskiy per., Moscow, 101990, Russian Federation)**

**Abstract.** The work is related to the study of external influences on the deformation behavior of metallic materials. On the basis of literary sources, the effects accompanying the passage of a pulsed current and related structure changes in the metals and alloys are briefly considered. A special role in the contribution of each effect belongs to the current mode (direct, pulse) and regimes (density, off-duty factor), as well to the material. The results of our own studies of the interaction of pulsed current with a large off-duty factor ( $Q \geq 10^3$ ) and plastic deformation by quasi-static tension in materials of different physical nature are presented: pure metals (titanium and aluminum), shape memory TiNi alloys with reversible martensitic transformation

(stoichiometric and behind stoichiometric composition), ferrite-pearlitic (ST3) and stainless austenitic (0Kh18N10T) steels. A pulsed current with a density above the critical and high off-duty factor is used, which makes it possible to observe the electroplastic effect in the form of stress drops with a minimum thermal effect. In contrast to the well-known classical manifestation of the electroplastic effect in the form of a decrease in flow stresses and an increase in plasticity, a manifestation of anomalous strengthening from several tens to hundreds of MPa is demonstrated. It is assumed that the reasons of visible effects are external and internal factors - high off-duty factor, thermomechanical cycling, change in the dislocation mechanism of deformation, martensitic transformation, structure refinement, dissolution of particles of excess phases. With a decrease in the off-duty factor (increasing the frequency of the pulsed current to  $10^3$  Hz) and transition from single pulse to multi-pulse current, the hardening effects are replaced by the traditional decrease in flow stresses due to the thermal effect of the current.

**Keywords:** pulse current, off-duty ratio, tension, strengthening, titanium, aluminum, steels, shape memory alloys

**For citation:** Stolyarov V.V. Anomalous strengthening effect in tension accompanied by impulse current. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2022, no. 3 (41), pp. 11 – 17. (In Russ.).

### **Введение**

Электропластический эффект (ЭПЭ) – известное явление, обнаруженное более полувека назад [1]. Традиционно ЭПЭ проявляется в сопровождаемых током снижении напряжений течения и увеличении пластичности при использовании разных схем деформации [2 – 8]. В настоящей работе под ЭПЭ понимаются все сопутствующие эффекты, связанные с импульсным током: тепловой, скин, пинч, магнито-пластический эффекты, вибрация и другие. Практическая значимость ЭПЭ обусловлена возможностью исключить промежуточные этапы отжига и деформации в процессах металлообработки. Научное значение ЭПЭ связано с необходимостью понимания физических механизмов пластической деформации, взаимодействующей с электрическим током.

Ранее было показано влияние вида тока [9], режимов тока [10], сопровождающего теплового эффекта [11] и самого материала [12] на механические свойства металла. В большинстве этих исследований наблюдались разупрочнение материала и увеличение пластичности до разрушения. Одной из первых работ, в которой обнаружено упрочнение материала под влиянием импульсного тока, было исследование в сплавах с памятью формы TiNi [13]. В работе [14] авторы также наблюдали упрочнение в крупнозернистом ( $d = 80$  мкм) сплаве Ti – 7 % Al (атом.), которое связано с изменением механизма деформации скольжением на двойникование и соответствующим переползанием дислокаций. Упрочнение, вызванное электроимпульсной обработкой (без деформации), наблюдалось в малоуглеродистых и феррито-перлитных сталях [15, 16].

Электропластический эффект был исследован во многих чистых металлах (цинк, кадмий, свинец, олово, титан, медь) и термически стабильных сплавах на основе титана (Ti64), магния (AZ31), алюминия (AA6000 и AA7000), меди (латунь), железа (аустенитные стали). Во всех случаях деформация растяжением в присутствии тока сопровождалась

либо скачками напряжения вниз, либо снижением напряжений течения при плотности тока выше критической [2]. Это практически важное свойство тока было широко использовано в практике металлообработки, а также показана его эффективность для подавления прерывистой деформации (эффект Портевена-Ле Шателье) в алюминиевых сплавах АМгб [17]. Тем не менее оказалось, что в ряде случаев могут наблюдаться аномальные эффекты упрочнения, вызванные специальными режимами тока или природой исследуемых материалов. Особый интерес представляют термически нестабильные сплавы, в которых возможны структурно-фазовые превращения в процессе нагрева или деформации.

Целью настоящей работы является демонстрация нетипичного (аномального) деформационного поведения при растяжении в сопровождении импульсного тока высокой скважности в материалах различной природы.

### **Исследуемые материалы**

В настоящей работе исследовали материалы: чистые металлы (титан и алюминий), сплавы с памятью формы на основе TiNi, стали. Титан разной чистоты (BT1-0 / BT1-00) применяли в виде проволоки диаметром 1 мм, с размером зерен 20 мкм. Образцы алюминия представляли собой монокристаллические пластины, полученные в условиях невесомости. Изучали закаленные крупнозернистые ( $d = 20$  мкм) сплавы Ti<sub>49,3</sub>Ni<sub>50,7</sub> и Ti<sub>50</sub>Ni<sub>50</sub> (образцы в форме листа). Низкоуглеродистую феррито-перлитную сталь Ст3 использовали в виде волоченной проволоки диаметром 1,5 мм, а нержавеющую сталь 0X18N10T – в форме полос. Все материалы, кроме стальной проволоки, находились в отожженном крупнозернистом состоянии. Поскольку все образцы для механических испытаний на растяжение имели разные рабочие размеры  $L_{\text{раб}}$ , то для адекватного сравнения пластичности

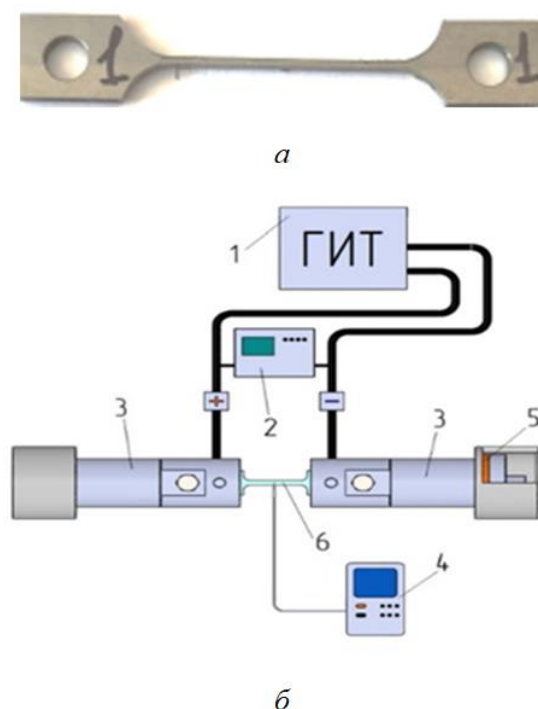


Рис. 1. Вид плоского образца (а) и схема подвода тока к зажимам (б):  
1 – генератор импульсного тока (ГИТ); 2 – осциллограф; 3 – образец; 4 – термопара; 5 – изоляция;  
6 – зажимы испытательной машины

Fig. 1. View of a flat sample (a) and scheme of current supply to the terminals (б):  
1 – pulse current generator; 2 – oscilloscope; 3 – sample; 4 – thermocouple; 5 – insulation; 6 – clamps of testing machine

значения относительного удлинения до разрушения были приведены к единой расчетной длине  $L_0 = 25$  мм. Для образцов из сплавов TiNi ввиду использования микрообразцов расчетная длина  $L_0$  составляла 10 мм. Форма образцов для испытаний листовых материалов показана на рис. 1, а.

Испытания на растяжение проводились при комнатной температуре и скорости 1 мм/мин на горизонтальной машине ИР 5081-20 с использованием одиночных импульсов тока большой скажности, которые вводили одновременно с началом растяжения. Плотность тока  $j$  (от 100 до 2600 А/мм<sup>2</sup>), длительность импульса  $\tau$  (от 100 до 1000 мкс) и скажность  $Q$  (более  $10^3$ ) варьировали в соответствии с удельным электросопротивлением и теплопроводностью исследуемых материалов таким образом, чтобы нагрев образца за время растяжения был минимальным, а скачки напряжения наблюдались визуально. Температуру образца контролировали термопарой и инфракрасной камерой. Расхождение измеренных температур не превышало  $\pm 5$  °С.

На рис. 2 показаны кривые напряжение – деформация технически чистого титана BT1-0, BT1-00 (рис. 2, а, б) (одиночные импульсы тока,  $j = 250$  А/мм<sup>2</sup>,  $Q = 10000$ ) и монокристаллического алюминия (рис. 2, в) без тока (кривые 1) и

при приложении тока в форме одиночных импульсов (кривые 2).

На кривых 2 наблюдаются скачки напряжения с разной для титана (до 40 МПа) и алюминия (до 5 МПа) амплитудой, соответствующие каждому импульсу тока. Видно, что введение импульсов тока во всех материалах привело к упрочнению: повышению предела прочности на 20 и 4 МПа соответственно для титана и алюминия по сравнению с образцами, испытанными без тока. Относительное удлинение образцов из BT1-0 и монокристаллического алюминия также повысилось на 15 и 30 % соответственно, а образцов BT1-00 не изменилось. Характерной особенностью кривых при наложении тока является высокое равномерное удлинение без формирования шейки. Отметим, что температуры образцов при растяжении с током и без тока практически не отличались от комнатной.

Интерпретация наблюдаемого упрочнения в чистых металлах без структурных исследований является наиболее трудной, поскольку никаких фазовых превращений не происходит. Можно предположить, что упрочнение связано с малоцикловой усталостью, вызванной импульсным током. В результате термомеханического циклирования накапливаются внутренние напряжения. Заслуживает внимания объяснение, связанное с изменением механизма деформации сколь-

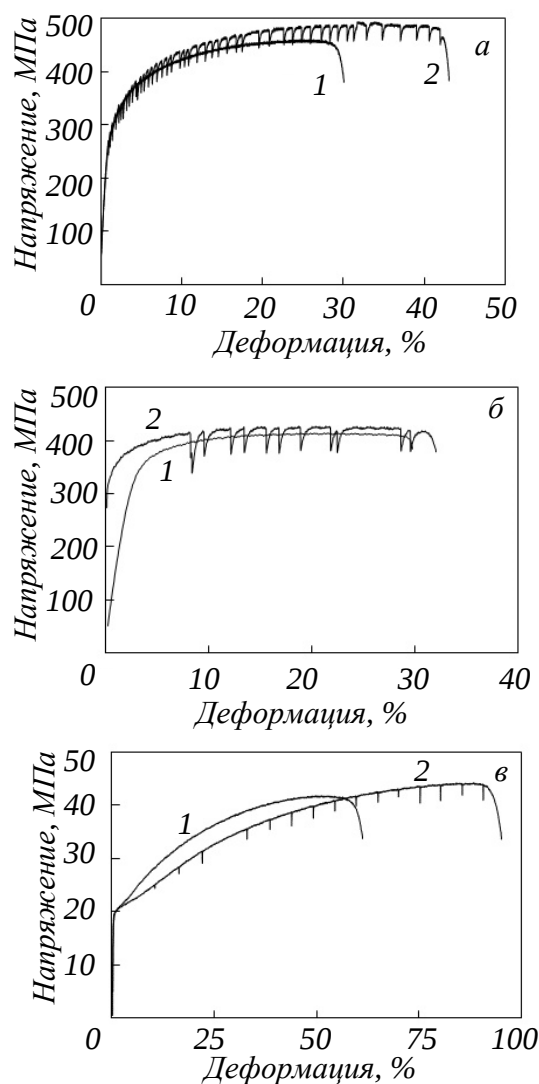


Рис. 2. Кривые напряжение – деформация при растяжении без тока (1) и при приложении тока (2) для титана VT1-0 (а), VT1-00 (б) (проволока диаметром 1 мм) и монокристаллического алюминия (в) (одиночные импульсы тока; для VT1-0, VT1-00  $j = 250 \text{ A/mm}^2$ ; для алюминия  $j = 450 \text{ A/mm}^2$ )

Fig. 2. Tensile stress-strain curves without current (1) and at application of current (2) for titanium VT1-0 (a), VT1-00 (б) (wire of 1 mm diameter) and single-crystal aluminum (в) (single current pulses; for VT1-0, VT1-00  $j = 250 \text{ A/mm}^2$ ; for aluminum  $j = 450 \text{ A/mm}^2$ )

жением на переползание дислокаций, способствующего двойникованию и упрочнению. Такой механизм был предложен для сплава Ti – 7 % Al (атом.) в работе [14]. Авторы показали наличие существенного упрочнения при растяжении в сопровождении импульсного тока большой скважности и подтвердили это структурными исследованиями.

Рассмотрим деформационное поведение сплавов системы TiNi. Наиболее ярко эффект упрочнения наблюдался в аустенитном сплаве системы  $\text{Ti}_{49,3}\text{Ni}_{50,7}$  (рис. 3, а).

Видно, что кривая 2 (с одиночными импульсами тока) в начале деформации располагается на 200 МПа выше по сравнению с кривой 1 (без тока). С увеличением деформации эффект упрочнения уменьшается и исчезает. Отметим, что температура образца в момент прохождения импульса повышалась до 50 °С. Однако в эквиатомном сплаве близ-

кого состава  $\text{Ti}_{50}\text{Ni}_{50}$  с мартенситной структурой эффект упрочнения отсутствовал (рис. 3, б). Из-за пластинчатой структуры мартенсита скачки напряжения вниз имеют малую амплитуду. Столь разное поведение сплавов при растяжении с током связано с их фазовым составом при комнатной температуре и температурами начала обратного мартенситного превращения  $A_s$ , которые в крупнозернистых сплавах  $\text{Ti}_{49,3}\text{Ni}_{50,7}$  и  $\text{Ti}_{50}\text{Ni}_{50}$  сильно отличаются. В аустенитном сплаве деформационный мартенсит при незначительном нагреве током превращается в аустенит и, как следствие, упрочняет сплав [14]. В мартенситном сплаве незначительный нагрев не приводит к обратному превращению и упрочнение отсутствует.

На рис. 4 показаны деформационные кривые двух типов сталей: феррито-перлитной стали Ст3 и нержавеющей стали 0Х18Н10Т.

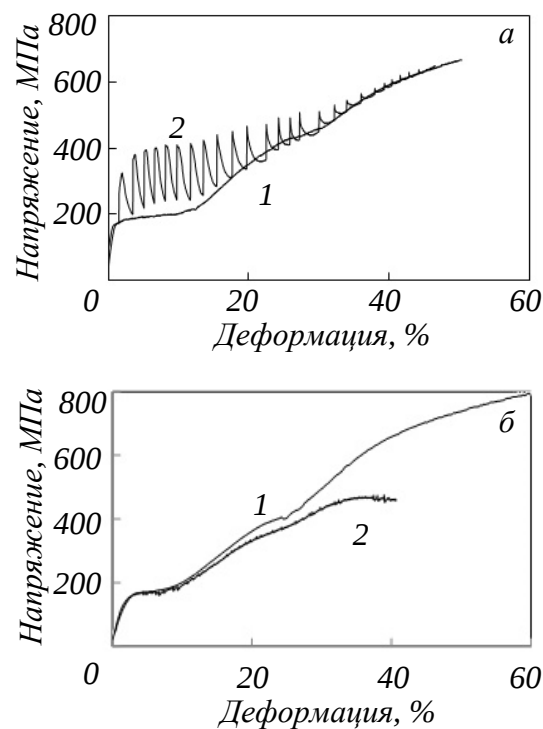


Рис. 3. Кривые напряжение – деформация при растяжении без тока (1) и при наложении тока (2):  
 $a - \text{Ti}_{49,3}\text{Ni}_{50,7}$ ,  $j = 500 \text{ A/mm}^2$ ,  $\tau = 100 \text{ мкс}$  ( $Q = 140000$ );  $b - \text{Ti}_{50}\text{Ni}_{50}$ ,  $j = 500 \div 1500 \text{ A/mm}^2$ ,  $\tau = 1000 \text{ мкс}$   
 Fig. 3. Tensile stress-strain curves without current (1) and with current (2):  
 $a - \text{Ti}_{49,3}\text{Ni}_{50,7}$ ,  $j = 500 \text{ A/mm}^2$ ,  $\tau = 100 \text{ μs}$ ;  $b - \text{Ti}_{50}\text{Ni}_{50}$ ,  $j = 500 \div 1500 \text{ A/mm}^2$ ,  $\tau = 1000 \text{ μs}$

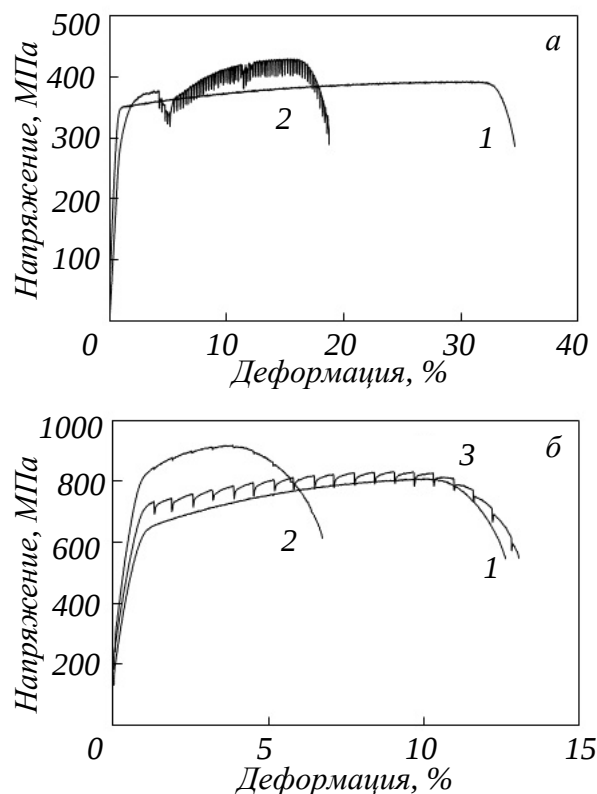


Рис. 4. Кривые напряжение – деформация при растяжении сталей Ст3 (а) и Х18Н10Т (б):  
 1 – без тока; 2, 3 – с током (на поз. а кривая 2:  $j = 115 \text{ A/mm}^2$ ,  $\tau = 1000 \text{ мкс}$ , температура  $\leq 50 \text{ °C}$ ; на поз. б кривая 2:  $j = 820 \text{ A/mm}^2$ ,  $\tau = 250 \text{ мкс}$ ; кривая 3:  $j = 2600 \text{ A/mm}^2$ ,  $\tau = 1000 \text{ мкс}$ ,  $54 \text{ °C}$ ; на вкладке (поз. а) – участок растяжения в увеличенном масштабе)  
 Fig. 4. Tensile stress-strain curves for steels St3 (a) and Cr18Ni10T (b):  
 1 – without current; 2, 3 – with current (on item a curve 2:  $j = 115 \text{ A/mm}^2$ ,  $\tau = 1000 \text{ μs}$ , temperature  $\leq 50 \text{ °C}$ ; on item б curve 2:  $j = 820 \text{ A/mm}^2$ ,  $\tau = 250 \text{ μs}$ ; curve 3:  $j = 2600 \text{ A/mm}^2$ ,  $\tau = 1000 \text{ μs}$ ,  $54 \text{ °C}$ ; on tab (item a) – tensile section in enlarged scale)

Здесь, как и в приведенных выше материалах, введение импульсного тока привело в процессе растяжения как к разной интенсивности упрочнения, так и к существенному снижению пластичности. В отличие от предыдущих примеров в волооченной неотожженной проволоке из стали Ст3 при растяжении импульсный ток вводили на стадии пластической деформации (рис. 4, а). В момент введения ток сначала вызвал резкое снижение напряжений течения на коротком участке деформации, а затем продолжительную стадию упрочнения до 30 – 40 МПа (рис. 4, а). Похожий эффект упрочнения при электропульсировании (без деформации) наблюдался в малоуглеродистой стали [15] и феррито-перлитной стали [16]. Авторы объяснили упрочнение в феррито-перлитной стали структурным измельчением под влиянием тока и предложили соответствующие механизмы: повышенная скорость зарождения в малоуглеродистой стали и сфероидизация цементита в перлитной составляющей. В стали Ст3 не исключается конкуренция действующих механизмов: динамическая рекристаллизация (начальное разупрочнение из-за повышенной плотности дислокаций в феррите) и малоцикловая усталость.

Более сильное (100 – 150 МПа) упрочнение наблюдалось в аустенитной нержавеющей стали (рис. 4, б, кривая 2), когда применили высокую скважность (низкая частота) и низкую плотность тока, при которой амплитуда скачков была слабо видима. Меньший (60 – 70 МПа) эффект упрочнения наблюдался при большей плотности тока и меньшей скважности (рис. 4, б, кривая 3). Упрочнение в этом случае при электро-пульсировании может быть связано с растворением в аустените частиц вторых фаз, обогащенных хромом или никелем [18]. Неясной остается роль энергии дефектов упаковки в дуплексных феррито-аустенитных сталях [19]. В настоящих исследованиях аустенитно-мартенситной ТРИП стали, дуплексной феррито-мартенситной стали и стали 45 подобный эффект не наблюдался. В упрочняемых термической обработкой алюминиевом (АМг6) и медном (БрАЖ9-4) сплавах эффекты упрочнения наблюдались при большой скважности импульсного тока.

### **Выводы**

Все приведенные примеры в совершенно различных по природе сплавах свидетельствуют о возможности фиксации не только эффектов разупрочнения, но заметных эффектов упрочнения под действием импульсного тока. Условием упрочнения является высокая скважность тока, которая позволяет снизить влияние теплового эффекта и выявить структурные причины, к которым можно отнести динамическое деформационное старение; мартенситные превращения, вызванные температурой или деформацией; замену дислокационного механизма скольжения на переползание; динамическую рекристаллизацию;

двойникование; измельчение структуры; дефекты упаковки. Эти структурные изменения требуют экспериментального подтверждения путем тщательного наблюдения тонкой структуры.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Troitskii O.A. Electromechanical effect in metals // JETP Letters. 1969. No. 1. P. 18–22.
2. Электростимулированная пластичность металлов и сплавов / В.Е. Громов, Л.Б. Зуев, Э.В. Козлов, В.Я. Целлермаер. М.: Недра, 1996. 280 с.
3. Conrad H. Effects of electric current on solid-state phase transformation in metals // Mater. Sci. Eng. A. 2000. Vol. 287. No. 227. P. 276–287.
4. Perkins T.A., Kronenberger T.J., Roth J.T. Metallic Forging Using Electrical Flow as an Alternative to Warm/Hot Working // J. of Manufact. Sci. Eng. 2007. Vol. 129. P. 84–94.
5. Salandro W.A., Bunget C., Mears L. Modeling and quantification of the electroplastic effect when bending stainless steel sheet metal. In: ASME 2010 Conference. 2010. Article 34043.
6. Chun X.U., Ya-Nan L.I., Rao X.H. Effect of electropulsing rolling on mechanical properties and microstructure of AZ31 magnesium alloy // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2014. Vol. 24. P. 3777–3784.
7. Zhou Y., Chen G.Q., Fu X.S., Zhou W.L. Effect of electropulsing on deformation behavior of Ti-6Al-4V alloy during cold drawing // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2014. Vol. 24. P. 1012–1021.
8. Коновалов С.В., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф. Влияние электромагнитных полей и токов на пластическую деформацию металлов и сплавов. Новокузнецк, 2013. 293 с.
9. Lee T., Magargee J., Ng M.K., Cao J. Constitutive analysis of electrically assisted tensile deformation of CP-Ti based on non-uniform thermal expansion, plastic softening and dynamic strain aging // Inter. Journal of Plasticity. 2017. Vol. 94. P. 44–56.
10. Okazaki K., Kagawa M., Conrad H. Additional results on the electroplastic effect in metals // Scr. Metall. 1979. Vol. 13. P. 277–280.
11. Okazaki K., Kagawa M., Conrad H. An Evaluation of the Contributions of Skin, Pinch and Heating Effects to the Electroplastic Effect in Titanium // Mater. Sci. Eng. 1980. Vol. 45. P. 109–116.
12. Rudolf C., Goswami R., Kang W., Thomas J. Effects of electric current on the plastic deformation behavior of pure copper, iron, and titanium // Act. Mater. 2021. Vol. 209. Article 116776.
13. Stolyarov V. Deformation behavior at rolling and tension under current in TiNi alloy. In: ESOMAT 2009. Article 06033.
14. Zhao S., Zhang R., Chong Y., et al. Defect reconfiguration in a Ti–Al alloy via Electroplas

- ticity // *Nat. Mater.* 2021. Vol. 20. P. 468–472.
15. Zhou Y., Zhang W., Wang B., He G., Guo J. Grain refinement and formation of ultrafine-grained microstructure in a low-carbon steel under electropulsing // *J. Mater. Res.* 2002. Vol. 17. P. 2105–2111.
  16. Rahnama A., Qin R.S. Electropulse-induced microstructural evolution in a ferritic-pearlitic 0.14 % C steel // *Scr. Mater.* 2015. Vol. 96. P. 17–20.
  17. Шибков А.А., Золотов А.Е., Желтов М.А., Денисов А.А., Гасанов М.Ф. Исследование механизмов подавления прерывистой деформации электрическим током // *Кристаллография.* 2015. /Т. 60. № 6. С. 938–949.
  18. Qin R.S., Rahnama A., Lu W.J., Zhang X.F., Elliott-Bowman B. Electropulsed steels // *Materials Science and Technology.* 2014. Vol. 30. P. 1040–1044.
  19. 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. Article 1911.
  10. Okazaki K., Kagawa M., Conrad H. Additional results on the electroplastic effect in metals. *Scr. Metall.* 1979, vol. 13, pp. 277–280.
  11. Okazaki K., Kagawa M., Conrad H. An Evaluation of the Contributions of Skin, Pinch and Heating Effects to the Electroplastic Effect in Titanium. *Mater. Sci. Eng.* 1980, vol. 45, pp. 109–116.
  12. Rudolf C., Goswami R., Kang W., Thomas J. Effects of electric current on the plastic deformation behavior of pure copper, iron, and titanium. *Act. Mater.* 2021, vol. 209, article 116776.
  13. Stolyarov V. Deformation behavior at rolling and tension under current in TiNi alloy. In: *ESOMAT 2009*, article 06033.
  14. Zhao S., Zhang R., Chong Y., et al. Defect reconfiguration in a Ti–Al alloy via Electroplasticity. *Nat. Mater.* 2021, vol. 20, pp. 468–472.
  15. Zhou Y., Zhang W., Wang B., He G., Guo J. Grain refinement and formation of ultrafine-grained microstructure in a low-carbon steel under electropulsing. *J. Mater. Res.* 2002, vol. 17, pp. 2105–2111.
  16. Rahnama A., Qin R.S. Electropulse-induced microstructural evolution in a ferritic-pearlitic 0,14 % C steel. *Scr. Mater.* 2015, vol. 96, pp. 17–20.
  17. Shibkov A.A., Zolotov A.E., Zheltov M.A., Denisov A.A., Gasanov M.F. Investigation of the mechanisms of suppression of intermittent deformation by electric current. *Kristallografiya.* 2015, vol. 60, no. 6, pp. 938–949. (In Russ.).
  18. Qin R.S., Rahnama A., Lu W.J., Zhang X.F., Elliott-Bowman B. Electropulsed steels. *Materials Science and Technology.* 2014, vol. 30, pp. 1040–1044.
  19. 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, article 1911.
- ### REFERENCES
1. Troitskii O.A. Electromechanical effect in metals. *JETP Letters.* 1969, no. 1, pp. 18–22.
  2. Gromov V.E., Zuev L.B., Kozlov E.V., Tsellermaer V.Ya. *Electrostimulated plasticity of metals and alloys.* Moscow: Nedra, 1996, 280 p. (In Russ.).
  3. Conrad H. Effects of electric current on solid-state phase transformation in metals. *Mater. Sci. Eng. A.* 2000, vol. 287, no. 227, pp. 276–287.
  4. Perkins T.A., Kronenberger T.J., Roth J.T. Metallic Forging Using Electrical Flow as an Alternative to Warm/Hot Working. *J. of Manufact. Sci. Eng.* 2007, vol. 129, pp. 84–94.
  5. Salandro W.A., Bunget C., Mears L. Modeling and quantification of the electroplastic effect when bending stainless steel sheet metal. In: *ASME 2010 Conference.* 2010, article 34043.
  6. Chun X.U., Ya-Nan L.I., Rao X.H. Effect of electropulsing rolling on mechanical properties and microstructure of AZ31 magnesium alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China.* 2014, vol. 24, pp. 3777–3784.
  7. Zhou Y., Chen G.Q., Fu X.S., Zhou W.L. Effect of electropulsing on deformation behavior of Ti-6Al-4V alloy during cold drawing. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China.* 2014, vol. 24, pp. 1012–1021.
  8. Konovalov S.V., Gromov V.E., Ivanov Yu.F. *Influence of electromagnetic fields and currents on plastic deformation of metals and alloys.* Novokuznetsk, 2013, 293 p. (In Russ.).
  9. Lee T., Magargee J., Ng M.K., Cao J. Constitutive analysis of electrically assisted tensile deformation of CP-Ti based on non-uniform thermal expansion, plastic softening and dynamic strain aging. *Inter. Journal of Plasticity.* 2017, vol. 94, pp. 44–56.
- ### Сведения об авторах
- Владимир Владимирович Столяров**, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник, Институт машиноведения РАН  
**E-mail:** vlstol@mail.ru  
**ORCID:** 0000-0001-7604-3961
- ### Information about the authors
- Vladimir V. Stolyarov**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Chief Researcher, Mechanical Engineering Research Institute of Russian Academy of Sciences  
**E-mail:** vlstol@mail.ru  
**ORCID:** 0000-0001-7604-3961
- Поступила в редакцию 26.07.2022  
 После доработки 07.09.2022  
 Принята к публикации 12.09.2022
- Received 26.07.2022  
 Revised 07.09.2022  
 Accepted 12.09.2022