

РОЛЬ ХИМИЧЕСКОГО И ФАЗОВОГО СОСТАВОВ В ПРОЯВЛЕНИИ ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

Столяров В.В., д.т.н., профессор, главный научный сотрудник (vlstol@mail.ru)

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН
(101990, Россия, Москва, Малый Харитоньевский переулок, 4)

Аннотация. Анализируется природа разнонаправленных скачков напряжения, наблюдаемых на диаграммах напряжение – деформация при растяжении при комнатной температуре с пропуском импульсного тока в сплавах различной физической природы. Обобщены результаты предыдущих исследований проявления электропластического эффекта при прокатке и растяжении в крупнозернистых, ультрамелкозернистых и наноструктурных титановых сплавах с однофазной, двухфазной и интерметаллидной структурой. Электропластическая прокатка позволяет формировать ультрамелкозернистые и наноструктурные состояния, повышает деформируемость и прочность исследованных титановых сплавов ВТ1-0, ВТ6 и TiNi. Показано, что амплитуда и направление скачков напряжений определяются конкуренцией механизмов электропластического эффекта и обратимого мартенситного превращения, а электропластический эффект является структурно-чувствительным свойством. Величина электропластического эффекта уменьшается при измельчении структуры и даже исчезает в нанокристаллическом и аморфном состояниях. Переход из аустенитного в мартенситное состояние способствует повышению деформируемости никелида титана.

Ключевые слова: растяжение, напряжение, прокатка, сплавы, импульсный ток, электропластический эффект, пластическая деформация, наноструктура.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-6-420-423

Одним из методов увеличения технологических и эксплуатационных свойств материалов является метод, основанный на электропластическом эффекте (ЭПЭ) [1 – 11]. Предполагается, что помимо теплового и пинч-эффектов значимый вклад в механизм ЭПЭ вносит взаимодействие потока электронов с дислокациями, что до сих пор является дискуссионным [5, 7, 10, 11]. Большая часть ранних исследований ЭПЭ была выполнена на монокристаллах чистых металлов или однофазных сплавах с крупнозернистой (КЗ) структурой, роль исходной нано- или ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры, влияние легирования и фазовых превращений не исследовали. Недавно было показано, что прокатка с током не только повышает деформируемость, но и обеспечивает формирование УМЗ и (или) наноструктуры в титановых сплавах и ТРИП стали [12 – 14]. В этих же работах выполнены первые оценки величины ЭПЭ в экспериментах по растяжению с введением импульсного и постоянного тока, которые, однако, нуждаются в дополнительном анализе полученных результатов. В этой связи в настоящей работе для расширения представлений о физической природе ЭПЭ обобщаются результаты предыдущих исследований проявления ЭПЭ при прокатке и растяжении в КЗ и УМЗ титановых сплавах ВТ1-0, ВТ6 и TiNi, различных по природе, химическому и структурно-фазовому составам.

Крупнозернистое состояние с размером зерен от 20 до 50 мкм в материалах было получено отжигом

при 700 °С (ВТ1-0, Grade-4); закалкой из β -области или отжигом в двухфазной ($\alpha + \beta$)-области при температуре 900 °С (сплав ВТ6); закалкой с 800 °С в воду ($Ti_{49,3}Ni_{50,7}$ и $Ti_{49,2}Ni_{50,8}$). Наноструктура в никелиде титана (рис. 1, а) и УМЗ структура в сплавах ВТ1-0 и ВТ6 (рис. 1, б, в) получены методом электропластической прокатки (ЭПП) с последующим отжигом. Многопроходная ЭПП выполнена на полосах сечением 2×6 мм с одновременным пропуском однополярного импульсного тока плотностью $j = 80 \div 150$ А/мм², длительностью импульса $(1 \div 10) \cdot 10^{-4}$ с⁻¹ и частотой 10³ Гц; подробности метода описаны в работе [12]. Деформируемость полос оценивали по истинной степени деформации $e = \ln(t_o/t_k)$ (где t_o и t_k – начальная и конечная толщина полосы).

Аттестации структуры и механическим испытаниям были подвергнуты образцы после отжига при температурах 450 и 600 °С, когда происходят заметные структурные изменения: релаксация напряжений, рекристаллизация или старение. Механическое поведение изучали с введением импульсного тока плотностью 1500 А/мм², длительностью 100 и 1000 мкс при скорости растяжения 0,5 мм/мин на горизонтальной машине ИМ-5081 (с применением одиночного и многоимпульсного тока).

Значения истинной деформации крупнозернистых сплавов до разрушения при прокатке с током (e_j) и без тока ($e_j = 0$) приведены ниже:

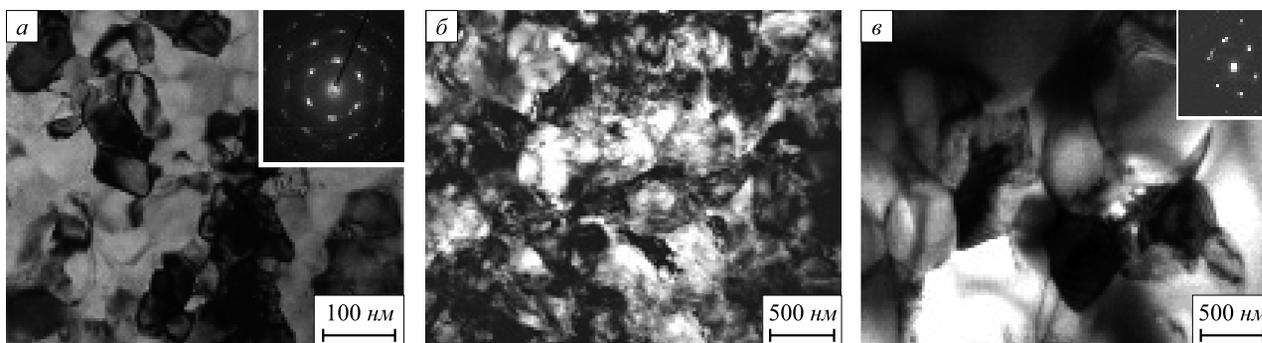


Рис. 1. Микроструктура сплавов, подвергнутых ЭПП и отжигу:
 а – $Ti_{49,4}Ni_{50,6}$, отжиг при 450 °С в течение 1 ч ($e = 1,81$); б – VT1-0, отжиг при 450 °С в течение 1 ч ($e = 1,2$);
 в – VT6, отжиг при 600 °С в течение 1 ч ($e = 1,8$)

Fig. 1. Microstructure of electroplastic rolled alloys subjected to annealing:
 а – $Ti_{49,4}Ni_{50,6}$, $T_a = 450\text{ °C} - 1\text{ h}$ ($e = 1,81$); б – VT1-0, $T_a = 450\text{ °C} - 1\text{ h}$ ($e = 1,2$); в – VT6, $T_a = 600\text{ °C} - 1\text{ h}$ ($e = 1,8$)

Материал	$e_{j=0}$	e_j
Ti (Grade, 0,4 % O)	2,0	2,3
Ti (VT1-0, 0,2 % O)	2,3	3,2
$Ti_{49,2}Ni_{50,8}$ (аустенит)	0,1	1,2
$Ti_{50,0}Ni_{50,0}$ (мартенсит)	0,6	3,6
VT6 ($\alpha + \beta$)	0,55	2,4
VT6 (β)	0,35	1,9

Преимущество прокатки с током зависит от химического и фазового составов сплава. В однофазных сплавах (титан и никелид титана) определяющим является влияние содержания примесей или легирующего элемента. Так, деформируемость чистого титана с током в КЗ состоянии повышается с уменьшением содержания кислорода (Grade-4 и VT1-0). Аналогично уменьшение содержания никеля в никелиде титана повышает его деформируемость ($Ti_{50,0}Ni_{50,0}$ и $Ti_{49,2}Ni_{50,8}$). Переход из аустенитного в мартенситное состояние также способствует повышению деформируемости никелида титана. Известно, что в сплаве с исходной мартенситной структурой наряду с механическим двойникованием В19 фазы может происходить дополнительное образование двойников В2 фазы в процессе обратного мартенситного превращения [15], что вносит дополнительный вклад в деформируемость. В сплаве VT6 деформируемость связана с морфологией вторых фаз. В случае равноосной зеренной ($\alpha + \beta$)-структуры деформируемость выше по сравнению с деформируемостью мартенситных игл β' -фазы. Отметим, что аналогичные зависимости для исследованных сплавов наблюдаются и при прокатке без пропуска тока.

На характер деформационного упрочнения в процессе ЭПП при одинаковой плотности тока влияет дисперсность сплава (рис. 2). Сплавы в КЗ состоянии испытывают упрочнение (кривые 1 и 3), тогда как чистый титан в УМЗ состоянии проявляет разупрочнение с ростом деформации (кривая 2). Разупрочнение сплава VT6 в процессе ЭПП наблюдали и в работе [13]. Авто-

ры связывают этот факт с динамической рекристаллизацией, температура которой уменьшается с измельчением структуры и может быть близкой к температуре деформации, особенно при высоких плотностях тока.

Механическое поведение сплавов после ЭПП и постдеформационного отжига представлено диаграммами растяжения (рис. 3, 4).

Отличительной особенностью кривых напряжение – перемещение при воздействии импульсным током является появление скачков напряжения, каждый из которых соответствует одиночному импульсу тока.

Направление (вверх, вниз) и амплитуда скачка напряжения различны и зависят от химического состава сплава, его структурного состояния. При наличии фазового превращения при деформации никелида титана (TiNi) наблюдаются оба вида скачков напряжения (рис. 3, а), при отсутствии фазового превращения

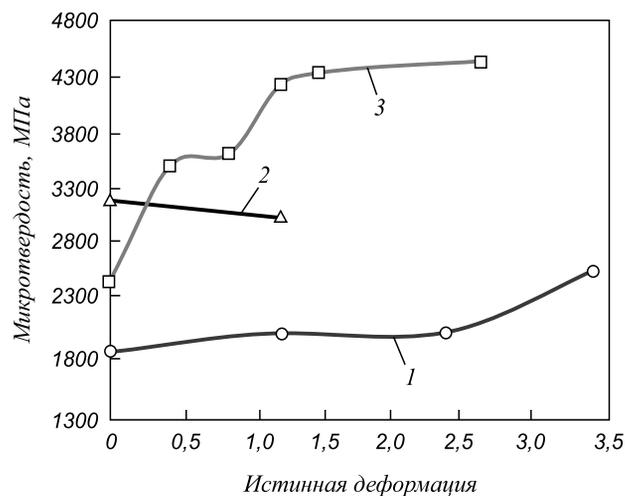


Рис. 2. Зависимость микротвердости КЗ сплава VT1-0 (1), УМЗ сплава VT1-0 (2) и КЗ сплава TiNi (3) от деформации при ЭПП

Fig. 2. Dependence of microhardness on strain degree during electroplastic rolling: coarse grain VT1-0 alloy (1), ultrafine grain VT1-0 (2), coarse grain TiNi alloy (3)

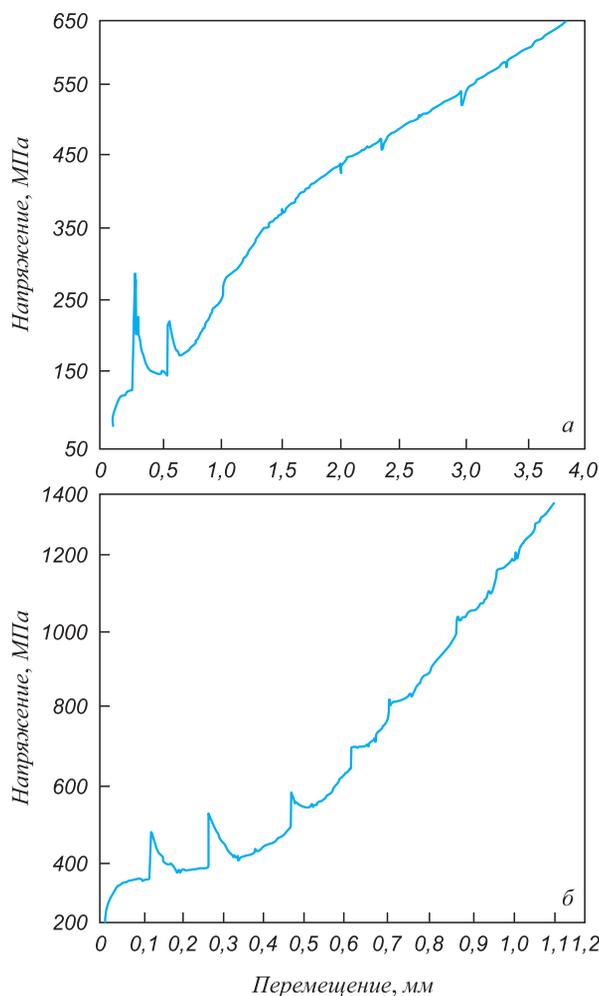


Рис. 3. Кривые растяжения сплава $Ti_{49,3}Ni_{50,7}$ в КЗ (а) и НС (б) состояниях при воздействии одиночными импульсами тока

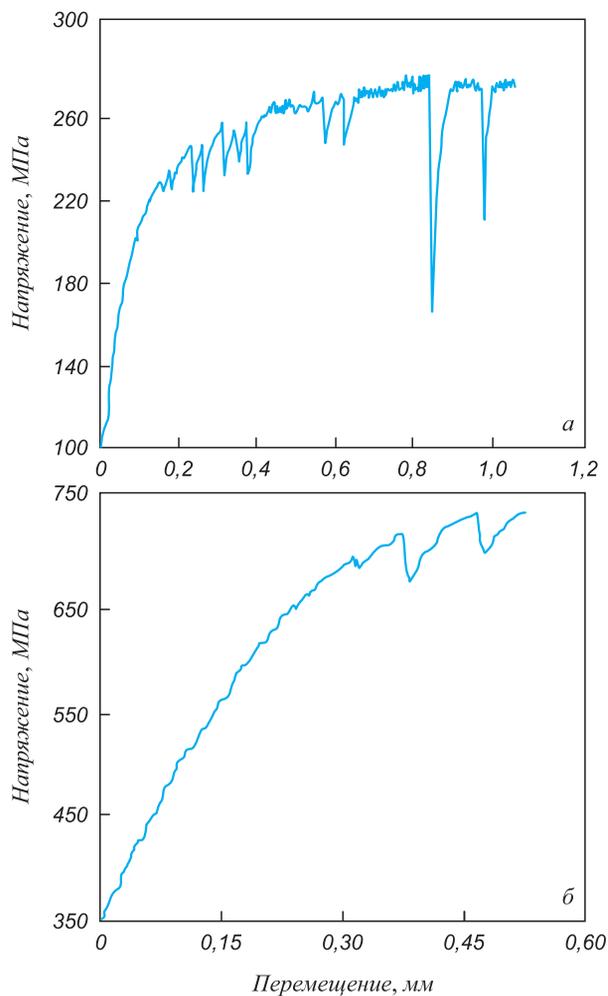


Рис. 4. Диаграммы растяжения КЗ (а) и УМЗ (б) титана при воздействии тока

Fig 3. Stress-displacement tension curves for $Ti_{49,3}Ni_{50,7}$ under single current pulses: coarse grain (a) and nanostructured (b) states

Fig. 4. Stress-displacement tension curves for coarse grain (a) and ultrafine grain (b) of titanium under single pulse current

наблюдаются только скачки вниз (рис. 4). Подробный анализ физической причины скачков свидетельствует о фазовом превращении (скачки вверх) или о действии ЭПЭ (скачки вниз) [1]. Амплитуда скачков напряжения в титане в КЗ состоянии в два раза выше, чем в титане в УМЗ состоянии, что указывает на уменьшение ЭПЭ с уменьшением размера зерен. Аналогичное влияние размерного эффекта структуры на ЭПЭ наблюдается и в никелиде титана: в сплаве в КЗ состоянии размерный эффект присутствует, в НК состоянии – отсутствует (рис. 3). Возможной причиной отсутствия ЭПЭ в никелиде титана в НК состоянии является недостаточно высокая плотность тока, выбранная для этого сплава. Требуется дополнительные исследования ЭПЭ в зависимости от плотности тока.

Выводы. Электропластическая прокатка формирует УМЗ и наноструктурные состояния, повышает деформируемость и прочность исследованных титановых сплавов ВТ1-0, ВТ6 и TiNi. Электропластический эффект является структурно-чувствительным свойством,

проявление которого уменьшается при измельчении структуры и даже исчезает в сплаве в нанокристаллическом состоянии. В сплаве $Ti_{49,3}Ni_{50,7}$ с памятью формы введение тока при растяжении приводит к обусловленным обратимым термоупругим мартенситным превращением дополнительным скачкам напряжения вверх.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Физические основы и технологии обработки современных материалов (теория, технология, структура и свойства) / О.А. Троицкий, Ю.В. Баранов, Ю.С. Авраамов, А.Д. Шляпин / В 2 т. – М. – Ижевск: изд. ин-та комп. техн., 2004. – 590 с.
2. Conrad H. Electroplasticity in metals and ceramics // Mater. Sci. Eng. 2000. A 287. P. 276.
3. Sprecher A.F., Mannan S.L., Conrad H. On the mechanisms for the electroplastic effect in metals // Acta metall. 1986. Vol. 34. No. 7. P. 1145 – 1162.
4. Perkins T.A., Kronenberger T.J., Roth J.T. Metallic Forging Using Electrical Flow as an Alternative to Warm/Hot Working // Journal of Manufacturing Science and Engineering. 2007. Vol. 129. P. 84 – 94.
5. Timsit R.S. Remarks on recent experimental observations of the electroplastic effect // Scr. Metal. 1981. Vol. 15. P. 461 – 464.

6. Magargee J., Morestin F., Cao J. Characterization of Flow Stress for Commercially Pure Titanium Subjected to Electrically Assisted Deformation // *Journal of Engineering Materials and Technology*. 2013. Vol. 135. P. 041003-1-10.
7. Sánchez Egeaa A.J., González Rojasa H.A., Montilla Montana C.A., Echeverri V.K. Effect of electroplastic cutting on the manufacturing process and surface properties // *Journal of Materials Processing Technology*. 2015. Vol. 222. P. 327 – 334.
8. Shibkov A.A., Denisov A.A., Zheltov M.A., Zolotov A.E., Gasanov M.F. The electric current-induced suppression of the Portevin – Le Chatelier effect in Al–Mg alloys // *Materials Science & Engineering A*. 2014. Vol. 610. P. 338 – 343.
9. Bilyk S.R., Ramesh K.T., Wright T.W. Finite deformations of metal cylinders subjected to electromagnetic fields and mechanical forces // *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2005. Vol. 53. P. 525 – 544.
10. Электростимулированная пластичность металлов и сплавов / В.Е. Громов, Л.Б. Зуев, Э.В. Козлов, В.Я. Целлермаер. – М.: Недра, 1996. – 290 с.
11. Батаронов И.Л. Механизмы электропластичности // Соросовский образовательный журнал. 1999. С. 93 – 99.
12. Столяров В.В., Угурчиев У.Х., Трубитцына И.Б., Прокошкин С.Д., Прокофьев Е.А. Интенсивная электропластическая деформация сплава TiNi // ФТВД. 2006. Т. 16. № 4. С. 48 – 51.
13. Федоткин А.А., Меденцов В.Э., Столяров В.В. Структурно-фазовые превращения при растяжении с током // Изв. вуз. Черная металлургия. 2012. № 8. С. 47 – 52.
14. Терентьев В.Ф., Столяров В.В., Слизов А.К., Сиротинкин В.П., Рыбальченко О.В. Особенности электропластического деформирования трип-стали // Деформация и разрушение материалов. 2015. № 2. С. 35 – 41.
15. Сурикова Н.С., Тюменцев А.Н., Евтушенко О.В. Мартенситное превращение под напряжением в [001] кристаллах никелида титана и его связь с механическим двойникованием В2-фазы // Изв. вуз. Физика. 2009. Т. 52. № 6. С. 58.

Поступила 20 октября 2014 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. VOL. 59. NO. 6, PP. 420–423.

THE ROLE OF CHEMICAL AND PHASE COMPOSITION IN ELECTROPLASTIC EFFECT OCCURRENCE

V.V. Stolyarov

Blagonravov Institute of Machines Science of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. The nature of differently directed stress jumps, observed at stress-deformation diagrams at tension at room temperature subjected to pulse current in alloys of different physical nature was analyzed. The results of previous studies of electroplastic effect occurrence during rolling and tension in coarse-grain, ultrafine-grain and nanostructured titanium alloys with single-phase, two-phase and intermetallic structure were summarized. Electroplastic rolling allows forming ultrafine-grain and nanostructured states, increases deformability and strength of VT1-0, VT6, TiNi titanium alloys. It is shown that amplitude and direction of stress jumps are defined by competition of electroplastic effect (EPE) and phase transformation, and EPE is structurally-sensitive property. EPE decreases at structure refinement and even disappears in nanocrystalloid and amorphous states. Martensite transformation leads to deformability enhancement of TiNi.

Keywords: tension, stress, rolling, alloys, pulse current, electroplastic effect, plastic deformation, nanostructure.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-6-420-423

REFERENCES

1. Troitskii O.A., Baranov Yu.V., Avraamov Yu.S., Shlyapin A.D. *Fizicheskie osnovy i tekhnologii obrabotki sovremennykh materialov (teoriya, tekhnologiya, struktura i svoystva). V 2 t.* [Physical basics of advanced materials processing (theory, technology, structure and properties). In 2 vols.]. Moscow – Izhevsk: izd. in-ta komp. tekhn., 2004. 590 p. (In Russ.).
2. Conrad H. Electroplasticity in metals and ceramics. *Mater. Sci. Eng. A* 287, 2000, pp. 276–287.
3. Sprecher A.F., Mannan S.L., Conrad H. On the mechanisms for the electroplastic effect in metals. *Acta metall.* 1986, vol. 34, no. 7, pp. 1145–1162.
4. Perkins T.A., Kronenberger T.J., Roth J.T. Metallic Forging Using Electrical Flow as an Alternative to Warm/Hot Working. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2007, vol. 129, pp. 84–94.
5. Timsit R.S. Remarks on recent experimental observations of the electroplastic effect. *Scr. Metal.* 1981, vol. 15, pp. 461–464.
6. Magargee J., Morestin F., Cao J. Characterization of Flow Stress for Commercially Pure Titanium Subjected to Electrically Assisted Deformation. *Journal of Engineering Materials and Technology*. 2013, vol. 135, pp. 041003-1-10.
7. Sánchez Egeaa A.J., González Rojasa H.A., Montilla Montana C.A., Echeverri V.K. Effect of electroplastic cutting on the manufacturing process and surface properties. *Journal of Materials Processing Technology*. 2015, vol. 222, pp. 327–334.
8. Shibkov A.A., Denisov A.A., Zheltov M.A., Zolotov A.E., Gasanov M.F. The electric current-induced suppression of the Portevin – Le Chatelier effect in Al–Mg alloys. *Materials Science & Engineering A*. 2014, vol. 610, pp. 338–343.
9. Bilyk S.R., Ramesh K.T., Wright T.W. Finite deformations of metal cylinders subjected to electromagnetic fields and mechanical forces. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2005, vol. 53, pp. 525–544.
10. Gromov V.E., Zuev L.B., Kozlov E.V., Tzellermaer V.Ya. *Elektrostimulirovannaya plastichnost' metallov i spлавov* [Electrostimulated plasticity of metals and alloys]. Moscow: Nedra, 1996, 290 p. (In Russ.).
11. Bataronov I.L. Mechanisms of electroplasticity. *Sorosovskii obrazovatel'nyi zhurnal*. 1999, pp. 93–99. (In Russ.).
12. Stolyarov V.V., Ugurchiev U.Kh., Trubittsyna I.B., Prokoshkin S.D., Prokof'ev E.A. Intensive electroplastic deformation of TiNi alloy. *Fizika i tekhnika vysokikh davlenii*. 2006, vol. 16, no. 4, pp. 48–51. (In Russ.).
13. Fedotkin A.A., Medentsov V.E., Stolyarov V.V. Structural-phase transformations under the tension with current. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2012, no. 8, pp. 47–52. (In Russ.).
14. Terent'ev V.F., Stolyarov V.V., Slizov A.K., Sirotkin V.P., Rybal'chenko O.V. Specifications of TRIP-steel electroplastic deformation. *Deformatsiya i razrushenie materialov*. 2015, no. 2, pp. 35–41. (In Russ.).
15. Surikova N.S., Tyumentsev A.N., Evtushenko O.V. Stress-induced martensitic transformations in [001] crystals of titanium nickelide and its relation to mechanical twinning in the B2-phase. *Russian Physics Journal*. 2009, vol. 52, no. 6, pp. 612–621.

Information about the author:

V.V. Stolyarov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher (vlstol@mail.ru)

Received October 20, 2014