

## ДЕФОРМИРУЕМОСТЬ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ПОД ТОКОМ

О.Е. Корольков, В.В. Столяров, А.Д. Шляпин

*Работа посвящена изучению влияния электропластического эффекта (ЭПЭ) на процесс формообразования изгибом образцов титанового сплава ВТ6 и нелегированного титана Grade 4. Показано, что ЭПЭ позволяет повысить деформируемость изгибом указанных сплавов путем снижения максимального напряжения изгиба и увеличения деформации до разрушения при относительно невысоких температурах. Повышение амплитудной плотности позволяет избежать появления трещин в сплаве ВТ6. Изменение направления тока в образце с продольного на поперечное приводит к дополнительному снижению напряжений изгиба.*

**Ключевые слова:** изгиб, импульсный ток, электропластический эффект, титан, напряжение, деформация.

### Введение

Электропластический эффект (ЭПЭ) – явление, характеризующееся резким снижением сопротивления металла деформированию и повышением его пластичности под влиянием электрического тока большой плотности или интенсивного электронного излучения [1]. ЭПЭ впервые был обнаружен при изучении воздействия электронного и  $\gamma$ -облучения на процесс деформации монокристаллов цинка [1]. В дальнейшем было выполнено большое количество исследований этого явления, однако до конца понять его природу не удалось до сих пор.

В работе [2] был предложен один из наиболее вероятных механизмов воздействия электрического тока на металлические материалы. Он заключается в действии направленного потока электронов на подвижные дислокации (электронный ветер).

Теоретическое обоснование ЭПЭ было сделано в работах [3, 4], где также обсуждались вопросы о вкладе теплового разупрочнения в процесс электропластической деформации и подробно разбирались другие механизмы атермического действия тока, включающие в себя пинч-эффект и скин-эффект.

Некоторые авторы полностью отрицают ЭПЭ, объясняя свои наблюдения тепловым разупрочнением [5, 6]. При этом в работе [6] было показано, что импульсный ток высокой плотности позволяет избежать трещин при гибке титанового сплава Ti-6Al-4V. Однако эксперименты по растяжению монокристаллов цинка при от-

рицательных температурах [7] показали наличие скачков деформирующего усилия при прохождении отдельных импульсов тока, тем самым исключив тепловой эффект от действия тока.

В работе [8] показано, что при растяжении образцов из сплава Ti-6Al-4V, ЭПЭ увеличивается с ростом амплитудной плотности тока, а в исследовании [9] обнаружено, что увеличение плотности тока существенно снижает пружинение изгибаемых образцов сплава Ti-6Al-4V. В работе [10] исследован процесс деформационного сдвига образцов сплава Ti-6Al-4V. Показано, что увеличение амплитудной плотности тока также способствует снижению усилия деформации и залечиванию микротрещин.

Таким образом, мнения исследователей по поводу вклада ЭПЭ в разупрочнение разнятся. Часть из них считает, что ЭПЭ полностью отсутствует, однако большинство исследователей полагают, что происходит комбинированное воздействие ЭПЭ и теплового эффекта. Следует отметить, что исследования по оценке вклада ЭПЭ в титановых сплавах проводились при испытаниях на сдвиг, растяжение и изгиб при достаточно высоких максимальных температурах (от 400 до 1250 °С), что влияет на корректность вывода о соотношении обоих эффектов. Практически отсутствуют экспериментальные данные о роли направленности тока по отношению к направлению деформации в титановых сплавах.

Титановые сплавы обладают многими преимуществами – низкой плотностью и теплоем-

костью, высокой удельной прочностью, коррозионной стойкостью и биосовместимостью. Благодаря этим свойствам они находят применение в судостроении, аэрокосмической технике и медицине. Производство изделий из титановых сплавов осложняется тем, что они плохо деформируются при комнатной температуре, а повышение температуры обработки выше  $\sim 300^\circ\text{C}$  ведет к увеличению толщины оксидной пленки и образованию окалины, последующее удаление которой является трудоемкой операцией. Длительный нагрев при повышенных температурах в воздушной атмосфере ведет к образованию альфирированного слоя и росту зерна, что ухудшает комплекс механических свойств конечного изделия [11]. В этой связи применение импульсного тока может рассматриваться как один из технологических путей улучшения деформируемости без существенного нагрева заготовок.

Цель настоящей работы – исследование влияния плотности и направления импульсного тока на деформационное поведение при изгибе образцов нелегированного титана *Grade 4* и сплава ВТ6.

### Методика исследований, оборудование и материалы

В качестве материалов для исследования выбраны нелегированный титан *Grade 4* (*ASTM F 67-00*) и титановый сплав ВТ6 (ГОСТ 22178-76) в рекристаллизованном (отожженном) состоянии в форме плоских образцов: толщина  $h = 2$  мм; ширина  $b = 8,5$  мм; длина  $L_1 = 70$  мм.

Для испытаний на трехточечный изгиб использована оснастка, состоящая из пуансона

с радиусом закругления  $R_1 = 1$  мм и углом  $45^\circ$  и раздвижными опорами, расстояние  $L$  между которыми было установлено в 46 мм (рис. 1). Оснастка установлена на горизонтальную испытательную машину И-5081 через текстолитовые изоляционные переходники. Скорость перемещения пуансона составляла 0,5 мм/мин. Минимальный внутренний угол изгиба ограничен конструкцией оснастки и составляет  $90^\circ$ .

Многоимпульсный электрический ток от генератора пропускали в двух направлениях: вдоль образца и перпендикулярно образцу. Варианты подключения обозначены цифрами 1 и 2 соответственно (см. рис. 1, б). Амплитудная плотность тока  $j_a$  выбрана опытным путем исходя из двух критериев – пороговой плотности возникновения ЭПЭ  $\sim 10\text{--}1000$  А/мм<sup>2</sup> [12] и минимизации температуры нагрева  $t$  ( $< 300^\circ\text{C}$ ), способствующей образованию оксидной пленки.

Среднеквадратичную плотность тока  $j$  рассчитывали по формуле [6]:

$$j = \frac{I_m \sqrt{\frac{\tau}{2T}}}{S},$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения;  $I_m$  – амплитудная сила тока;  $\tau$  – длительность импульса;  $T$  – период импульсов тока.

Использовали следующие режимы тока:  $j_a$  ( $j$ ) = 12 (5,52), 18 (8,27) и 24 (11,04) А/мм<sup>2</sup>; частота  $\nu = 1000$  Гц; длительность импульса  $\tau = 110$  мкс. Сквозность (отношение периода к длительности импульса) составляла 9,1. Контроль температуры осуществляли в точке контакта образца и пуансона хромель-алюмелевой

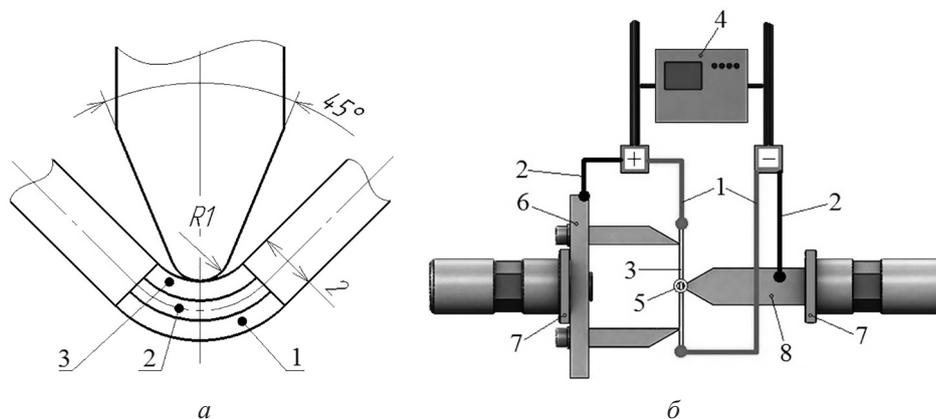


Рис. 1. Испытание образцов на трехточечный изгиб:

а – зоны исследования микротвердости и микроструктуры:

1 – растяжения; 2 – нейтральная; 3 – сжатия;

б – оснастка для испытаний на изгиб:

1 – вдоль образца; 2 – перпендикулярно образцу; 3 – образец; 4 – осциллограф;

5 – термопара; 6 – раздвижные опоры; 7 – изолятор; 8 – пуансон

термопарой UT321 с точностью  $\pm 5$  °С. Для построения кривых «напряжение изгиба – деформация» прилагаемую нагрузку и перемещение пересчитывали в напряжения и деформации по формулам [13]:

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2};$$

$$\varepsilon_f = \frac{600kh}{L^2},$$

где  $F$  – нагрузка, Н;  $L$  – расстояние между опорами, мм;  $b, h$  – ширина и толщина образца, мм;  $k$  – перемещение пуансона, мм.

### Результаты испытаний

В ходе испытаний были получены основные характеристики изгиба (табл.) и кривые «напряжение изгиба – деформация» для различных условий и режимов тока (рис. 2).

Все образцы из нелегированного титана Grade 4 без тока и с током выдержали изгиб

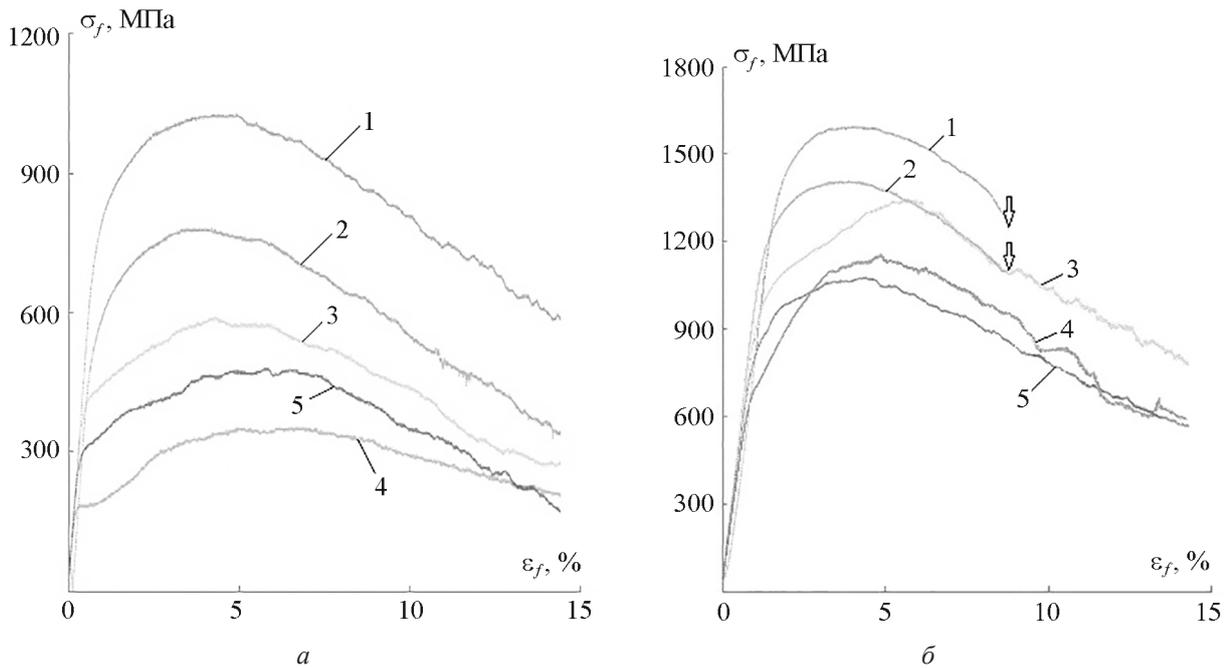


Рис. 2. Зависимости «напряжение изгиба – деформация»

для образцов из нелегированного титана Grade 4 (а) и VT6 (б):

без тока – образец 1; с продольным направлением тока – образцы: 2 (12 А/мм<sup>2</sup>); 3 (18 А/мм<sup>2</sup>); 4 (24 А/мм<sup>2</sup>); с поперечным направлением тока – образец 5 (18 А/мм<sup>2</sup>)

Таблица

Режимы тока, напряжение изгиба и микротвердость

Сплав	№ образца	Направление и амплитудная плотность тока $j_a$ , А/мм <sup>2</sup>	$t$ , °С	$\sigma_f$ , МПа	Примечание
Grade 4	1	без тока	–	1023	нет трещин
	2	продольное	12	779	нет трещин
	3	продольное	18	586	нет трещин
	4	продольное	24	347	нет трещин
	5	поперечное	18	477	нет трещин
VT6	1	без тока	–	1595	разрушение
	2	продольное	12	1400	разрушение
	3	продольное	18	1320	нет трещин
	4	продольное	24	1140	нет трещин
	5	поперечное	18	1070	нет трещин

без появления трещин и разрушения. Внутренний угол изгиба и деформация составили  $90^\circ$  и 14 % соответственно (см. рис. 2, а). Повышение плотности многоимпульсного тока, направленного вдоль образца, привело к трехкратному уменьшению напряжений и сдвигу их максимума в сторону больших перемещений. Изменение направления тока с продольного на поперечное при одинаковой плотности тока способствовало дополнительному снижению напряжений изгиба. Отметим, что температура образцов в месте контакта с пунсоном повышалась с увеличением плотности тока, но не превышала  $180^\circ\text{C}$ . Еще одной особенностью кривых изгиба является короткая стадия равномерной деформации, на которой с увеличением плотности тока коэффициент деформационного упрочнения резко уменьшается и вместо условного предела текучести появляется физический предел текучести.

В сплаве ВТ6 изгиб образцов без тока или с минимальной плотностью тока привел к образованию трещин и разрушению при деформации 9 % и внутреннем угле  $110^\circ$  (см. рис. 2, б, кривые 1 и 2, отмечены стрелкой). Повышение плотности многоимпульсного тока до  $24\text{ А/мм}^2$  привело к увеличению деформации до 14 %, внутреннего угла изгиба до  $90^\circ$ , снижению максимального напряжения на 30 % (см. рис. 2, б, кривые 3 и 4) и сдвигу максимума напряжения в сторону больших перемещений. Изменение направления тока в образце с продольного на поперечное при одинаковой плотности тока  $18\text{ А/мм}^2$  способствовало дополнительному снижению напряжений изгиба (см. рис. 2, б, кривая 5).

Температура образцов в месте контакта с пунсоном повышалась с увеличением плотности тока, но не превышала  $250^\circ\text{C}$ . Увеличение плотности тока способствует снижению коэффициента деформационного упрочнения и появлению физического предела текучести.

### Анализ результатов

Одним из основных результатов работы является обнаружение сильного снижения напряжений изгиба в обоих материалах с повышением амплитудной плотности тока, которое невозможно объяснить только тепловым эффектом тока. Действительно, известные справочные данные [14, 15] свидетельствуют, что абсолютная величина снижения предела прочности образцов *Grade 4* и ВТ6 в интервале

температур  $20\text{--}250^\circ\text{C}$  заметно меньше наблюдаемого в эксперименте. Этот факт позволяет утверждать, что снижение напряжений изгиба вызвано суммарным действием теплового эффекта и ЭПЭ, причем относительный вклад последнего в 2–3 раза выше первого. Отметим, что ЭПЭ в образце *Grade 4* оказался выше, чем в образце ВТ6, что объясняется большим вкладом теплового разупрочнения [8].

Смена направления тока в образце с продольного на поперечное дополнительно снижает напряжение изгиба, что объясняется усилением локального разогрева в очаге деформации (месте электрического контакта пунсона с образцом) при поперечном направлении тока. Следует отметить, что эта особенность является одним из аргументов использования ЭПЭ в промышленной технологии гибки, поскольку при поперечном направлении ток подводится к оснастке, а не к каждой деформируемой заготовке.

Наблюдаемое смещение максимума на кривых образцов 3, 4, 5 для обоих материалов связано с тем, что дислокации могут открепляться с локальных стопоров (примеси внедрения, мелкодисперсные фазы) при меньшем механическом напряжении. Для нелегированного титана марки *Grade 4*, ввиду относительно невысокой температуры деформации, основной вклад в снижение напряжений вносит ЭПЭ, а для сплава ВТ6 в равных долях оказывают воздействие ЭПЭ и тепловое разупрочнение [4, 16, 17]. Смещение максимума напряжений вправо является позитивной особенностью воздействия импульсного тока, поскольку он способствует повышению равномерной деформации, следовательно, и деформируемости в целом. Пропускание многоимпульсного тока плотностью выше  $18\text{ А/мм}^2$  через исследуемые образцы сопровождается появлением физического предела текучести в обоих материалах, что можно объяснить триггерным эффектом многоимпульсного тока, который обеспечивает отрыв дислокаций от примесных атомов в сплаве *Grade 4* и частиц второй фазы в сплаве ВТ6 [16, 17]. Отсутствие второй фазы в нелегированном титане *Grade 4* также благоприятно влияет на подвижность дислокаций, которые не встречают дополнительных препятствий [4].

Сравнивая особенности влияния многоимпульсного тока при изгибе в обоих материалах, можно увидеть, что трещинообразование отсутствует в сплаве *Grade 4* и частично наблюдается для образцов с минимальной плотностью

тока в сплаве ВТ6. Меньшая исходная пластичность ВТ6 определяет большую необходимость в эффективном технологическом применении импульсного тока. Наблюдаемое различие при максимальных температурах разогрева (180 °С для сплава *Grade 4* и 250 °С для сплава ВТ6) при одинаковых плотностях тока связано с разницей удельного сопротивления сплавов:  $6,1 \cdot 10^{-7}$  Ом·м для марки сплава *Grade 4* и  $1,71 \cdot 10^{-6}$  Ом·м для сплава ВТ6 [14].

Интересно, что результаты данной работы не согласуются с работой [6], авторы которой пришли к заключению, что в их исследовании ЭПЭ в сплаве  $Ti_6Al_4V$  отсутствует, а все изменения обусловлены только тепловым эффектом действия тока. На наш взгляд, такое принципиальное отличие в выводах связано с большой разницей в температурах изгиба (250 °С в нашем исследовании и 620 °С у авторов), поскольку вклад ЭПЭ зависит от температуры и резко снижается с ее увеличением [8].

### Выводы

1. Значительное снижение напряжений изгиба в титановых сплавах с повышением амплитудной плотности импульсного тока свидетельствует о действии электропластического эффекта, относительный вклад которого равен или даже больше теплового эффекта тока.

2. Смена направления импульсного тока в образце с продольного на поперечное дополнительно снижает напряжение изгиба.

3. Повышение амплитудной плотности тока сопровождается появлением физического предела текучести и позволяет избежать образования трещин в сплаве ВТ6.

### Заключение

Применение импульсного тока в процессах обработки металлов давлением титановых сплавов позволяет многократно уменьшить усилия деформирования, повысить технологическую деформируемость, в частности при гибке, и обеспечить конкуренцию традиционным приемам термомеханической обработки.

### Список литературы

1. Троицкий О.А., Лихтман В.И. Об анизотропии действия электронного и  $\gamma$ -облучения на процесс деформации монокристаллов цинка в хрупком состоянии // Докл. АН СССР. 1963. Т. 148. С. 332–334.
2. Кравченко В.Я. Воздействие направленного потока электронов на движущиеся дислокации // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1966. Т. 51. С. 1676–1681.
3. Батаронов И.Л. Механизмы электропластичности // Соросовский образовательный журнал. 1999. № 10. С. 93–99.
4. Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы: моногр. / Ю.В. Баранов, О.А. Троицкий, Ю.С. Авраамов, А.Д. Шляпин. М.: Изд-во МГИУ, 2001. – 844 с.
5. Investigation of electroplastic effect at high deformation rates for 304SS and Ti-6Al-4V / B. Kinsey, G. Cullen, A. Jordan, S. Mates // CIRP Ann. 2013. Vol. 62 (1). P. 279–282. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2013.03.058>.
6. Effect of pulse current on bending behavior of Ti6Al4V alloy / Li Xifeng, Zhou Qiang, Zhao Shuangjun, Chen Jun // Procedia Engineering. 2014. Vol. 81. P. 1799–1804. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.235>
7. Спицын В.И., Троицкий О.А. Электропластическая деформация металлов: моногр. М.: Наука, 1985. – 160 с.
8. Hot Tensile Behaviors and Microstructure Evolution of Ti-6Al-4V Titanium Alloy Under Electropulsing / Ao Dong-Wei, Chu Xing-Rong, Lin Shu-Xia, Yang Yang, Gao Jun // Acta Metallurgica Sinica (English Letters). 2018. Vol. 31. P. 1287–1296 <https://doi.org/10.1007/s40195-018-0735-3>.
9. Effect of electropulsing on springback during V-bending of Ti-6Al-4V titanium alloy sheet / Ao Dong-Wei, Chu Xing-Rong, Lin Shu-Xia, Yang Yang, Gao Jun // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018. Vol. 96. P. 3197–3207. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1654-1>.
10. Use of hat-shaped specimens to study the effect of pulsed current on the shear deformation behavior of Ti-6Al-4V alloy / Zhao Zhiyong, Hou Hongliang, Wang Guofeng, Zhang Yanling, Han Baoshuai, Li Tiejun // Journal of Alloys and Compounds // Manuscript Number: JALCOM-D-17-09788.
11. Титановые сплавы. Металловедение титана и его сплавов / С.П. Белов, М.Я. Брун, С.Г. Глазунов и др.: под ред. Б.А. Колачева, С.Г. Глазунова. – М.: Металлургия, 1992. – 352 с.

12. Conrad H. Electroplasticity in metals and ceramics // Materials Science and Engineering. 2000. A287. P. 276–287.
13. ГОСТ 4648-2014 (ISO 178:2010). Пластмасы. Метод испытания на статический изгиб. – М.: Изд-во стандартов, 2014. – 33 с.
14. Titanium Alloys – Physical Properties // AZO Materials. 2002. April 2. URL: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1341> (дата обращения: 25.05.2020).
15. Глазунов С.Г., Мусеев В.Н. Титановые сплавы. Конструкционные титановые сплавы. – М.: Металлургия, 1974. – 368 с.
16. Материаловедение: Учебник для высших технических учебных заведений: под ред. проф. Б.Н. Арзамасова; 2-е изд., испр. и доп. – М.: Машиностроение, 1986. – 384 с.
17. Savenko V.S. Electroplastic effect at twinning metals // Problems of Physics, Mathematics and Technics. 2011. No 4 (9). P. 60–63.

**КОРОЛЬКОВ  
Олег Евгеньевич**

Московский политехнический университет  
E-mail: [41zh1k@mail.ru](mailto:41zh1k@mail.ru)  
Тел.: (926) 663-83-27

Аспирант, кафедра «Материаловедение»; технолог ООО «КОНМЕТ» (г. Москва). Сфера научных интересов: электропластический эффект. Автор четырех научных публикаций.

**СТОЛЯРОВ  
Владимир Владимирович**

Институт машиноведения  
им. А.А. Благонравова РАН  
E-mail: [vlstol@mail.ru](mailto:vlstol@mail.ru)  
Тел.: (495) 623-42-37

Доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник. Сфера научных интересов: физическое материаловедение, наноструктурные материалы. Автор более 400 научных работ.

**ШЛЯПИН  
Анатолий Дмитриевич**

Московский политехнический университет  
E-mail: [6883412@mail.ru](mailto:6883412@mail.ru)  
Тел.: (916) 688-34-12

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Материаловедение». Сфера научных интересов: композиционные материалы, физическое материаловедение. Автор более 180 научных работ.

## TITANIUM ALLOYS DEFORMABILITY UNDER CURRENT INFLUENCE

Oleg E. Korolkov, Vladimir V. Stoliarov, Anatolii D. Shliapin

*The paper concentrates on influence of the electroplastic effect (EPE) on bending VT6 titanium alloy and unalloyed titanium Grade 4 samples. It has been shown that EPE can increase these alloys deformability by bending at reducing the maximum bending stress and increasing the strain-to-fracture at relatively low temperatures. The amplitude density increase prevents an appearance of cracks in VT6 alloy. The change of a longitudinal current direction to transverse results in additional decrease of bending stresses.*

**Keywords:** bending, pulsed current, electroplastic effect, titanium, stress, deformation.

### References

1. Troitskiy O.A., Likhtman V.I. Ob anizotropii deistviia elektronnoho i  $\gamma$ -oblucheniia na protsess deformatsii monokristallov tsynka v khrupkom sostoianii [Anisotropy of electronic and  $\gamma$ -irradiation effect on cynk monocrystal deformation in brittle state] // Doklady AN SSSR [Proc. of the USSR Academy of Sciences]. 1963. Vol. 148. P. 332–334.
2. Kravchenko V.Ia. Vozdeistvie napravlennoho potoka elektronov na dvozhushchiesia dislokatsii [Electrons directed flow influence on moving dislocations] // Zhurnal eksperimentalnoi i teoreticheskoi fiziki [Experimental and Theoretical Physics Journal]. 1966. Vol. 51. P. 1676–1681.
3. Bataronov I.L. Mekhanizmy elektroplastichnosti [Electro-plasticity mechanisms] // Sorosovskii obrazovatelnyi zhurnal [Soros Educational Journal]. 1999. No 10. P. 93–99.
4. Fizicheskie osnovy elektroimpulsnoi i elektroplasticheskoi obrabotok i novye materialy: monografiia [Physical Principles of Electro-pulse and Electro-plastic Processing and New Materials: monography] / Iu.V. Baranov, O.A. Troitskiy, Iu.S. Avraamov, A.D. Shliapin. M.: Izdatelstvo MSIU, 2001. – 844 p.
5. Investigation of electroplastic effect at high deformation rates for 304SS and Ti–6Al–4V / B. Kinsey, G. Cullen, A. Jordan, S. Mates // CIRP Ann. 2013. Vol. 62 (1). P. 279–282. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2013.03.058>.

6. Effect of pulse current on bending behavior of Ti6Al4V alloy / Li. Xifeng, Zhou. Qiang, Zhao. Shuangjun, Chen Jun // Procedia Engineering. 2014. Vol. 81. P. 1799–1804. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.235>
7. Spitsyn V.I., Troitskiy O.A. Elektroplasticheskaia deformatsia metallov: monografiya [Electro-plastic Metals Deformation: monography]. M.: Nauka, 1985. – 160 p.
8. Hot Tensile Behaviors and Microstructure Evolution of Ti-6Al-4V Titanium Alloy Under Electropulsing / Ao. Dong-Wei, Chu. Xing-Rong, Lin. Shu-Xia, Yang. Yang, Gao. Jun // Acta Metallurgica Sinica (English Letters). 2018. Vol. 31. P. 1287–1296 <https://doi.org/10.1007/s40195-018-0735-3>.
9. Effect of electropulsing on springback during V-bending of Ti-6Al-4V titanium alloy sheet / Ao. Dong-Wei, Chu. Xing-Rong, Lin. Shu-Xia, Yang. Yang, Gao. Jun // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018. Vol. 96. P. 3197–3207. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1654-1>.
10. Use of hat-shaped specimens to study the effect of pulsed current on the shear deformation behavior of Ti-6Al-4V alloy / Zhao. Zhiyong, Hou. Hongliang, Wangl. Guofeng, Zhang. Yanling, Hanl. Baoshuai, Li. Tiejun // Journal of Alloys and Compounds // Manuscript Number: JALCOM-D-17-09788.
11. Titanovye splavy. Metallovedenie titana i ego splavov [Titanium Alloys. Metal Science of Titanium and its Alloys] / S.P. Belov, M.Ia. Brun, S.G. Glazunov et al.: ed. by B.A. Kolachev, S.G. Glazunov. M.: Metallurgia, 1992. – 352 p.
12. Conrad H. Electroplasticity in metals and ceramics // Materials Science and Engineering. 2000. A287. P. 276–287.
13. GOST 4648-2014 (ISO 178:2010). Plastmassy. Metod ispytania na staticheskii izgib. [Plastics. Method for the Slow-bend Test]. M.: Izdatelstvo standartov, 2014. – 33 p.
14. Titanium Alloys – Physical Properties // AZO Materials. 2002. April 2. URL: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1341> (дата обращения: 25.05.2020).
15. Glazunov S.G., Moiseev V.N. Titanovye splavy. Konstruktsionnye titanovye splavy. [Titanium Alloys. Structural Titanium Alloys]. M.: Metallurgia, 1974. – 368 p.
16. Materialovedenie: uchebnyk dlia vysshikh tekhnicheskikh uchebnykh zavedenii [Material Science: handbook for highest technical schools]: ed. by Prof. B.N. Arzamasov; 2nd ed., corr. and add. M.: Mashinostroenie, 1986. – 384 p.
17. Savenko V.S. Electroplastic effect at twinning metals // Problems of Physics, Mathematics and Technics. 2011. No 4 (9). P. 60–63.

**Oleg E. KOROLKOV**

Moscow Polytechnic University  
E-mail: [41zh1k@mail.ru](mailto:41zh1k@mail.ru)  
Phone: 8 (926) 663-83-27

Postgraduate student of Materials Science Department, process engineer of Konmet, OJSC. Areas of expertise: electro-plastic effect. He authored four publications.

**Vladimir V. STOLYAROV**

Blagonravov Mechanical Engineering  
Research Institute of the RAS  
E-mail: [vvstol@mail.ru](mailto:vvstol@mail.ru)  
Phone: 8 (495) 623-42-37

Doctor of Technical Science (habil.), Professor, Chief Researcher. Areas of expertise: material physics, nano-structural materials. He authored more than 400 publications.

**Anatolii D. SHLIAPIN**

Moscow Polytechnic University  
E-mail: [6883412@mail.ru](mailto:6883412@mail.ru)  
Phone: 8 (916) 688-34-12

Doctor of Technical Science (habil.), Professor, Head of Materials Science Department. Areas of expertise: composite materials, material physics. He authored more than 180 publications.