

Оригинальная статья

УДК 539.2;669.017

DOI: 10.57070/2304-4497-2025-2(52)-37-43

**ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ И
ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ
ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНА**

© 2025 г. Л. П. Башенко

Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. Модифицирование поверхностных слоев изделий из металлических материалов сопровождается изменением эксплуатационных характеристик: повышаются твердость, износостойкость, жаростойкость. В настоящее время для модифицирования поверхности применяются лазерная обработка, электронно-лучевое и плазменное легирование, в том числе электровзрывное легирование. Применение современных методов упрочнения поверхности с использованием концентрированных потоков энергии (электровзрывное легирование и электронно-пучковая обработка) особенно актуально для локального воздействия на изделия из титана и титановых сплавов. Целью работы являлось выявление формирования структурно-фазовых состояний при электровзрывном легировании и электронно-пучковой обработке поверхности технически чистого титана марки ВТ1-0 с точки зрения повышения функциональных свойств для практического применения. Разработанный способ упрочнения поверхности титана включает электровзрывное науглероживание и последующую электронно-пучковую обработку зоны легирования. Особенности каждого метода определяют выбор режимов обработки. Проведено изучение тепловых процессов при этих обработках с учетом особенностей каждого метода, позволяющее обоснованно выбирать режимы обработки. Установлено влияние режимов электронно-пучковой обработки на микротвердость поверхностных слоев, формирование максимумов в глубине зоны легирования и кратное повышение микротвердости поверхностных слоев. Выявлены особенности структурно-фазовых состояний и механизмы упрочнения поверхностных слоев технически чистого титана при электровзрывном науглероживании и последующей электронно-пучковой обработке. В зоне обработки формируется градиентная многофазная структура, толщина слоев которой коррелирует с распределением микротвердости по глубине. На основании полученных экспериментальных данных сделан вывод, что комбинированная обработка поверхности технически чистого титана марки ВТ1-0, сочетающая электровзрывное науглероживание и последующую электронно-пучковую обработку зоны легирования, обеспечивает повышение микротвердости и глубины зоны упрочнения.

Ключевые слова: технически чистый титан, электровзрывное легирование, электронно-пучковая обработка, структура, функциональные свойства, глубина зоны обработки

Для цитирования: Башенко Л.П. Применение электровзрывного легирования и электронно-пучковой обработки для упрочнения поверхности титана. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2025;2(52):37–43. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2\(52\)-37-43](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2(52)-37-43)

Original article

**THE USE OF ELECTRO-EXPLOSIVE ALLOYING AND ELECTRON BEAM
TREATMENT TO HARDEN THE SURFACE OF TITANIUM**

© 2025 L. P. Bashchenko

Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation)

Abstract. Modification of the surface layers of products made of metallic materials is accompanied by a change in performance characteristics: hardness, wear resistance, and heat resistance increase. Currently, laser processing,

electron beam and plasma alloying, including electro-explosive alloying, are used to modify the surface. The application of modern methods of surface hardening using concentrated energy flows (such as electro-explosive alloying and electron beam treatment) is especially relevant for local effects on titanium and titanium alloy products. The aim of the work was to identify the formation of structural and phase states during electro-explosive alloying and electron beam surface treatment of technically pure titanium grade VT1-0 from the point of view of increasing functional properties for practical use. The developed method for hardening the titanium surface includes electro-explosive carburization and subsequent electron beam treatment of the alloying zone. The features of each method determine the choice of processing modes. The thermal processes during these treatments have been studied, taking into account the specifics of each method, which makes it possible to reasonably choose the treatment modes. The effect of electron beam processing modes on the microhardness of the surface layers, the formation of maxima in the depth of the alloying zone, and a multiple increase in the microhardness of the surface layers has been established. The features of the structural and phase states and the mechanisms of hardening of the surface layers of technically pure titanium during electroexplosion carburization and subsequent electron beam treatment are revealed. A gradient multiphase structure is formed in the treatment area, the thickness of the layers of which correlates with the depth distribution of microhardness. Based on the experimental data obtained, it is concluded that the combined surface treatment of technically pure titanium grade VT1-0, combining electro-explosive carburization and subsequent electron beam treatment of the alloying zone, provides an increase in microhardness and depth of the hardening zone.

Keywords: technically pure titanium, electro-explosive alloying, electron beam processing, structure, functional properties, depth of the processing zone

For citation: Bashchenko L.P. The use of electro-explosive alloying and electron beam treatment to harden the surface of titanium. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2025;2(52):37–43. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2\(52\)-37-43](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2(52)-37-43)

Введение

Применение концентрированных потоков энергии (КПЭ) [1; 2] для поверхностной модификации обеспечивает существенное улучшение эксплуатационных характеристик изделий из металлических материалов [3 – 6]. Наблюдается изменение различных функциональных свойств: многократно повышаются твердость, износостойкость, жаростойкость [7 – 9].

Среди современных методов модифицирования поверхности выделяются лазерная обработка [10], электронно-лучевое и плазменное легирование [11 – 13], в том числе электровзрывное легирование (ЭВЛ) [14 – 16]. Для упрочнения поверхности в промышленности все чаще используют локальные методы упрочнения поверхности с использованием концентрированных потоков энергии (ЭВЛ [17; 18] и электронно-пучковая обработка (ЭПО) [19]) с использованием низкоэнергетических сильнооточных электронных пучков).

Широкую сферу применения имеют титановые сплавы. Они характеризуются низкой износостойкостью, повышенным коэффициентом трения при взаимодействии с большинством конструкционных материалов, склонностью к налипанию. Именно поэтому для титановых сплавов особенно актуально применение КПЭ [20 – 24].

Целью настоящей работы является выявление особенностей формирования структурно-фазовых состояний при ЭВЛ и ЭПО поверхности легирования технически чистого титана марки

BT1-0 с точки зрения повышения функциональных свойств для практического применения с учетом экономической эффективности обработки.

Материалы и методы исследования

В настоящей работе материалом исследования являлся технически чистый титан марки BT1-0. Этот материал не содержит никаких специальных добавок, кроме примесей, суммарное содержание которых не превышает 0,3 %. Технически чистый титан марки BT1-0 выбран как модельный материал для надежной интерпретации результатов.

Исследования структуры упрочненных слоев проводили с использованием методов световой (микроскоп Olympus GX 51) и электронной сканирующей микроскопии (СЭМ) (микроскоп Carl Zeiss EVO50), рентгеноспектрального микроанализа, просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) (микроскоп ЭМ-125), рентгеноструктурного анализа (дифрактометры ДРОН-2,0 и ARL X'TRA). Упрочнение поверхности оценивали, определяя микротвердость модифицированных слоев (прибор HVS-1000A).

Результаты работы и их обсуждение

Функциональные свойства поверхности и всего изделия во многом зависят от особенностей структуры и фазового состава именно поверхностных слоев. При определении конкретных методов упрочнения металлов и сплавов учет этого обязателен. При использовании для по-

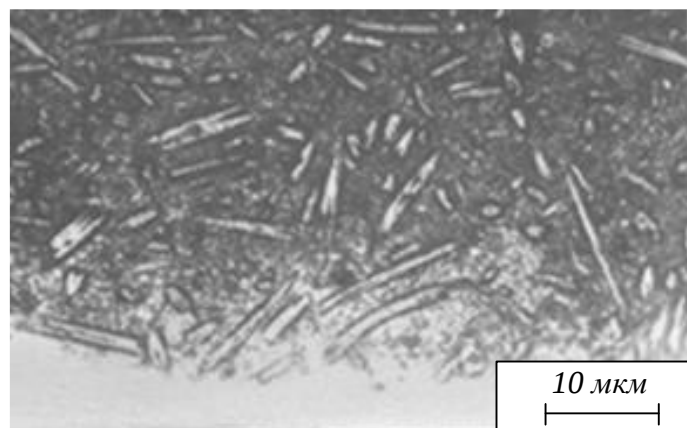


Рис. 1. Вид поперечного шлифа (структура) после ЭВЛ (науглероживание) титана (световая микроскопия)
Fig. 1. View of a cross-section (structure) after EVL (carburization) of titanium (light microscopy)

верхностного легирования лазерного, электронно-пучкового и плазменного нагрева поверхности наблюдаются самые лучшие показатели упрочнения. Структура, фазовый состав и свойства модифицированных слоев поверхности сильно зависят от технологических особенностей методов обработки. Большое влияние на формируемые структуру и фазовый состав, а, соответственно, и свойства, оказывают параметры воздействия при ЭВЛ и ЭПО. Поглощаемая плотность мощности (порядка $10^5 - 10^6$ Вт/см²), глубина воздействия (порядка 10 мкм), размеры зоны воздействия (3 – 5 см²) сопоставимы при ЭВЛ и ЭПО, именно поэтому возможно применение этих видов обработки совместно. При одновременном использовании ЭВЛ и ЭПО (при комбинированной обработке) формируются новые структурно-фазовые состояния поверхностных слоев металлов и сплавов. Таким образом, область практического применения рассматриваемых видов обработки увеличивается [16]. При используемых параметрах обработки образуются поверхностные слои с аморфной нано- и субмикроструктурной структурой. Толщина поверхностных слоев составляет порядка $10^{-7} - 10^{-6}$ м.

Параметры ЭВЛ: поглощаемая плотность мощности q_p 5,5 ГВт/м², длительность τ_p импульса 100 мкс. Оплавление и легирование поверхностного слоя при таком режиме ЭВЛ происходит без выплеска расплава. В качестве взрывающего проводника в настоящей работе использована углеродная лента марки ЛУ-П/0,1-50 массой 140 мг.

Электронно-пучковую обработку полученной поверхности легирования осуществляли на установке «Соло» (Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН) [19]. Параметры ЭПО: поглощаемая плотность мощности q_e 2,0, 2,25 и 3,0 ГВт/м², длительность τ_e импульсов 100 и 200 мкс; частота f следования импульсов 0,3 Гц; количество N импульсов 5 и 10.

Эксперимент проводили при давлении 0,02 Па в аргоне.

По результатам сканирующей электронной микроскопии видно, что при ЭВЛ происходит науглероживание титана. Формируемое несплошное покрытие характеризуется развитым рельефом и высокой шероховатостью [25; 26]. В структуре поверхности хорошо различимы три характерные морфологические составляющие: конгломераты частиц графита, титана и карбида титана глобулярной морфологии (75 % площади поверхности); частицы углеродных волокон (15 %); области твердого раствора на основе титана с наноразмерными включениями карбида титана (10 %).

На поперечных шлифах образцов при исследовании методом световой микроскопии выделяется зона легирования толщиной примерно 50 мкм. Углерод (в виде частиц углеродных волокон) распределен по всей глубине зоны легирования до самой границы с основой (рис. 1). При химическом травлении выявляется карбид титана (на снимке в виде светлых частиц глобулярной формы).

В зоне легирования (по результатам микро-дифракционного ПЭМ-анализа) наблюдаются следующие фазы: карбид титана TiC; β -титан; графит наноразмерного диапазона с кубической и гексагональной кристаллической решеткой; оксид титана β -TiO₂. Зеренная структура титана содержит дислокации. Скалярная плотность дислокаций составляет примерно $5,6 \cdot 10^{10}$ см⁻².

Частицы карбида титана глобулярной формы (4 – 10 нм) формируются на поверхности и в приповерхностном слое углеродных волокон, а также на поверхности и в приповерхностном слое зерен титана.

После ЭПО покрытие объединяется с зоной легирования. Зона упрочнения двухслойная (рис. 2). Слой, расположенный около поверхности, толщиной около 20 мкм можно считать зоной переплавления при ЭПО, в которой при

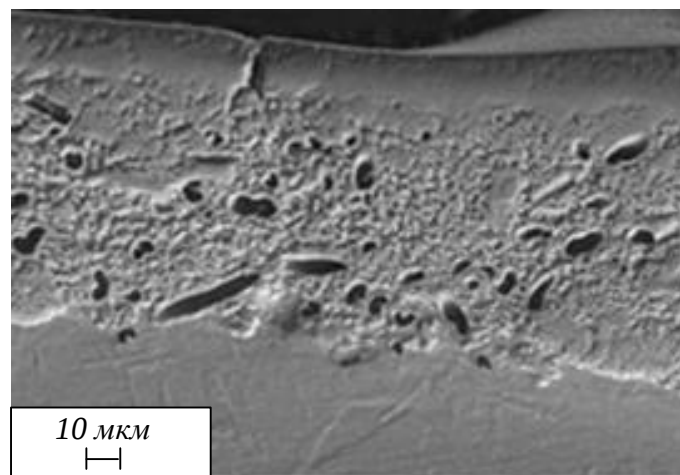


Рис. 2. Вид поперечного шлифа (структура) после ЭВЛ (науглероживание) и ЭПО титана
Fig. 2. View of cross-section (structure) after EVL and EPO of titanium

проведении СЭМ-анализа этого слоя частицы углеродных волокон не выявляются. В слое толщиной 60 мкм, находящемся под слоем переплавления, наблюдается большое количество карбида титана глобулярной морфологии и частицы не до конца провзаимодействовавших с титаном углеродных волокон. Общая толщина зоны упрочнения составляет около 80 мкм, то есть по сравнению с зоной науглероживания при ЭВЛ увеличивается в 1,6 раза.

В процессе фазовый состав на глубине 20 – 25 мкм выравнивается. После комбинированной обработки (по результатам рентгенофазового анализа) этот слой состоит из 63 % α -титана; 25 % TiC; 4 % TiB₂; 6 % TiB; 1 – 2 % B₄C (% по объему). По результатам микроструктурного и микрофракционного анализов видно, что в поверхностном слое присутствуют α -титан и карбид титана TiC. Включения карбида титана имеют глобулярную форму, их средние размеры составляют примерно 300 нм.

На глубине 5 – 8 мкм наблюдается двухфазный слой, состоящий из α -Ti и карбида титана TiC. Размеры кристаллитов карбидной фазы изменяются в пределах 150 – 250 нм.

На глубине 40 – 45 мкм наблюдается более грубая структура.

В процессе работы было изучено распределение микротвердости по глубине модифицированных слоев при различных режимах обработки: время обработки (длительность импульса) τ_e составляло 100 и 200 мкс. На рис. 3 представлен пример распределения микротвердости при 100 мкс.

Выявлено, что положение максимумов микротвердости коррелируется с положением границ раздела верхнего слоя, переплавленного при ЭПО, с нижележащей зоной легирования и зоны легирования с основой сплава. Общая глубина

зоны упрочнения с уровнем микротвердости около 2000 HV составляет 30 – 50 мкм.

Полученные распределения микротвердости и микроскопические исследования рельефа и структурно-фазовых состояний поверхностных слоев титана BT1-0 после электровзрывного карбоборирования и ЭПО поверхности легирования [22] дают основание сделать вывод, что упрочнение достигается вследствие формирования высокодисперсной структуры, упрочненной частицами карбида и боридов титана.

Выводы

Разработан способ упрочнения поверхности титана и определены его параметры. Способ включает электровзрывное науглероживание и последующую электронно-пучковую обработку зоны легирования. Установлено влияние режимов электронно-пучковой обработки на микротвердость поверхностных слоев, формирование максимумов значений микротвердости в глубине зоны легирования. Выявлены особенности структурно-фазовых состояний и механизмы упрочнения поверхностных слоев технически

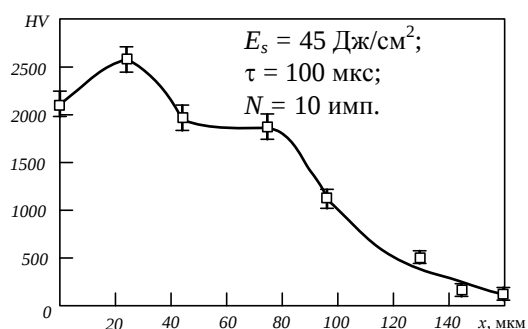


Рис. 3. Распределение микротвердости по глубине после комбинированной обработки
Fig. 3. Microhardness distribution by depth after combined treatment

чистого титана при электровзрывном науглероживании и последующей электронно-пучковой обработке. Комбинированная обработка поверхности технически чистого титана марки ВТ1-0, сочетающая электровзрывное науглероживание и последующую ЭПО зоны легирования, обеспечивает повышение микротвердости и глубины зоны упрочнения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перевертов В.П., Андрончев И.К., Абулкасимов М.М. Технологии обработки материалы концентрированным потоком энергии. *Надежность и качество сложных систем*. 2015;3(11):69–79.
2. Перевертов В.П., Андрончев И.К., Абулкасимов М.М. Инновационные технологии обработки материалов концентрированным потоком энергии в ГПС. В кн.: *Труды Международного симпозиума «Надежность и качество»*. 2015;1:29–35.
3. Петров П.Ю. Исследования поверхностной обработки изделий (материалов) машиностроения электронным лучом. *Мировая наука*. 2020;3(36):602–618.
4. Fedun V.I., Kolyada Yu.E. Dynamics of phase transformations by electron beam surface modification of metals and alloys. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2010;4:316–320.
5. Astashynski V.M., Ananin S.I., Askerko V.V., Kostyukevich E.A., Kuzmitski A.M., Uglov V.V., Anishchik V.M., Astashynski V.V., Kvasov N.T., Danilyuk A.L. Materials surface modification using quasi-stationary plasma accelerators. *Show more Surface and Coatings Technology*. 2004;180-181:392–395.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2003.10.098>
6. Grishin Yu.M., Kamrukov A.S., Kozlov N.P., Panasenko K.N., Chepegin D.V., Shashkovskiy S.G. Radiation-plasmodynamic method of surface hardening of steels and alloys. In: *Plasma technique and plasma technologies: collection of scientific papers*. Moscow: Publ. of NITs «Inzhener», 2003:193.
7. Cherenda N.N., Uglov V.V., Anishchik V.M., Stalmashonak A.K., Astashynski V.M., Kuzmickii A.M., Punko A.V., Thorwarth G.B., Stritzker B. Modification of high-speed steels by nitrogen compression plasma flow: structure, element composition, tribological properties. *Surface and Coatings Technology*. 2006;200(18-19):5334–5342.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.06.007>
8. Pogrebnyak A.D., Tyurin Yu.N. Modification of material properties and coating deposition using plasma jets. *Physics Uspekhi*. 2005;48(5):487–514.
<https://doi.org/10.1070/PU2005v048n05ABEH002055>
9. Korotaev A.D., Tyumentsev A.N., Pinzhin Yu.P., Remnev G.E. Features of the morphology, defect substructure, and phase composition of metal and alloy surfaces upon high-power ion irradiation. *Surface and Coatings Technology*. 2004;185(1):38–49.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2003.11.021>
10. Vedernikova I.I., Poletaev V.A. Application of laser modification for strengthening the working surfaces of machine details. *JARITS*. 2019;15:18–25.
<https://doi.org/10.26160/2474-5901-2019-15-18-25>
11. Nikolchuk I.S., Chumakov A.N., Kuznechik O.O., Minko D.V. Pulsed plasma surface treatment of constructional steel in the air. In: *7 International Conference «Plasma Physics and Plasma Technology»: contributed papers*. Minsk, 2012:438–441.
12. Aleksandrov V.V., Belan N.V., Kozlov N.P., Mashtylev N.A., Popov G.A., Protasov Yu.S., Khvesyuk V.I. *Pulsed Plasma Accelerators*. Khar'kov: Kharkiv Aviation Institute. 1983:247.
13. Астапчик С.А., Голубев В.С., Маслаков А.Г. *Лазерные технологии в машиностроении и металлообработке*. Минск: Белорусская наука, 2008:251.
14. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. *Технологические процессы лазерной обработки*. Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006:664.
15. Грибков В.А., Григорьев Ф.И. Калинин Б.А., Якушин В.Л. *Перспективные радиационно-пучковые технологии обработки металлов*. Москва: Круглый год, 2001:528.
16. Багаутдинов А.Я., Будовских Е.А., Иванов Ю.Ф., Громов В.Е. *Физические основы электровзрывного легирования металлов и сплавов*. Новокузнецк: СибГИУ, 2007:301.
17. Будовских Е.А. Закономерности формирования поверхностных слоев металлов и сплавов при электровзрывном легировании: автореф. дисс. докт. техн. наук. Новокузнецк, 2008:37.
18. Багаутдинов А.Я., Будовских Е.А., Иванов Ю.Ф., Громов В.Е. *Физические основы электровзрывного легирования металлов и сплавов*. Новокузнецк: СибГИУ, 2007:304.
19. Коваль Н.Н., Иванов Ю.Ф. Наноструктурирование поверхности металлокерамических и керамических материалов при импульсной электронно-пучковой обработке. *Известия вузов. Физика*. 2008;51(5):60–70.

20. Lei M.K., Dong Z.H., Zhang Z., Hu Y.F., Zhu X.P. Wear and corrosion resistance of Ti_6Al_4V alloy irradiated by high-intensity pulsed ion beam. *Surf Coat Technol.* 2007;201(9):5613–5616. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.07.013>
21. Shymanski V.I., Cherenda N.N., Uglov V.V., Astashynskiy V.M., Kuzmitskiy A.M. Thermal stability of the structure and phase composition of titanium treated with compression plasma flows. *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques.* 2018;12:710–716. <https://doi.org/10.1134/S102745101804016X>
22. Башенко Л.П. Упрочнение поверхности титана при электровзрывном науглероживании и карбоборировании и последующей электронно-пучковой обработке: автореф. дисс. канд. техн. наук. Новокузнецк, 2013:17.
23. Асташинский В.М., Углов В.В., Черенда Н.Н., Шиманский В.И. Модификация титана при воздействии компрессионными плазменными потоками. Минск: Белорусская наука, 2016:179.
24. Gao Y.-K. Influence of pulsed electron beam treatment on microstructure and properties of TA15 titanium alloy. *Applied Surface Science.* 2013;264:633–635. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.10.083>
25. Башенко Л.П., Ефименко И.Т., Будовских Е.А., Иванов Ю.Ф., Иванов К.В., Ионина А.В., Громов В.Е. Особенности модифицирования поверхностных слоев титана при электровзрывном науглероживании. *Физика и химия обработки материалов.* 2012;2:65–69.
5. Astashynski V.M., Ananin S.I., Askerko V.V., Kostyukevich E.A., Kuzmitskiy A.M., Uglov V.V., Anishchik V.M., Astashynski V.V., Kvasov N.T., Danilyuk A.L. Materials surface modification using quasi-stationary plasma accelerators. *Show more Surface and Coatings Technology.* 2004;180-181:392–395. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2003.10.098>
6. Grishin Yu.M., Kamrukov A.S., Kozlov N.P., Panasenkov K.N., Chepegin D.V., Shashkovskiy S.G. Radiation-plasmodynamic method of surface hardening of steels and alloys. In: *Plasma technique and plasma technologies: collection of scientific papers.* Moscow: Publ. of NITs «Inzhener», 2003:193.
7. Cherenda N.N., Uglov V.V., Anishchik V.M., Stalmashonak A.K., Astashynski V.M., Kuzmitskiy A.M., Punko A.V., Thorwarth G.B., Stritzker B. Modification of high-speed steels by nitrogen compression plasma flow: structure, element composition, tribological properties. *Surface and Coatings Technology,* 2006;200(18–19):5334–5342. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.06.007>
8. Pogrebnyak A.D., Tyurin Yu.N. Modification of material properties and coating deposition using plasma jets. *Physics Uspekhi.* 2005;48(5):487–514. <https://doi.org/10.1070/PU2005v048n05ABEH002055>
9. Korotaev A.D., Tyumentsev A.N., Pinzhin Yu.P., Remnev G.E. Features of the morphology, defect substructure and phase composition of metal and alloy surfaces upon high-power ion irradiation. *Surface and Coatings Technology.* 2004;185(1):38–49. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2003.11.021>
10. Vedernikova I.I., Poletaev V.A. Application of laser modification for strengthening the working surfaces of machine details. *JARITS.* 2019;15:18–25. <https://doi.org/10.26160/2474-5901-2019-15-18-25>
11. Nikolchuk I.S., Chumakov A.N., Kuznechik O.O., Minko D.V. Pulsed plasma surface treatment of constructional steel in the air. In: *7 International Conference «Plasma Physics and Plasma Technology»: contributed papers.* Minsk, 2012:438–441.
12. Aleksandrov V.V., Belan N.V., Kozlov N.P., Mashtylev N.A., Popov G.A., Protasov Yu.S., Khvesyuk V.I. *Pulsed Plasma Accelerators.* Khar'kov: Kharkiv Aviation Institute, 1983:247.
13. Astapchik S.A., Golubev V.S., Maslakov A.G. *Laser technologies in mechanical engineering*

REFERENCES

1. Perevertov V.P., Andronchev I.K., Abulkasimov M.M. Technologies for processing materials using concentrated energy flow. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem.* 2015;3(11):69–79. (In Russ.).
2. Perevertov V.P., Andronchev I.K., Abulkasimov M.M. Innovative technologies of materials processing by concentrated energy flow in GPS. In: *Proceedings of the International Symposium «Reliability and Quality».* 2015;1:29–35. (In Russ.).
3. Petrov P.Yu. Research of surface treatment of products (materials) of mechanical engineering by electron beam. *Mirovaya nauka.* 2020;3(36):602–618. (In Russ.).
4. Fedun V.I., Kolyada Yu.E. Dynamics of phase transformations by electron beam surface modification of metals and alloys. *Problems of Atomic Science and Technology.* 2010;4:316–320.

- and metalworking. Minsk: Belorusskaya nauka. 2008:251. (In Russ.).
14. Grigor'yants A.G., Shiganov I.N., Misyurov A.I. *Laser processing technologies*. Moscow: MGTU im. N.E. Bauman, 2006:664. (In Russ.).
 15. Gribkov V.A., Grigor'ev F.I. Kalin B.A., Yakushin V.L. *Promising radiation beam technologies for metal processing*. Moscow: Kruglyi god, 2001:528. (In Russ.).
 16. Bagautdinov A.Ya., Budovskikh E.A., Ivanov Yu.F., Gromov V.E. *Physical principles of electroexplosive alloying of metals and alloys*. Novokuznetsk: SibGIU, 2007:301. (In Russ.).
 17. Budovskikh E.A. Regularities of formation of surface layers of metals and alloys during electric explosive alloying; abstract of Doctor of Technical Sciences. Novokuznetsk. 2008:37. (In Russ.).
 18. Bagautdinov A.Ya., Budovskikh E.A., Ivanov Yu.F., Gromov V.E. *Physical principles of electroexplosive alloying of metals and alloys*. Novokuznetsk: SibGIU. 2007:304. (In Russ.).
 19. Koval' N.N., Ivanov Yu.F. Nanostructuring of the surface of metal-ceramic and ceramic materials using pulsed electron beam processing. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 2008;51(5):60–70. (In Russ.).
 20. Lei M.K., Dong Z.H., Zhang Z., Hu Y.F., Zhu X.P. Wear and corrosion resistance of Ti6Al4V alloy irradiated by high-intensity pulsed ion beam. *Surf Coat Technol.* 2007;201(9):5613–5616. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.07.013>
 21. Shymanski V.I., Cherenda N.N., Uglov V.V., Astashynskii V.M., Kuzmitski A.M. Thermal stability of the structure and phase composition of titanium treated with compression plasma flows. *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2018;12:710–716. <https://doi.org/10.1134/S102745101804016X>
 22. Bashchenko L.P. Hardening of titanium surface by electroexplosive carburization and carbonization with subsequent electron beam processing. Abstract of dissertation for the degree of candidate of technical sciences. Novokuznetsk, 2013:17. (In Russ.).
 23. Astashinskii V.M., Uglov V.V., Cherenda N.N., Shimanskii V.I. *Modification of titanium under the influence of compression plasma flows*. Minsk: Belorusskaya nauka, 2016:179. (In Russ.).
 24. Gao Y.-K. Influence of pulsed electron beam treatment on microstructure and properties of TA15 titanium alloy. *Applied Surface Science*. 2013;264:633–635. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.10.083>
 25. Bashchenko L.P., Efimenko I.T., Budovskikh E.A., Ivanov Yu.F., Ivanov K.V., Ionina A.V., Gromov V.E. Features of modification of titanium surface layers during electroexplosive carburization. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*. 2012;2:65–69. (In Russ.).

Сведения об авторе:

Людмила Петровна Бащенко, к.т.н., доцент кафедры теплоэнергетики и экологии, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: luda.baschenko@gmail.com
ORCID: 0000-0003-1878-909X
SPIN-код: 5942-8145

Information about the author:

Lyudmila P. Bashchenko, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Thermal Power Engineering and Ecology, Siberian State Industrial University
E-mail: luda.baschenko@gmail.com
ORCID: 0000-0003-1878-909X
SPIN-код: 5942-8145

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
 The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 28.05.2025
 После доработки 12.06.2025
 Принята к публикации 16.06.2025

Received 28.05.2025
 Revised 12.06.2025
 Accepted 16.06.2025