

УДК 67.017

**ВПЛИВ КОМБІНОВАНОЇ ОБРОБКИ – ЕЛЕКТРОІСКРОВОГО ЛЕГУВАННЯ З НАСТУПНОЮ ЛАЗЕРНОЮ ОБРОБКОЮ НА ПОВІТРІ НА ВЛАСТИВОСТІ ТИТАНОВОГО СПЛАВУ VT1-0**

**Є. В. Івашченко, І. В. Смоліна**

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»  
просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна. E-mail: [ivashchenko@kpm.kpi.ua](mailto:ivashchenko@kpm.kpi.ua)

**Ю. М. Гаврилюк**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського  
вул. Першотравнева, 20, 39600, м. Кременчук, Україна. E-mail: [kimv@kdu.edu.ua](mailto:kimv@kdu.edu.ua)

Проведено експериментальні дослідження структури та мікротвердості покриттів, отриманих методом комбінованої обробки: електроіскрового легування алюмінієм із наступною імпульсною лазерною обробкою з оплавленням поверхневого шару титанового сплаву VT1-0. Показано, що наступна лазерна обробка після електроіскрового легування дозволяє підвищити мікротвердість поверхневого шару у 1,2...2 рази, отримати більш протяжні (80...120 мкм) і суцільні шари. Показано, що такі покриття можуть використовуватися в медичному приладобудуванні як біосумісні захисні покриття.

**Ключові слова:** електроіскрове легування (ЕІЛ), імпульсна лазерна обробка, комбінована обробка, мікротвердість, електронна мікроскопія, легований шар.

**ВЛИЯНИЕ КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ – ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ЛЕГИРОВАНИЯ И ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ НА ВОЗДУХЕ НА СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT1-0**

**Е. В. Иващенко, И. В. Смолина**

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»  
просп. Победы, 37, г. Киев, 03056, Украина. E-mail: [ivashchenko@kpm.kpi.ua](mailto:ivashchenko@kpm.kpi.ua)

**Ю. Н. Гаврилюк**

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского  
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: [kimv@kdu.edu.ua](mailto:kimv@kdu.edu.ua)

Проведены экспериментальные исследования структуры и микротвердости покрытий, полученных методами электроіскрового легирования алюминием и последующая лазерная обработка с оплавлением титанового сплава VT1-0. Показано, что последующая лазерная обработка после электроіскрового легирования позволяет повысить микротвердость слоя в 1,2...2 раза, получить более протяжные (80...120 мкм) и сплошные слои. Показано, что такие покрытия могут использоваться в медицинском приборостроении как биосовместимые защитные покрытия.

**Ключевые слова:** электроіскровое легирование (ЭИЛ), лазерная обработка (ЛО), комбинированная обработка, микротвердость, электронная микроскопия, легированный слой.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** Сучасний світ вимагає від людства життя на шаленій швидкості та з максимальними навантаженнями, тому і не дивно, що організм багатьох сучасних людей протягом життя вимагає заміни зношених природних частин тіл. В останні 20 років усе більше обертів набирають такі наукові сфери як генна інженерія, пластична хірургія та величезна міждисциплінарна область досліджень – біосумісні матеріали. Тільки впродовж останніх 30 років у цій сфері було використано понад 40 різноманітних матеріалів (кераміка, метали, полімери) для медичної інженерії та приладобудування [1].

У більшості випадків біосумісність металічних матеріалів досягається нанесенням тонкого шару покриття на поверхню матеріалу–основи [2, 3]. Для того, щоб досягти вищевказаних показників використовують різні види обробки поверхні, зокрема високоенергетичні імпульсні та вакуумноплазмові [4] методи обробки матеріалів. Сучасні методи отримання біосумісних металевих покриттів мають ряд недоліків, при цьому малодослідженими залишаються високоенергетичні методи для отримання біосумісних покриттів, такі як електроіскрове легування [5] та лазерна обробка [6, 7]. У цьому випадку малодослідженими є також фізичні, механічні та трибологічні характеристики

цих покриттів, без аналізу яких неможливе отримання покриттів нового покоління конструкційних і функціональних матеріалів. Отже, тема дослідження є сучасною та актуальною.

Метою роботи є дослідження структури, фазового складу та мікротвердості біосумісних покриттів отриманих методами комбінованої обробки: електроіскровим легуванням алюмінієм на повітрі та наступної лазерної обробки титанового сплаву VT1-0.

**МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.** Для визначення впливу параметрів комбінованої обробки (електроіскрове легування та лазерна обробка) на структуру легованого покриття титанового сплаву VT1-0, було проведено мікродюриметричний, мікроструктурний та електронномікроскопічний аналіз.

Для отримання на поверхні титану окислів алюмінію, було проведено електроіскрове легування титанового сплаву VT1-0 алюмінієвим анодом – на повітрі. Також було проведено лазерну обробку на повітрі для гомогенізації хімічного складу і зняття внутрішніх напружень у легованому шарі.

Алюміній для титана виступає як легуючий елемент, який підвищує температуру поліморфного  $\alpha \rightarrow \beta$  перетворення титану та є  $\alpha$ -стабілізатором.

Таким чином, при легуванні титану, алюміній утворює в титані твердий розчин.

У результаті електроіскрового легування поверхні титанового сплаву VT1-0 алюмінієм було отримано структуру, яка складається з поверхневого легуваного шару та перехідної зони (рис. 1). Ці зони можна виявити на непротравленому шліфі.

При обробці травником, до складу якого входять плавикова кислота та гліцерин, було виявлено мікроструктуру поверхневого шару сплаву, яка характеризувалася переходом від більш світлих сріблястих зерен легуваного шару до більш темних зерен зони термічного впливу та основи (рис. 2).

Розподіл мікротвердості за глибиною зразка відбувається наступним чином – у легуваному шарі мікротвердість має значення 1,3...1,4 ГПа. У дифузійній зоні відбувається незначне підвищення (до 3 ГПа для зразка, легуваного впродовж 300 с (5 хв), і до 5 ГПа для зразка, легуваного впродовж 180 с (3 хв)), яке розповсюджується також і на зону термічного впливу (рис. 3, 4). Мікротвердість основи (вихідного матеріалу) складає близько 1,7..1,8 ГПа.



Рисунок 1 – Структура нетравленого зразка титанового сплаву VT1-0, ЕІЛ на повітрі: анод – Al; I = 1,8..2 А; V = 60..70 В; τ = 180 с (3 хв)

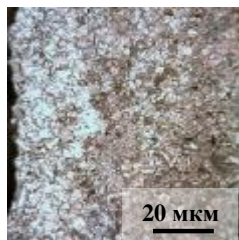


Рисунок 2 – Мікроструктура (хімічне травлення: плавикова кислота у гліцерині) титанового сплаву VT1-0 після ЕІЛ на повітрі анод – Al; I = 1,8..2 А; V = 60..70 В; τ = 300 с (5 хв)

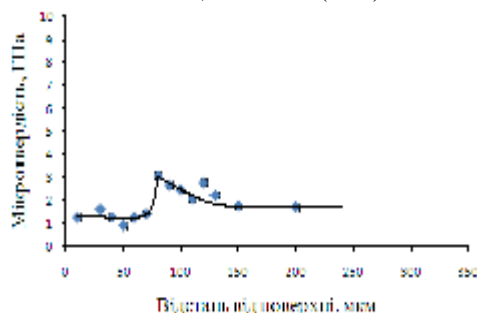


Рисунок 3 – Розподіл мікротвердості у поверхневому шарі зразка VT1-0 ЕІЛ на повітрі: анод – Al; I = 1,8..2 А; V = 60..70 В; τ = 300 с (5 хв)

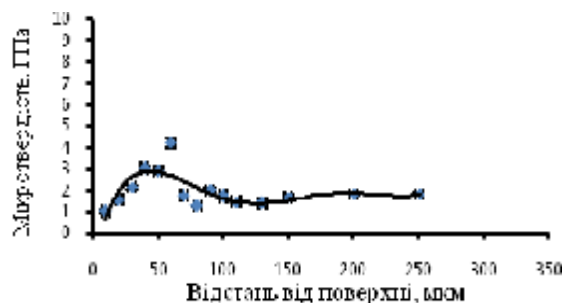


Рисунок 4 – Розподіл мікротвердості у поверхневому шарі зразка, VT1-0 ЕІЛ на повітрі: анод – Al; I = 1,8..2 А; V = 60..70 В; τ = 180 с (3 хв)

Можна припустити, що зростання твердості зумовлено тим, що у складі ЕІЛ покриттів, окрім компонентів основи та легуючого елементу, можуть спостерігатися продукти взаємодії із киснем, азотом і вуглецем (CO<sub>2</sub>) повітря протягом часу обробки.

Після попереднього легування алюмінієм за допомогою електроіскрового легування було проведено лазерну обробку на повітрі зразків титанового сплаву VT1-0. Внаслідок такої обробки на поверхні спостерігаються зони лазерної дії (рис. 5–7).

Структура лазерно-легованого шару зразка VT1-0 (рис. 5) характеризується сірим кольором із темними вкрапленнями і білим шаром по границі, яка обмежує лунку після лазерної обробки. Згідно до результатів мікродорометричного аналізу побудовано криві розподілу мікротвердості (рис. 8–10).



Рисунок 5 – Мікроструктура поверхневого шару зразка VT1-0, хімічне травлення – плавикова кислота у гліцерині, ЕІЛ на повітрі: анод – Al; I = 1,8..2 А; V = 60..80 В; τ = 300 с (5 хв), наступна ЛО: Wp=2,6 ГВт/м<sup>2</sup>

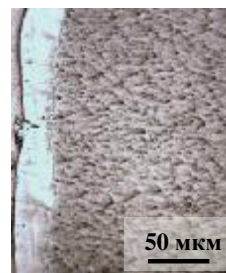


Рисунок 6 – Структура поверхневого шару зразка VT1-0, ЕІЛ на повітрі: анод – Al; I = 1,8..2 А; V = 60..80 В; τ = 300 с (5 хв), наступна ЛО: Wp=5 ГВт/м<sup>2</sup>



Рисунок 7 – Структура поверхневого шару зразка BT1-0, ЕЛП на повітрі: анод – Al;  $I = 1,8..2$  А;  $V = 60..80$  В;  $\tau = 180$  с (3 хв) наступна ЛО:  $W_p = 5$  ГВт/м<sup>2</sup>

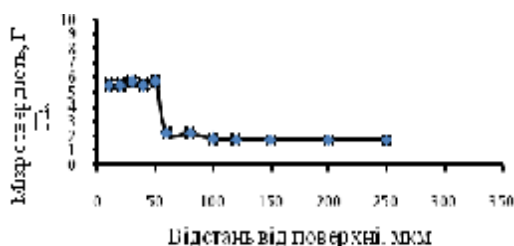


Рисунок 8 – Розподіл мікротвердості в поверхневому шарі зразка, BT1-0 ЕЛП на повітрі: анод – Al;  $I = 1,8..2$  А;  $V = 60..80$  В;  $\tau = 300$  с (5 хв) ЛО:  $W_p = 2,6$  ГВт/м<sup>2</sup>

Аналіз кривої мікротвердості показує, що в лазерно-легованому шарі відбувається рівномірний розподіл мікротвердості ( $\approx 5,5$  ГПа) зі значним зниженням значень у зоні термічного впливу (до 2 ГПа) і подальшим плавним зниженням до значень мікротвердості вихідного матеріалу ( $\approx 1,75$  ГПа).

Глибина лазерно-легованого шару для зразка після ЕЛП на повітрі (анод – Al;  $I = 1,8..2$  А;  $V = 60..80$  В;  $\tau = 300$  с (5 хв)) та наступної ЛО ( $W_p = 5$  ГВт/м<sup>2</sup>) складає близько 150 мкм (рис. 9).

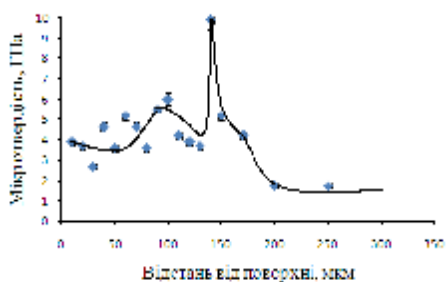


Рисунок 9 – Розподіл мікротвердості в поверхневому шарі зразка; BT1-0 ЕЛП на повітрі: анод – Al;  $I = 1,8..2$  А;  $V = 60..80$  В;  $\tau = 300$  с (5 хв) наступна ЛО:  $W_p = 5$  ГВт/м<sup>2</sup>

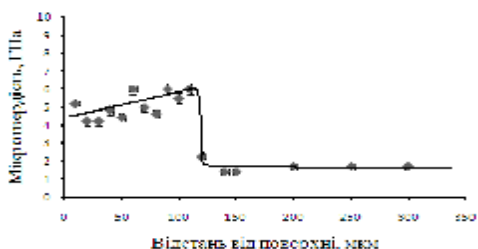


Рисунок 10 – Розподіл мікротвердості у поверхневому шарі зразка, BT1-0; ЕЛП на повітрі: анод – Al;  $I = 1,8..2$  А;  $V = 60..80$  В;  $\tau = 180$  с (3 хв) наступна ЛО:  $W_p = 5$  ГВт/м<sup>2</sup>

На основі цих даних можемо отримати порівняльну діаграму коефіцієнтів зміцнення (рис. 11) для зразків, що оброблювалися протягом 300 с (5 хв) і 180 с (3 хв), враховуючи також показники після ЕЛП.

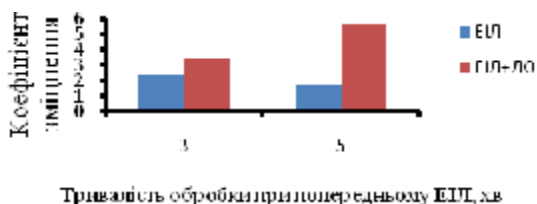


Рисунок 11 – Порівняльна діаграма коефіцієнтів зміцнення для зразків зі сплаву BT1-0 після ЕЛП (анод – Al;  $I = 1,8..2$  А;  $V = 60..80$  В) і для комбінованого типу обробки ЕЛП+ЛО ( $W_p = 5$  ГВт/м<sup>2</sup>) при різній тривалості ЕЛП алюмінієм

Цікавим є те, що коефіцієнт зміцнення після ЛО для зразка, попередньо легованого алюмінієм під час електроіскрової обробки протягом 300 с (5 хв), є вищим за коефіцієнт зразка оброблюваного 180 с (3 хв), навіть при тому, що коефіцієнт зміцнення після ЕЛП у першого менше.

Очікується, що у складі лазерно-оплавлених ЕЛП покриттів окрім з'єднань, утворених при взаємодії легуючих компонентів та основи, можуть утворитися продукти взаємодії з киснем, азотом і вуглецем (СО<sub>2</sub>) повітря протягом лазерного оплавлення та попередньої електроіскрової обробки.

Таким чином, можна зробити висновок, що поєднання ЕЛП алюмінієм і наступної ЛО для зразків титанового сплаву BT1-0 дає високі коефіцієнти зміцнення та збільшення протяжності зони покриття.

*Електронна мікроскопія.* Було проведено аналіз поверхневих шарів зразка титанового сплаву BT1-0 після комбінованої обробки: ЕЛП та наступної ЛО за допомогою растрової електронної мікроскопії (РЕМ). За результатами даного аналізу було визначено, що після ЕЛП+ЛО обробки легований шар має товщину близько 40 мкм (рис. 12).

Спостерігається виділення двох видів дисперсних частинок в межах легованої зони – це частинки, що мають округлу форму ( $\varnothing \approx 1..2$  мкм) (рис. 13) та частинки у вигляді дисперсних дендритів, в яких довжина за вертикаллю сягає близько 4...5 мкм, а довжина горизонтального перетину приблизно 2...3 мкм (рис. 14). Частинки у вигляді дисперсних систем дендритів не мають чуткої орієнтації, а розташовані у хаотичному порядку.

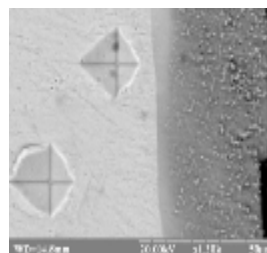


Рисунок 12 – Мікрофотографія на РЕМ мікроструктури поверхневого шару зразка BT1-0 у вторинних електронах, ЕЛП на повітрі: анод – Al;  $I = 2..2,5$  А;  $\tau = 300$  с (5 хв) та наступної ЛО на повітрі ( $W_p = 2,6$  ГВт/м<sup>2</sup>)

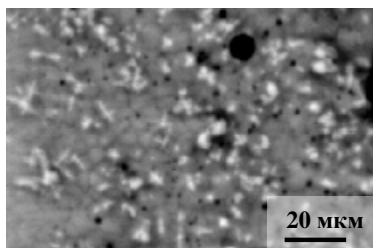


Рисунок 13 – Мікрофотографія на РЕМ ділянки поверхневого шару зразка ВТ1–0 у вторинних електронах, ЕІЛ на повітрі: анод – Al;  $I = 2..2,5$  А;  $\tau = 300$  с (5 хв) та наступної ЛО на повітрі ( $W_p = 2,6$  ГВт/м<sup>2</sup>)

Більш темний колір на мікрофотографіях, отриманих у вторинних електронах, відповідає вмісту більш легкого елемента – алюмінію. Можна припустити, що вздовж всього об'єму легованого шару алюміній розподілився приблизно рівномірно.

Також спостерігається світлотравлена перехідна зона суцільного характеру шириною 5...10 мкм.

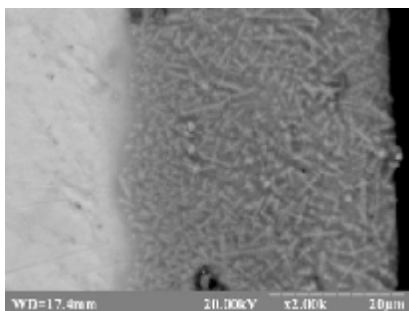


Рисунок 14 – Мікрофотографія на РЕМ поверхневого шару зразка ВТ1–0 у вторинних електронах, ЕІЛ на повітрі: анод - Al;  $I = 2..2,5$  А;  $\tau = 300$  с (5 хв) та наступної ЛО на повітрі ( $W_p = 2,6$  ГВт/м<sup>2</sup>)

**ВИСНОВКИ 1.** Згідно з результатами дослідження можна відмітити, що використання лазерної обробки після електроіскрового легування дозволяє суттєво (у 1,2...2 рази) підвищити мікротвердість поверхневого шару, отримати більш протяжні (80...120 мкм) і суцільні шари.

#### INFLUENCE OF COMBINED ELECTRO-SPARK ALLOYING FOLLOWED BY AIR LASER TREATMENT ON THE PROPERTIES OF TITANIUM ALLOY

**I. Ivashchenko, I. Smolina**

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»  
prosp. Peremogy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine. E-mail: [ivashchenko@kpm.kpi.ua](mailto:ivashchenko@kpm.kpi.ua)

**Yu. Gavrilyuk**

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University  
vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine.

The investigation of structure and microhardness of coatings obtained by methods of electro-spark alloying and laser treatment with melting titanium alloys are carried out. It is proved, that the subsequent laser treatment, which is following after electro-spark alloying, allows to increase microhardness in 1,2...2 times, отримати більш протяжні (80...120 мкм) і суцільні шари. Показано, що такі покриття можуть використовуватися в медичному приладобудуванні як біосумісні захисні покриття.

**Key words:** electro-spark alloying (ESA), laser treatment (LT), combined treatment, microhardness, electronic microscopy, alloyed layer.

2. Комбінована обробка, що включає електроіскрове легування алюмінієм титанового сплаву ВТ1–0, та наступна лазерна обробка може бути першим етапом формування багатошарових покриттів. Другим етапом планується формування на поверхні шару нітриду алюмінію. Такі покриття можуть використовуватися в медичному приладобудуванні як біосумісні захисні покриття.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Тихилов Р.М., Шаповалов В.М. Материалы, используемые в эндопротезировании тазобедренного сустава [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://bone-surgery.ru/articles/1358.htm>. – Назва заголовку з екрана.
2. Pavlov M., Novichenko D., Doubenskaia D. Optical Diagnostics of Deposition of Metal Matrix // Composites by Laser Cladding, Physics Procedia. – 2011. – Vol. 12. – PP. 674–682.
3. Savalani M.M., Ng C.C., Li Q.H., Man H.C. In situ formation of titanium carbide using titanium and carbon-nanotube powders by laser cladding // Applied Surface Science. – 2012. – Iss. 258. – PP. 3173–3177.
4. Czarnowska E., Wierzchon T., Maranda-Niedbala A. Properties of the surface layers on titanium alloy and their biocompatibility in in vitro tests // Journal of Materials Processing Technology. – 1999. – Vol. 92–93. – PP. 190–194.
5. Tang Chang-bin, Liu Dao-xin, Wang Zhan, Gao Yang. Electro-spark alloying using graphite electrode on titanium alloy surface for biomedical applications // Applied Surface Science. – 2011. – Iss. 257. – PP. 6364–6371.
6. Sampedroa J., Pérez I., Carcel B., Ramos J.A., Amigó V. Laser Cladding of TiC for Better Titanium Components // Physics Procedia. – 2011. – Vol. 12. – PP. 313–322.
7. Norbert Radek, Jurji Shalapko, Maciej Kowalski. Investigations of the Cu-Mo and Cu-Ti electrospark coatings after laser treatment // Vestnik dvigatelestroenia. – 2009. – № 1. – PP. 143–149 [Electronic resources]. – Access way: [http://www.nbu.gov.ua/portal/natural/vds/2009\\_1/30.pdf](http://www.nbu.gov.ua/portal/natural/vds/2009_1/30.pdf). – Назва заголовку з екрану.

REFERENCES

1. Tikhilov R.M., Shapovalov V.M. *Materials using in endo-prosthetic repair of hip joint* [Electronic resources]. – Access mode: <http://bone-surgery.ru/articles/1358.htm> [in Russian]
2. Pavlov M., Novichenko D., Doubenskaia D. Optical Diagnostics of Deposition of Metal Matrix // *Composites by Laser Cladding, Physics Procedia*. – 2011. – Vol. 12. – PP. 674–682.
3. Savalani M.M., Ng C.C., Li Q.H., Man H.C. In situ formation of titanium carbide using titanium and carbon-nanotube powders by laser cladding // *Applied Surface Science*. – 2012. – Iss. 258. – PP. 3173–3177.
4. Czarnowska E., Wierzchon T., Maranda-Niedbala A. Properties of the surface layers on titanium alloy and their biocompatibility in in vitro tests // *Journal of Materials Processing Technology*. – 1999. – Vol. 92–93. – PP. 190–194.
5. Tang Chang-bin, Liu Dao-xin, Wang Zhan, Gao Yang. Electro-spark alloying using graphite electrode on titanium alloy surface for biomedical applications // *Applied Surface Science*. – 2011. – Iss. 257. – PP. 6364–6371.
6. Sampedroa J., Pérez I., Carcel B., Ramos J.A., Amigó V. Laser Cladding of TiC for Better Titanium Components // *Physics Procedia*. – 2011. – Vol. 12. – PP. 313–322.
7. Norbert Radek, Jurji Shalapko, Maciej Kowalski. Investigations of the Cu-Mo and Cu-Ti electrospark coatings after laser treatment // *Vestnik dvigatelestroenia*. – 2009. – № 1. – PP. 143–149 [Electronic resources]. – Access way: [http://www.nbu.gov.ua/portal/natural/vds/2009\\_1/30.pdf](http://www.nbu.gov.ua/portal/natural/vds/2009_1/30.pdf).

Стаття надійшла 20.09.2012.  
Рекомендовано до друку  
д.т.н., проф. Драгобецьким В.В.