

СТРУКТУРООБРАЗУВАНЕ НА КОМПОЗИТНИ ПОКРИТИЯ ЧРЕЗ ЕЛЕКТРОННОЛЪЧЕВА МОДИФИКАЦИЯ

Фатме Падикова

*Технически университет- Габрово, ул. Хаджи Димитър 4, 5300 Габрово, България
Институт по електроника- БАН, бул. Цариградско шосе 72, 1784 София, България
кореспондиращ автор: f.padikova@yahoo.com

STRUCTURE FORMATION OF COMPOSITE COATINGS BY ELECTRON BEAM MODIFICATION

Fatme Padikova

*Technical University of Gabrovo, 4 H. Dimitar str., 5300 Gabrovo, Bulgaria
Institute of Electronics, BAS, 1784 Sofia, Bulgaria
Corresponding author: f.padikova@yahoo.com

Abstract

This article presents an overview of electron beam technologies for the modification of light metals, particularly titanium and aluminum. The focus is placed on the development of composite coatings and the improvement of their mechanical properties through the application of these methods. Electron beam technologies offer significant advantages and find wide applications in the automotive, aerospace, and metal-cutting industries, as well as in the manufacturing of various tools. The article presents specific examples of the use of a scanning electron beam for the modification of structure and enhancement of functional characteristics—such as hardness and wear resistance—of Ti- and Al-based materials.

Keywords: electron beam technologies, titanium, aluminum, composite coatings.

ВЪВЕДЕНИЕ

Технологиите, базирани на високоинтензивни потоци намират все по-широко приложение при създаването на нови усъвършенствани, свръхтвърди материали, както и при модифицирането на тяхната структура и свойства. Електроннолъчевите процеси се открояват като едни от най-перспективните методи за подобряване на повърхностните характеристики на материалите [1].

Електроннолъчевите технологии предлагат редица предимства в сравнение с конвенционалните методи:

- ниска себестойност на производството;

- значително съкратено време за изработване на единични инструменти и детайли;

- възможност за обработка на материали със сложна геометрия и конфигурация [2, 3].

При тези процеси кинетичната енергия на електроните се трансформира в топлина, като се формира определено термично разпределение. Параметрите на електроннолъчевото третиране могат да бъдат оптимизирани така, че да се стопи повърхностният слой на обработвания материал и да се образува течна вана. В нея могат да се въвеждат моди-

фикатори, които подобряват функционалните свойства на материала [4].

Разпределението на модификаторите в течната вана се обуславя от така наречената конвекция на Марангони, породена от високия температурен градиент във ваната [5]. Влиянието на конвекцията върху хомогенизацията се характеризира чрез числото на повърхностното напрежение (S), определено по формула (1) [5]:

$$S = \frac{\left(\frac{d\sigma}{dT}\right) q d}{\mu u_0 k} \quad (1)$$

където:

$(\partial\sigma/\partial T)$ е температурният коефициент на повърхностното напрежение;

q – топлинният поток;

d – диаметърът на електронния лъч;

μ – вискозитетът;

u_0 – скоростта на движение на образеца по време на процеса;

k – топлопроводимостта на материала.

По-ниските стойности на S водят до слабо изразени конвекционни процеси и нехомогенно разпределение на модификаторите в течната вана. Увеличаването на скоростта на движение на образеца намалява температурата, което от термодинамична гледна точка води до по-слаба смесимост между модификатора и основния материал.

Друг ключов параметър при електроннолъчевите процеси е плътност на входящата енергия [6], която се определя по формула (2):

$$E = \frac{UIt}{S} \quad (2),$$

където E е плътността на входната енергия (J/mm^2);

U – ускоряващо напрежение (V);

I – ток на лъча (A);

t – време на облъчване (s);

S – сканирана площ (mm^2).

При по-ниски стойности на E не се

достига температурата на топене на материала и не се формира течна вана. Ето защо технологичните параметри – ускоряващо напрежение, ток на лъча, време на облъчване (определяно от скоростта на движение на образеца и честотата на сканиране на електронния лъч) и сканирана площ – трябва да се оптимизират прецизно, за да се осигури стабилен и ефективен режим на електроннолъчевия процес.

В последните години формирането, модифицирането и характеризиране на леки метали и техните сплави представляват особен интерес за съвременната индустрия поради тяхното ниско специфично тегло, добри механични характеристики и висока термоустойчивост. Електроннолъчевото модифициране на алуминиеви и титанови материали е обект на интензивни научни изследвания и представлява значим принос към развитието на съвременните високотехнологични производствени процеси.

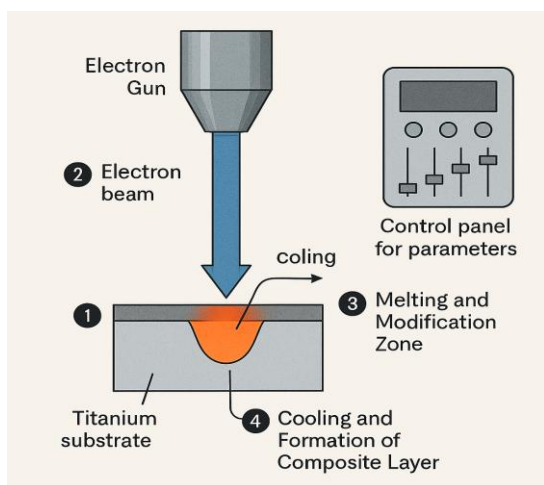
ИЗЛОЖЕНИЕ

ЕЛЕКТРОННОЛЪЧЕВА МОДИФИКАЦИЯ НА ТИТАНОВИ МАТЕРИАЛИ

Титанът и неговите сплави представляват материали от стратегическо значение за редица високотехнологични области – авиационна и космическа техника, енергетика, биомедицинско оборудване и други. Те се отличават с ниско специфично тегло, висока корозионна устойчивост и добра механична якост, но същевременно притежават относително ниска твърдост и изнosoустойчивост. Една от най-ефективните технологии за преодоляване на тези ограничения е електроннолъчевата повърхностна модификация, позволяваща формиране на композитни покрития с подобрени механични свойства.

В настоящата статия са представени механизмите за получаване на композитни покрития на основата на Ti-B и Ti-C, чрез електроннолъчеви техники и технологии. На фигура 1 е представена

принципна схема на електроннолъчева обработка на титаниеви образци.



Фиг. 1. Схема на електроннолъчева модификация на титанова подложка

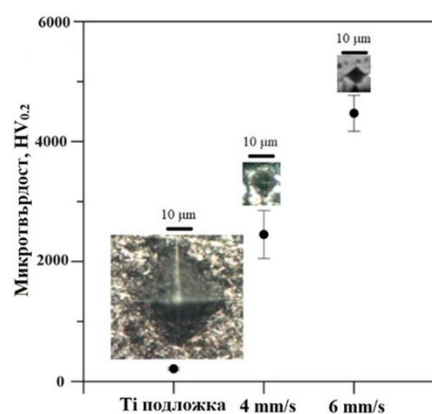
Известен факт е, че композитните структури на основата на титанови бориди и карбиди се характеризират с много добри механични свойства и получаването им във вид на покрития е от основен интерес за съвременната индустрия и практика.

Авторите на [6,7] са изследвали възможностите за получаване на композитни покрития на основата на титанови бориди и карбиди, като за нуждите на експерименталната дейност контролирано количество прахове от бор или въглерод се смесват със ацетон (C_3H_6O) или етанол (C_2H_5OH). Тази смес се хомогенизира и депозира върху повърхността на титанови подложки, като след последващото изпарение на въглеродород се формира хомогенен слой, състоящ се от борен или въглероден прах. След това е приложена технологията на електроннолъчева повърхностна модификация, с цел формирането на композитни покрития в системите Ti-C и Ti-B.

Авторите на [6] са изследвали влиянието на скоростта на движение на образца по време на процеса на електроннолъчева модификация. Изследвано е влиянието на две скорости на движение: 4 mm/s и 6 mm/s. Резултатите от микроструктурните изследвания показват, че при

по-ниската скорост от 4 mm/s е формирано покритие в системата Ti-B, характеризиращо се със силно нехомогенна структура. Прилагането на по-високата скорост на движение на пробата от 6 mm/s води до формиране на значително по-хомогенно покритие в гореспоменатата система, като само на повърхността се наблюдава малко количество неразтворен бор в основната титанова подложка.

Изследвана е и микротвърдостта на получените покрития като функция на скоростта на движение на образца по време на електроннолъчевия процес, като за сравнение са представени и данни за необработена титанова подложка. Резултатите са представени на фигура 2.



Фиг. 2. Микротвърдост на покрития в системата Ti-B, получени при различни скорости на движение на образца и на необработена титанова подложка

Микротвърдостта на подложката е около 210 HV_{0.2}. Тази стойност е типична за чистия титан [8]. Средната твърдост на повърхнинната сплав в системата Ti-B, формирана при скорост на движение на образца от 4 mm/s е 2610 HV_{0.2}, която е 12 пъти по-голяма от тази на подложката. Твърдостта на образца, получен при скорост на движение от 6 mm/s, е още по-висока. Измерените стойности достигат повече от 4540 HV_{0.2}, които съответстват на близо 21 пъти по-висока стойност от тази на Ti основа. Вижда се, че и в двата случая на скорост на движение, стойностите за микротвър-

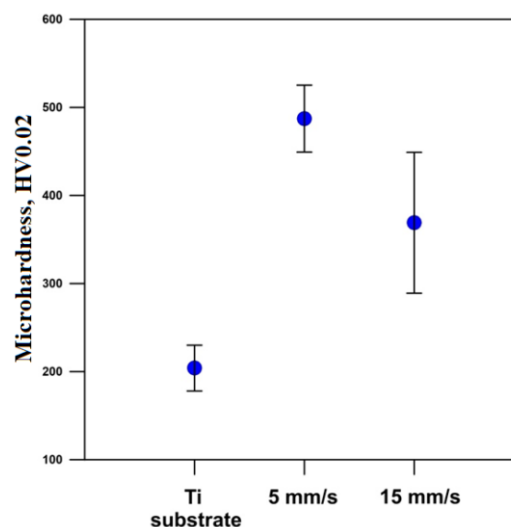
дост значително надвишават тази на необработената титанова подложка. Най-високи стойности са получени при движение на пробата със скорост от 15 mm/s, поради значително по-хомогенната микроструктура.

Друго перспективно направление е получаването на композитни покрития в системата Ti-C. В последните години са проведени редица изследвания, насочени към разработване на титанова основа, армирана с твърди частици от титанов карбид (TiC). Значим принос в тази област представлява работа [7]. В нея е представен процесът на формиране и характеризиране на Ti/TiC композитни слоеве, получени чрез електроннолъчева повърхностна модификация на титан.

Морфологичният анализ, извършен чрез сканираща електронна микроскопия (SEM), показва еднородно разпределение на карбидната фаза, докато рентгеноструктурният анализ (XRD) потвърждава образуването на стабилни TiC фази без наличие на вторични съединения. Получените резултати доказват, че електроннолъчевата модификация е ефективен метод за създаване на изнosoустойчиви композитни покрития върху титанова основа, приложими в натоварени механични среди.

Изследването доказва, че чрез използването на електроннолъчеви технологични параметри, оптимизирани за контрол на входящата енергия и скоростта на охлаждане, води до формиране на структура, състояща се от TiC зърна, равномерно разпределени в титановата матрица. В цитираната работа отново е изследвано влиянието на скоростта на движение на пробата по време на процеса на модификация. Реализирани са два експеримента при скорости от 5 и 15 mm/s. Получените композитни слоеве демонстрират значително подобрени механични свойства, като микротвърдостта на модифицираната зона достига стойности до 2.5 пъти по-високи спрямо изходния материал в случая на по-ниската скорост на движение на пробата.

На фигура 3 са представени резултатите от направените изследвания на дискутираната механична характеристика.

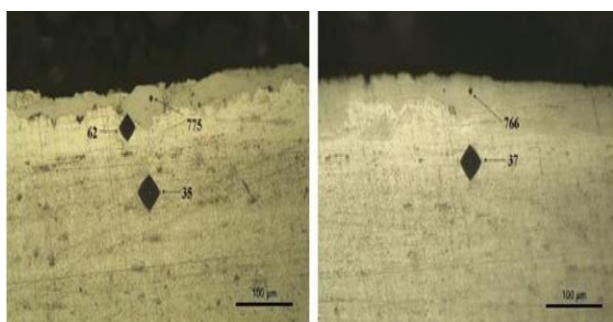


Фиг. 3. Микротвърдост на покрития в системата Ti-C, получени при различни скорости на движение на образеца и на необработена титанова подложка

ЕЛЕКТРОННОЛЪЧЕВА МОДИФИКАЦИЯ НА АЛУМИНИЕВИ МАТЕРИАЛИ

Алуминият и неговите сплави се смятат за едни от най-перспективните материали. Те съчетават редица ценни свойства, които ги правят незаменими в различни области на техниката и индустрията. Алуминият е изключително лек метал. В същото време неговите сплави притежават висока здравина, което позволява изработването на леки, но устойчиви конструкции. Това е особено важно в авиацията, автомобилостроенето и транспорта, където намаленото тегло води до икономия на гориво и енергия. Друго важно предимство е корозионната устойчивост на алуминия. Благодарение на естествения оксиден слой, който се образува на повърхността му, той не ~~ръждава~~ корозира и има дълъг живот дори при неблагоприятни условия. Въпреки това, биха могли да се споменат и някои недостатъци, например много ниските стойности на твърдост и изнosoустойчивост. Именно тези недостатъци се преодоляват от авторите на [9,10].

В тази работи е реализирана електроннолъчева повърхностна модификация на подложки от алуминий като на повърхността са въведени титанови и ниобиеви модификатори. Отново е изследвано влиянието на скоростта на движение на пробите по време на електроннолъчевия процес. Реализирани са експерименти при 5 и 10 mm/s. Доказано е, че дискутираният технологичен параметър силно влияе върху микроструктурата на формираните покрития. В случая на по – ниската скорост на движение на пробата е формирана значително по-хомогенна такава. Същите автори са установили, че тази обработка довежда до формиране на двуфазна структура във вид на фини частици от $(\text{Ti}, \text{Nb})\text{Al}_3$ равномерно разпределени в алуминиевата матрица. Същите тези автори [9,10] са изследвали микротвърдостта на формираните повърхностни структури. Те установяват, че независимо от скоростта на движение на пробата по време на процеса на електроннолъчева обработка твърдостта се повишава повече от 20 пъти в сравнение с основната алуминиева подложка. На фигура 4 са представени микроскопски изображения на напречен срез, където се наблюдават отпечатъците от реализираните експерименти по определяне на микротвърдост.



Фиг. 4. а) Изображение на напречен разрез на образца обработан с $V_1 = 5 \text{ mm/s}$.
б) Изображение на напречен разрез на образца обработан с $V_2 = 10 \text{ mm/s}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящото изследване представя обобщен аналитичен преглед на резулта-

ти, потвърждаващи, че електроннолъчевата повърхностна модификация представлява високоефективен и перспективен подход за формиране на композитни покрития върху леки метали, в частност титан и алуминий. Прецизният контрол върху основните технологични параметри – плътност на входящата енергия, скорост на движение на обработвания образец и време на облъчване – осигурява оптимален термичен режим, способстващ за равномерно разпределение на модификаторите в стопената зона и формиране на хомогенни структури с подобрени физико-механични характеристики.

Експерименталните резултати показват, че при титановите материали се реализира формиране на покрития в системите Ti–В и Ti–С, отличаващи се с повишение на микротвърдостта до над двадесет пъти спрямо изходната титанова подложка. Аналогичен ефект е установен и при алуминиевите образци, при които въвеждането на титанови и ниобиеви модификатори води до получаване на двуфазна структура, състояща се от фини частици $(\text{Ti}, \text{Nb})\text{Al}_3$, равномерно диспергирани в алуминиевата матрица, което обуславя значително нарастване на твърдостта и износоустойчивостта на обработената повърхност.

Обобщавайки резултатите, може да се заключи, че електроннолъчевите технологии представляват ефективен инструмент за целенасочено управление на структурата и свойствата на металните материали. Тяхното приложение позволява създаването на функционално градиентни и износоустойчиви повърхности, отговарящи на изискванията на съвременната високотехнологична индустрия. В този контекст електроннолъчевата модификация се утвърждава като ключов технологичен процес при разработването на ново поколение композитни покрития за нуждите на индустриалната промишленост.

БЛАГОДАРНОСТИ: Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Frazier W.E., Metal additive manufacturing: a review, J. Mater. Eng. Perform. 23(2014) 1917–1928.
- [2] Weglowski M., Electron beam rapid prototyping using wires and modification of the surface, In: T. Srivatsan, T. Sudarshan, K. Manigandan, editors. Manufacturing Techniques for Materials: Engineering and Engineered. 1st ed. Boca Ration, FL, USA: Taylor and Francis Group (2018) 133–160.
- [3] Valkov S., M. Ormanova, P. Petrov, Surface manufacturing of the materials by high energy fluxes, In: Mohammad Asaduzzaman Chowdhury, editor. Advanced Surface Engineering Research. 1st edition, InTechOpen, UK, (2018) 69–87.
- [4] Draper C.W., J.M. Poate, Laser surface alloying, Int. Met. Rev. 30 (2) (1985) 85–108.
- [5] Chan C., J. Mazumder, M. Chen, A two-dimensional transient model for convection in laser melted pool, Metall. Trans. A 15 (1984) 2175–2184.
- [6] Padikova, F., Nedeva, D., Dunchev, V., Stoyanov, B., Ormanova, M., Nedyalkov, N., Valkov, S. Fabrication and characterization of titanium borides by electron beam surface alloying. Coatings, 13 (2023). DOI:10.3390/coatings13111941.
- [7] Valkov, S., Nedeva, D., Dunchev, V., Padikova, F., Ormanova, M., Stoyanov, B., Nedyalkov, N. Fabrication and characterization of Ti/TiC composite layers by an electron-beam surface modification. Coatings, 13 (2023) 951. IF 2.9, Q2. DOI: 10.3390/coatings13050951.
- [8] da Rocha, S.S., Adabo, G.L., Henriques, G.E.P., de A. Nóbilo, M.A. Vickers hardness of cast commercially pure titanium and Ti-6Al-4V alloy submitted to heat treatments, Braz Dent J 17(2) (2006) 126–129.
- [9] Valkov S., P. Petrov, R. Lazarova, R. Bezdushnyi, D. Dechev, Formation and Characterization of Al – Ti – Nb Alloys by Electron Beam Surface Alloying, Applied Surface Science 389 (2016) 768–774.
- [10] Valkov S., D. Neov, R. Bezdushnyi, A. Beskrovnyi, D. Kozlenko, P. Petrov, Study of themicrostructure, crystallographic structure and thermal stability of Al–Ti–Nb alloys produced by selective electron beam alloying, Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques 12 (2018) 436–441.