

**ВЛИЯНИЕ НА МОЩНОСТТА НА ЛЪЧА ВЪРХУ
ВЪЗМОЖНОСТИТЕ ЗА ПОЛУЧАВАНЕ НА TI-NB СПЛАВИ ЧРЕЗ
ЕЛЕКТРОННОЛЪЧЕВА ПОВЪРХНОСТНА МОДИФИКАЦИЯ**

**Ивана Илиевска^{1,*}, Димитър Дечев¹, Николай Иванов¹, Ангел Анчев², Фат-
ме Падикова^{1,2}, Стефан Вълков^{1,2}**

¹*Институт по Електроника, Българска Академия на Науките, бул. "Цариградско шосе" №72, 1784-София, България*

²*Технически Университет – Габрово, Габрово, ул. Хаджи Димитър 4, България*

³*Център за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“, 5300 Габрово, България*

**кореспондиращ автор: ivannyilievaska@gmail.com*

**INFLUENCE OF BEAM POWER ON THE POSSIBILITY OF
OBTAINING OF TI-NB ALLOYS BY THE ELECTRON BEAM
SURFACE MODIFICATION**

**Ivana Ilievaska^{1,*}, Dimitar Dechev¹, Nikolay Ivanov¹, Angel Anchev²,
Fatme Padikova^{1,2}, Stefan Valkov^{1,2}**

¹*Institute of Electronics, Bulgarian Academy of Sciences, 72, Tsarigradsko chaussee blvd., Sofia 1784, Bulgaria*

²*Technical University Gabrovo, 4 Hadzi Dimitar, Gabrovo, 5300, Bulgaria*

³*Center of Competence “Smart Mechatronic, Eco-and Energy-Saving Systems and Technologies”, 5300 Gabrovo, Bulgaria*

**Corresponding author: ivannyilievaska@gmail.com*

Abstract

Ti–Nb alloys are considered highly promising for orthopedic applications due to their excellent functional properties, including superior biocompatibility and a low modulus of elasticity. Forming such intermetallic structures as thin films or coatings on advanced materials is particularly advantageous, as these materials are typically exposed to demanding service conditions. In this study, Ti–Nb coatings were fabricated on titanium substrates using an electron beam treatment technique. Initially, a 1 µm Nb layer was deposited on commercially pure titanium via Direct Current (DC) Magnetron Sputtering. The samples were subsequently modified by a scanning electron beam, with beam power varied between 1000 and 2000 W. The resulting phase composition of the intermetallic structures was analyzed using X-ray diffraction (XRD). Their microstructure and chemical composition were characterized by Scanning Electron Microscopy (SEM) and Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS), respectively. Mechanical performance was evaluated in terms of hardness, Young’s modulus, and Coefficient of Friction (COF). The results demonstrate that electron beam treatment enables the formation of Ti–Nb intermetallic coatings with enhanced mechanical and functional properties, making them promising candidates for biomedical and orthopedic applications. The potential integration of these coatings into implant manufacturing and modern biomedicine is discussed in detail.

Keywords: Ti-Nb alloys, electron beam

ВЪВЕДЕНИЕ

Титанът и неговите сплави отдавна са предпочитан избор за биомедицински приложения, особено при ортопедични, ортодонтски и стоматологични импланти, благодарение на отличната си биосъвместимост, устойчивост на корозия и благоприятни механични свойства [1,2,3]. Въпреки това модулът на еластичност титана (ср-Ti), макар и по-нисък в сравнение с много конструкционни метали, остава значително по-висок от този на човешката кост. Това несъответствие в механичните свойства може да доведе до повреда на импланта с течение на времето [4,5].

През последните години титан-ниобиевите (Ti-Nb) сплави се очертават като обещаващ клас биоматериали поради своя по-нисък модул на еластичност, отлична биосъвместимост и добра корозионна устойчивост [6]. Ниобият е известен със своята способност да стабилизира β -фазата на титана, която е свързана с понижен модул на еластичност и подобрени механични характеристики, подходящи за импланти, подложени на натоварване [7,8].

Повърхностните свойства на биоматериалите са от ключово значение за определяне на тяхното взаимодействие с околната биологична среда [9]. Поради това разработването на техники за модификация на повърхността, които подобряват функционалността и дълготрайността на имплантите, представлява значителен научен и практически интерес. Сред тези техники повърхностното третиране с електронен лъч (ЕВ) привлича внимание поради своята висока прецизност, висока енергийна плътност и способност локално да променя състава и структурата на повърхността, без да засяга обемните свойства на материала [10].

В комбинация с методи за нанасяне на тънки филми, като постоянно-токово (DC) магнетронно разпрашване и обработката със сканиращ електронен лъч предлага мощен подход за създаване на композитни покрития с контролирани свойства [13,14].

Настоящото изследване е фокусирано върху изработването на Ti-Nb покрития

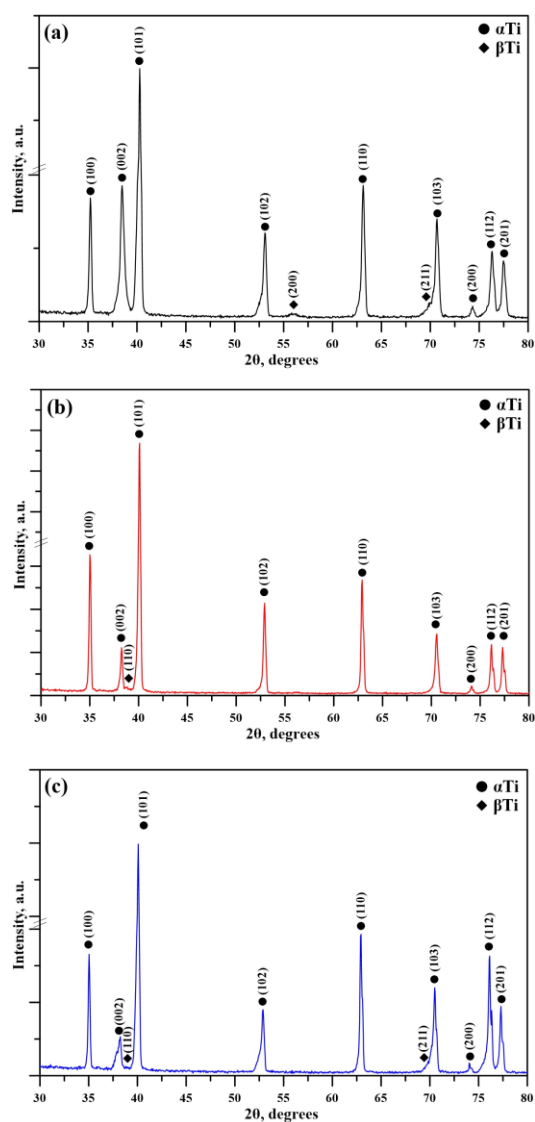
върху подложки от търговски чист титан (ср-Ti) чрез двуетапен подход: първоначално нанасяне на тънък слой ниобий чрез директно токово (DC) магнетронно разпрашване, последвано от повърхностна обработка с електронен лъч (ЕВ) за формиране на композитни покрития в системата Ti-Nb. Целта е да се изследва влиянието на мощността на електронния лъч върху фазовия състав, микроструктурата и механичните свойства на получените покрития. Проведени са експерименти при три различни мощности: 1200 W, 1500 W и 1800 W.

Чрез цялостна характеристика, включваща рентгенова дифракция (XRD), сканираща електронна микроскопия (SEM) и механични изпитвания, настоящата работа има за цел да оцени потенциала на Ti-Nb покритията за ортопедични приложения. Получените резултати допринасят към нарастващия обем знания в областта на повърхностното инженерство за биомедицински импланти, като подчертават възможностите за подобряване на тяхната ефективност и дълготрайност чрез напреднали технологии за покрития.

ИЗЛОЖЕНИЕ

На фигура 1 са представени експериментално получените рентгенови дифрактограми при мощностите от 1200W, 1500 W и 1800 W. Във всички разглеждани случаи се наблюдава нисък фон, като наблюдаваните дифракционни пикове са индексирани според кристалографската база данни ICDD (International center for diffraction data). Всички разглеждани случаи се наблюдава двуфазна структура от α титан (характеризираща се с хексагонална плътнопакетована структура) и β титан (характеризираща се с обемно-центрирана кубична структура). Тези резултати показват, че разглеждания технологичен параметър (мощността на електронния лъч) в изследвания диапазон не влияе върху фазовия състав. Трябва да се отбележи, че експериментално получената позиция на пиковете съответстващи на бета фазата са отместени към по-високите ъгли на Брег в сравнение с данните, налични в кристалографската база

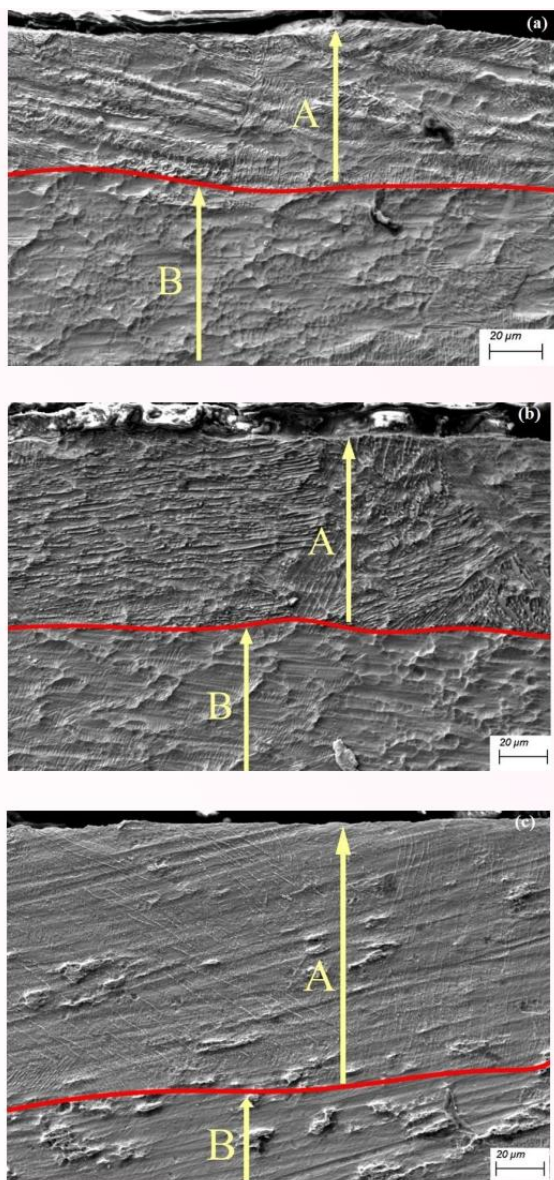
данни. Трябва да се отбележи, че тези данни са валидни за β -фазата при висока температура, при която тя е стабилна - над 1153 K. β фазата, наблюдавана в настоящото изследване, обаче се дължи на наличието на Nb в модифицираната зона, който е известен като β стабилизиращ елемент, а XRD измерванията са проведени при стайна температура. Следователно, параметрите на елементарната клетка и позицията на пиковите на тази фаза трябва да са различни в сравнение с данните от ICDD. Обсъжданото изместване в този случай е свързано с атомните радиуси на стабилизиращия елемент. Такива ефекти са наблюдавани и в изследвания [11].



Фиг. 1. Експериментално получени рентгенови дифрактограми на композитни слоеве от Ti-Nb при различни мощности: (a) 1200 W; (b) 1500 W; (c) 1800 W

На фигура 2 са представени микроскопски изображения на напречен срез, получени чрез сканираща електронна микроскопия (СЕМ). Фигура 2 (a) представя микроструктурата на модифицираната зона при обработка с мощност от 1200 W; фигура 2 (b) – при обработка с мощност от 1500 W; фигура 2 (c) – при обработка с мощност от 1800 W. Ясно се вижда, че с увеличаването на мощността на електронния сноп дебелината на обработената зона нараства. В случай на обработка при мощност от 1200 W дебелината на тази зона е 50 μm . При увеличаване на дискутирания технологичен параметър до 1500 W дебелината нараства до около 70 μm . В случай на най-високата стойност на мощността на електронния лъч, наблюдаваната дебелина на третираната зона достига до около 90 μm . Тези резултати са в пълно съгласие с твърденията на авторите на [12], които са изследвали влиянието на мощността на електронния сноп върху дебелината на модифицираната зона при електроннолъчева повърхностна модификация. Техните резултати свидетелстват за увеличаване на дебелината с увеличаване на мощността. Анализът на микроструктурата на формираните модифицирани зони във всички разглеждани случаи показва наличие на мартензитна структура. Това е типично за процесите на електроннолъчева повърхностна модификация. При високите скорости на охлаждане на титанови сплави (типични за модификацията на материали с високоинтензивни потоци) високотемпературната β -фаза (обемно-центрирана кубична структура) се трансформира бездифузионно в мартензитна структура от тип α' или α'' . Тази трансформация настъпва поради силно ограниченото време за дифузия на атомите. В резултат се формира метастабилна, твърда и напрегната мартензитна микроструктура с повишена якост, но намалена пластичност. Процесът е характерен за титановите сплави, съдържащи различни количества β -стабилизатори, и е от съществено значение за уп-

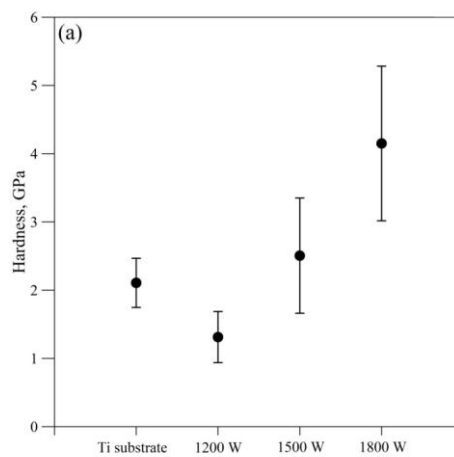
равлението на техните механични свойства чрез термична обработка.



Фиг. 2. Микроскопски изображения на напречен срез на слоеве от Ti-Nb при различни мощности: (a) 1200 W; (b) 1500 W; (c) 1800 W

На фигура 3 са представени резултатите от изследванията на микротвърдост на разглежданите образци. За сравнение е представена и необработената титанова подложка. Вижда се, че при най-ниската стойност на мощност на електронния сноп, дискутираната механична характеристика намалява в сравнение с необработената титанова подложка – от около 2 GPa до около 1.6 GPa. При понататъшно

увеличение на мощността на лъча се наблюдава последващо увеличение на твърдостта, като в случай на модификация с мощност на електронния сноп от 1500 W, тя е около 2.4 GPa. При модификация с мощност на лъча от 1800 W се наблюдава най-високата измерена стойност, доближаваща се до 4 GPa. Това увеличение на твърдостта с увеличаване на мощността се дължи на по-високите скорости на охлаждане, което води до формиране на по-фини мартензитни зърна.



Фиг. 3. Твърдост на слоеве от Ti-Nb при различни мощности: 1200 W; 1500 W; 1800 W, както и чиста титанова подложка.

Анализът на микроструктурата и твърдостта на Ti-Nb повърхностните сплави предоставя ценна информация за техните механични свойства и приложимост в различни дентални и ортодонтични отрасли. Увеличаването на твърдостта обикновено показва структурно уякчаване чрез механизми като фазови преходи ($\beta \rightarrow \alpha'$). Тези промени подобряват устойчивостта на сплавите срещу износване и повърхностни повреди, което води до по-голяма издръжливост и по-добро плъзгане в ортодонтичните брекети. Въпреки това прекалено високата твърдост може да намали пластичността и еластичността, които са ключови за осигуряване на плавни и постоянни ортодонтични сили. Затова контролът върху състава и термичната обработка е от съществено значение за постигане на оптимален баланс между твърдост, якост и гъвкавост. В заключение, изследванията за твърдост

са ефективен метод за гарантиране, че Ti–Nb сплавите проявяват необходимите механични свойства за безопасни, ефективни и дълготрайни ортодонтични дъги.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получените в настоящото изследване резултати показват възможностите за формиране на Ti–Nb покрития върху титанови подложки чрез технология за повърхностна модификация с електронен лъч. Беше изследвано влиянието на мощността на електронния лъч. Резултатите показват, че микроструктурата на формираните повърхностни сплави е съставена от мартензитна и бета фаза. Увеличаването на мощността на лъча води до намаляване на количеството ниобий във формираното покритие. Сплавите, получени при по-ниски стойности на мощността на електронния лъч, се характеризират с по-ниска твърдост в сравнение с основния титанов субстрат. Въпреки това, по-нататъшното увеличаване на мощността на лъча води до нарастване на разглежданите механични характеристики. Тези резултати откриват нови перспективи за приложение в ортодонтията и в областта на съвременната биомедицина.

Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие по ОП „Научни изследвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация 2021–2027“, проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност „Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Yue Gao and Wentao Jiang and Da Zeng and Xiongwei Liang and Chaoli Ma and Wenlong Xiao, Additive manufacturing of titanium alloys for biomedical applications: A systematic review, Review of Materials Research, Volume 1, Issue 1, January **2025**.
- [2] Cherneva, Sabina & Stoyanova-Ivanova, Angelina & Petrunov, Vladimir & Petrova, Violeta & Ilievska, Ivana & Mikli, Valdek & Iankov, Roumen, Investigation of mechanical and physicochemical properties of clinically retrieved titanium-niobium orthodontic archwires, Acta of bioengineering and biomechanics / Wroclaw University of Technology **2020**.
- [3] M. Niinomi, M. Nakai, J. Hieda, Development of new metallic alloys for biomedical applications Acta Biomater, 8, pp. 3888, **2012**.
- [4] Kai-Yang Liu, Li-Xia Yin, Xu Lin, Shun-Xing Liang, Development of Low Elastic Modulus Titanium Alloys as Implant Biomaterials, Recent Progress in Materials 4(2), **2022**, 008.
- [5] Juliana Dias Corpa Tardelli, Bruna Monteiro de Barros Ciribelli Alves, Mariana Lima da Costa Valente, Andr´ea Candido dos Reis, Influence of the modulus of elasticity of dental implants on the distribution of stresses in the alveolar bone by the finite element method: A systematic review, Journal of Oral and Maxillofacial Surgery, Medicine, and Pathology 35, **2023**, 383-389.
- [6] S. Gabriel, J. Dille, C. Nunes, G. Soares, The effect of niobium content on the hardness and elastic modulus of heat-treated ti-10mo-xnb alloys, Regular Articles Mat. Res. 13 (3) **2010**, 333-337.
- [7] E Eisenbarth, D Velten, M Müller, R Thull, J Breime, Biocompatibility of β -stabilizing elements of titanium alloys, Biomaterials 25(26), **2004**, 5705-5713
- [8] Mukesh Rani, Vipasha Sharma, Medical Implants: An Overview, Innovation and Future Prospects, Asian Journal of Pharmacy and Technology, 15(2), **2025**, 157-5.
- [9] Peiyun Yi, Linfa Peng, Jiaqiang Huang, Multilayered TiAlN films on Ti6Al4V alloy for biomedical applications by closed field unbalanced magnetron sputter ion plating process, Materials Science and Engineering: C, 59, **2016**, 669-676.
- [10] Valkov, S.; Ormanova, M.; Petrov, P., Electron-Beam Surface Treatment of Metals and Alloys: Techniques and Trends. Metals 10, **2020**, 1219,.
- [11] K. Panda, K. Ravi Chandran, Synthesis of ductile titanium–titanium boride (Ti–TiB) composites with a beta-titanium matrix: the nature of TiB formation and composite properties, Metall. Mater. Trans. 34 (6) (2003) 1371–1385
- [12] Angelov, V.; Ormanova, M.; Kaisheva, D.; Lazarova, R.; Dimitrova, R.; Petrov, P. Selective electron beam surface alloying of aluminum with TiCN nanoparticles. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B 2019, 440, 88–94