

М.С. Стечишин, О.В. Диха, Н.С. Машовець

**ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ АЗОТОВАНИХ В  
ТЛЮЧОМУ РОЗРЯДІ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ  
ЕЛЕМЕНТІВ ЗБРОЇ**

**Анотація:** представлені теоретичні та експериментальні дослідження процесів безводневого низькотемпературного азотування в тліючому розряді титанових сплавів. На основі фізики низькотемпературних газорозрядних процесів та енергетичної моделі азотування, аналізу відносних енергетичних факторів розроблена та експериментально доведена методика вибору оптимальних параметрів технологічного режиму безводневого азотування, що дозволяє забезпечити характеристики поверхневого зміценого азотуванням шару відповідно до екстремальних умов експлуатації робочих елементів зброї.

**Ключові слова:** титанові сплави, низькотемпературне азотування, фази

**Annotation:** Theoretical and experimental studies of the processes of anhydrous low-temperature nitriding in the glow discharge of titanium alloys are presented. Based on the physics of low-temperature gas-discharge processes and the energy model of nitriding, the analysis of relative energy factors, a technique for choosing the optimal parameters of the technological regime of anhydrous nitriding has been developed and experimentally proven, which allows to ensure the characteristics of the nitriding surface layer in accordance with the extreme conditions of operation of the working elements of weapons.

**Keywords:** titanium alloys, low-temperature nitriding, phases

Серед матеріалів сучасної техніки титан та його сплави займають важливе місце завдяки унікальним фізичним, хімічним та технологічним властивостям. Титан серед інших металів виділяється високою міцністю при кімнатній температурі та підвищених температурах, хорошою корозійною стійкістю та рядом інших цінних якостей, що і зумовило його дедалі більше застосування для виготовлення елементів зброї для ЗСУ. Таким чином, титанові сплави мають високу міцність і пластичність, малу густину, високу корозійну та ерозійну стійкість у морській воді, значну теплоємність і невелику теплопровідність та незначний коефіцієнт термічного розширення, низький модуль пружності. Так, промислові титанові сплави із  $\sigma_b \approx 1000 \dots 1100$  МПа мають питому міцність у 1,7-1,8 разів більш високу, ніж сталі такої ж міцності [1].

По структурі титанові сплави розділяють на три групи: 1) однофазні  $\alpha$ -сплави; 2) двофазні  $\alpha+\beta$ -сплави; 3) однофазні  $\beta$ -сплави. Найбільше використання отримали  $\alpha$ - та  $\alpha+\beta$  сплави [1]. По міцності існуючі титанові сплави розділяють на сплави з низькою (BT1, BT1-0, BT1-00), середньою (OT4, AT3, BT5-1), підвищеною (BT5, BT6, AT6, BT20) і високою міцністю (BT3-1, BT8, BT9, BT22, BT18, BT14, BT16

На сьогоднішній день існує велика кількість методів зміцнення титану та сплавів на його основі, серед яких найбільш використовуються газове азотування, іонна імплантація, лазерне азотування, плазмове азотування, а також методи хімічного (CVD) та фізичного (PVD) осадження. Кожний метод має свої переваги та недоліки. Для інтенсифікації процесу поверхневого зміцнення титану та сплавів на його основі перспективним є метод іонного азотування (азотування в тліючому розряді). Основи теорії та практики безводневого азотування в тліючому розряді розроблені В.Г Каплуном та І.М Пастухом [1, 2].

При використанні високотемпературного азотування погіршуються механічні характеристики, зокрема пластичність, та утворюється крихкий азотований шар. Тому перевага надається низькотемпературному азотуванню.

Азотування із застосуванням тліючого розряду дозволяє знизити температуру обробки до 600°C [3]. У роботі [4] розглядається можливість іонного азотування відпалених  $\alpha$ - і  $(\alpha+\beta)$ -сплавів титану при температурах, що не перевищують температуру відпалу даного сплаву на 30...50°C, оскільки при цьому зберігаються їх механічні характеристики. Підвищення температури обробки вище цих значень приводить до помітного росту кристалів  $\alpha$ - і  $\beta$ -фаз, а також до укрупнення виділень  $\epsilon$ -фази у дифузійній зоні, що погіршує шорсткість поверхні і

призводить до більш інтенсивного зношування [3]. В роботах [3,4] представлено іонне азотування титану та сплавів на його основі шляхом інтенсифікації тліючим розрядом при низькій температурі. Таке азотування досить ефективно і показує значно кращу кінетику росту поверхневого шару порівняно з традиційним азотуванням у печах. Після азотування мікротвердість поверхні підвищується в 3 рази.

Для досліджень використовували ( $\alpha+\beta$ ) сплави титану марки: VT3-1, VT6 та VT8, які мають широке застосування у промисловості. Хімічний склад цих сплавів приведено у табл. 1, механічні властивості титанових сплавів у табл. 2.

**Табл. 1. Хімічний склад титанових сплавів**

Сплав	Структура	Вміст елементів, мас.%					
		Al	Cr	Mo	Zr	Si	Fe
VT3-1	$\alpha+\beta$	5,5-7,0	0,8-2,3	2,0-3,0	0,5	0,1-0,4	0,5
VT6	$\alpha+\beta$	5,3-6,8	-	-	-	0,15	0,3
VT8	$\alpha+\beta$	5,8-7,0	-	3,5	0,5	0,3	0,3

**Табл. 2. Механічні властивості титанових сплавів**

Сплав	Межа текучості, $\sigma_{0,2}$ , МПа	Межа міцності, $\sigma_B$ , МПа	Відносне видовження, $\delta_5$ , %	Відносне звуження, $\psi_5$ , %	Ударна в'язкість K <sub>SU</sub> , Дж/см <sup>2</sup>
VT3-1	930	1030	10	25	30
VT6	1000-1050	1100-1150	14-16	30	34
VT8	960	1050-1250	8-12	25	40

Для модифікації поверхні титанових сплавів використовували низькотемпературне азотування в тліючому розряді в безводневому середовищі. Азотування проводилося на експериментальній установці "УАТР-1", яка розроблена Подільським науковим фізико-технологічним центром (ПНФТЦ) в Хмельницькому національному університеті [1,2].

Для визначення якості поверхневого шару та структури внутрішніх шарів модифікованих титанових зразків, проводили мікроструктурний аналіз металів. У оптичному мікроскопі МІМ – 10 розглядали мікрошліфи, що мають шліфовану і поліровану гладку поверхню. Дослідження мікроструктури азотованих титанових сплавів проводили на „прямих” та „косих” шліфах. В даній роботі для рентгеноструктурних досліджень використовували ДРОН-3М. За допомогою рентгеноструктурного аналізу визначали фазовий та кількісний склад поверхневих шарів титанових сплавів після іонного азотування. Рентгеноструктурний аналіз проводився з автоматичним записом кривих розподілу інтенсивності дифракційних віддзеркалень в кобальтовому випромінненні. Оже-спектрометрія (ЕОС) виконана за допомогою серійного растрового електронного оже-спектрометра JAMP-10S (фірма JEOL, Японія).

Досліджено вплив параметрів безводневого азотування в тліючому розряді (БАТР) на формування модифікованих нітридних шарів. Прогнозування процесу формування нітридів в титанових сплавах при азотуванні в тліючому розряді виконано на основі теоретичних основ фізики процесу азотування та енергетичної моделі процесу, розроблених сумісно з І. М. Пастухом. Введено поняття відносних енергетичних факторів (ВЕФ), які характеризують як процеси утворення нітридів, дифузії азоту, так і розпорошення нітридів. Експериментально показано, що величина ВЕФ утворення нітридів і, відповідно, фізико-механічні характеристики поверхні можна змінювати в широких межах в залежності від технологічних параметрів процесу азотування. При певних технологічних режимах можна отримати екстремальні значення ВЕФ і, відповідно, мікротвердість та товщину нітридного шару. Таким чином, розроблені на основі енергетичної моделі теоретичні положення та система аналітичних показників цілком адекватно відображають процес формування модифікованих шарів на поверхні титанових сплавів внаслідок низькотемпературного БАТР.

Дослідження показали, що в залежності від технологічних параметрів азотування можна отримувати на поверхні фази TiN, Ti<sub>2</sub>N і твердий розчин  $\alpha$ -Ti(N). При температурі 540

°C і тиску 80 Па на поверхні утворюється більш пластична фаза Ti<sub>2</sub>N і відсутня фаза TiN і лише з підвищенням температури на поверхні з'являється фаза TiN. В результаті цієї частини досліджень розроблена методика вибору оптимальних параметрів технологічного режиму БАТР, що дозволяє забезпечити оптимальні характеристики поверхневого зміщеного азотування шару відповідно до екстремальних умов експлуатації зброї ЗСУ.

#### Список використаних джерел

1. Каплун В. Г., Каплун В. Г. Ионное азотирование в безводородных средах : монография. Хмельницький: ХНУ, 2015. 315 с
2. Пастух И. М. Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде. Харьков: Нац. научный центр «Харьковский физико-технический институт», 2006. 364 с.
3. Stechyshyna, N.M., Stechyshyn, M.S., Oleksandrenko, V.P. *et al.* Influence of the Power Parameters of Hydrogen-Free Nitriding in Glow Discharge on the Physicochemical Properties of 40Kh Steel. *Mater Sci* 57, 484–491 (2022). <https://doi.org/10.1007/s11003-022-00569-y>
4. Пастух І. М. Прогнозування формування нітридів в титанових сплавах при азотуванні в тліючому розряді / І. М. Пастух, Н. С. Машовець // Вісник Хмельницького національного університету. – 2007. – № 3. – Т. 2 (93). – С. 28–36.

*Стечишин Мирослав Степанович - д-р техн. наук, професор, професор кафедри галузевого машинобудування та агроінженерії, e-mail: miro@gmail.com Хмельницький національний університет, м. Хмельницький*

*ORCID <https://orcid.org/0000-0001-5780-2790>*

*Хмельницький національний університет, Інститутська, 11, м. Хмельницький, 29016.*

*Духа Олександр Володимирович - д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри трибології, автомобілів та матеріалознавства, e-mail: tribosenator@gmail.com Хмельницький національний університет, м. Хмельницький, 29016*

*ORCID <https://orcid.org/0000-0003-3020-9625>*

*Хмельницький національний університет, Інститутська, 11, м. Хмельницький, 29016.*

*Машовець Наталія Сергіївна - канд.техн.наук, доцент кафедри архітектури та містобудування, mashovetsns@ukr.net Хмельницький національний університет, м. Хмельницький*

*ORCID <https://orcid.org/0000-0001-9181-5253>*

*Хмельницький національний університет, вул. Інститутська 11, м.Хмельницький, 29016*

*Stechyshyn Myroslav Stepanovych - Dr. Tech. Sciences, professor, professor of the Department of Industrial Mechanical Engineering and Agricultural Engineering, e-mail: miro@gmail.com Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi*

*ORCID <https://orcid.org/0000-0001-5780-2790>*

*Khmelnytskyi National University, Instytutaska, 11, Khmelnytskyi, 29016.*

*Dykha Oleksandr Volodymyrovych - Dr. Tech. Sciences, professor, head of the department of tribology, automobiles and materials science, e-mail: tribosenator@gmail.com Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi*

*ORCID <https://orcid.org/0000-0003-3020-9625>*

*Khmelnytskyi National University, Instytutaska, 11, Khmelnytskyi, 29016.*

*Mashovets Nataliya Serhiyivna - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Architecture and Urban Planning, mashovetsns@ukr.net Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi*

*ORCID <https://orcid.org/0000-0001-9181-5253>*

*Khmelnytskyi National University, str. Instytutaska 11, Khmelnytskyi, 29016*