

Стечишин М. С., Люховець В. В., Стечишина Н. М., Здоренко Д. В.

ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ АЗОТУВАННЯ В ТЛІЮЧОМУ РОЗРЯДІ НА МІЦНІСТЬ СТВОЛІВ МІНОМЕТІВ

Анотація: Досліджували вплив технологічних параметрів безводневого азотування в тліючому розряді (температура азотування, склад насичувального середовища, тиск в газорозрядній камері та тривалість азотування) на структурний і фазовий склад, товщину азотованого шару, мікротвердість та її розподіл по глибині зміцненого азотуванням поверхневого шару внутрішніх поверхонь стволів мінометів із титанового сплаву VT22.

Ключові слова: титановий сплав VT22, азотування, мікротвердість, міцність.

Annotation: The influence of technological parameters of hydrogen-free nitriding in a glow discharge (nitriding temperature, composition of the saturating medium, pressure in the gas discharge chamber, and nitriding duration) on the structural and phase composition, thickness of the nitrided layer, microhardness, and its distribution over the depth of the nitriding-hardened surface layer of the internal surfaces of mortar barrels made of titanium alloy VT22 was investigated.

Keywords: titanium alloy VT22, nitriding, microhardness, strength.

Метою досліджень було визначення залежності характеристик азотованого шару (глибини, твердості, структури, фазового і хімічного складу) від основних параметрів технологічного процесу (тиску, складу насичувального середовища, температури і тривалості процесу). У якості робочих газів застосовувалися суміші азоту і аргону (в різних співвідношеннях), температура насичення змінювалася від 700 °С до 800 °С, тиск газової суміші в процесі дифузійного насичення – від 67 Па до 320 Па, тривалість процесу – від 240 хв до 300 хв. Зразки для азотування являли собою пустотілі циліндри (втулки): $D_{\text{зовн}} = 50^{-0,1}$ мм, $d_{\text{вн}} = 35^{+0,05}$ мм, $L = 50$ мм. Розміри зразків визначали за критерієм геометричної подібності із виробом замовника. Фізико-хімічний аналіз зразків виконувався у три етапи: мікроскопія – аналіз зображення з метою виявлення структури матеріалу; вимірювання мікротвердості (твердометрія); рентгенофазовий аналіз [1]. Останній етап випробувань включав деформувальне протягування в технологічному мастилi із визначенням осьової сили протягування.

Виходячи з того, що сам процес безводневого азотування в тліючому розряді (БАТР) дозволяє широку зміну властивостей отримуваних покриттів через прості, легко керовані технологічні параметри, отримуємо можливість їх оптимізації за заданими контрольними характеристиками. При цьому вихідними параметрами процесу поверхневого зміцнення можуть бути як експлуатаційні (зносостійкість, міцність, тріщиностійкість, втомна витривалість), так і внутрішні фізико-механічні властивості (товщина шару, фазовий склад дифузійного шару, його структура, твердість тощо) [2].

Для визначення оптимальної кількості азоту в насичувальному середовищі, температури та тиску в розрядній камері проведено ряд технологічних режимів (6 режимів) зміцнення титану VT22. Технологічні параметри процесу утворення нітридного шару в тліючому розряді: температура процесу $T = 700\text{--}750^\circ\text{C}$, тривалість зміцнення $\tau = 300$ хв, тиск в камері змінювався від 67 Па до 320 Па, вміст азоту в насичувальному середовищі - від 15 % до 75 % об.

У процесі досліджень зразків із титану VT22 отримані залежності поверхневої мікротвердості нітридного шару від технологічних параметрів процесу зміцнення – тиску в розрядній камері та вмісту азоту в насичувальному середовищі. Дані поверхневої мікротвердості зміцнених втулок (1 – 6) і їх режими наведені в таблиці 1.

Для визначення глибини азотованого шару на втулках зробили шліфи і визначили мікротвердість, а дані занесли в таблицю 2. Залежності зміни мікротвердості по глибині азотованого шару при різних технологічних режимах зміцнення показані на рисунку 1.

Таблиця 1. Режими азотування втулок (втулки 1-6)

Номер втулки	Режими азотування	Мікротвердість Н _{0,1}	
		до зміцнення	після зміцнення
1	2	3	4
1	Температура Т=750°C; тиск р=320 Па; суміш: 50%N ₂ +50% Ar об; час t=300 хв	420	1310
2	Температура Т=700°C; тиск р=320 Па; суміш: 15%N ₂ +85% Ar об; час t=300 хв	420	790
3	Температура Т=700°C; тиск р=320 Па; суміш: суміш: 50%N ₂ +50% Ar об; час t=300 хв	420	760
4	Температура Т=750°C; тиск р=67 Па; суміш: 75%N ₂ +25% Ar об; час t=240 хв. Втулку попередньо нагрівали в середовищі аргону до температури 800 °C та витримали при цій температурі на протязі 60 хв. Потім деталь охолодили до Т=560°C, відкачавши аргон. Далі втулку нагріли до Т=750°C.	420	724
5	Температура Т=750°C; тиск р=67 Па; суміш: 75%N ₂ +25% Ar об; час t=120 хв. Втулку нагріли в середовищі аргону до температури Т=750 °C та витримали при цій температурі на протязі 60 хв. Потім з камери відкачали аргон і почали нагрівати деталь до Т=750°C в середовищі 75%N ₂ +25% Ar, втулку нагріту до Т=750°C азотували 60 хв. Далі з камери відкачали робочу суміш і повторили нагрів втулки до Т=750°C в середовищі аргону на 60 хв. Потім знову повторили нагрів в суміші та в аргоні. Деталь нагрівали три рази в аргоні та два рази в суміші.	420	918
6	Азотування проводили при Т=700°C ; тиск р=67 Па; суміш: 15%N ₂ +85% Ar; t=240 хв. Втулку нагріли в середовищі 15%N ₂ +85% Ar до температури 700 °C та протримали при цій температурі на протязі 240 хв. Потім з камери відкачали суміш робочих газів і почали нагрівати деталь до Т=750°C в середовищі Ar=100%, втулку нагріту до Т=750°C витримали 60 хв і охолодили разом з камерою.	420	544

Таблиця 2. Розподіл твердості НV_{0,1} по глибині азотованого шару ВТ22 (втулки 1-6)

Номера азотованих втулок	Глибина, мкм										
	0 (на поверхні)	25	35	50	75	100	150	200	300	500	1000
1	1310	530	426	399	402	399	402				
2	790	435	441	368	363	345	338				
3	760	443	402	448	422	426	422		418		
4	724	481	431	422	403	384	347	350	341	360	350
5	918	729	644	609	615	548	513	449	469	439	439
6	544	395	395	410	435	435	430	431	448	435	418

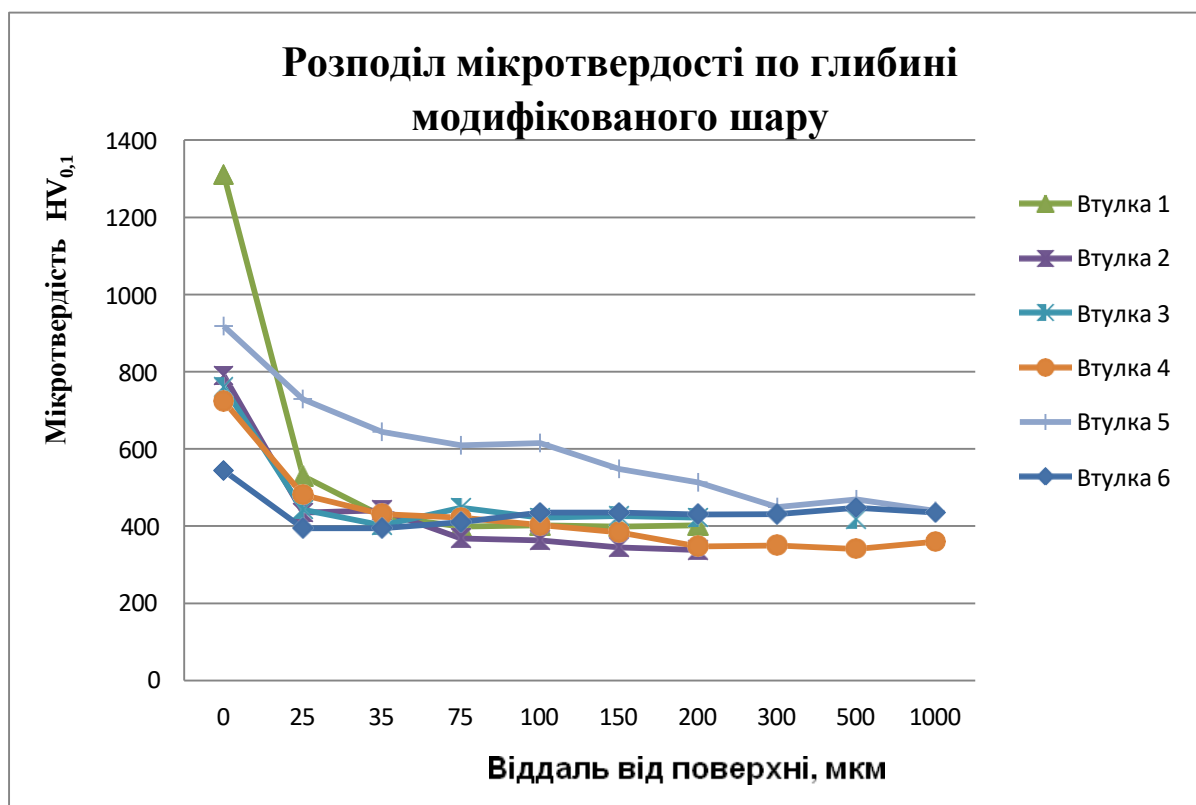


Рисунок 1 – Діаграма зміни мікротвердості титанового сплаву BT22 по глибині азотованого шару при різних технологічних режимах зміцнення

Далі модифіковані втулки (1 – 6) з титанового сплаву BT22 піддали деформуючому протягуванню в технологічному мастилі. Схоплення всіх втулок відбулося на третьому циклі протягування, але осьові сили протягування втулок досить сильно різняться. Результати досліджень занесені в таблицю 3.

Таблиця 3. Експериментальні дані, отримані при деформуючому протягуванні втулок зі сплаву BT22

Номер втулки	Осьові сили протягування Q, кН			
	1 цикл	2 цикл	3 цикл	3 цикл
1	3,0	12,0	27,0	схоплення
2	10,0	16,7	90,0	схоплення
3	10,0	27,0	схоплення	
4	6,2	13,4	58,3	схоплення
5	6,86	11,6	15,2	тріснула
6	4,9	10,5	126,5	схоплення

Проаналізувавши дані отримані в таблицях 1 – 3 та діаграму зміни мікротвердості титанового сплаву BT22 по глибині азотованого шару при різних технологічних режимах зміцнення (рис.1) можна зробити висновок, що для покращення експлуатаційних параметрів процесу поверхневого зміцнення потрібно збільшити вміст азоту для інтенсивного утворення нітридних шарів, таких як TiN на поверхні сплаву. Це покращує твердість та зносостійкість, але водночас може створити щільний шар, який уповільнює дифузію азоту вглиб. Тому додавання аргону до азотного середовища зменшує утворення нітридної фази на поверхні й стимулює об'ємну дифузію, що дозволяє отримати більш глибокий модифікований шар.

Температура також є одним із ключових факторів, який впливає на кінетику дифузії. Низькі температури (<700°C) сповільняють процес дифузії азот, переважно утворюючи твердий розчин у титановій матриці без значного утворення нітридів. Це сприяє збереженню механічних властивостей серцевини. Високі температури (>800°C): дифузія азоту значно

активізується, але з'являється ризик укрупнення зерен та погіршення властивостей серцевини (міцність, пластичність). При цьому спостерігається активне формування TiN, який покращує зносостійкість, але може негативно вплинути на опір втомі.

Оптимальна температура для сплаву VT22 зазвичай становить 700–750°C, що дозволяє досягти балансу між глибиною дифузії, твердістю та збереженням об'ємних механічних властивостей.

Низький тиск у розрядній камері сприяє активній дифузії азоту вглиб металу, оскільки зменшується утворення щільного поверхневого нітридного шару, що може бути бар'єром для подальшого проникнення азоту. Високий тиск: сприяє формуванню товстих нітридних шарів, але може знижувати глибину дифузії через блокування поверхні. Тому для забезпечення оптимального утворення нітридної фази на поверхні та проникнення азоту вглиб потрібно створити в камері середній тиск, щоб досягти рівноваги між формуванням зміцненого шару і глибиною азотування.

Список використаних джерел:

1. Мирослав Степанович Стечишин, Олександр Володимирович Диха, Наталія Сергіївна Машовець Дослідження фізико-хімічних властивостей азотованих в тліючому розряді титанових сплавів для виготовлення елементів зброї. Матеріали Міжнародної IV науково-практичної інтернет-конференції “Актуальні проблеми бойового застосування та експлуатації і ремонту зразків озброєння та військової техніки”. Вінниця. 2024. 3с

2. Пастух И. М. Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде / И. М. Пастух. – Харьков : ННЦ ХФТИ, 2006.

Стечишин Мирослав Степанович – доктор технічних наук, професор кафедри галузевого машинобудування та агроінженерії Хмельницького національного університету, м. Хмельницький, вул. Інститутська 11, інд. 29016, e-mail: miro011951@gmail.com. ORCID <https://orcid.org/0000-0001-5780-2790>.

Люховець Володимир Васильович – кандидат технічних наук, доцент кафедри галузевого машинобудування та агроінженерії Хмельницького національного університету, м. Хмельницький, вул. Інститутська 11, інд. 29016, e-mail: vladimirlider76@gmail.com. ORCID <https://orcid.org/0000-0002-6978-7820>.

Стечишина Надія Мирославівна – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник НДЧ Хмельницького національного університету, м. Хмельницький, вул. Інститутська 11, інд. 29016, e-mail: n.stechyshyna@gmail.com. ORCID <https://orcid.org/0000-0003-2045-4774>.

Здоренко Денис Вікторович – магістр, Хмельницького національного університету, м. Хмельницький, вул. Інститутська 11, інд. 29016, e-mail: d.zdorenko@bgv.com. ORCID <https://orcid.org/0009-0004-3872-3797>.

Stechyshyn Myroslav Stepanovych – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Industrial Mechanical Engineering and Agricultural Engineering of Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, 11 Instytutska St., ind. 29016, e-mail: miro011951@gmail.com. ORCID <https://orcid.org/0000-0001-5780-2790>.

Liukhovets Volodymyr Vasylovych – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Industrial Mechanical Engineering and Agricultural Engineering, Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, 11 Instytutska St., ind. 29016, e-mail: vladimirlider76@gmail.com. ORCID <https://orcid.org/0000-0002-6978-7820>.

Stechyshyna Nadiya Myroslavivna – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher of the Research and Development Department of Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, 11 Instytutska St., Ind. 29016, e-mail: n.stechyshyna@gmail.com. ORCID <https://orcid.org/0000-0003-2045-4774>.

Zdorenko Denys Viktorovych – Master, Khmelnytsky National University, Khmelnytskyi, 11 Instytutska St., ind. 29016, e-mail: d.zdorenko@bgv.com. ORCID <https://orcid.org/0009-0004-3872-3797>.