

УДК 621.891

DOI:10.18372/0370-2197.2(107).20148

А. РУТКОВСЬКИЙ<sup>1</sup>, О. ЛОПАТА<sup>1</sup>, О. РАДЬКО<sup>2</sup>, С. МАРКОВИЧ<sup>3</sup>,  
С. КАТЕРИНИЧ<sup>3</sup>, А. СОЛОВИХ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України, Україна

<sup>2</sup>Національний університет оборони України, Україна

<sup>3</sup>Центральноукраїнський національний технічний університет, Україна

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВАКУУМНОГО ТЕРМОЦИКЛІЧНОГО АЗОТУВАННЯ У ПЛАЗМІ ПУЛЬСУЮЧОГО ТЛІЮЧОГО РОЗРЯДУ

У результаті проведених досліджень встановлено закономірності впливу режимів процесу вакуумного термоциклічного азотування у плазмі пульсуючого тліючого розряду на властивостей поверхневих шарів зміцнюємих зразків - мікротвердість, глибину дифузійного насичення, величину та розподіл залишкових напружень у зміцнених шарах сталевих поверхонь, циклічну міцність. Визначено, що завдяки використанню вакуумного термоциклічного азотування у плазмі пульсуючого тліючого розряду, товщина дифузійного шару складає 40...300 мкм; мікротвердість поверхневого шару досягає 7600 МПа; виникають залишкові напруження стиску порядку 445...950 МПа, корозійна стійкість підвищується в 3,1 рази, а межа витривалості сталевих конструкцій при температурах до 640<sup>0</sup>С - на 15...20%. На підставі проведених експериментальних досліджень встановлено, що основними механізмами підвищення межі витривалості матеріалів внаслідок застосування процесу дифузійного насичення поверхні азотом у пульсуючому тліючому розряді у термоциклічному режимі є: створення сприятливої схеми залишкових напружень; зміна закономірностей деформування поверхневих шарів, їх хімічних та адгезійних властивостей.

**Ключові слова:** термомеханічна втома; циклічна зміна температури, аномальний масоперенос, дифузійні процеси, дискретно-імпульсне введення енергії.

**Актуальність теми досліджень.** Аналіз літературних джерел та останніх досліджень, а також патентно-інформаційний пошук показав, що використання технології вакуумного термоциклічного азотування у плазмі пульсуючого тліючого розряду (ВТАППТР) обмежено відсутністю досліджень взаємозв'язку факторів, що визначають хід процесу ВТАППТР та узагальнюючих висновків та рекомендацій по вибору оптимальних параметрів цієї технології. Ці обставини підтверджують актуальність та необхідність дослідження процесу ВТАППТР.

**Постановка проблеми.** Більшість причин руйнування конструкційних елементів деталей машин і механізмів пов'язано з їх циклічною міцністю, а саме термомеханічною втомою, яка виражається у поступовому накопиченні пошкоджень у матеріалі в умовах одночасного впливу змінних навантажень, агресивного середовища та температури. Це призводить до виникнення тріщини від втоми, її розвитку та остаточного руйнування матеріалу. Одним із важливих та перспективних напрямків у вирішенні задач щодо підвищення опору термомеханічній втомі елементів конструкцій є використання вакуумного термоциклічного азотування у плазмі пульсуючого тліючого розряду. Для аналізу механізму явищ та управління технологічним процесом (ТП) вакуумного термоциклічного азотування у плазмі пульсуючого тліючого розряду необхідно виявити взаємозв'язок факторів, що визначають хід процесу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На основі теорії термоциклічної втоми і явища аномального масопереносу при імпульсному впливі в Інституті проблем міцності НАН України розроблено технологію прискореного азотування в тліючому розряді при циклічному зміні температури за рахунок періодичної подачі напруги розряду. Технологія іонно-плазмового термоциклічного азотування (ІПТА) захищена патентами України і не має аналогів у вітчизняній та світовій практиці [1-4].

За допомогою технології ВТАППТР можлива обробка різноманітних деталей. Наприклад, колінчаті вали, гільзи двигунів внутрішнього згорання, шестерні різних модулів, шнеки екструдерів, вали, штампи, прес-форми, довгомірні деталі з отворами та ін. Іонне азотування використовують для обробки чавунів і різноманітних сталей і сплавів: конструкційних і інструментальних, мартенситностаріючих, корозійностійких, хромистих і хромонікелевих сталей феритного і аустенітного класу тощо. Технологія вакуумного термоциклічного азотування у плазмі пульсуючого тліючого розряду перспективна для зміцнення титану, тугоплавких металів – ніобію, молібдену.

Технологія ВТАППТР синтезована на основі трьох теорій, явищ та ефектів: теорії термовтоми; дискретно-імпульсному вводі енергії в теплотехнологіях; ефекту аномального масопереносу при дії імпульсних деформацій. Ефект аномального масопереносу забезпечується термічними напруженнями, що виникають за рахунок циклічних змін температури процесу. Теорія термічної втоми визначає умови отримання величин термічних напружень, достатніх для пришвидшення дифузії азоту в метал, але безпечних, щоб не пошкодити виріб. Дискретно-імпульсне введення енергії забезпечує збільшення швидкості нагріву в 2...5 разів, що дозволяє збільшити термічні напруги та, відповідно, швидкість дифузії азоту [1-4].

Технологія прискореного азотування в тліючому розряді при циклічному зміні температури за рахунок періодичної подачі напруги розряду та ґрунтується на „трьох Китах” – ефективному рішенні комплексу взаємозв’язаних науково-методологічних проблем на межі термомеханіки, металофізики і теплофізики [1-4].

Технологія вакуумного термоциклічного азотування у плазмі пульсуючого тліючого розряду слід розглядати як альтернативу класичній цементації з наступним гартуванням. Слід підкреслити, що американський стандарт ASTM A 706 обмежує і забороняє гартування з відпуском і фінішною механічною обробкою через технічні складності і підвищення вартості. Нова технологія не потребує фінішної механічної обробки [1, 2, 4].

Головна особливість технології ВТАППТР – використання ефекту аномального масопереносу азоту в поверхні деталі, що обробляється, шляхом створення поля термічних напружень в поверхневому шарі за рахунок циклічного включення та виключення тліючого розряду. Враховуючи пришвидшення масопереносу при термоциклюванні за рахунок виникнення термічних напружень було прийнято рішення розробити технологію хіміко-термічної обробки (ХТО) на базі класичної технології іонного азотування (ІА), яка в усьому світі працює в ізотермічному режимі. Технологія іонного азотування приваблива для вдосконалення тому, що світова тенденція полягає в скороченні тривалості ХТО, яка відноситься до найбільш енергоємних в

машинобудуванні. Попередні спроби створити технологію термоциклічного іонного азотування (ТЦІА) дало позитивні результати. [1-4].

Технологія вакуумного термоциклічного азотування у плазмі пульсуючого тліючого розряду не використовує пічні пристрої. Іонне азотування в порівнянні з пічним має наступні переваги [1-4]:

- прискорює дифузійні процеси в 0,5-2 рази;
- дозволяє отримувати дифузійний шар регульованого складу і будови;
- характеризується незначними деформаціями виробів і високим класом чистоти поверхні;
- дає можливість азотувати корозійностійкі, жароміцні і мартенситно-старіючі сталі без додаткової депасивуючої обробки;
- значно скорочує загальний час процесу за рахунок зменшення часу нагріву і охолодження садки;
- володіє великою економічністю, підвищує коефіцієнт використання електроенергії, скорочує витрату насичуючих газів;
- нетоксична і відповідає вимогам по захисту навколишнього середовища.

В світовій практиці азотування використовують аміак. Екологічна перевага технології вакуумного термоциклічного азотування у плазмі пульсуючого тліючого розряду полягає у відмові від використання аміаку. Обробка відбувається тліючим розрядом у суміші аргону з азотом. Цим також усувається негативний вплив водню на серцевину деталі – водневе окрихчення та воднева корозія. Заміна класичного газового азотування в середовищі аміаку на технологію ВТАПТР в суміші азоту і аргону забезпечує скорочення тривалості обробки в 10 разів [1-4]:.

На відміну від класичних технологій хіміко-термічної обробки технологія вакуумного термоциклічного азотування у плазмі пульсуючого тліючого розряду не створює суцільного нагріву деталі, а забезпечує нагрів тільки поверхневого шару на глибину, необхідну для його зміцнення. Нагрівання відбувається за рахунок енергії тліючого розряду, тому немає необхідності використовувати печі [1-4]. Процес хіміко-термічної обробки пришвидшено в 2...6 разів за рахунок відсутності пічних пристроїв та наскрізного прогріву деталі, а також за рахунок пауз в електроживленні в півциклі охолодження деталі. За рахунок циклічного характеру дискретного енерговводу та прискорення дифузійних процесів скорочується час обробки в 2-3 рази, знижуються електровитрати і зменшуються енергоємність технології в 10 разів [1-4].

Таким чином, циклічний характер нагріву виробу дозволяє скоротити в 2...5 разів потрібну потужність джерел електричного живлення, що відносить технологію вакуумного термоциклічного азотування у плазмі пульсуючого тліючого розряду до категорії енергозберігаючих. Технологія ВТАПТР підвищує твердість поверхні на 20%, не змінює форми і розміри деталі, а також шорсткість поверхні. Тому вона використовується як фінішна, без заключної механічної обробки. Це значно спрощує технологічний процес виробництва при підвищенні довговічності та зносостійкості деталей в 4 рази, а межі багатоциклової втоми – на 25% [1-4].

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Одним із важливих та перспективних напрямків у вирішенні задач щодо підвищення опору термомеханічній втомі елементів конструкцій є використання вакуумного

термоциклічного азотування у плазмі пульсуючого тліючого розряду. Однак широке використання технології ВТАППТР обмежено відсутністю визначення взаємозв'язку факторів, що визначають хід процесу вакуумного термоциклічного азотування у плазмі пульсуючого тліючого розряду та відсутністю рекомендацій по вибору його оптимальних технологічних параметрів. Ці обставини підтверджують необхідність подальшого вивчення процесу вакуумного термоциклічного азотування у плазмі пульсуючого тліючого розряду.

**Метою статті** є дати аналіз явищ в процесі вакуумного термоциклічного азотування у плазмі пульсуючого тліючого розряду, встановити взаємозв'язку факторів, що визначають хід процесу ВТАППТР та визначити його оптимальні параметри.

**Методика досліджень.** Для дослідження процесу вакуумного термоциклічного азотування у плазмі пульсуючого тліючого розряду використовувалася універсальна установка «ВІПА-1», розроблена в Інституті проблем міцності ім. Г.С. Писаренко НАН України (рис.) [1, 4].



Рис. Установка для вакуумного термоциклічного азотування у плазмі пульсуючого тліючого розряду

В установці використовують абсолютно екологічно чистий вакуумний процес, споживання електроенергії знижено в 4 і більше рази, тривалість процесу скорочена в 2 рази, відсутні поводки деталей (особливо довгомірних) та крихкість поверхневого шару.

Принцип роботи вакуумного устаткування для проведення процесу вакуумного термоциклічного азотування у плазмі пульсуючого тліючого розряду заснований на можливості іонізації газу, який подається в вакуумну камеру з наступним отриманням плазмо-хімічного з'єднання на поверхні деталі. Таким чином, на поверхні деталі отримуються тверді розчини азоту, при цьому службові властивості деталей (твердість, зносостійкість и т. д.), а також їх ресурс багаторазово підвищуються.

**Виклад основного матеріалу.** Вакуумне термоциклічне азотування у плазмі пульсуючого тліючого розряду реалізується в дві стадії: очистка поверхні пед азотуванням і саме азотування.

Технологічний процес ВТАППТР зводиться до слідуєчих операцій [1-4]:

- знежирювання деталей;

- установка деталей на пристрої, який одночасно повинен служити для місцевого захисту від азотування (покривати захисну поверхню металічним і діелектричним екраном). Зазор між деталлю і екраном допускається не більше 0,3...0,5 мм;

- установка в камеру печі деталей, термопари і свідка для контролю результатів азотування;

- очистка поверхні деталі катодним розпиленням протягом 15...40 хвилин під напругою 800...1000 В при тиску близько 133 Па. Катодне розпилення оброблюваної поверхні забезпечує нагрів деталей до 300<sup>0</sup>...400<sup>0</sup>С;

- вихід на задану температуру азотування і витримка для отримання потрібної товщини азотованого шару (табл. 1, 2). Тиск в період насичення азотом підтримується в інтервалі 400...650 Па, а робоча напруга - 350...550 В;

- охолодження деталей в камері печі до 150<sup>0</sup>...200<sup>0</sup>С при тискові 13,0...65 Па. продовжується 1,0...2,0 години.

Таблиця 1

### Основні технологічні параметри ВТАПТР деталей з різних сталей

Марка сталі	Температура, °С	Газовий режим	Орієнтовна витримка, год., для отримання шару товщиною, мм					Твердість на поверхні, HV
			0,15-0,2	0,2-25	0,25-0,3	0,3-0,35	0,35-0,4	
40X	520	1,2	4-5	7-9	9-12	12-15	15-18	500...550
40XΦА	520	1	4-5	6-8	9-12	15-18	-	-
	520	2	4-5	6-8	8-10	12-15	15-18	510...560
18ХГТ	530	1,2	4-5	6-8	9-12	15-18	-	620...680
	550	1,2	3-4	4-5	6-8	9-12	15-18	530...600
30ХЗМФ	530	1	4-5	6-8	9-12	15-18	-	700...760
	530	2	4-5	5-7	6-8	9-12	15-18	-
38Х2МА	550	1,2	4-5	5-7	7-9	9-12	15-18	900...950

При експериментальних дослідженнях використовували зразки зі сталі 40Х13 розміром 30х30 мм і товщиною 10 мм. Газовий режим азотування (табл. 2) забезпечує рівномірне зміцнення поверхонь зразків (рівномірну товщину дифузійного шару).

Технологічні параметри формування зміцнених шарів:

- температура термоцикловання - 550 ± 30 ° С;
- тиск – 25...150 Па, час обробки - 10 годин;
- співвідношення реакційних газів – 80% Ar + 20% N<sub>2</sub>.

Значна кількість технологічних параметрів процесу вакуумного термоциклічного азотування у плазмі пульсуючого тліючого розряду в сполученні з широкою номенклатурою матеріалів, із яких формують зміцнений поверхневий шар (ЗПШ), дають широкий ряд альтернативних варіантів. У такій ситуації ефективність прийнятих рішень буде залежати від наявності необхідних критеріїв оцінки працездатності конструктивного матеріалу зі ЗПШ у заданих умовах експлуатації. Для успішної розробки технологічного процесу ВТАПТР необхідно мати фізичний зміст і досить повно характеризувати процес

вакуумного термоциклічного азотування у плазмі пульсуючого тліючого розряду [1-4].

Таблиця 2

### Основні технологічні параметри ВТАПТР деталей з різних сталей

№ експ.	Час насищення, хв.	Тиск газу, Па	Склад реакційного газу	Температура газу, °К	Експлуатаційна температура, °К	Мікротвердість МПа	Товщина шару, мкм
1	180	125	90%N <sub>2</sub> + 5%С <sub>3</sub> Н <sub>8</sub> + 5%Аг	773	788	3700	288
2	150	200	95%N <sub>2</sub> + 5%С <sub>3</sub> Н <sub>8</sub>	873	725,5	10062	125
3	210	75	80%N <sub>2</sub> + 5%С <sub>3</sub> Н <sub>8</sub> + 15%Аг	673	850,5	9955	286
4	150	175	80%N <sub>2</sub> + 5%С <sub>3</sub> Н <sub>8</sub> + 15%Аг	873	819,2	8175	215
5	210	50	90%N <sub>2</sub> + 5%С <sub>3</sub> Н <sub>8</sub> + 5%Аг	773	694,3	10590	142
6	180	100	90%N <sub>2</sub> + 5%С <sub>3</sub> Н <sub>8</sub> + 5%Аг	673	881,8	8270	253
7	240	225	95%N <sub>2</sub> - 5%С <sub>3</sub> Н <sub>8</sub>	773	756,8	8985	208
8	90	250	80%N <sub>2</sub> + 5%С <sub>3</sub> Н <sub>8</sub> + 15%Аг	673	709,9	9100	267
9	180	125	95%N <sub>2</sub> + 5%С <sub>3</sub> Н <sub>8</sub>	873	834,9	8945	181
10	150	50	80%N <sub>2</sub> + 5%С <sub>3</sub> Н <sub>8</sub> + 15% Аг	773	772,4	10235	179
11	210	175	90%N <sub>2</sub> + 5%С <sub>3</sub> Н <sub>8</sub> + 5% Аг	673	897,3	8144	312
12	150	100	95%N <sub>2</sub> + 5%С <sub>3</sub> Н <sub>8</sub>	873	803,6	8335	228
13	210	225	80%N <sub>2</sub> + 5%С <sub>3</sub> Н <sub>8</sub> + 15% Аг	673	678,6	10835	267
14	180	150	95%N <sub>2</sub> + 5%С <sub>3</sub> Н <sub>8</sub>	773	866	8841	215
15	240	25	90%N <sub>2</sub> + 5%С <sub>3</sub> Н <sub>8</sub> + 5% Аг	873	741	9150	191
16	90	150	90% N <sub>2</sub> + 5%С <sub>3</sub> Н <sub>8</sub> + 5% Аг	673	780	8659	212

При зміцненні поверхонь конструктивних елементів широко використовується термін конструктивна або конструкційна міцність матеріалів [5]. Поняття конструктивної міцності включає ряд параметрів або показників, що характеризують не тільки міцність конструктивних елементів, але і їх довговічність (ресурс), несучу здатність, а головне надійність. До показників конструкційної міцності елементів можна віднести міцність при різноманітних видах навантаження (розтягування, згинання, контактні навантаження і т. п.) при лінійному, двох і трьохвісному напруженому стані з різним характером прикладення навантаження (імпульсним, тривалим, стаціонарним або змінним), у тому числі програмним навантаженням, при низьких та високих температурах, в умовах впливу оточуючого середовища (корозійно-ерозійне середовище і т. п.) [5].

За допомогою використання процесу вакуумного термоциклічного азотування у плазмі пульсуючого тліючого розряду, який впливає на якість поверхневого шару, можна керувати значеннями параметрів конструктивної міцності матеріалів. Оцінюючи умови роботи найбільш навантажених конструктивних елементів машин і механізмів доцільно встановити одночасний вплив динамічних навантажень, підвищених температур та корозійного середовища.

Серед динамічних навантажень особливий інтерес представляють циклічні навантаження. При систематичному повторенні навантаження та розвантаження

проходить накопичення дефектів структури матеріалу, що призводить до виникнення мікроскопічних тріщин, поєднання яких викликає руйнування від втоми. Установити максимальне циклічне навантаження, при якому матеріал не руйнується можна за допомогою термомеханічних високочастотних випробувань на втому, а саме шляхом визначення межі витривалості зміцненого конструктивного матеріалу.

Корозійне пошкодження істотно знижує механічні властивості конструкційного матеріалу. Таким чином, в якості поверхонь, зміцнених вакуумним термоциклічним азотуванням у плазмі пульсуючого тліючого розряду доцільно досліджувати межу витривалості та корозійну стійкість, що характеризується питомим збільшенням маси.

Для дослідження процесу вакуумного термоциклічного азотування у плазмі пульсуючого тліючого розряду було визначено параметри, що найбільше впливають на межу витривалості та корозійну стійкість зміцнених поверхневих шарів (ЗПШ): час дифузійного насичення, тиск та склад реакційного газу, температуру процесу дифузійного насичення, експлуатаційну температуру (табл. 3).

Таблиця 3

**Параметри ВТАПТР, що впливають на якість ЗПШ**

Параметри	Значення
Час дифузійного насичення, хв.	90...240 (крок 30)
Тиск реакційного газу, Па	25...250 (крок 25)
Склад реакційного газу	1) 90%N <sub>2</sub> + 5%С <sub>3</sub> Н <sub>8</sub> + 5% Ar; 2) 95%N <sub>2</sub> + 5%С <sub>3</sub> Н <sub>8</sub> ; 3) 80%N <sub>2</sub> + 5%С <sub>3</sub> Н <sub>8</sub> + 15% Ar
Температура газу, °К	673...873 (крок 100)
Експлуатаційна температура, °К	663...913

Необхідно зауважити, що значення таких параметрів як тиск та температура реакційного газу, що наведені у таблиці, протягом процесу вакуумного термоциклічного азотування у плазмі пульсуючого тліючого розряду не є постійними:

- тиск реакційного газу змінюється періодично (з періодом 15...30 хв.);
- температура коливається у межах 25...35°C.

Шляхом дослідження мікротвердості поверхневих шарів після вакуумного термоциклічного азотування у плазмі пульсуючого тліючого розряду виявлено зростання її значень до 11250 МПа (табл. 4.) та поступове зменшення до 4200 МПа на глибині до 310 мкм.

Із результатів, наведених в таблиці 4 видно, що проведення азотування у пульсуючому тліючому розряді сприяє збільшенню мікротвердості та глибини зміцнення оброблених поверхневих шарів. У будь-якому випадку такі значення мікротвердості зразків у 2,5...3,0 рази більші ніж без впливу пульсуючого тліючого розряду та у 1,5 рази більші ніж у зразків після газового азотування (90%N<sub>2</sub> + 10%Ar; T = 600°C; t = 4,0 год).

Таблиця 4

**Мікротвердість ЗПШ зразка після ВТАПТР**

№ режиму обробки	Мікротвердість поверхневого шару, МПа	
	без пульсуючого тліючого розряду	з пульсуючим тліючим розрядом
0	3100	3700
1	9032	10062
2	8164	9955
3	7414	8175
4	8614	10590
5	8047	8270
6	8089	8985
7	8154	9100
8	7534	8945
9	9111	10235
10	9904	8144
11	7040	8335
12	9898	10835
13	7950	8841
14	8061	9150
15	7769	8659
16	7179	8663

Аналіз даних в таблиці 4 дозволяє зробити висновок про існування деяких діапазонів температури азотування  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) та тиску реакційного газу  $P$  (Па) за яких мікротвердість поверхневих шарів досягає максимальних значень: для температури азотування  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) діапазон знаходяться у межах 550...600 $^{\circ}\text{C}$ ; для тиску газу  $P$  (Па) - у межах 200...230 Па.

Зі збільшенням часу дифузійного насичення мікротвердість поверхневого шару зменшується, причому більш інтенсивно після 2 годин обробки.

Стосовно впливу на мікротвердість складу реакційного газу встановлено, що максимальних значень вона набуває за умови використання суміші 90% $\text{N}_2$  + 5% $\text{C}_3\text{H}_8$  + 5% $\text{Ar}$ , а мінімальних - за суміші 80% $\text{N}_2$  + 5% $\text{C}_3\text{H}_8$  + 15% $\text{Ar}$ . Якість поверхневого шару визначається шорсткістю поверхні (табл. 5), фізичним станом поверхневого шару конструкційного матеріалу та його напруженим станом. Дослідженнями якості поверхні зміцнених зразків (табл. 5) виявлено незначне її погіршення після обробки з  $R_a = 0,25$  мкм у неазотованих зразків до  $R_a = 0,29...0,39$  мкм у азотованих.

Шляхом технології вакуумного термоциклічного азотування у плазмі пульсуючого тліючого розряду можна отримати антикорозійну здатність таку як і при використанні гальванічних покриттів (табл. 6). У результаті проведення досліджень антикорозійної здатності іонно-азотованих сталевих зразків виявлено підвищення корозійної стійкості у 1,7...3,1 рази (табл. 6). Це являє собою особливий інтерес у випадку, коли переваги азотування спрямовані також на підвищення втомної міцності.

Таблиця 5

**Шорсткість поверхні ЗПШ зразків після ВТАППТР**

№ режиму	Зразки оброблені вакуумним азотуванням, $R_a$ , мкм	Зразки оброблені термоциклічним азотуванням, $R_a$ , мкм
0	0,248	0,218
1	0,324	0,291
2	0,385	0,364
3	0,335	0,353
4	0,310	0,312
5	0,284	0,347
6	0,330	0,326
7	0,275	0,242
8	0,294	0,385
9	0,286	0,381
10	0,315	0,294
11	0,304	0,236
12	0,294	0,308
13	0,328	0,315
14	0,302	0,319
15	0,299	0,290
16	0,330	0,361

Режими обробки вакуумного термоциклічного азотування у плазмі пульсуючого тліючого розряду для даних таблиць 4, 5 та 6 представлені в таблиці 2.

Для визначення опору втомі зразків, зміцнених ВТАППТР, досліджували не менше 10...15 зразків. Кожний зразок доводили до руйнування, при цьому амплітуду коливання зразка й частоту навантаження на протязі всього часу дослідження майже до його руйнування підтримували постійною. База випробувань на втому  $N = 10^7$  циклів навантаження. При дослідженні на втому в умовах підвищених температур зразок перед навантаженням (тобто до початку випробувань) нагрівали до заданої температури і витримували в камері нагрівання додатково на протязі 30 хв. Момент початку руйнування зразка встановлювали за падінням резонансної частоти його коливань на 10... 15 Гц. На кількісні характеристики втоми здійснює вплив температура оточуючого середовища. З підвищенням температури випробування, починаючи з 500°C, межа витривалості зменшується.

Активізуються дифузійні процеси на поверхні зразка під неадитивним впливом температури та зовнішнього середовища, що призводить до появи мікроскопічних поверхневих тріщин, які є початком руйнування від втоми. На опір втомі здійснює вплив як число циклів навантаження, так і час знаходження зразка при високих температурах в умовах циклічного навантаження.

Вакуумне термоциклічне азотування у плазмі пульсуючого тліючого розряду обмежує швидкість проходження дифузійних процесів, що значно впливає на підвищення межі витривалості. Завдяки процесу ВТАППТР вдалося підвищити межу витривалості зразків на 15...20% зі збільшенням кількості

циклів до руйнування в умовах одночасної дії циклічних навантажень та температури.

На підставі проведених експериментальних досліджень встановлено, що основними механізмами підвищення межі витривалості матеріалів внаслідок застосування процесу дифузійного насичення поверхні азотом у пульсуючому тліючому розряді у термоциклічному режимі є: створення сприятливої схеми залишкових напружень; зміна закономірностей деформування поверхневих шарів, їх хімічних та адгезійних властивостей.

Вакуумне термоциклічне азотування у плазмі пульсуючого тліючого розряду обмежує швидкість проходження дифузійних процесів, що значно впливає на підвищення межі витривалості. Завдяки процесу ВТАППТР вдалося підвищити межу витривалості зразків на 15...20% зі збільшенням кількості циклів до руйнування в умовах одночасної дії циклічних навантажень та температури.

На підставі проведених експериментальних досліджень встановлено, що основними механізмами підвищення межі витривалості матеріалів внаслідок застосування процесу дифузійного насичення поверхні азотом у пульсуючому тліючому розряді у термоциклічному режимі є: створення сприятливої схеми залишкових напружень; зміна закономірностей деформування поверхневих шарів, їх хімічних та адгезійних властивостей.

Відносно невелика глибина проникнення іонів азоту не може розглядатися як фактор, що обмежує можливості цього різновиду обробки щодо підвищення межі витривалості, адже реалізація режимів обробки, пов'язана із модифікуванням поверхневих шарів субмікронної товщини. До того ж, експериментально встановлено, що підвищену межу витривалості можуть мати шари, товщина яких у декілька разів перевищує іонноазотовану область.

Зміцнення поверхневих шарів відбувається за наступними механізмами, вклад яких залежить від різних факторів (температури та марки матеріалу, що обробляється, параметрів ТП, тощо):

- утворення структур зі зміцнюючими фазами (нітридів, карбонітридів тощо), що викликають дисперсійне твердіння;
- деформаційне зміцнення при пластичній зміні форми іонноазотованого шару; зміцнення за рахунок утворення твердих розчинів, які створюють енергетичний бар'єр та утруднюють переміщення дислокацій;
- зменшення розмірів зерен, що призводить до збільшення площі міжзерних границь та перешкоджає руху дислокацій.

Як відомо, найбільшу небезпеку з точки зору забезпечення високого рівня межі витривалості матеріалів являють собою залишкові напруження розтягу. Вони сприяють розвитку приповерхневих тріщин, проникненню молекул зовнішнього середовища у витоки мікротріщин та прискорюють дифузію атомів домішків.

В умовах багатоциклової втоми великого значення набувають залишкові напруження стиску, що виникають при дифузії азоту у поверхневі шари. У випадку дифузійного насичення поверхні азотом у тліючому розряді, упроваджений у матрицю атом азоту розсуває сусідні атоми, створюючи залишкові напруження стиску. Ці напруження ефективно зберігають поверхню від руйнування.

Таблиця 6

**Результати дослідження корозійної стійкості азотованих зразків**

№ режиму обробки	Питоме збільшення маси зразка А <i>m/m</i> , після 10 годин випробувань	
	без пульсуючого тліючого розряду	з пульсуючим тліючим розрядом
0	0,58	0,40
1	0,17	0,12
2	0,22	0,18
3	0,19	0,17
4	0,17	0,15
5	0,20	0,18
6	0,20	0,19
7	0,21	0,18
8	0,19	0,16
9	0,16	0,14
10	0,18	0,18
11	0,21	0,20
12	0,16	0,14
13	0,19	0,16
14	0,18	0,15
15	0,20	0,20
16	0,21	0,18

Іонно-азотуюча обробка значно впливає на хімічні та адгезійні властивості поверхні зміцнених матеріалів. Утворення хімічних сполук у сталях та сплавах за рахунок упродовження азоту або підвищення межі його концентрації змінює швидкість хімічних реакцій та кінетику зростання оксидних плівок, підвищує їх зчеплення з основою. Це призводить до зменшення інтенсивності утворення адгезійних вузлів схоплювання та сприяє покращенню механічних властивостей матеріалів.

**Висновки.** Аналіз літературних джерел та останніх досліджень показав, що широке використання технології вакуумного термоциклічного азотування у плазмі пульсуючого тліючого розряду обмежено відсутністю досліджень взаємозв'язку факторів, що визначають хід процесу ВТАПТР та рекомендацій по вибору його технологічних параметрів. Ці обставини підтверджують необхідність та доцільність подальшого вивчення технології вакуумного термоциклічного азотування у плазмі пульсуючого тліючого розряду.

У результаті проведених досліджень встановлено закономірності впливу параметрів процесу вакуумного термоциклічного азотування у плазмі пульсуючого тліючого розряду на мікротвердість, глибину дифузійного насичення, величину та розподіл залишкових напружень у зміцнених шарах сталевих поверхонь. Показано, що:

- для отримання максимальної мікротвердості поверхневого шару, що досягає 7600 МПа, тиск реакційного газу повинен знаходитися у межах 200...250 Па, час дифузійного насичення - 90... 150 хв.; температура процесу --

500...600°C;

- для отримання максимальної товщини дифузійного шару 150..305 мкм тиск реакційного газу повинен знаходитися у межах 200...250 Па, час дифузійного насичення – 180...240 хв.; температура процесу - 550...600°C;

- в іонноазотованих шарах виникають залишкові напруження стиску порядку 445...950 МПа, рівень і розподіл яких залежать від технологічних параметрів процесу ВТАПШТР та від попередньої термообробки (ТО).

У результаті проведення досліджень властивостей поверхневих шарів зразків, зміцнених азотуванням, встановлено: що завдяки використанню вакуумного термоциклічного азотування у плазмі пульсуючого тліючого розряду корозійна стійкість підвищується у 3,1 рази, а межа витривалості сталевих конструкцій при температурах до 640°C - на 15...20%.

#### Список літератури

1. Харченко В.В., Ляшенко Б.А., Куриат Р.И., Исаханов Г.В. Термоциклическое азотирование как синтез разработок НАН Украины. *Соврем. проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте*: матер. 12-го Междуна. науч.-техн. семинара (20-24 февраля 2012, Свалява). Киев, АТМ України. 2012. С.287-290.
2. Ляшенко Б.А., Рутковский А.В. О достоинствах технологии вакуумного азотирования. *Оборудование и инструмент*. 2005. №12. С. 20-21.
3. Ляшенко Б.А., Хоцяновский А.О., Кумуржи А.Ю. Повышение прочности и износостойкости металлических изделий с помощью импульсной методики нанесения ионно-плазменных нитридных покрытий *Проблемы прочности*. 2014. № 3. С. 155-163.
4. Патент 78071, Україна. Спосіб поверхневого зміцнення сталевих деталей іонно-плазмовим азотуванням у пульсуючому тліючому розряді. Опубл. 11.03.2013. Бюл. №5.
5. Писаренко Г.С. Сопротивление материалов деформированию и разрушению. Київ, Наукова думка. 1994. 286 с.

Стаття надійшла до редакції 20.05.2025.

**Рутковський Анатолій Віталійович**, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України, вул. Садово – Ботанічна, 2, (Київ, Україна). E-mail: rut2000@ukr.net.

**Лопата Олександр Віталійович**, PhD, старший науковий співробітник Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України, вул. Садово – Ботанічна, 2, (Київ, Україна). E-mail: lopata-sasha @ukr.net.

**Радько Олег Віталійович**, кандидат технічних наук, Національний університет оборони України. E-mail: radlviv@ukr.net.

**Маркович Сергій Іванович**, кандидат технічних наук, доцент кафедри експлуатації та ремонту машин Центральноукраїнського національного університету, пр. Університетський, 9, 1, м. Кропивницький, Україна, 25006, тел.: +38 0522 390 4 33, E-mail: marko60@ ukr.net.

**Катеринич Станіслав Євгенович** - кандидат технічних наук, доцент кафедри експлуатації та ремонту машин Центральноукраїнського національного університету, пр. Університетський, 9,1, м. Кропивницький, Україна, 25006, тел.: +38 0522 390 4 33, E-mail: katerinichs@ukr.net

**Солових Андрій Євгенович** - кандидат технічних наук, доцент кафедри експлуатації та ремонту машин Центральноукраїнського національного університету, пр. Університетський, 9, 1, м. Кропивницький, Україна, 25006, тел.: +38 0522 390 4 33, E-mail: ekskntu09@gmail.com

---

A.V RUTKOVSKY, O.V. LOPATA, O.V. RADKO, S.I. MARKOVICH, S.Y. KATERINICH,  
A.E. SOLOVYKH

### RESEARCH OF THE VACUUM THERMOCYCLIC NITROGEN PROCESS IN A PLASMA PULSING GLOW DISCHARGE

Analysis of literary sources and recent research, as well as patent information search showed that the use of vacuum thermocyclic nitriding technology in pulsating glow discharge plasma is limited by the lack of research on the relationship between the factors that determine the course of the process and general conclusions and recommendations for choosing the optimal parameters of this technology. These circumstances confirm the relevance of the research.

Most of the reasons for the destruction of structural elements of parts of machines and mechanisms are related to their cyclic strength, namely thermomechanical fatigue, which is expressed in the gradual accumulation of damage in the material under conditions of simultaneous exposure to variable loads, aggressive environment and temperature. This leads to the appearance of a fatigue crack, its development and the final destruction of the material. One of the important and promising directions in solving problems related to increasing the resistance to thermomechanical fatigue of structural elements is the use of vacuum thermocyclic nitriding in the plasma of a pulsating glow discharge. To analyze the mechanism of phenomena and control the process of vacuum thermocyclic nitriding in the plasma of a pulsating glow discharge, it is necessary to identify the interrelationship of factors that determine the course of the process.

The purpose of the article is to provide an analysis of the phenomena in the process of vacuum thermocyclic nitriding in the plasma of a pulsating glow discharge, to establish the interrelationship of factors that determine the course of the VTAPPTR process and to determine its optimal parameters.

As a result of the conducted research, the regularities of the influence of the parameters of the process of vacuum thermocyclic nitriding in the plasma of a pulsating glow discharge on the microhardness, the depth of diffusion saturation, the magnitude and distribution of residual stresses in the strengthened layers of steel surfaces were established. Based on the results of the experiments, the endurance limit and corrosion resistance of strengthened ion nitrided surface layers were determined. As a result of conducting research on the properties of the surface layers of samples strengthened by nitriding, it was established that thanks to the use of vacuum thermocyclic nitriding in the plasma of a pulsating glow discharge, the thickness of the diffusion layer is 40...300  $\mu\text{m}$ ; the microhardness of the surface layer reaches 7600 MPa; there are residual compressive stresses of the order of 445...950 MPa, corrosion resistance increases by 3.1 times, and the endurance limit of steel structures at temperatures up to 640  $^{\circ}\text{C}$  increases by 15...20%.

The analysis of the conducted studies showed the absence of studies on the interrelationship of factors that determine the course of the process of vacuum thermocyclic nitriding in the plasma of a pulsating glow discharge and recommendations for the selection of technological parameters of vacuum thermocyclic nitriding in the plasma of a pulsating glow discharge, which would be used for the practical application of this technology. On the basis of the conducted experimental studies, it was established that the main mechanisms of increasing the endurance limit of materials due to the application of the process of diffusion saturation of the surface with nitrogen in a pulsating glow discharge in the thermocyclic mode are: creation of a favorable scheme of residual stresses; change in patterns of deformation of surface layers, their chemical and adhesive properties.

**Key words:** thermomechanical fatigue; cyclic temperature change; anomalous mass transfer; diffusion processes; discrete-impulse energy input.

---

---

### References

1. Kharchenko V.V., Lyashenko B.A., Kuriat R.I., Isakhanov G.V. (2012). *Termociklicheskie azotirovaniya kak sintez razrabotok NAN Ukrainy*. [Thermocyclic nitriding as a synthesis of developments of the NAS of Ukraine] *Sovrem. problemy proizvodstva i remonta v promyshlennosti i na transporte: mater. 12-go Mezhdun. nauch.-tekhn. seminara* [Lying. problems of production and repair in industry and transport: Mater. 12th Int. scientific and technical workshop] (Svalyava, February 20-24, 2012). Kiev: ATM of Ukraine, - S.287-290. [in Ukrainian]
2. Lyashenko B.A., Rutkovskij A.V. (2005). O dostoinstvakh tekhnologii vakuumnogo azotirovaniya. [On the advantages of vacuum nitriding technology] *Oborudovanie i instrument. №12*. - Pp. 20-21. [in Ukrainian].
3. Lyashenko B.A., Khoczyanovskij A.O., Kumurzhi A.Yu. (2014) Povysheniye prochnosti i iznosostojkosti metallicheskih izdelij s pomoshh'yu impul'snoj metodiki naneseniya ionno-plazmennyykh nitridnykh pokrytij. [Improving the strength and durability of metal products using a pulsed method of applying ion-plasma nitride coatings]. *Problemy prochnosti, № 3*. - Pp. 155-163. [in Ukrainian].
4. Sposib poverkhnevogo zmichnennya stalevikh detalej ionno-plazmovim azotuvannyam u pul'suyuchomu tli'yuchomu rozryadi: [Method for surface steel parts of ion-plasma nitrogen in a pulsating flash discharge]: US Pat. 78071 Ukraine C23C 8/06 publ. 03/11/2013, Bull. No.5.
5. Pisarenko G.S. (1994). *Soprotivlenie materialov deformirovaniyu i razrusheniyu. Chast' 1 [Tekst]*. [Resistance to deformation and destruction of materials. Part 1 [Text] / G.S. Pisarenko]. K.: Naukova dumka, - 286 p. [in Ukrainian].

**Rutkovsky Anatoliy Vitaliyovich**, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher , G. S. Pisarenko. Institute for Problems of Strength of the National Academy of Sciences of Ukraine, Sadovo-Botanichna St., 2 (Kyiv, Ukraine), E-mail: rut2000@ukr.net. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9515-814X>.

**Lopata Oleksandr Vitaliyovych**, PhD, Senior Researcher, G. S. Pisarenko. Institute for Problems of Strength of the National Academy of Sciences of Ukraine, Sadovo-Botanichna St., 2 (Kyiv, Ukraine), E-mail: lopata-sasha @ukr.net <https://orcid.org/0000-0001-5266-6486>.

**Radko Oleh Vitaliyovych**, Candidate of Technical Sciences, National Defense University of Ukraine. E-mail: radlviv@ukr.net. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6391-5713>.

**Markovych Serhiy Ivanovych**, Candidate of Technical Sciences, Central Ukrainian National University, 9, 1 Universytetskyi Ave., Kropyvnytskyi, Ukraine, 25006, tel.: +38 0522 390 4 33, E-mail: marko60@ ukr.net

**Stanislav Evgenovich Katerinich** - candidate of technical sciences, dotsent of the department of operation and repair of machines, Central Ukrainian National Technical University. 8 University Ave., Kropyvnytskyi, Ukraine, 25006. E-mail: katerinichs@ukr.net ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-30520747>.

**Andrey Evgenovich Solovykh** - candidate of technical sciences, dotsent of the department of operation and repair of machines, Central Ukrainian National Technical University. 8 University Ave., Kropyvnytskyi, Ukraine, 25006. E-mail: ekskntu09@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5780-3582>.