

М.С. АГЕСВ, І.В. ГРИЦУК

Херсонська державна морська академія

А.В. РУТКОВСЬКИЙ

Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка Національної академії наук України

А.Є. СОЛОВИХ, С.Є. КАТЕРИНИЧ

Центральноукраїнський національний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ІМПУЛЬСНОГО ІОННОГО ВАКУУМНОГО ТЕРМОЦИКЛІЧНОГО АЗОТУВАННЯ У ПЛАЗМІ ПУЛЬСУЮЧОГО ТЛЮЧОГО РОЗРЯДУ

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 ВТАППТР. Для аналізу механізму явищ та управління технологічним процесом (ТП) ВТААПТР необхідно виявити взаємозв'язок факторів, що визначають хід процесу.

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 оптимальних технологічних параметрів ВТАППТР. Ці обставини підтверджують необхідність подальшого вивчення процесу ВТАППТР.

Ключові слова: Вакуумне термоциклічне азотування, математична модель, технологічний процес, плазма, пульсуючий тліючий розряд.

M. AHIEIEV, I. GRITSUK

Kherson State Maritime Academy

A. RUTKOVSKIY

Institut problem micnosti imeni G.S. Pisarenka Nacional'na academia nauk Ukraini

A. SOLOVUCH, S. KATERINICH

Central Ukrainian National Technical University

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

An analysis of literature and recent studies, as well as a patent information search, showed the absence of general conclusions and recommendations on the selection of optimal technological parameters of vacuum thermocyclic nitriding in a pulsating glow discharge plasma (VTAPTTR) for the practical application of this technology. These circumstances confirm the relevance of optimizing the VTAPTTR technology and the need for further study.

Most of the causes of the destruction of structural elements of machine parts and mechanisms are associated with their cyclic strength, namely thermomechanical fatigue, which is expressed in the gradual accumulation of damage in the material under the conditions of simultaneous exposure to variable loads, aggressive environment and temperature. This leads to the appearance of a crack from fatigue, its development and the final destruction of the material. One of the important and promising directions in solving problems of increasing the thermomechanical fatigue resistance of structural elements is the use of VTAPTTR. To analyze the mechanism of phenomena and process control (TP) VTAAPTTR, it is necessary to identify the relationship of factors that determine the course of the process, and present them in the form of a mathematical model.

Based on the theory of thermocyclic fatigue and the phenomenon of abnormal mass transfer under pulsed action, the Institute of Strength Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine developed a technology for accelerated nitriding in a glow discharge during cyclic temperature changes due to periodic supply of discharge voltage. The technology of ion-plasma thermocyclic nitriding (IPTA) is protected by patents of Ukraine and has no analogues in domestic and world practice. Using the VTAPTTR technology, various parts can be machined. For example, crankshafts, sleeves of internal combustion engines, gears of various modules, extruder screws, shafts, dies, molds, lengthy parts with holes, etc. Ion nitriding is used to process cast irons and various steels and alloys: structural and tool, maraging, corrosion-resistant, chromium and chromium-nickel steels of ferritic and austenitic class and the like. A promising new technology for hardening titanium, refractory metals - niobium, molybdenum.

One of the important and promising directions in solving problems of increasing the resistance to thermomechanical fatigue of structural elements is the use of vacuum thermocyclic nitriding in a plasma of a pulsating glow discharge. However, the widespread use of the VTAPTTR technology is limited by the lack of determining the relationship between the factors determining the process of vacuum thermocyclic nitriding in a pulsating glow discharge plasma and the lack of recommendations for choosing the optimal technological parameters of the VTAPTTR, these circumstances confirm the need for further study of the VTAPTTR process and its optimization.

The problem statement is to give an analysis of the phenomena in the process of vacuum thermocyclic nitriding in a plasma of a pulsating glow discharge, to determine the interconnections of factors that determine the course of the process of the STAPTTR and present them in the form of a mathematical model

As a result of the studies, the regularities of the influence of the HTAPTTR TP parameters on the microhardness, the diffusion saturation depth, the magnitude and distribution of residual stresses in the hardened layers of steel surfaces are established. Based on the use of expert assessment methods and the results of a series of screening experiments, optimization criteria (endurance limit and corrosion resistance) and controlled factors for mathematical modeling of the formation of strengthened ion-nitrated surface layers are determined. A

mathematical model of the TP of the formation of reinforced surfaces of the VTAPTR TP according to the criteria of endurance and corrosion resistance is obtained.

An analysis of the studies showed that there are no general conclusions and recommendations on the selection of optimal technological parameters of the VTAPTR that would be used for the practical application of this technology. These circumstances confirm the need for further study of the VTAPTR technology and the feasibility of its optimization.

Keywords. Vacuum thermocyclic nitriding, mathematical model, technological process, plasma, pulsating glow discharge.

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

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 (ВТАПТР). Для ефективного аналізу механізму явищ та управління технологічним процесом (ТП) вакуумного термоциклічного азотування у плазмі пульсуючого тліючого розряду (ВТАПТР) 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 ім. Г.С. Писаренка НАН України розроблено технологію прискореного азотування в тліючому розряді при циклічному зміні температури за рахунок періодичної подачі напруги розряду. Технологія іонно-плазмового термоциклічного азотування захищена патентами України і не має аналогів у вітчизняній та світовій практиці [1-4].

За допомогою технології ВТАПТР можлива обробка різноманітних деталей. Наприклад, колінчаті вали, гільзи двигунів внутрішнього згоряння, 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. Перспективна нова технологія для зміцнення титану, тугоплавких металів – ніобію, молібдену.

Нова технологія синтезована на основі трьох теорій, явищ та ефектів: теорії термовтоми; дискретно-імпульсному вводити 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-імпульсний ввід 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].

Технологію вакуумного термоциклічного азотування у плазмі пульсуючого тліючого розряду (ВТАПТР) 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 ВТАПТР – 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 ВТАПТР 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 ВТАППТР 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 ВТАППТР в суміші азоту і аргону забезпечує скорочення тривалості обробки в 10 разів [1-4]:

На відміну від класичних технологій ХТО технологія ВТАППТР 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].

Відмінність технології ВТАППТР від класичних технологій ХТО, які використовують ізотермічний режим: процес ХТО 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, циклічного характеру швидкісного дискретного енерговводу, прискорення дифузійних процесів скорочується в 2-3 рази час обробки, знижуються електровитрати та 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 ВТАППТР до категорії енергозберігаючих. Технологія ВТАППТР 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 ТП виробництва при підвищенні довговічності та зносостійкості деталі в 4 рази, межі багатоциклової втоми – на 25% [1-4].

Виділення недосліджених раніше 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 технологічних параметрів ВТАППТР. Ці обставини підтверджують необхідність подальшого вивчення процесу ВТАППТР.

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

Виклад основного матеріалу. Обладнання для вакуумного термоциклічного азотування у плазмі пульсуючого тліючого розряду. Для дослідження процесу вакуумного термоциклічного азотування у плазмі пульсуючого тліючого розряду використовувалася універсальна установка «ВПА-1», розроблена в Інституті проблем міцності ім. Г.С. Писаренко НАН України (рис.1) [1, 4].



Рис. 1. 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 ВТАППТР 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 і т. д.), а також їх ресурс багаторазово підвищується.

Характеристика процесу вакуумного термоциклічного азотування у плазмі пульсуючого тліючого розряду. Процес ВТАППТР реалізується в дві стадії: очистка поверхні пед азотуванням і саме азотування. Технологічний процес ВТАППТР зводиться до наступних операцій [1-4]:

- обезжирювання деталей;
- установка деталей на пристрої, який одночасно повинен служити для місцевого захисту від азотування (покрита 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 300-400°C;
- 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 150-200°C при тискові 13,0-65 Па. продовжується 1,0-2,0 години.

Таблиця 1

Основні технологічні параметри процесу ВТАПТР деталей з різних сталей

Марка сталі	Температура, °C	Газовий режим	Орієнтовна витримка, год., для отримання шару товщиною, мм					Твердість на поверхні, HV
			0,15-0,2	0,2-0,25	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
40XФА	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
30X3МФ	530	1	4-5	6-8	9-12	15-18	-	700-760
	530	2	4-5	5-7	6-8	9-12	15-18	-
38X2МЮА	550	1,2	4-5	5-7	7-9	9-12	15-18	900-950

При експериментальних дослідженнях використовували зразки зі сталі 40X13 розміром 30x30 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 термоциклювання - 550 ± 30 °C,
- тиск - 25-150 Па,
- час обробки - 10 годин,
- співвідношення реакційних газів – 80% Ar + 20% N₂.

Таблиця 2

Основні технологічні параметри процесу ВТАПТР деталей з різних сталей

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

За допомогою запропонованої технології можлива обробка різноманітних деталей. Наприклад, колінчаті вали, гільзи двигунів внутрішнього згоряння, 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. Перспективна нова технологія для зміцнення титану, тугоплавких металів – ніобію, молібдену.

Аналіз літературних джерел та останніх досліджень, а також патентно-інформаційний пошук [1-4] показує що широке використання технології вакуумного термоциклічного азотування у плазмі пульсуючого тліючого розряду (ВТАПШТР) обмежено відсутністю досліджень взаємозв'язку факторів, що визначають хід процесу ВТАПШТР та узагальнюючих висновків та рекомендацій по вибору технологічних параметрів цієї технології. Ці обставини підтверджують актуальність та необхідність дослідження процесу ВТАПШТР.

Дослідження процесу ВТАІ ШТР та властивостей іонноазотованих шарів. Значна кількість технологічних параметрів процесу ВТАІ ШТР у сполученні із широкою номенклатурою матеріалів, із яких формують зміцнений поверхневий шар (ЗПШ), дають технологам 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 (ТП) ВТАІ ШТР необхідно мати фізичний зміст і досить повно характеризувати процес вакуумного термоциклічного азотування у плазмі пульсуючого тліючого розряду [1-7].

При зміцненні поверхонь конструктивних елементів широко використовується термін конструктивна або конструкційна міцність металів [8-10]. 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.) [8-10]. За допомогою використання ТП ВТАІ ШТР, який впливає на якість поверхневого шару, можна керувати значеннями параметрів конструктивної міцності матеріалів. Оцінюючи умови роботи найбільш навантажених конструктивних елементів, встановлено 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 у необхідності визначення значення межі витривалості зміцненого конструктивного матеріалу.

Корозійне пошкодження істотно знижує механічні властивості конструкційного матеріалу. Таким чином, в якості поверхонь, зміцнених ВТАПШТР доцільно досліджувати межу витривалості та корозійну стійкість, що характеризується питомим збільшенням маси.

Для дослідження процесу ВТАПШТР 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 ВТАПШТР, що впливають на якість ЗПШ

№	Параметри	Значення
1	Час дифузійного насичення, хв.	90...240 (крок 30)
2	Тиск реакційного газу, Па	25...250 (крок 25)
3	Склад реакційного газу	1) 90%N ₂ + 5%С ₃ Н ₈ + 5% Ar; 2) 95%N ₂ + 5%С ₃ Н ₈ ; 3) 80%N ₂ + 5%С ₃ Н ₈ + 15% Ar
4	Температура газу, °К	673...873 (крок 100)
5	Експлуатаційна температура, °К	663...913

Необхідно зауважити, що значення таких параметрів як тиск та температура реакційного газу, що наведені у таблиці, протягом процесу ВТАПШТР не є постійними: тиск реакційного газу змінюється періодично (з періодом 15...30 хв.), а температура - коливається у межах 25...35°С.

Дослідження мікротвердості поверхневих шарів після ВТАПШТР виявили зростання її значень до 11250 МПа (табл. 4.) та поступове її зменшення до 4200 МПа на глибині до 310 мкм. Режими обробки представлені в таблиці 2 та 3. Із аналізу 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 більшими, ніж у зразків після газового азотування (90%N₂+10%Ar; T=600°C; t=4,0 год).

Таблиця 4

Мікротвердість ЗПШ зразка після ВТАППТР

№ 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 (°C) та тиску реакційного газу P (Па), за яких мікротвердість поверхневих шарів сягає своїх максимальних значень: для температури азотування T (°C) цей діапазон знаходиться у межах 550...600 °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%N₂+ 5%С₃Н₈ + 5%Ar, а мінімальних - за суміші 80%N₂ + 5%С₃Н₈ + 15%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. Режимми обробки ВТАППТР для даних таблиць 5 та 6 представлені в таблиці 2.

Шляхом технології ВТАППТР 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.

Для визначення опору втомі зміцнених ВТАППТР зразків 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=10⁷ 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 втомі 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.

ВТАППТР обмежує швидкість проходження дифузійних процесів, що значно впливає на підвищення межі витривалості. Завдяки ТП ВТАППТР вдалося підвищити межу витривалості зразків на

15...20% зі збільшенням кількості циклів до руйнування у мовах одночасної дії циклічних навантажень та температури.

Таблиця 5

Шорсткість поверхні ЗПШ зразків після ВТАПТР

№ Режиму обробки	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

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

Таблиця 6

Результати дослідження корозійної стійкості азотованих зразків

№ режиму обробки	Питоме збільшення маси зразка А т/т, 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

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 підвищення межі 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 домішок. 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, упродовженні у матрицю атом азоту розсуває сусідні атоми, створюючи залишкові напруження стиску. Ці напруження ефективно зберігають поверхню від руйнування.

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 (ВТАПШТР) обмежено відсутністю досліджень взаємозв'язку факторів, що визначають хід процесу ВТАПШТР та узагальнюючих висновків та рекомендацій по вибору технологічних параметрів цієї технології.

На основі досліджень впливу напруженого стану і механічних властивостей на характеристики міцності встановлено механізм підвищення межі витривалості іонноазотованих поверхневих шарів. На підставі аналізу напружено-деформованого стану (НДС) створено можливість прогнозування характеристик циклічної міцності, що дозволяє в широких межах керувати режимами ТП ВТАПШТР.

У результаті проведених досліджень встановлено закономірності впливу параметрів ТП ВТАПШТР 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 °С;

- 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 °С;

- 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 ВТАПШТР корозійна стійкість підвищується у 3,1 рази, а межа витривалості сталевих конструкцій при температурах до 640 °С підвищується на 15...20%.

Література

1. Харченко В.В., Ляшенко Б.А., Курият 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 Междун. науч.-техн. семинара (Свальява, 20-24 февраля 2012). 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. Спосіб поверхневого зміцнення сталевих деталей іонно-плазмовим азотуванням у пульсуючому тліючому розряді: пат. 78071 Україна С23С 8/06 опубл. 11.03.2013, Бюл. № 5.

5. Дубровська Г.М. Системи сучасних технологій [Текст] / Г.М. Дубровська - Ч.: ЧІПІ, 2001 - 195 с.

6. В.В. Налимов Логические основания планирования эксперимента. [Текст] / В.В. Налимов, Т.И. Голикова - М.: Наука, 1976. - 128 с.

7. Румшинский, Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента. [Текст] / Л.З. Румшинский - М.: Наука, 1971. - 192 с.
8. Скляр, Н.М. Конструктивная прочность металлов. Металловедение и термическая обработка металлов. 1981, - №6. - С. 8-12.
9. Писаренко Г.С. Сопротивление материалов деформированию и разрушению. Часть 1 [Текст] / Г.С. Писаренко. - К.: Наукова думка, 1994. - 286 с.
10. Писаренко Г.С. Сопротивление материалов [Текст] / Г.С. Писаренко. - К.: Вища школа, 1986. - 775 с.

References

1. Kharchenko V.V., Lyashenko B.A., Kuriat R.I., Isakhanov G.V. (2012). Termociklicheskie azotirovanie kak sintez razrabotok NAN Ukrainy. [Thermocyclic nitriding as a synthesis of developments of the NAS of Ukraine] Sovrem. problemy' proizvodstva i remonta v promy'shlennosti i na transporte: mater. 12-go Mezhdun. nauch.-tekhn. seminaru [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) Povy'shenie prochnosti i iznosostojkosti metallicheskih izdelij s pomoshh'yu impul'snoj metodiki naneseniya ionno-plazmenn'kh nitridny'kh 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 poverkhnivogo 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. Dubrovs'ka G.M. (2001). Sistemi suchasnikh tekhnologi'j [Текст] [Systems of modern technologies [Text] / GM. Dubrovskaya]. Ch.: ChI'TI', 195 p. [in Ukrainian].
6. Nalimov V.V. (1976). Logicheskie osnovaniya planirovaniya e'ksperimenta. [Текст]. [The logical basis for planning an experiment. [Text] / V.V. Nalimov, T.I. Golikova.] M.: Nauka, - 128 p. [in Russian].
7. Rumshinskij, L.Z. (1971). Matematicheskaya obrabotka rezul'tatov e'ksperimenta. [Текст]. [Mathematical processing of experimental results. [Text] / L.Z. Rumshinskij]. M.: Nauka, - 192 p. [in Russian].
8. Sklyarov, N.M. (1981). Konstruktivnaya prochnost' metallov [Текст] [Structural Strength of Metals]. Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov. №6. P. 8-12. [in Russian].
9. Pisarenko G.S. (1994). Soprotivlenie materialov deformirovaniyu i razrusheniyu. Chast' 1 [Текст]. [Resistance to deformation and destruction of materials. Part 1 [Text] / G.S. Pisarenko]. K.: Naukova dumka, - 286 p. [in Ukrainian].
10. Pisarenko G.S. (1986). Soprotivlenie materialov [Текст] [Resistance of materials [Text] / G.S. Pisarenko]. K.: Vishha shkola, - 775 p. [in Ukrainian].

Надійшла / Paper received : 12.11.2020 р. Надрукована/Printed :04.01.2021 р.