

© Р. Л. Трищук, аспірант, КПІ ім. Ігоря Сікорського,
Київ, Україна

**ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ
ДЕТАЛЕЙ ПОЛІГРАФІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ
ШЛЯХОМ МОДИФІКАЦІЇ ЇХ ПОВЕРХОНЬ
МЕТОДОМ ІОННО-ПЛАЗМОВОГО АЗОТУВАННЯ**

Подано аналітичний огляд способів зміцнення металевих поверхонь деталей методом хіміко-термічної обробки азотуванням. Чільне місце відведено аналізу методів іонно-плазмового азотування, до яких відносяться іонне азотування в тліючому розряді та іонне азотування в високочастотному геліконному розряді.

Ключові слова: азотування; іонне азотування; іонно-плазмове азотування; азотування в тліючому розряді; азотування в геліконному розряді.

Постановка проблеми

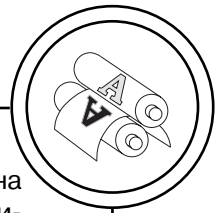
Створення сучасного якісного обладнання є важливим завданням, яке пов'язане з підвищенням зносостійкості та міцності деталей та агрегатів, з розробкою і застосуванням новітніх екологічно безпечних, енерго- та ресурсощадних технологій. Розробка конструкцій машин передбачає збільшення їх продуктивності, що майже завжди супроводжується підвищенням механічного та теплового навантаження рухомих деталей, які працюють в умовах тертя. У зв'язку з цим перед конструктором постає завдання створити нові, більш сучасні вузли тертя [1].

Для створення якісного обладнання в поліграфічному виробництві насамперед потрібно використовувати деталі й агрегати з підвищеною міцністю, надійністю та довговічністю. Боротьба

з дочасним зношуванням деталей набуває нових і ширших масштабів не тільки в поліграфічних друкувальних верстатах, а й в інших галузях металообробки та машинобудування. У багатьох технологічних процесах зростає величина навантажень на деталі та механізми верстатів. Тому необхідно поліпшувати експлуатаційні властивості поверхні деталей поліграфічного обладнання з метою підвищення їх міцності та зносостійкості.

Аналіз попередніх досліджень

Нині існує значна кількість різноманітних методів хіміко-термічної обробки матеріалів, в яких поверхню металевих деталей піддають насиченню іншими елементами з використанням дифузійного проникнення. Поверхня такої зразка покривається новим



шаром, який суттєво відрізняється від серцевини деталі за складом, структурою та механічними властивостями.

Цементация, нітроцементация та азотування є основними способами підвищення міцності деталей машин та агрегатів шляхом поверхневого зміцнення. Останнім часом найбільше використовують азотування — процес хіміко-термічної обробки матеріалів, який полягає в насиченні поверхневого шару зразка азотом. Він сприяє високій зносостійкості та твердості поверхневого шару деталей. Після азотування заготовка стає твердішою, більш зносостійкою, підвищуються її контактна витривалість, корозійна стійкість. Крім очевидних плюсів, цей метод модифікування поверхні сталевих зразків має також і недоліки. Це:

- довготривалий дифузійний процес;
- застосування аміаку, водню та інших вибухонебезпечних і отруйних газових сумішей;
- значні енергозатрати (електроенергія, вода, гази тощо).

Технологія іонно-плазмового азотування застосовується на заключному етапі обробки деталей, є доволі простою, екологічно безпечною та економічною [2]. Ці переваги обумовлюють істотне розширення застосування іонно-плазмового азотування в різних галузях виробництва машин і механізмів.

Для проведення азотування необхідно враховувати вплив попередньої термічної обробки на розмір зародків нітриду заліза на поверхні деталі. У роботі [3] показано, що режими попередньої термічної обробки металевої

заготовки суттєво впливають на її поверхневу структуру та властивості утвореного покриття. Таким чином, при кожній температурі обробки утворюється своя структура, яка характеризується певними механічними властивостями зразка. Автори [4] вивчали, як на механічні властивості азотованих сталевих зразків впливають розміри фаз нітриду заліза, їх густина, характер розподілу та хімічний склад. У [5] показано, що під час дифузійного насичення сталевих зразків на їх поверхні відбувається формування структур, подібне до розпаду пересичених твердих розчинів у сплавах, в яких триває процес старіння. Залежно від складу сталевих зразків та від температури азотування можуть утворюватися такі види нітридних структур:

- структура з одношарових зародків нітридної фази, що когерентні з кристалічною ґраткою матриці;
- структура з частковою когерентністю нітридної фази (розмір нітридів складає 2–4 нм);
- структура з порушеною когерентністю нітридної фази (розмір нітридів 10 нм).

Азотування сталевих деталей відбувається при нагріванні шляхом дифузійного насичення її поверхні азотом. Процес азотування складається з трьох основних етапів:

- створення газової фази, насиченої активним азотом;
- адсорбція атомів азоту поверхнею сталевих заготовок;
- дифузія атомів азоту в метал.

Мета роботи

Проведення аналізу сучасних методів хіміко-термічної обробки



для зміцнення сталевих деталей, що працюють в умовах тертя та піддаються високим фізичним і хімічним навантаженням, шляхом модифікації їх поверхневих шарів у результаті насичення азотом і виявлення найбільш перспективного й ефективного методу.

Результати проведених досліджень

Здатність матеріалу змінювати свої властивості при поглинанні атомів азоту залежить від:

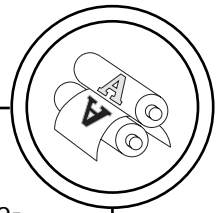
- чистоти поверхні сталеві заготовки;
- мікрорельєфу поверхні;
- хімічного складу приповерхневого шару;
- мікроструктури приповерхневого шару.

Найбільше на процес азотування впливає те, до якого типу сталей належить оброблюваний матеріал: до конструкційних, інструментальних, феритних, перлітних, аустенітних чи жаростійких [6].

Як зазначив М. А. Балтер, процес звичайного азотування складається з низки попередніх операцій [1]. Насамперед потрібна попередня термічна обробка заготовки. Вона складається із загартування та відпуску сталеві заготовки з метою отримання підвищеної міцності та в'язкості виробу. Відпуск проводять при температурах 600–675° С, а це вище за максимальну температуру подальшого азотування, що підвищує твердість, за якої сталь можна обробляти різанням. Після термічної обробки застосовують механічну обробку деталей і шліфування, що надає їм остаточних розмірів. Безпосередньо перед

азотуванням часто використовують захист ділянок, які не підлягають азотуванню, шляхом нанесення на них електролітичним методом тонкого шару (~0,01 мм) олова, або покриття їх рідким склом. За температури азотування олово розплавляється на поверхні сталі у вигляді тонкої непроникної для азоту плівки. Після всіх цих процедур проводять, власне, азотування, а потім доводять виріб до потрібних параметрів шляхом шліфування [1].

З метою пришвидшення процесів активації в газовому середовищі та збільшення поверхні азотування застосовують іонне азотування, яке суттєво скорочує тривалість процесу (до трьох разів), значно поліпшує якість поверхні виробу [7]. Іонне азотування проводять у сталевій камері, яка слугує одночасно анодом, а катодом виступає деталь, яка піддається азотуванню. В евакуйовану до низького тиску камеру, де має проходити азотування, подається азотовмісна газова суміш. Спочатку поверхню деталі очищують катодним розпиленням у розрідженому азотовмісному газі або водні. За напруги 1000 В і тиску 13,33 Па іони газу бомбардують поверхню деталі й очищують її, поверхня катода нагрівається до 200° С, після цього встановлюють робочий режим з напругою 300–800 В. Поверхня деталі-катода в результаті бомбардування позитивно зарядженими іонами газу нагрівається до температури 450° С. Іони азоту поглинаються поверхнею катода та дифундують углиб заготовки. Процес катодного розпилення на поверхні дозволяє проводити азотування



сплавів, які важко піддаються азотуванню та покриваються захисною оксидною плівкою.

У процесі азотування сталевих заготовок утворюються багатократні дифузійні шари, які складаються з поверхневої зони хімічної сполуки (білого шару) і зони внутрішнього азотування [8]. Дифузійні шари — це, в основному, гетерофазна зона зі значним вмістом високоазотистого α -твердого розчину з надлишковою фазою γ -нітридів, що виділилися внаслідок пересичення [2]. Дифузійний шар характеризується високою поверхневою твердістю, характерним розподілом твердості по товщині нітридної зони та зони внутрішнього азотування і градієнтом зміни твердості на одиницю товщини шару [6]. У дифузійному шарі твердість нижча, ніж в нітридному, та поступово зменшується від межі розділу двох зон шару до величини твердості сталі, яка не піддавалась процесу азотування. На твердість дифузійної зони значною мірою впливають кількість елементів легування та режими, за яких проводилось азотування. Нітридний шар, що утворюється на поверхні зразка в процесі азотування, має товщину 0,3–0,6 мм, і цього досить, щоб сталеві заготовки набули необхідних властивостей. Деталь, азотована за цією технологією, може більш не піддаватися жодним обробкам і готова до використання.

У роботах [9] досліджували вплив основних параметрів процесу азотування на властивості отриманих заготовок і на їх поверхневу структуру за такими параметрами:

— температура;

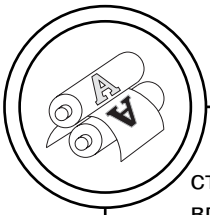
— тривалість насичення;
— склад азотовмісного середовища;

— тиск газової суміші;
— електричні показники.

Контролюючи параметри технологічного процесу і змінюючи потрібні їх показники, можна досягти оптимальної структури нітридної і дифузійної зон, властивості яких будуть відповідати вимогам умов їх експлуатації.

У газових середовищах для активації процесу використовують різноманітні розряди. Дедалі частіше застосовують іонне азотування в плазмі тліючого розряду, яке в кілька разів скорочує час обробки та підвищує якість зони азотування. Цей процес зазвичай проводять у середовищі дисоційованого аміаку. За рахунок дії розпиленого газу насичення в тліючому розряді проходить удвічі швидше, ніж при звичайному газовому азотуванні. Під час бомбардування поверхні заготовки позитивно зарядженими іонами відбувається її нагрівання, тому при його проведенні не потрібні спеціальні засоби для додаткового нагрівання деталі. Температурою процесу іонного азотування можна керувати шляхом зміни тиску робочого газу. Величина тиску газу в камері в межах 100–500 Па дозволяє підтримувати стабільне запалювання та тління розряду [2].

Головними факторами, що впливають на азотування, є: температура, за якої виконується ця технологічна операція, тиск газу, що подається в камеру, і час витримки деталі в печі. Ступінь дисоціації аміаку в газовому середовищі, який може



становити від 15 до 45 %, також впливає на ефективність процесу азотування. Твердість утвореного шару знижується при підвищенні температури азотування, зате пришвидшується процес дифузії азоту в ґратку металу. У деяких випадках можливе зниження твердості поверхневого шару металу, коли при азотуванні відбувається коагуляція нітридів елементів, якими леговано заготовку.

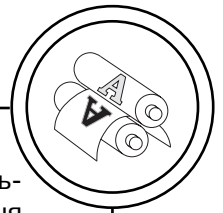
Перевагою цього методу є отримання плазми у великих за розмірами камерах (це дає змогу обробляти великі за розмірами деталі) і простота її підтримання, але, зважаючи на відносно високий тиск, потрібно подавати високу напругу горіння, а отже зростатимуть енергозатрати процесу. У процесі іонного азотування в тліючому розряді через використання високого тиску заряджені частинки в камері багатократно зіштовхуються між собою і це призводить до втрати ними кінетичної енергії. Знижена кінетична енергія частинок унеможлиблює руйнування оксидної плівки, яка утворюється на поверхні сталевих заготовок та не дає змоги потрапити в зразок атомам азоту. Для подолання цього явища у вакуумну камеру потрібно вводити більше 5 % водню для відновних реакцій. У [10] показано, що за певних умов зміна концентрації водню в газовій суміші не впливає на структуру дифузійного шару при азотуванні в тліючому розряді.

В монографії [11] представлено технологічний процес іонного азотування та його переваги перед пічним азотуванням. Між катодом (деталлю) та анодом

збуджується тліючий розряд, завдяки якому іони газу зі значною енергією бомбардують поверхню деталі та нагрівають її. Проходить депасивація і змінюється структура поверхні деталі, підвищується інтенсивність адсорбції та дифузії. Поверхня деталі насичується азотом, утворюються сполуки азоту з металами і в результаті змінюються фізико-механічні властивості деталі, особливо зростає твердість азотованих шарів зразка.

Таким чином, іонне азотування має низку переваг перед звичайним пічним азотуванням, а саме:

- отримання якісних дифузійних шарів із заданими складом і будовою;
- велика швидкість насичення;
- проведення добре регульованих процесів;
- високий ступінь чистоти поверхні зразка;
- дуже незначна деформація деталей після обробки;
- можливість азотування пасивованої поверхні без її депасивації;
- значне скорочення часу нагрівання та охолодження заготовки;
- скорочення числа проміжних і допоміжних операцій;
- відсутність операції з активування поверхні зразка;
- економне використання електроенергії;
- скорочення витрати газових сумішей для насичення;
- менший вплив викидів на довкілля;
- простота технічного виконання і прогнозовано стабільні параметри процесу іонного-



плазмового азотування в тліючому розряді роблять його найбільш привабливим методом [6].

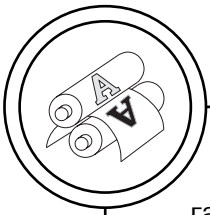
Параметри зміцнених поверхневих шарів азотованих зразків залежать від напруги між електродами, складу газової суміші та ступеня її розрідження, робочої температури в камері й тривалості процесу, а також від розташування зразків та електродів [12]. При азотуванні в тліючому розряді температура в камері підтримується в межах $470\text{--}580^\circ\text{C}$, а напруга — $400\text{--}900\text{ В}$. При виборі тиску газової суміші потрібно виходити з обмежень для тліючого розряду. Якщо тиск нижче 133 Па , енергії іонів буде недостатньо для нагрівання зразка до робочої температури, а при тиску, вищому за 1330 Па , відбуватиметься порушення стабільності тліючого розряду і він буде переходити в електричну дугу, що може призвести до оплавлення поверхні зразка. Оптимальний тиск у камері залежить від розмірів і конфігурації заготовки, оскільки зі зміною тиску змінюється протяжність катодної зони розряду. При тиску нижче 133 Па розряд гасне й ділянка темного катодного світіння біля поверхні зразка (який слугує катодом) буде на відстані $10\text{--}50\text{ мм}$, бо саме в цьому проміжку відбувається прискорення позитивно заряджених іонів за рахунок спаду напруги між межею плазми та катодом. У цьому випадку кінетична енергія іонів за величиною відповідає напрузі розряду, іонний струм є мінімальний і його густина не перевищує $0,5\text{ мА/см}^2$. Якщо підняти напругу розряду до 1000 В , то все одно іонізація газу буде

відбуватися слабо через низький тиск у системі. Збільшення тиску газу в робочій камері призведе до зростання числа зіткнень частинок між собою і суттєвого зниження кінетичної енергії іонів. За значень тиску газової суміші від 133 Па до 1330 Па ділянка катодної частини розряду зменшиться від 10 мм до 1 мм і при цьому завдяки інтенсивній іонізації газового середовища різко зростатиме густина іонного струму, до 20 мА/см^2 . Знизиться також значення напруги розряду до величини $400\text{--}500\text{ В}$. Значення величини густини струму в межах $0,5\text{--}20\text{ мА/см}^2$ не справляє особливого впливу на концентрацію дифузійних атомів, а лише визначає температуру нагрівання сталевого зразка [13].

Раніше при іонному азотуванні як азотовмісний газ застосовували аміак, або ж суміш азоту з воднем. У плазмі при тліючому розряді не є бажаною наявність слідів кисню, тому що він призводить до утворення оксидних плівок на поверхні зразків, а ті перешкоджають процесу насичення. Збільшення концентрації водню в робочій суміші з 10% до 90% майже не впливає на структурно-фазові параметри дифузійного шару. Водень лише позитивно впливає на кінетику формування азотованого шару та прискорює процес.

Процес іонного азотування в тліючому розряді протікає в дві стадії:

— очищення й активація поверхні зразка катодним розпиленням за умов низького тиску (менше $13,3\text{ Па}$), високої напруги (1000 В), малої густини іонного струму ($0,5\text{ мА/см}^2$);



— насичення азотом за тиску газу вище 133 Па.

При катодному розпиленні на першій стадії електричні параметри й дані тиску гарантують руйнування оксидних плівок та активацію поверхні. За другої стадії відбувається нагрівання поверхні до температури дифузії, підтримується активність газової фази і градієнта концентрації азоту на поверхні з одночасним регулюванням процесу за фазовим складом дифузійного шару [2].

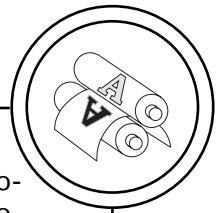
При використанні аміаку як робочого газу часто виникають проблеми вибухонебезпечності та забруднення доквілля. Наявність значної кількості водню у газовій суміші для насичення (крім азоту) призводить до крихкості поверхні зразка, а отже і до зниження міцності та довговічності деталей. Додавання аргону у водневомісне газове середовище для насичення сприяє підвищенню пластичності азотованих шарів. Повна заміна водню аргонном і використанні тільки аргонно-азотної суміші робочого газу позбавляє азотований шар крихкості, але призводить до суттєвої зміни енергетики процесу іонного азотування [9].

Для азотування сталевих деталей у тліючому розряді застосовують методи, які дозволяють не тільки скоротити процес у часі, а й отримувати високий клас чистоти поверхні, що не потребує її подальшої обробки, а також вдаються до економічних та безпечних методів, які позбавляють від потреби використання аміаку. Дедалі більше застосовують альтернативні іонно-плазмові технології з викори-

станням багатокомпонентних газових середовищ, що не містять аміаку. Експериментальні дані про ці процеси ще не повністю вивчено, їх результати не систематизовано, тому є дуже мало відомостей про структуру, фазовий склад і властивості поверхневих шарів сталевих деталей, що піддавалися азотуванню згідно з цими методиками.

Для азотування в тліючому розряді як робочу суміш газів можна використовувати NH_3 , N_2 , $\text{N}_2 + \text{H}_2$ або їх комбінацію. Азотна плазма поблизу катода складається з іонів N^{2+} і N^+ при співвідношенні 3:1. Позитивно заряджені іони N^+ під дією електричного поля рухаються у напрямку до катода з енергією в кілька тисяч разів більшою, ніж енергія іона азоту, що дисоціює в аміаку при звичайному азотуванні [11].

Під час бомбардування катода кінетична енергія іона перетворюється в теплову енергію поверхні деталі, що сприяє відриву електронів та атомів заліза, які в плазмі тліючого розряду з'єднуються з азотом й утворюють нітрид заліза, що адсорбується тонким шаром на поверхні деталі. Цей шар розкладається під дією бомбардування, у результаті утворюються нижчі нітриди заліза й азотистого α -твердого розчину $\alpha\text{-Fe}_{[\text{N}]}$. Азот, який виділяється при розпаді нижчого нітриду, дифундує в поверхневий шар і формує зону внутрішнього азотування, а залізо, збіднене азотом, розпилюється в плазму. Цей процес постійно повторюється. Осаджені на катоді нітридні фази є самостійним джерелом азоту [14].



У процесі пічного азотування дифузія азоту на початковому етапі протікає по межах зерен. Карбідні фази, що знаходяться там, перетворюються в карбонітридні, збільшуються за об'ємом і блокують граничну дифузію, що призводить до сповільнення азотування. При іонному азотуванні роль граничної дифузії на початковому етапі зменшується і дифузія азоту протікає, в основному, по дислокаційних каналах.

Під час іонного бомбардування очищується й депасивується поверхня зразка завдяки усуненню окисних плівок. Створення специфічної структури поверхні деталі при іонному очищенні та наявність активних іонів азоту при азотуванні в тліючому розряді зумовлює швидке зростання глибини шару та його твердості в початковий період. Протягом кількох хвилин азотування в тліючому розряді мікротвердість поверхні зразка досягає граничних значень, у той час як при пічному азотуванні концентрація азоту та мікротвердість зростають поступово [15].

При іонному азотуванні головними й незалежними параметрами процесу, від яких залежить якість новоствореного шару, є температура, тиск і склад газового середовища. Напряга й густина струму також мають вплив на процес, але не так суттєво [16]. Деякі автори схиляються до думки, що шляхом зміни параметрів азотування можна формувати на сталевих виробках дифузійні шари на основі високоазотистого α -твердого розчину, шари з монофазним нітридним покриттям γ чи ϵ над зоною внутрішнього азотування, або дво-

фазні нітридні покриття γ , ϵ з шаровою чи зі змішаною будовою. Це забезпечує майже весь набір фазових станів азотованого шару. При пічному газовому азотуванні сталевого зразка ступінь зміни фазового складу є незначним, дифузійний шар складається з трьох зон, які різняться за своїм структурним і фазовим складом. Перша зона — це зона ϵ -нітриду, що складається з твердого розчину азоту в нітриді Fe_2N . Під ϵ -нітридом знаходиться зона γ -фази, яка є впорядкованим твердим розчином азоту в ГЦК-ґратці заліза, де атоми азоту розміщуються в центрі елементарних кубів. Нижче за γ -фазою розміщується зона внутрішнього азотування, що є азотистим феритом з ОЦК-ґраткою. Азот займає октаедричні пори в ґратці α -заліза. Слід зазначити, що при пічному азотуванні зона ϵ - і γ -фаз просувається вглиб зразка й утворює нітридну сітку в дифузійному підшарі, а в нітридній зоні виникають пори. При іонному азотуванні нітридна зона на всій глибині не має пор [17].

Сьогодні недостатньо дослідженим, але доволі перспективним є метод іонного азотування в безводневому середовищі з використанням височастотного геліконного джерела плазми. У цьому напрямі нами проводяться дослідження на базі Інституту металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України, де була створена спеціалізована технологічна установка для прецизійного іонно-плазмового формування вуглецевих нанотрубок в єдиному вакуумно-технологічному циклі [18], яка була переналаштована



під процес азотування деталей поліграфічного обладнання (результати досліджень та опис технологічних процесів будуть наведені в окремій статті). Метод азотування в безводневому середовищі в плазмі геліконного розряду має ряд переваг перед вищезгаданими методами, таких як:

- збільшення густини плазми й концентрації атомів, що розпилюються;
- зменшена енерговитратність;
- розширений діапазон регулювання параметрів технологічного процесу;
- єдиний технологічний цикл очищення заготовки з подальшим азотуванням;
- значне скорочення тривалості технологічного процесу.

Попередні результати досліджень на циліндричних деталях

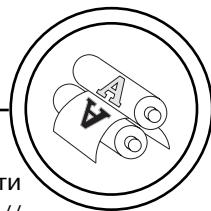
поліграфічного обладнання показали, що середня тривалість повного технологічного процесу іонного азотування у високочастотному геліконному розряді зразка з конструкційної сталі скоротилась у 10 разів порівняно з іонним азотуванням в тліючому розряді з аналогічними результатами збільшення мікротвердості поверхневого шару на певну глибину.

Висновки

Аналіз сучасних способів хіміко-термічної обробки азотуванням показує перспективність дослідження та застосування методу іонного азотування у високочастотному геліконному розряді в безводневих середовищах для зміцнення сталевих поверхонь деталей поліграфічного обладнання з огляду на його переваги над іншими методами.

Список використаної літератури

1. Балтер М. А. Упрочнение деталей машин / М. А. Балтер. М.: Машиностроение, 1978. 184 с.
2. Арзамасов Б. Н. Ионная химико-термическая обработка сплавов в газовых средах / Б. Н. Арзамасов, А. Г. Братухин, Ю. С. Елисеев, Т. А. Панайоти. М.: Изд. МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1999. 400 с.
3. Герасимов С. А. Новые идеи о механизме образования структуры азотированных сталей / С. А. Герасимов, А. В. Жихарев, Е. В. Березина, Г. И. Зубарев, В. А. Прянишников // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2004. № 1. С. 13–18.
4. Герасимов С. А. Влияние предварительной термической обработки на структуру и свойства азотированных сталей / С. А. Герасимов, А. В. Жихарев, В. А. Голиков и др. // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2000. № 6. С. 24–25.
5. Гаврилова А. В. Исследование структуры азотированных сталей / А. В. Гаврилова, С. А. Герасимов, Г. Ф. Косолапов, Ю. Д. Тяпкин // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1974. № 3. С. 14–17.
6. Лахтин Ю. М. Теория и технология азотирования / Ю. М. Лахтин и др. М.: Металлургия, 1991. 320 с.
7. Фетисов Г. П. *Материаловедение и технология материалов* / Г. П. Фетисов, Ф. А. Гарифуллин. М.: Инфра-М. 2014. 397 с.
8. Лахтин Ю. М. Структура и прочность азотированных сплавов / Ю. М. Лахтин, Я. Д. Коган. М.: Металлургия. 1982. 192 с.



9. Панайоти Т. А. Создание максимальной насыщающей способности газовой среды при ионном азотировании сплавов / Т. А. Панайоти // Физика и химия обработки материалов. 2003. № 4. С. 70–78.

10. Бабад-Захряпин А. А. Радиационно-стимулируемая химико-термическая обработка / А. А. Бабад-Захряпин, Г. Д. Кузнецов. М.: Энергоиздат. 1982. 182 с.

11. Каплун В. Г. Ионное азотирование в безводородных средах: монограф. / В. Г. Каплун, П. В. Каплун. Хмельницкий: ХНУ, 2015. 318 с.

12. Белый А. В. Влияние плотности ионного тока на структурные параметры и свойства поверхностных слоев хромосодержащих сплавов железа, модифицированных ионами азота / А. В. Белый и др. // Физика и химия обработки материалов. 2000. № 4. С. 11–17.

13. Wei R. A comparative study of beam ion implantation and nitriding of AISI 304 stainless steel / R. Wei et. al. // Surf. Coat. Technol. 1996. V. 83. P. 235–242.

14. Лахтин Ю. М. Азотирование в тлеющем разряде / Ю. М. Лахтин, Я. Д. Коган // Технология и механизация термической обработки металлов. М.: Машиностроение, 1974. 37 с.

15. Бутенко О. И. Формирование диффузионного слоя при ионном азотировании / О. И. Бутенко, Я. М. Головчинер, С. А. Скотников // Прогрессивные методы термической и химико-термической обработки. М.: Машиностроение, 1972. С. 122–128.

16. Лахтин Ю. М. Оптимизация газодинамических и энергетических параметров ионного азотирования / Ю. М. Лахтин, Я. Д. Коган, В. Н. Шапошников // Металловедение и термическая обработка металлов. 1976. № 6. С. 2–6.

17. Лахтин Ю. М. Азотирование стали / Ю. М. Лахтин, Я. Д. Коган. М.: Машиностроение, 1976. 256 с.

18. Руденко Е. М. Установка для прецизионного ионно-плазмового формирования вуглецевых нанотрубок / Е. М. Руденко, І. В. Короташ, В. Ф. Семенюк, К. П. Шамрай // Наука та інновації. 2009. Т. 5. № 5. С. 5–8.

References

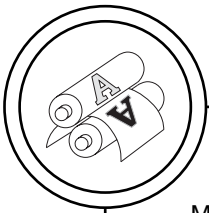
1. Balter, M. A. (1978). *Uprochnenie detaley mashin*. Moscow: Mashinostroenie, 184 p. [in Russian].

2. Arzamasov, B. N. & Bratukhin, A. G. & Eliseev, Yu. S. & Panayoti, T. A. (1999). *Ionnaya khimiko-termicheskaya obrabotka splavov v gazovyykh sredakh*. Moscow: Izd. MGTU im. N. E. Bauman, 400 p. [in Russian].

3. Gerasimov, S. A. & Zhikharev, A. V. & Berezina, E. V. & Zubarev, G. I. & Pryanishnikov, V. A. (2004). Novye idei o mekhanizme obrazovaniya struktury azotirovannykh staley. *Journal of Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 1, 13–18 [in Russian].

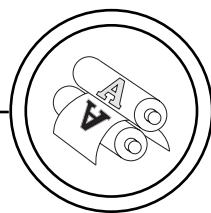
4. Gerasimov, S. A. & Zhikharev, A. V. & Golikov, V. A. & other (2000). Vliyanie predvaritel'noy termicheskoy obrabotki na strukturu i svoystva azotirovannykh staley. *Journal of Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 6, 24–25 [in Russian].

5. Gavrilova, A. V. & Gerasimov, S. A. & Kosolapov, G. F. & Tyapkin, Yu. D. (1974). Issledovanie struktury azotirovannykh staley. *Journal of Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 3, 14–17 [in Russian].



6. Lakhtin, Yu. M. & other (1991). *Teoriya i tekhnologiya azotirovaniya*. Moscow: Metallurgiya, 320 p. [in Russian].
7. Fetisov, G. P. & Garifullin, F. A. (2014). *Materialovedenie i tekhnologiya materialov*. Moscow: Infra-M, 397 p. [in Russian].
8. Lakhtin, Yu. M. & Kogan, Ya. D. (1982). *Struktura i prochnost' azotirovannykh splavov*. Moscow: Metallurgiya, 192 p. [in Russian].
9. Panayoti, T. A. (2003). Sozdanie maksimal'noy nasyshchayushchey sposobnosti gazovoy sredy pri ionnom azotirovanii splavov. *Journal of Fizika i khimiya obrabotki materialov*, 4, 70–78 [in Russian].
10. Babad-Zakhryapin, A. A. & Kuznetsov, G. D. (1982). *Radiatsionno-stimuliruemaya khimiko-termicheskaya obrabotka*. Moscow: Energoizdat, 182 p. [in Russian].
11. Kaplun, V. G. & Kaplun, P. V. (2015). *Ionnoe azotirovanie v bezvodnorodnykh sredakh*. Khmel'nitskiy: KhNU, 318 p. [in Russian].
12. Belyy, A. V. & other (2000). Vliyaniye plotnosti ionnogo toka na strukturnyye parametry i svoystva poverkhnostnykh sloev khromosoderzhashchikh splavov zheleza, modifitsirovannykh ionami azota. *Journal of Fizika i khimiya obrabotki materialov*, 4, 11–17 [in Russian].
13. Wei, R. & other (1996). A comparative study of beam ion implantation and nitriding of AISI 304 stainless steel. *Journal of Surf. Coat. Technol.*, V. 83, 235–242 [in English].
14. Lakhtin, Yu. M. & Kogan, Ya. D. (1974). Azotirovanie v tleyushchem razryade. *Journal of Tekhnologiya i mekhanizatsiya termicheskoy obrabotki metallov*. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].
15. Butenko, O. I. & Golovchiner, Ya. M. & Skotnikov, S. A. (1972). Formirovanie diffuzionnogo sloya pri ionnom azotirovanii. *Journal of Progressivnye metody termicheskoy i khimiko-termicheskoy obrabotki*. Moscow: Mashinostroenie, 122–128 [in Russian].
16. Lakhtin, Yu. M. & Kogan, Ya. D. & Shaposhnikov, V. N. (1976). Optimizatsiya gazodinamicheskikh i energeticheskikh parametrov ionnogo azotirovaniya. *Journal of Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 6, 2–6 [in Russian].
17. Lakhtin, Yu. M. & Kogan, Ya. D. (1976). *Azotirovanie stali*. Moscow: Mashinostroenie, 256 p. [in Russian].
18. Rudenko, E. M. & Korotash, I. V. & Semeniuk, V. F. & Shamrai, K. P. (2009). Ustanovka dlia pretsyziinoho ionno-plazmovoho formuvannia vuhletsevykh nanotrubok. *Journal of Nauka ta innovatsii*, V. 5, 5, 5–8 [in Ukrainian].

Представлен аналитический обзор способов упрочнения металлических поверхностей деталей методом химико-термической обработки азотированием. Особое внимание уделено анализу методов ионно-плазменного азотирования, к которым относятся ионное азотирование в тлеющем разряде и ионное азотирование в высокочастотном геликонном разряде.



Ключевые слова: ионно-плазменное азотирование; ионное азотирование; азотирование в геликонном разряде; азотирование в тлеющем разряде.

The article gives an analytical review of methods of strengthening the metal surfaces of parts by the method of chemical and thermal treatment of nitriding. The focus is on the analysis of ion-plasma nitriding methods, which include ion nitriding in the glow discharge and ion nitriding in high-frequency heliconium discharges.

Keywords: ion-plasma nitriding; ion nitriding; nitriding in helicon discharge; nitriding in the glow discharge.

Рецензент — Ю. Ю. Віцюк, к.т.н.,
доцент, КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції 23.03.18