

К. О. КОСТИК, канд. техн. наук, доц., НТУ«ХП»;

В. О. КОСТИК, канд. техн. наук, доц., НТУ«ХП»

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ВПЛИВУ ГАЗОВОГО ТА ІОННО-ПЛАЗМОВОГО АЗОТУВАННЯ НА ЗМІНУ СТРУКТУРИ І ВЛАСТИВОСТЕЙ ЛЕГОВАНОЇ СТАЛІ 30ХЗВА

Метою роботи є вивчення структури і властивостей плунжерів з легованої сталі 30ХЗВА після газового та іонно-плазмового азотування. В порівнянні з газовим азотуванням іонно-плазмове азотування забезпечує: скорочення тривалості обробки 5–10 разів, як за рахунок скорочення часу нагріву і охолодження садки, так і за рахунок зменшення часу ізотермічної витримки; зниження крихкості зміцненого шару; скорочення витрат робочих газів в 20–100 разів; скорочення витрат електроенергії в 1,5–3 разів; виключення операції депасивації; зниження деформації, що виключає фінішне шліфування; простоту й надійність екранного захисту від азотування незміцнюємих поверхонь; покращення санітарно-гігієнічних умов виробництва. Лл.: 19. Бібліогр.:18. назв.

Ключові слова: легована сталь, газове азотування, іонно-плазмове азотування, хіміко-термічна обробка, дифузійний шар, глибина шару, мікрокрихкість.

Вступ. Вплив експлуатаційних факторів на технічний стан об'єктів проявляється у вигляді відхилень параметрів від норм внаслідок зносу, старіння деталей та регулювання агрегатів.

Необхідність підвищення ресурсів і якості роботи плунжерів насосів з метою зниження витрат на ремонт паливної апаратури вимагає відповідати високим критеріям по точності виготовлення і якості поверхневого шару (мікротвердість, шорсткість) та бути стійкими на знос. Такі вимоги до відповідальних деталей можуть бути виконані тільки при використанні дорогих матеріалів з додатковою термічною обробкою або при використанні методів хіміко-термічної обробки таких як азотування.

Застосування процесу азотування спрямоване на зміцнення різноманітних сталей і сплавів, деталей машин та інструментів, що експлуатуються за різних умов. Азотування має багато технологічних варіантів і вибір того чи іншого процесу визначається технологічністю, можливістю регулювання будови утворюваного шару, швидкістю насичення поверхні, часом підготовчих робіт, рівнем автоматизації, економічністю, дотриманням вимог з охорони праці та навколишнього середовища.

Широкого розповсюдження набули процеси азотування в газових середовищах (в аміаку, в аміаку із природним газом, триетаноламіном, в аміаку з ендогазом або екзогазом); у рідких середовищах (у соляних, ціанідо-ціанітних, азотно-натрієвих й азотуючих розплавах); у вакуумі, тліючому розряді, а також проведення процесів насичення азотом під тиском, імпульсної подачі насичуючих середовищ, розведення аміаку азотом, азотно-водневими сумішами, повітрям тощо.

Аналіз публікацій. У загальному виді технологічний процес обробки виробів, що азотують, можна представити у вигляді наступних послідовних етапів [1–2]:

- 1) попередня термічна обробка з метою забезпечення сталі необхідного комплексу механічних властивостей;
- 2) механічна обробка деталі, яка включає шліфування;
- 3) захист ділянок, що не підлягають азотуванню;
- 4) азотування;
- 5) остаточне шліфування чи доведення виробу відповідно до заданих допусків.

Розрізняють два види азотування, а саме низькотемпературне та високотемпературне. Низькотемпературне азотування проводять при температурі нижче 600 °С в різних середовищах, що насичують. У результаті незалежно від середовища відбувається переважна дифузія азоту, а будова шару визначається діаграмою стану залізо-азот. Вуглець (кисень) бере участь у формуванні поверхневих нітридних зон шару, додаючи їм карбонітридний (карбоксінітридний) характер.

Низькотемпературне азотування проводять у частково дисоційованому аміаку, у суміші аміаку й азоту, аміаку і попередньо дисоційованому аміаку. Для активізації процесу в аміачно-водневу суміш додають кисень чи повітря. Широке застосування знаходять атмосфери на основі частково дисоційованого газу, ендогазу і екзогазу, продуктів піролізу триетаноламіна, синтина, гасу, спирту й ін. При рідкому азотуванні застосовують розплави ціанід – ціаністих солей.

Високотемпературне азотування проводять при температурах вище евтектоїдного перетворення (600–1200 °С). Цей вид азотування застосовують для феритних і аустенітних сталей, тугоплавких металів (титан, молібден, ніобій і ін.) [3].

Ефективність процесів азотування регулюється азотним потенціалом – N_p , на який впливають умови, що виникають на поверхні оброблюваного матеріалу. Кінцевий стан поверхні і хімічний склад матеріалів значно впливає на схолоненість поверхні. Насамперед, це відноситься до матеріалів, що містять хром: вони мають на поверхні оксиди хрому, що перешкоджають взаємодії з газами, що містять азот. Тому велика кількість робіт присвячена дослідженню різних способів підвищення активності поверхні – дробіструмна обробка, оксидування, обробка хлоридомісткими речовинами чи фтором [4].

Додавання вуглецю в будь-якому випадку сприяє підвищенню активності поверхні з утворенням ϵ -карбонітрида, і середовище, що насичує, до складу якої входить вуглевмісний газ, може прискорити протікання реакцій.

Азотування в газовому середовищі. Застосування різних газових атмосфер для насичення дозволяє оптимізувати будову і склад азотованого шару. Серед фахівців, що працюють в області азотування, існують визначені розбіжності з приводу того, наскільки тісно зв'язані формування шару хімічних сполук і його властивості з наявністю і відсутністю вуглецю. При цьому використане для всіх процесів загальне поняття "азотування" повинне бути уточнене для того, щоб чітко розрізнити безпосередньо "азотування", "карбонітрування" і "нітрооксиазотування", оскільки кожний з них відрізняється характерною тривалістю й отриманими в результаті властивостями.

Обмежено використовується азотування при зниженні тиску з іонізацією і без її, однак такі процеси звичайно більш тривалі, чим зв'язані з використанням

плазми. На противагу їм азотування з додаванням підвищеного тиску у визначеній системі сприяє підвищенню азотного потенціалу, унаслідок чого такий спосіб обробки знаходить застосування в промисловому масштабі. Додавання вуглецю в будь-якому випадку сприяє підвищенню активності поверхні з утворенням ϵ -карбідів, і середовище, що насичує, у складі якої входить вуглеводневий газ, може прискорити протікання реакцій [5].

Якщо парціальний тиск азоту в азотуючій атмосфері підтримувати меншим тиском дисоціації нітридів основного металу, то шар буде складатися тільки з зони внутрішнього азотування – твердого розчину азоту в основному металі, його нітридів і нітридів легуючих елементів. Такий шар сприяє підвищенню границі витривалості.

При більш високому парціальному тиску азоту утвориться композиційний шар, на поверхні якого розташовується суцільна зона нітридів основного металу. У цьому випадку, крім підвищення границі витривалості, досягаються високі корозійна і зносостійкість, задиростійкість, припрацьовуваність поверхонь тертя [6].

Здійснюють також азотування в суміші попередньо дисоційованого аміаку зі свіжим аміаком (5–15 %). У такій атмосфері утвориться шар тільки азотистого α -твердого розчину. Для зниження крихкості шару й економії аміаку рекомендується азотування в аміаку, розведеному азотом (азотним газом $N_2 + 4\% H_2$) до 70–80 %.

Введення в аміачно-водневу атмосферу кисню, повітря, вуглекислого газу і їхньої суміші прискорює процес насичення сталі азотом. У суміші аміаку і кисню (4 л на 100 л NH_3) швидкість азотування зростає в 2 рази в порівнянні зі звичайним азотуванням в аміаку.

Щоб зменшити крихкість шару, у деяких випадках застосовують азотування, що проводять в атмосфері цілком дисоційованого аміаку, при 520–560 °С. Одне сприяє, з одного боку, видаленню азоту з поверхневих шарів, а з іншого боку – дифузії його всередину. Зниження концентрації азоту в поверхневому шарі приводить до усунення в структурі шару ϵ -фази і, як наслідок цього, до зменшення крихкості азотованого шару без зміни його твердості.

На підставі наявних у літературі аналітичних залежностей, що описують загальні закономірності процесу азотування і кінетики формування окремих фаз, розроблена методика азотування в газовій атмосфері на прикладі легованих сталей 20Х3МВФА, 20ХГНМ, EI961, титанових сплавів [7–9].

Автори [9] в якості базового методу розглянули газове азотування, яке комбінували з азотуванням в тліючому розряді, а також іонною імплантацією азоту. Проаналізували фазовий склад нітридних шарів і особливості газонасичення. Вивчили мікротвердість і шорсткість поверхні, а також зносостійкість покриттів. Показали, що поєднання газового азотування з іншими способами азотування дозволяє підвищити зносостійкість титанових сплавів. Найбільш сприятливим поєднанням є послідовне проведення газового азотування і азотування в тліючому розряді, оскільки не тільки ефективніше підвищує зносостійкість нітридних поверхонь, але і найбільшою мірою сприяє збереженню механічних властивостей титанової матриці.

Азотування в плазмі тліючого розряду. Один зі способів інтенсифікації

процесу азотування – застосування різних електричних газових розрядів.

Найбільше поширення в даний час одержує азотування іонізованим азотом у плазмі тліючого розряду (іонне азотування). Плазма може прискорювати реакції, підвищуючи енергію іонів азоту, додатково активуючи їх у результаті катодного розпилення. Традиційний процес іонізації удосконалений розробкою методів плазмового азотування з каркасом, що екранує, чи з активним екраном, що забезпечує підвищення ефективності процесу і якості. Плазмове азотування відповідає екологічним вимогам, експлуатується велика кількість установок для його реалізації, особливо в Європі, але в інших регіонах цей процес не знайшов широкого поширення.

Іонне азотування має наступні переваги перед стандартним газовим процесом:

- велику швидкість насичення (у 1,5–2 рази);
- можливість проведення регульованих процесів азотування з оптимізацією дифузійних шарів за фазовим складом і будовою з урахуванням умов експлуатації деталей;
- мінімальні деформації виробів у процесі обробки і високий клас чистоти поверхні;
- велику економічність процесу, підвищення коефіцієнта використання електроенергії, скорочення витрати газів, що насичують.

Азотування сталі 38X2МЮА в тліючому розряді в середовищі азоту як в умовах прояву ЕПК, так і без прояву ЕПК (ефект порожнього катода дозволяє підвищити струм тліючого розряду в 6-10 разів і в результаті збільшити швидкість азотування в 1,2–1,5 рази при однакових напругах горіння заряду і тисках в камері), не призвело до зміцнення поверхні, що пов'язано з наявністю кисню в газорозрядній камері, який блокує процес азотування. Використання ефекту порожнього катода при азотуванні титанових сплавів в чистому азоті дозволяє збільшити його твердість від 400 до 1000 HV₅₀. Введення ацетилену в суміш азоту і аргону сприяє ефективному насиченню поверхні сталі 38X2МЮА азотом і дозволяє досягти твердості поверхні до 1000 HV₅₀ при азотуванні (нітроцементатії) у тліючому розряді. Причому товщина карбонітрідної зони, отриманої в тліючому розряді з порожнім катодом, в 2–3 рази більше [10].

Плазмове азотування (ПА) широко застосовують для поліпшення властивостей поверхні інструменту та зносостійких поверхонь різних виробів у машинобудуванні.

Відзначають розробку фірмою PlaTeg технології за допомогою однополярної або двополярної пульсуючої плазми постійного струму, що дозволяє поліпшити зносостійкість і корозійну стійкість поверхні при одночасному підвищенні втомної міцності сталей. Розроблена технологія володіє високими техніко-економічними показниками і дозволяє здійснювати процеси азотування, нітроцементатії, оксидування, хімічного осадження з газового середовища, ультратонку очистку поверхні. Іншим напрямком роботи зазначеної фірми є створення плазмового обладнання зниженого тиску для модифікування поверхні виробів плазмою середньої і підвищеної частоти і мікрочастотною плазмою [11–12].

Іонна хіміко-термічна обробка має переваги в порівнянні зі звичайними

способами, але одночасно пов'язана з більш високими витратами. Забезпечити помітне зниження витрат змогла фірма ELTRO (Німеччина), яка розробила модуль для іонного азотування з двома працюючими по черзі анодними столами, на яких встановлюються оброблювані деталі. Велику частину часу модуль працює в автоматичному режимі. У цикл обробки включені нанесення написів лазером і укладання деталей в стапель. На ці операції витрачається не більше 30 с на деталь [13].

Авторами проведено дослідження впливу O_2 на хід азотування сталей у плазмі, легованих Cr. Шляхом добавки повітря відбувається зміна в широких межах окисного потенціалу робочого газу. За аналогією з окисненням в ході азотування в газовому середовищі такі ж процеси в плазмовому середовищі у сталей з низьким змістом Cr ведуть до прискореного зростання сполучного шару. Для сталей з високим вмістом Cr добавка повітря значно погіршує результати азотування. Для таких сталей негативний вплив неконтрольованих домішок O_2 може бути компенсований достатньо високою часткою H_2 у робочому газі [14].

Спільне азотування і старіння Cr–Ni–Mo–Al при $500^\circ C$ протягом 2–8 годин підвищує твердість поверхні до 1000 HV, формуючи глибину азотованого шару від 100 до 200 мкм. Твердість поверхні зразків, оброблених на твердий розчин, після досліджуваного процесу підвищується з 30 до 39 HRC, що свідчить про можливість суміщення процесів азотування і старіння. Зразки після старіння при даній обробці не проявляють ефекту перестарівання. Утворений при плазмовому азотуванні поверхневий комплексний шар підвищує корозійну стійкість сталі [15].

Азотування в рідких середовищах. Процес азотування в розплаві солей одержав поширення в різних галузях машинобудування для зміцнення деталей широкої номенклатури, що працюють на знос в умовах закономірних згинаючих навантажень.

Найбільше поширення одержали ванни. Недавнє досягнення в області технології азотування в соляних ваннах – розробка низькотемпературного процесу. Низькотемпературна обробка при $480^\circ C$ штампів для пресування алюмінію видавлюванням і іншого формуючого оснащення використовуються усе ширше, забезпечуючи підвищення зносостійкості без зниження твердості навіть при повторному азотуванні. Крім того, азотування при зниженні температурі дозволяє звести до мінімуму жолоблення таких деталей, як вали, у тому числі і колінчаті вали для автомобілів [16].

Соляні ванни на основі ціанатів мають такі ж чи навіть більш високий азотний потенціал, а розроблені методи контролю і регулювання складу ванн забезпечують значний прогрес, дозволяючи позбутися практично від усіх недоліків. Висока активність соляних ванн на основі ціанатів зберігається навіть у випадку, якщо не забезпечується видалення солей, що погіршилися по якості, і технології регенерації, проведені в даний час, забезпечують значну економію.

З метою підвищення зносостійкості і корозійної стійкості застосовують новий процес азотування заліза і сталевих виробів, заснований на формуванні комплексного оксидного шару Fe–Li при обробці в соляній ванні, що містить катіони Li, Na і K і аніони CNO^- і CO^{2-} з добавками гідроксидів Li, Na і K. Для перемішування ванни застосовують продувку вологим повітрям ($1 \cdot 10^{-2}$ кг· H_2O) /

(1 кг сухого повітря). Кращим є зміст Li, Na і K, при якому температура затвердіння суміші карбонатів Li, Na, K нижче 500 °С. Рекомендують співвідношення компонентів у ванні для азотування: Na і K – 2:8–8:2, змісту CNO^- - 50035%, CN^- - 2% і температуру соляної ванни 450–650 °С [17].

Низькотемпературне азотування. Проведення низькотемпературних процесів стало можливими завдяки чіткому підбору хімічного складу й удосконаленню методів хімічного контролю. Плазмове азотування дозволяє внаслідок дифузії вуглецю чи азоту формувати при низькій температурі зміцнений шар.

Азотування без утворення шару хімічних сполук ефективно для сталей, легованих хромом, таких як нержавіючі, а також може бути рекомендоване для підвищення властивостей пружинних сталей.

Азотування і карбонітрування в газовому середовищі, включаючи обробку з використанням плазми, є прогресивними, і представляється можливим, що подальше дослідження й удосконалення цих процесів дозволяють підвищити продуктивність. Успішна реалізація азотування в газовому середовищі і плазмі залежить від контрольних розмірів, складу атмосфери і температури.

Азотування в плазмі становить практичний інтерес, однак при цьому необхідно вирішення питань, зв'язаних зі зниженням вартості устаткування і підвищення ефективності [18].

Азотування в соляних ванних ефективно для більшості марок у порівнянні з процесами в газових середовищах, включаючи і процеси з використанням плазми. Азотування в соляних ваннах при температурах нижче 480 °С дозволяє сформувати тонкий зміцнений шар без утворення шару хімічних сполук.

Метою роботи є вивчення структури і властивостей плунжерів з легової сталі 30ХЗВА після газового та іонно-плазмового азотування.

Методика експерименту. Матеріалом для дослідження в даній науково-дослідній роботі є конструкційна теплостійка легована сталь 30ХЗВА (ГОСТ 20072-74).



Рис. 1 – Загальний вид плунжера

Характеристика деталі.

Плунжер працює в парі з втулкою і піддається тертю, напруженням та деформаціям, які виникають під навантаженням, температурі та іншим факторам. Загальний вид плунжера показаний на рис. 1. Головні вимоги до плунжерів при виготовленні – це забезпечення високої твердості поверхневого шару, зносо-стійкості, корозійної стійкості та малої шорсткості робочої поверхні, тому такі деталі після поліпшення азотують.

Характеристика середовища для газового та іонно-плазмового азотування.

Газове та іонно-плазмове азотування деталей (плунжерів) проводили в середовищі дисаційованого аміаку.

Аміак – NH₃, нітрид водню, при нормальних умовах – газ без кольору з різким характерним запахом нашатирного спирту, майже вдвічі легше повітря, отрута. Розчинність NH₃ у воді дуже велика – майже 1200 об'ємів (при 0 °С) або 700 об'ємів (при 20 °С) в об'ємі води. В холодильній техніці носить назву R717, де R – Refrigerant (хладогент), 7 – тип хладогенту (неорганічне сполучення), 17 — молекулярна маса.

Молекула аміаку має форму тригональної піраміди з атомом азоту на вершині (рис. 2). Три неспарених р-електрона атому азоту приймають участь у відтворенні полярних ковалентних зв'язків з 1s-електронами трьох атомів водню (зв'язок N–H), четверта пара зовнішніх електронів є неподіленою, вона може утворити донорно-акцепторний зв'язок з іоном водню, що складає іон амонію NH₄⁺. Завдяки тому, що двухелектронна хмара строго орієнтована в просторі, молекула аміаку володіє високою полярністю, яка приводить до його доброї розчинності у воді (рис. 3). В рідкому стані молекули аміаку пов'язані між собою водневим зв'язком.

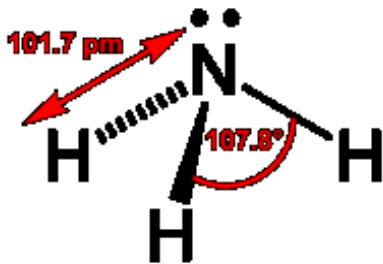


Рис. 2 – Хімічна формула аміаку

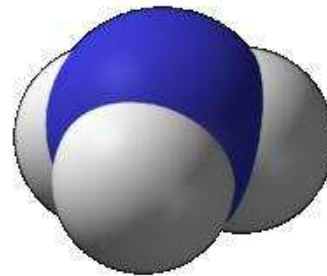
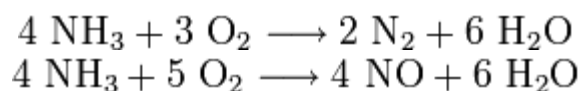


Рис. 3 – Вигляд молекули аміаку

При нагріванні аміак проявляє відновлюючі властивості. Так, він горить в атмосфері кисню, відтворюючи воду і азот. Окислення аміаку повітрям на платиновому каталізаторі дає оксиди азоту, що використовується в промисловості для отримання азотної кислоти:



Технологія ХТО та обладнання для азотування. Захист ділянок, які не азотуються, здійснюють шляхом нанесення в 2–3 шари ізоляційного лаку ХВЛ-21 (ТУ 6-10-1244), лудінням.

Для газового азотування застосовують електропіч опору типу УДА-901, загальний вид якої зображений на рис. 4.

Для здійснення процесу іонно-плазмового азотування застосовують піч НГВ 6,6/6, загальний вид якої показаний на рис. 5.



Рис. 4 – Загальний вид печі для газового азотування УДА-901



Рис. 5 – Загальний вид печі для іонно-плазмового азотування НГВ 6,6/6

Газове азотування плунжерів. Для здійснення процесу газового азотування встановлено таке обладнання:

- а) електропіч УДА-901 із щитами керування;
- б) стелаж з аміачними балонами;
- в) адсорбер (силікагелевий осушувач);
- г) дисоціомерт, U-подібні манометри, масляний затвор, крани.

Електропіч опору типу УДА-901 призначена для газового азотування. Загальний вигляд печі для газового азотування УДА-901 показаний на рис.4. Для азотування застосовують рідкий аміак першого сорту з вологою до 0,2 % (ГОСТ 6221–75), який постачається в балонах під тиском до 30 атм. Аміак подається в піч з балонів. Балони з аміаком встановлюються на спеціальному стелажі. Всі балони з'єднані гнучкими шлангами з устаткуванням. Рідкий аміак із балонів спрямовується в адсорбер. Контроль тиску аміаку здійснюється манометром, який встановлюється на колекторі. Тиск на I-му ступені редуктор повинен бути в межах 2 атм. Газоподібний аміак крізь колектор надходить в аміачний 2^x ступеневий редуктор ДР-ІА, який призначений для редуціювання та підтримки тиску у системі трубопроводів.

Адсорбер призначений для осушування аміаку, який надходить у піч. Адсорбер – це пустий циліндр, оснащений з двох боків фланцями, які кріпляться до нього за допомогою болтів. В середину адсорбер вставляється сітчастий кошик із вологовідокремлювачем – силікагелем (CaCl_2). Аміак надходить в адсорбер через нижній штуцер, проходить крізь силікагель та осушений крізь нижній штуцер, надходить в систему. Дисоціометр призначений для визначення ступеню дисоціації аміаку і є ємністю, градуйованою на 100 ділень. Принцип дії приладу оснований на властивості аміаку розчинятися у воді. Зверху та знизу ємність закривається кранами. Одна гілка нижнього двоходового крану з'єднана з лінією викиду рідини в каналізацію, а друга – з лінією викиду газів у повітря (крізь масляний затвор).

Для визначення ступеню дисоціації аміаку відкривають обидва крани таким чином, щоб гази, що відходять з печі, проходили крізь дисоціометр. Через 40–60 с закривають нижній кран, а інший повернути таким чином, щоб дисоціометр наповнювався водою. Аміак розчиняється у воді, а азот та водень не розчиняються. За об'ємом, наповненим газами, визначається ступінь дисоціації аміаку. При газовому азотуванні плунжерів зі сталі 30Х3ВА при температурі 525 °С ступінь дисоціації аміаку знаходиться в межах 30–50 %.

Маршрут виготовлення плунжерів складається з відпалу, покращення (гартування 880 ± 10 °С з високим відпуском 650 ± 10 °С), знежирювання, газового азотування протягом 40–50 годин, охолодження деталей, контролю твердості на поверхні і серцевини деталі, глибини дифузійного шару, мікроструктури, мікрокрихкості. Деталі розміщують в пристрої так, щоб вони не доторкувалися один до одного і щоб продукти розпаду аміаку вільно попадали на поверхню, яка підлягає азотуванню. Після цього деталі загрузають в піч УДА-901 (рис. 6) та герметично зачиняють.

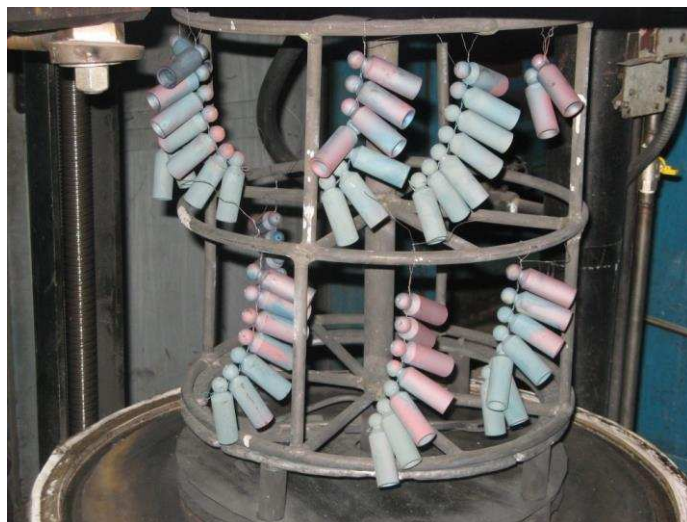


Рис. 6 – Деталі в печі УДА-901

Продувають муфель печі до повного вилучення з нього повітря, що установлюється по дисоціометру (повне заповнення дисоціометру водою вказує на відсутність повітря в печі), потім вмикають піч. Термін продувки складає 30–60 хв. Вибір температури азотування для деталей визначається відповідно до значень глибини та твердості шару. При високій твердості і невеликому шарі застосовують низьку температуру, а при великій глибині та меншій твердості пристосовують більш високу температуру; при великій глибині та високій твердості застосовують двохступеневий режим азотування.

Для визначення глибини азотованого шару використовувалась шкала об'єкт-мікрметра (рис. 7). Мікроструктура сталі 30Х3ВА після газового азотування приведені на рис. 8.

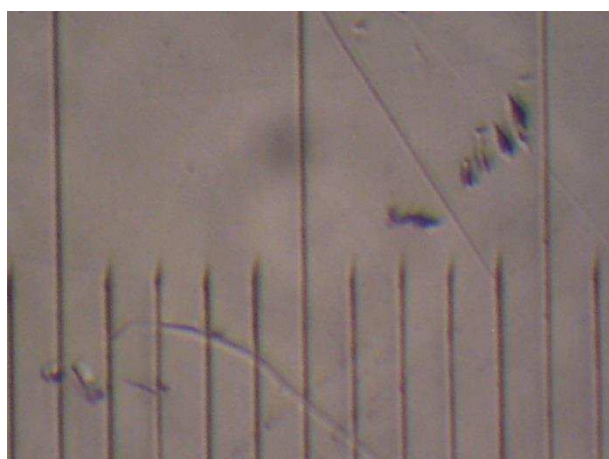
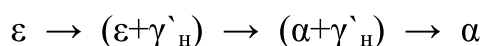


Рис. 7 – Шкала об'єкт-мікрметра; $\times 200$

При насиченні атомарним азотом на поверхні легованої сталі утворився при температурах нижче евтектоїдної ($590\text{ }^{\circ}\text{C}$), а саме $525\text{ }^{\circ}\text{C}$ дифузійний шар, який складається з нітридної зони і підшару α -твердого розчину. Нітридна зона після повільного охолодження утворена з ε -фази (Fe_{2-3}N) і γ' -фази (Fe_4N):



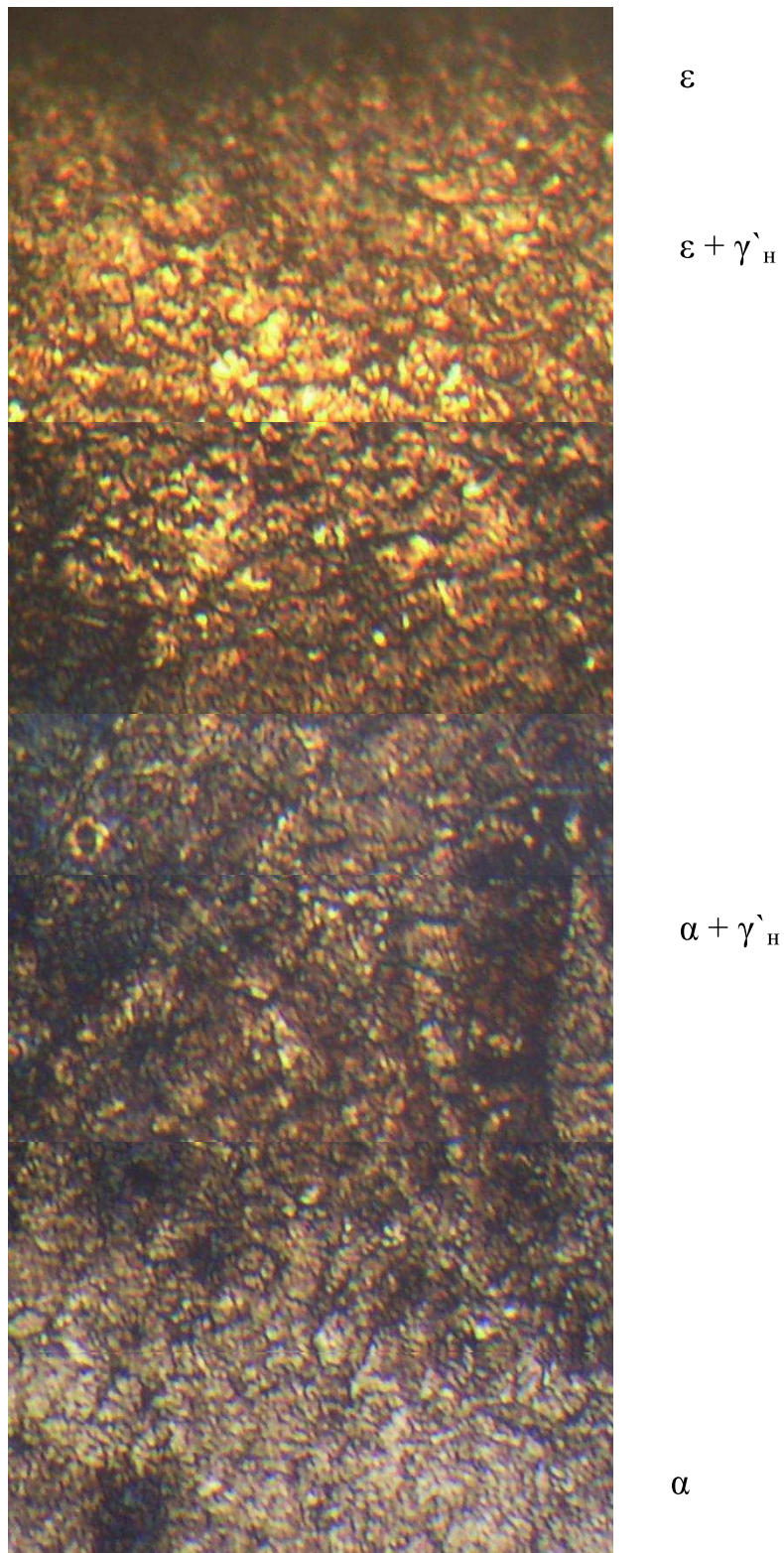


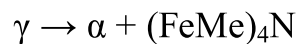
Рис. 8 – Мікроструктура дифузійного шару плунжерів з легованої сталі 30X3BA після газового азотування в печі УДА-901 при 525 °С протягом 50 годин; $\times 200$

У підшарі α -твердого розчину при охолодженні виділяється γ' -фаза (Fe_4N). Цю частину азотованого шару називають зоною внутрішнього азотування. Вона являє собою багатофазну область, що складається з азотованого твердого розчину

основного металу, його нітридів і нітридів легуючих елементів. Зони внутрішнього азотування утворюються в сплавах заліза, легованих нітридоутворюючими елементами: W та Cr. Вони, розчиняючись у фериті, підвищують розчинність азоту в α -фазі та утворюють спеціальні нітриди типу MeN і Me_2N .

При азотуванні відбувається здрібнювання блоків матриці, виникнення пружних напружень і дефектів кристалічної решітки α -фази. Завдяки розвитку полігонізованої структури з'являється велика кількість додаткових каналів дифузії. Це дає можливість атомам азоту в процесі насичення єдиним фронтом переміщатися в глиб α -фази. Виділення нітридів супроводжується збідненням твердого розчину як по азоту, так і по нітридоутворюючому елементу. При утворенні зон внутрішнього азотування для коагуляції нітридів, що виділилися, необхідний дифузійний приплив не тільки атомів азоту, але і легувальних елементів. Цей потік максимальний на границі «шар-матриця», тому найбільш інтенсивне укрупнення нітридів спостерігається наприкінці дифузійного шару, тобто зі збільшенням відстані від поверхні дисперсність нітридів зменшується. Також відзначено, що в ϵ -фазі за рахунок дифузії легувальних елементів карбіди розчиняються.

Структура азотованого шару формується не тільки при температурі насичення, але й у процесі наступного охолодження. У період охолодження після азотування відбувається розпад α -твердого розчину. У залежності від швидкості охолодження розпад протікає в більшому чи меншому ступені. При дуже повільному охолодженні крім зернистих нітридів легувальних елементів можливо утворення голчастих нітридів $(Fe)_{16}N_2$, $(FeMe)_4N$, що виділяються з α -фази. Азотистий аустеніт зазнає евтектоїдного перетворення:



Властивості азотованого шару визначаються структурою, що сформувалася в процесі насичення сталі азотом і перетвореннями, що протікають в аустеніті та фериті при охолодженні.

Іонно-плазмове азотування.

Характеристика іонно-плазмової технології хіміко-термічної обробки та її переваги перед газовим азотуванням. Іонно-плазмове азотування (ІПА) – це різновид ХТО деталей машин, інструменту, штампової та ливарної оснастки, яка забезпечує дифузійне насичення поверхневого шару сталі азотом в азотно-водородній плазмі при температурах 400–600 °C (рис. 9).

Принцип дії ІПА полягає в тому, що в розрядженому ($p=150\text{--}1000$ Па) азотовмісному газовому середовищі між катодом – деталями і анодом – стінками вакуумної камери – викликається аномальний тліючий розряд, який утворює активне середовище (іони, атоми), що забезпечує формуванню азотованого шару. Технологічними факторами, які впливають на ефективність іонного азотування, являються температура процесу, тривалість насичення, тиск, склад і витрати робочої газової суміші.



Рис. 9 – Обладнання для іонно-плазмового азотування

Температурний діапазон іонного азотування при зміцненні сталей ширше, чим газового і знаходиться в межах 400–600 °С. Обробка при температурах нижче 500 °С особливо ефективна при зміцненні виробів з легованих сталей, тому що значно підвищує їх експлуатаційні властивості при збереженні твердості серцевини на рівні 55-60 HRC. ІПА сприяє значному підвищенню зносостійкості та опору задирів і втомленості. Змінюючи склад газу, тиску, температуру і час витримки можна отримати шари необхідної структури та фазового складу. Оптимізація властивостей зміцненої поверхні забезпечує за рахунок необхідного сполучання нітридного й дифузійного шарів.

В наслідок іонного азотування можуть бути суттєві підвищення наступних характеристик виробів:

- зносостійкість,
- втомна витривалість,
- антизадирні властивості,
- теплостійкість,
- корозійна стійкість.

ІПА забезпечує стабільну якість обробки з мінімальною різницею властивостей від деталі до деталі та від садки до садки. Крім того, в порівнянні з газовим азотуванням в печі, ІПА забезпечує:

- скорочення тривалості обробки в 2–5 разів, як за рахунок скорочення часу нагріву і охолодження садки, так і за рахунок зменшення часу ізотермічної витримки (рис. 10);
- зниження крихкості зміцненого шару;
- скорочення витрат робочих газів в 20–100 разів;
- скорочення витрат електроенергії в 1,5–3 разів
- виключення операції депасивації;
- зниження деформації настільки, що виключення фінішного шліфування;
- простоту й надійність екранного захисту від азотування незміцнюємих поверхонь;
- покращення санітарно-гігієнічних умов виробництва;



Рис. 10 – Деталі до і після іонно-плазмового азотування

Використання ПІА замість газового азотування дозволить зекономити основне обладнання, знизити верстатні й транспортні витрати, зменшити витрати електроенергії та активних газових середовищ.

Застосування іонно-плазмового азотування. ПІА найбільш ефективно при обробці крупносерійних партій однотипних деталей: шестерній, валів, осів, зубчастих валів, вал-зубчастих шестерній та ін. Деталі, які оброблені плазмовим азотуванням, мають кращу стабільність розмірів і можуть використовуватися без додаткової обробки.

Основними споживачами обладнання і технології іонно-плазмового азотування є автомобільні, тракторні, авіаційні, суднобудівні і судноремонтні, машино- і верстатобудівні заводи, заводи по виробництву сільськогосподарської техніки, насосного та компресорного обладнання, шестерень, підшипників, алюмінієвих профілів, енергетичних устаткувань та ін. (рис. 11).

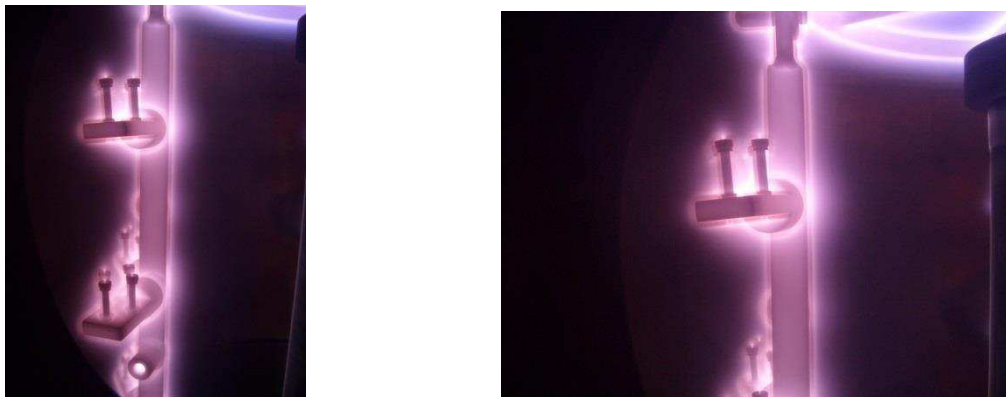


Рис. 11 – Деталі під час іонно-плазмового азотування

Якщо в якості робочого середовища використовується аміак, то це утворює певні труднощі:

- для забезпечення високої якості азотування необхідно очищати аміак від залишків вологи та олії, що потребує використання додаткового спеціального обладнання;
- при дисоціації аміаку, в робочій камері утворюється деяка кількість метану, неконтрольована присутність якого в робочій атмосфері недопустимо;
- проблеми по техніці безпеки та екології.

Це може призвести до отримання нестійких результатів по твердості азотованого шару.

Іонно-плазмове азотування плунжерів. Перед іонно-плазмовим азотуванням деталі та зразки-свідки промивають бензином, ацетоном та просушують. Набирають деталі на пристрій (рис. 12), закривають установку. Потім в камері утворюють вакуум з тиском не менше 5 Па. Продувають 2–3 рази камеру дисаційованим аміаком протягом 5–6 хвилин до тиску 200–600 Па, потім відкачують з камери газ до тиску 5 Па.



Рис. 12 – Деталі на пристрої для іонно-плазмового азотування

Деталі очищують мікродугами, заповнюють камеру аміаком до тиску 50 Па і вмикають нагрів до температури 390 ± 10 °С. Потім підвищують тиск газу до 1000 Па і проводять азотування при температурі 520 ± 10 °С протягом 4–5 годин. Охолоджують деталі в дві стадії:

- 1) охолодження до $300\text{--}250$ °С в тліючому розряді (тиск до 0,5–1,0 мм.рт.ст);
- 2) охолодження до $150\text{--}100$ °С при відключенні тліючого розряду. Далі деталі охолоджують на повітрі.

Мікроструктура азотованих плунжерів в печі НГВ 6,6/6 приведена на рис. 13. Головним достоїнством іонного азотування є можливість отримання тільки дифузійного зміцненого шару, або шару з монофазним нітридом Fe_4N (γ' -фаза) на поверхні, на відмінність від класичного газового азотування в аміаку, де нітридний шар складається з двох фаз – ($\epsilon + \gamma'$), що є джерелом внутрішніх напружень на границі розділу фаз і викликає крихкість і відшарування зміцненого шару при експлуатації.



ε

$\varepsilon + \gamma'_{\text{H}}$

$\alpha + \gamma'_{\text{H}}$

α

Рис. 13 – Мікроструктура дифузійного шару плунжерів з легованої сталі 30X3BA після іонно-плазмового азотування в печі НГВ 6,6/6 при температурі 525 °С протягом 5 годин; $\times 200$

У структурі нітридного шару спостерігаються залишки колишніх зерен пластинчастого перліту. При сильному збільшенні чітко видно, що пластини цементиту ростуть за рахунок підведення до них азоту з боку фериту, причому доти, поки вони цілком не перейдуть у шар з'єднань. Звідси випливає, що вихідні карбіди при виникненні нітридного шару не розчиняються, а перетворюються в карбонітриди. Крім того, нітридний шар формується внаслідок обумовлених збагаченням азотом структурних змін.

Вуглець, що дифундує при хіміко-термічній обробці, поглинається нітридами, що утворилися в шарі з'єднань, унаслідок чого цей шар можна розглядати як карбонітридний.

Частка обох нітридних фаз ε і γ' визначається ступенем насичення сталі азотом, і тому співвідношення цих фаз при азотуванні можна регулювати величиною витрати середовища, що насичує. У шарі з'єднань при азотуванні, незважаючи на підведення щодо великої кількості азоту, частка ε -нітридів виявляється менше, а частка γ' -нітридів більше.

Зона внутрішнього азотування являє собою багатофазну область, що складається з азотистого твердого розчину основного металу, його нітридів і нітридів легувальних елементів. Зони внутрішнього азотування відносяться до легованої сталі, тому що легувальні елементи (Cr, W) мають більшу спорідненість до азоту, ніж залізо. Азот помітно розчиняється в сплаві і його дифузійна рухливість більше, ніж рухливість легувальних елементів.

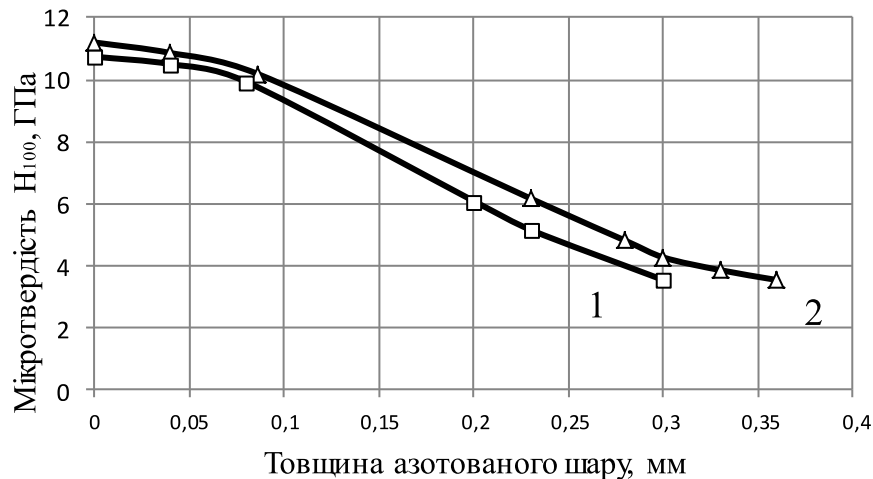
Дифузійний підшар, що відповідає зонам внутрішнього азотування другого роду, складається з азотистого твердого розчину нітриду заліза (γ') і легувальних елементів (рис. 13). За рахунок флуктуації спочатку у твердому розчині утворюються кластери, потім зони типу Гінье-Престона, після чого відбувається розрив когерентності й утворення самостійної фази. Утворення нітридів супроводжується зменшенням енергії Гіббса. При зростанні зародка він здобуває дископодібну, пластинчасту чи голчасту форму.

Виділення нітридів супроводжується збіднінням твердого розчину, як за азотом, так і за нітридоутворюючим елементом.

Якщо після азотування охолодження проводиться повільно, то вже в процесі його відбувається виділення γ' -нітридів, унаслідок чого пересичення матричного твердого розчину при кімнатній температурі виявляється менше, ніж після швидкого охолодження. Після повільного охолодження з температури азотування до кімнатної виникають нечисленні, однак відносно протяжні і частково відповідні діаметру зерна нітриди.

Зміна мікротвердості дифузійних шарів легованої сталі 30Х3ВА залежно від способу азотування. Твердість легованої сталі в результаті насичення азотом підвищується. Це пов'язано з виділенням із твердих дисперсних нітридів легувальних елементів, що запобігають легкому протіканню пластичної деформації (блокують рух дислокацій). У легованій сталі підвищення твердості можна пояснити утворенням дуже твердих нітридів нітридоутворюючими елементами в процесі азотування. Кількість поглиненого азоту, а також тип і кількість нітридів, що виділилися, визначають ступінь підвищення твердості. Твердість шару з'єднань, що переважно складається з нітридів, найвища і складає 10,5–11,0 ГПа. Максимальне зміцнення сталі досягається при температурі 525 ± 10 °С, коли в процесі насичення в α -фазі утворюються одношарові за азотом предвиділення, цілком когерентні з решіткою твердого розчину (рис. 14). Під

шаром з'єднань нижче і відповідно до концентрації азоту твердість поступово знижується від поверхні до значень серцевини матеріалу 3,6–3,8 ГПа. Таким чином, проаналізувавши експериментальні дані, можна відмітити, що іонно-плазмове азотування при температурі 525 °С за 5 годин дає можливість отримати зміцнення поверхневого шару до 11,0 ГПа на глибину 0,35 мм, а газове азотування за 50 годин зміцнює поверхневий шар до 10,5 ГПа на глибину 0,3 мм.



1 – газове азотування 50 годин;
2 – іонно-плазмове азотування 5 годин

Рис. 14 – Розподіл мікротвердості дифузійних шарів в сталі 30Х3ВА залежно від способів азотування при температурі 525 °С

Вплив хіміко-термічної обробки на мікротвердість поверхневого шару легованої сталі. Мікротвердість визначалась за стандартною методикою при навантаженнях 30÷200 г. В експериментах враховувався темп наростання крихкого руйнування матеріалу.

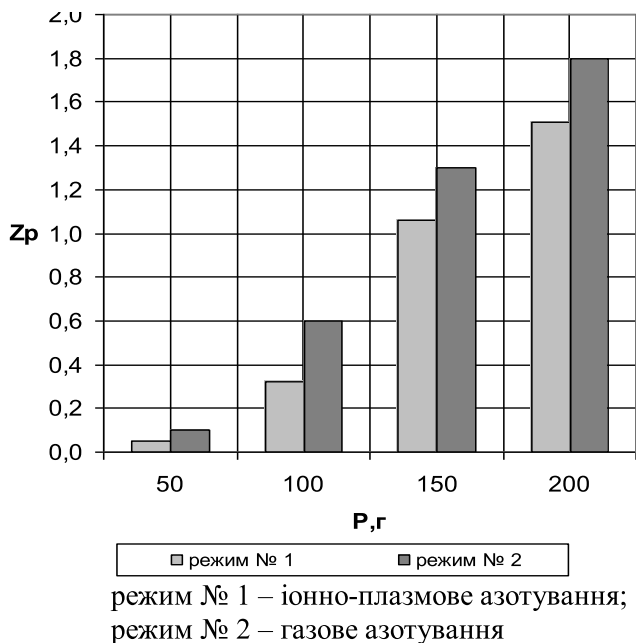


Рис. 15 – Графік залежності сумарного балу мікротвердості Z_p легованої сталі 30Х3ВА від навантаження P після азотування

Залежність сумарного балу крихкості Z_p від навантаження P після азотування показані на рис. 15. Результати вимірів мікротвердості після газового і іонно-плазмового азотування приведені на рис. 16–19.

Графіки показують, що наявність перехідної зони суттєво впливає на показники мікротвердості поверхневих шарів. Після азотування бал крихкості при наростанні темпу навантаження поступово збільшується від 0 балу при P=50 г до 1,5 балу після іонно-плазмового азотування та до 1,8 балів після газового азотування при P=200 г.

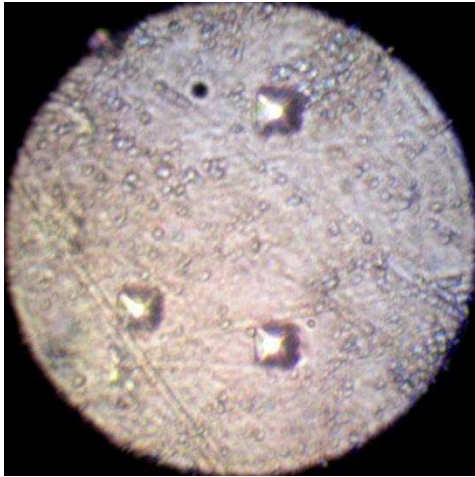


Рис. 16 – Мікрокрихкість азотованого шару сталі при $P=50$ г, $\times 500$

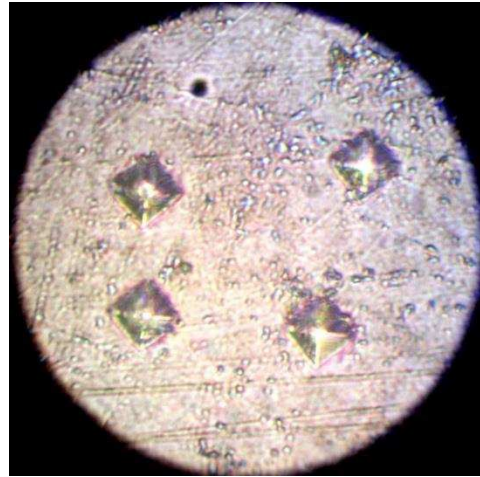


Рис. 17 – Мікрокрихкість азотованого шару сталі при $P=100$ г, $\times 500$

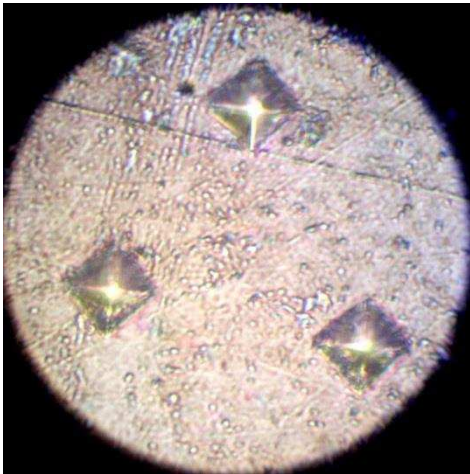


Рис. 18 – Мікрокрихкість азотованого шару сталі при $P=150$ г, $\times 500$

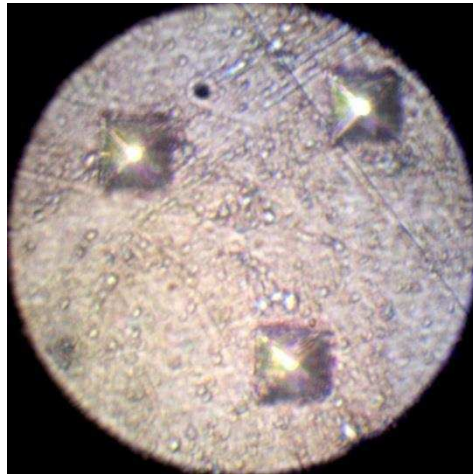


Рис. 19 – Мікрокрихкість азотованого шару сталі при $P=200$ г, $\times 500$

Висновки:

1. Попередня термічна обробка (поліпшення) перед азотуванням легованої сталі 30Х3ВА забезпечує твердість 36–38 НРС за рахунок формування перлітної структури з карбідами хрому та вольфраму.

2. Максимальна твердість поверхневого азотованого шару, що досягає 10,5–11,0 ГПа при температурі азотування 525 °С відповідає ϵ -фазі з нітридами заліза та легувальних елементів.

3. Газове азотування за 50 годин зміцнює поверхневий шар до 10,5 ГПа на глибину 0,3 мм з балом мікрокрихкості від 0 до 1,8 балів.

4. Іонно-плазмове азотування при температурі 525 °С за 5 годин дає можливість отримати зміцнення поверхневого шару до 11,0 ГПа на глибину 0,35 мм з балом мікрокрихкості від 0 до 1,5 балів.

5. В порівнянні з газовим азотуванням іонно-плазмове азотування забезпечує:

- скорочення тривалості обробки 5–10 разів, як за рахунок скорочення часу нагріву і охолодження садки, так і за рахунок зменшення часу ізотермічної витримки;
- зниження крихкості зміцненого шару;
- скорочення витрат робочих газів в 20–100 разів;
- скорочення витрат електроенергії в 1,5–3 разів;
- виключення операції депасивації;
- зниження деформації, що виключає фінішне шліфування;
- простоту й надійність екранного захисту від азотування незміцнюємих поверхонь;
- покращення санітарно-гігієнічних умов виробництва.

Список літератури: 1. *Герасимов С. А.* Новые идеи о механизме образования структуры азотированных сталей [Текст] / *С. А. Герасимов, А. В. Жихарев, Е. В. Березина* // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 2004. – № 1. 2. *Крукович М. Г.* Моделирование процесса азотирования [Текст] / *М. Г. Крукович* // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 2004. – № 1. 3. *Михальский Й.* Формирование однофазного слоя γ' -нитрида при концентрируемом азотировании в газовой среде [Текст] / *Й. Михальский, Й. Тасиковский, П. Вах* // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 2005. – № 1. 4. *Шнис Х.-Й.* Контролируемое азотирование [Текст] / *Х.-Й. Шнис, Х. Ле Тьен, Х. Бирманн* // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 2004. – № 7. – С. 7–11. 5. *Baranowska J.* Functional characteristics of nitride layers on austenitic steel produced by gas nitriding [Text] / *Jolanta Baranowska* // *Material Science.* – Lithuania, 2005. 11. – № 3. – С. 226–307. 6. *Базалева К. О.* Механизмы влияния азота на структуру и свойства сталей [Текст] / *К. О. Базалева* // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 2005. – № 10 (604). – С. 17–23. 7. *Герасимов С. А.* Газобарическое азотирование сталей [Текст] / *С. А. Герасимов, В. А. Голиков, М. А. Пресс* [и др.] // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 2004. – № 6. – С. 7–9. 8. *Михальски Й.* Формирование однофазного слоя γ' -нитрида при контролируемом азотировании в газовой среде [Текст] / *Й. Михальски, Й. Тасиковски, П. Вах* [та ін.] // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 2005. – № 11 (605). – С. 35–38. 9. *Fossati A.* Glow-discharge nitriding of AISI 316L austenitic stainless steel: influence of treatment time [Text] / *A. Fossati, F. Borgioli, E. Galvanetto* [etc.] // *Surface and Coat. Technol.* – 2006. 200. – № 11. – С. 3511–3517. 10. *Артемьев В. П.* Ионное азотирование покрытий, нанесенных из жидкометаллического носителя [Текст] / *В. П. Артемьев* // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 2004. – № 1. – С. 43–45. 11. *Будилов В. В.* Ионное азотирование в тлеющем разряде с эффектом полого катода [Текст] / *В. В. Будилов, Р. Д. Агзамов, К. Н. Рамазанов* // *Металло-ведение и термическая обработка металлов.* – 2007. – № 7 (625). – С. 33–36. 12. *Короатев А. Д.* Ионное азотирование феррито-перлитной и аустенитной сталей в газовых разрядах низкого давления [Текст] / *А. Д. Короатев, С. В. Овчинников, А. Н. Тюменцев* и др. // *Физика и химия обработки материалов.* – 2004. – № 1. – С. 22–27. 13. *Борисов Д. П.* Ионно-плазменное азотирование легированной стали с применением дугового плазмодгенератора низкого давления [Текст] / *Д. П. Борисов, В. В. Гончарова, В. М. Кузьмиченко* и др. // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 2006. – № 12. – С. 11–15. 14. *Куксенов Л. И.* Влияние условий нагрева при азотировании на структуру и износостойкость поверхностных слоев на стали 38Х2МЮА [Текст] / *Л. И. Куксенов, М. С. Мичугин* // *Металл. 2008.* № 2. С. 29 – 35. 15. *Tsujikawa M.* Behavior of carbon in low temperature plasma nitriding layer of austenitic stainless steel [Text] / *M. Tsujikawa, N. Yamauchi, N. Ueda* [etc.] // *Surface and Coat. Technol.* – 2005. 193. – № 1–3. – P. 309–313. 16. *Oliveira Sandro D.* Simultaneous plasma nitriding and ageing treatments of precipitation hardenable plastic mould steel [Text] / *Sandro D. Oliveira, Andre P. Tschiptschin, Carlos E. Pinedo* // *Mater. and Des.* – 2007. 28. – № 5. – P. 1714–1718. 17. *M. Shah Shoaib.* Langmuir probe characterization of nitrogen plasma for surface nitriding of AISI-4140 steel [Text] / *M. Shah Shoaib, Saleem Murtaza, R. Ahmad* [etc.] // *J. Mater. Process. Technol.* – 2008. 199. – № 1–3. – P. 363–368. 18. *Liu Junyou.* Nitridation of iron by the mixing technology with laser and plasma beams [Text] / *Liu Junyou, Sun Fenqiu, Yu Hanjing* // *Appl. Surface Sci.* – 2005. 252. – № 4. – P. 921–928.

Bibliography (transliterated): 1. *Gerasimov S. A.* (2004) Novyie idei o mehanizme obrazovaniya strukturyi azotirovannyih staley. – *J. Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 1. 2. *Krukovich M. G.* (2004)

Modelirovanie protsessa azotirovaniya. – J. Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov, 1. **3.** *Mihalskiy Y., Tasikovskiy Y., Vah P.* (2005) Formirovanie odnofaznogo sloya γ -nitrida pri kontsentriruemom azotirovanii v gazovoy srede. – J. Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov, 1. **4.** *Shpis H.-Y., H. Le Ten, Birmann H.* (2004) Kontroliruemoe azotirovanie. – J. Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov, 7, 7–11. **5.** *Baranowska J.* (2005) Functional characteristics of nitride layers on austenitic steel produced by gas nitriding. *Material Science, Lithuania*, 3, 226–307. **6.** *Bazaleeva K. O.* (2005) Mehanizmy vliyaniya azota na strukturu i svoystva staley. – J. Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov, 10 (604), 17–23. **7.** *Gerasimov S. A., Golikov V. A., Press M. A.* (2004) Gazobaricheskoe azotirovanie staley. – J. Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov, 6, 7–9. **8.** *Mihalski Y., Tasikovski Y., Vah P.* (2005) Formirovanie odnofaznogo sloya γ -nitrida pri kontroliruemom azotirovanii v gazovoy srede. – J. Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov, 11 (605), 35–38. **9.** *Fossati A., Borgioli F., Galvanetto E.* (2006) Glow-discharge nitriding of AISI 316L austenitic stainless steel: influence of treatment. – *Surface and Coat. Technol*, 11, 3511–3517. **10.** *Artemev V. P.* (2004) Ionnoe azotirovanie pokryitiy, nanesennykh iz zhidkometallicheskogo nositelya. – J. Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov, 1, 43–45. **11.** *Budilov V. V., Agzamov R. D., Ramazanov K. N.* (2007) Ionnoe azotirovanie v tleyuschem razryade s efektom pologo katoda. – J. Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov, 7 (625), 33–36. **12.** *Koroatev A. D., Ovchinnikov S. V., Tyumentsev A. N.* (2004) Ionnoe azotirovanie ferrito-perlitnoy i austenitnoy staley v gazovykh razryadah nizkogo davleniya. – J. Fizika i himiya obrabotki materialov, 1, 22–27. **13.** *Borisov D. P., Goncharova V. V., Kuzmichenko V. M.* (2006) Ionno-plazmennoe azotirovanie legirovannoy stali s primeneniem dugovogo plazmogeneratora nizkogo davleniya. – J. Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov, 12, 11–15. **14.** *Kuksenov L. I., Michugin M. S.* (2008) Vliyaniye usloviy nagreva pri azotirovanii na strukturu i iznosostoykost poverhnostnykh sloev na stali 38H2MYuA. – J. Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov, 2, 29 – 35. **15.** *Tsujikawa M., Yamauchi N., Ueda N.* (2005) Behavior of carbon in low temperature plasma nitriding layer of austenitic stainless steel. – *Surface and Coat. Technol*, 1–3, 309–313. **16.** *Oliveira Sandro D., Andre P. Tschiptschin, Carlos E. Pinedo.* (2007) Simultaneous plasma nitriding and ageing treatments of precipitation hardenable plastic mould steel. – *Mater. and Des*, 5, 1714–1718. **17.** *M. Shah Shoaib, Saleem Murtaza, R. Ahmad.* (2008) Langmuir probe characterization of nitrogen plasma for surface nitriding of AISI-4140 steel. – *J. Mater. Process. Technol*, 1–3, 363–368. **18.** *Liu Junyou, Sun Fenqiu, Yu Hanjing.* (2005) Nitridation of iron by the mixing technology with laser and plasma beams. – *Appl. Surface Sci*, 4, 921–928.

Надійшла (received) 09.10.2014

УДК 629.735.03:621.43.031.3(045)

Ю. М. ТЕРЕЩЕНКО, д-р техн. наук, проф., Национальный авиационный университет, Киев;

Е. В. ДОРОШЕНКО, канд. техн. наук, доц., Национальный авиационный университет, Киев;

А. ТЕХРАНИ, аспирант, Национальный авиационный университет, Киев

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА НА СРЫВНЫХ РЕЖИМАХ

В работе представлена методика расчета характеристик осевого компрессора на срывных режимах работы. Результаты расчета показали, что учет характеристик режимов записания течения в межлопаточных каналах последних ступеней позволяет более точно рассчитать положение границы газодинамической устойчивости на характеристике многоступенчатого осевого компрессора. Расчетное значение границы газодинамической устойчивости сдвигается вправо - в сторону больших расходов воздуха. Из.: 4. Библиогр.: 11 назв.

Ключевые слова: методика, характеристика, компрессор, записание, течение, решетка, срыв, газодинамическая устойчивость, расчет, режим.

© Ю. М. ТЕРЕЩЕНКО, Е. В. ДОРОШЕНКО, А. ТЕХРАНИ 2014