

УДК 621.785

Сагалович О. В., Попов В. В., Сагалович В. В.

АТ Науково-виробнича корпорація «ФЕД». Україна, м. Харків

## ПЛАЗМОВЕ ПРЕЦИЗІЙНЕ АЗОТУВАННЯ AVINIT N ДЕТАЛЕЙ І СПЛАВІВ

*Розроблений спосіб зміцнення і підвищення зносостійкості виробів із сталей і сплавів шляхом плазмового прецизійного азотування Avinit N.*

*Нагрівання деталей до температури 400...500°C, наступну ізотермічну витримку при цій температурі і безпосередньо дифузійне насичення поверхні деталей при температурах 500...600°C в атмосфері азоту проводять у високошільній газорозрядній плазмі аргону і азоту, що формується газовим плазмоджерелом.*

*При цьому суттєво інтенсифікується процес утворення азотованого шару в 5–50 разів в порівнянні з обробкою традиційними способами азотування. Підвищується твердість і зносостійкість деталей за рахунок отримання рівномірно зміцненого шару без короблення зі збереженням вихідних геометричних розмірів азотованих деталей (прецизійне азотування «в розмір» з точністю до 1–2 мкм). [dx.doi.org/10.29010/89.8]*

*Ключові слова:* вакуумні плазмові технології; іонно-плазмова дифузійна модифікація поверхні металів; точність азотування.

Азотування як метод зміцнення деталей машин і інструментів є одним з ефективних і розповсюджених методів зміцнення і забезпечення функціональних властивостей багатьох деталей [1–5].

Серед переваг слід відзначити:

високу твердість (до 1300 HV), що досягається без закалювання; незначну деформацію деталей в порівнянні з другими методами зміцнення; теплостійкість поверхневого шару до 500–600°C; високу зносостійкість; корозійну стійкість (особливо в атмосфері); високу втомну витривалість азотованих деталей.

Відомий ряд традиційних способів азотування, давно і широко використовуваних в промисловості — газове азотування рідинне ціаністе азотування, іонне азотування в плазмі тліючого розряду тощо [1–5].

Зазвичай процес азотування містить нагрівання деталей до заданої температури в інтервалі 500...600°C і наступну витримку в насичуючій атмосфері для дифузійного насичення поверхні деталей азотом [1]. При цьому вдається підвищити пластичність і спротив задиру поверхневої нітридної зони оброблюваних деталей.

До недоліків традиційних методів слід віднести: велика тривалість процесу насичення (до 100 годин); необхідність застосування спеціальних дорогих сталей, які до того ж нетехнологічні на різних етапах виготовлення деталей; низька в порівнянні з цементованими деталями контактна міцність; дуже висока неекологічність промислових методів, крихкість поверхневого шару і знижена в'язкість

азотованих деталей, нестабільність результатів азотування при його реалізації в промисловості.

Недоліком цих способів є утворення вторинних крихких нітридів заліза Fe<sub>4</sub>N як на поверхні, так і у зернах зміцненого шару. Це сприяє виникненню внутрішнього напруженого стану, що призводить до короблення покриття із змінюванням геометричних розмірів деталей, що потребує подальшого шліфування. Азотований шар має недостатню твердість і зносостійкість.

Широко розповсюджені також методи дифузійного насичення, засновані на використанні плазмових процесів.

У відомих способах іонного азотування в плазмі тліючого розряду дифузійне насичення проводять в середовищі реактивного газу-азоту, або в тліючому розряді з використанням генератора газорозрядної плазми з накалиємим катодом [8].

Можливо застосування вакуумної іонно-плазмової обробки деталей [9] в газорозрядній плазмі, яка містить іони аргону та водню, проведення дифузійного насичення, причому обробку виробу і дифузійне насичення проводять одночасно в газорозрядній плазмі, що додатково містить іони вуглецю або вуглецю і азоту. Це дозволяє сформувати в поверхневому шарі дисперсно розподілені карбіди або карбонітриди і, таким чином, підвищити його твердість. Додаткове бомбардування іонами інертного газу (аргону), що міститься в газорозрядній плазмі, сприяє підвищенню швидкості дифузії, а значить і підвищенню товщини зміцненого поверхневого шару.

Недоліками іонно-плазмових способів є низька продуктивність процесу азотування і карбонітрування, формування на поверхні суцільного шару з нітридів заліза, вузька область їхнього застосування, оскільки він обмежений тільки азотованими сплавами (переважно конструкційними сталями з низьким ступенем легування). Не всі види покриттів, що наносяться в подальшому на азотовані поверхні, мають хімічну спорідненість з вуглецевим або карбонітрованим шаром підкладинки, і в цьому випадку дифузійне насичення може призвести навіть до зменшення міцності зчеплення покриттів з підкладинкою. А для підкладинок з твердого сплаву на основі карбідів тугоплавких металів насичення вуглецем для підвищення твердості поверхневого шару малоефективно.

Враховуючи беззаперечні можливі переваги азотування при створенні нових конструкційних матеріалів, пошук вдосконалених методів азотування залишається актуальним.

### Плазмове прецизійне азотування «Avinit N» [10–13]

Нами розроблений процес плазмового прецизійного азотування «Avinit N» — процес хіміко-термічної обробки деталей машин, інструменту, дифузійне насичення поверхневого шару азотом у високощільній плазмі несамостійного газового розряду. Плазмоутворюючий газ — азот. Джерелом високощільної плазми є газовий плазмогенератор установок «Avinit» [14].

#### *Суть плазмового азотування:*

Деталі, розміщені у вакуумній камері, піддаються обробці плазмою високої щільності, збудженої генератором плазми, в розрядженому інертному газовому середовищі.

Після нагріву до робочої температури плазмоутворюючий газ в камері замінюють на азот, що призводить до формування на поверхні деталей азотованого шару.

Змінюючи тиск, температуру, параметри розряду і час витримки, можна отримувати шари заданої структури і фазового складу, забезпечуючи необхідні властивості азотованих поверхонь.

#### *Спосіб Avinit N здійснюють наступним чином.*

Спосіб включає попередню іонно-плазмову обробку деталей із сталі і сплавів в плазмі тліючого розряду інертного газу-аргону при тиску  $3 \cdot 10^{-4}$  –  $7 \cdot 10^{-4}$  мм рт.ст. і щільності струму  $3,5 \text{ мА/см}^2$  впродовж 30 хв, плавно підвищуючи від'ємну напругу зміщення на деталі до 1000–1200 В.

В камері установки, яка містить джерело газорозрядної плазми (газовий плазмогенератор), створюють попередній вакуум  $5 \cdot 10^{-5}$  мм рт.ст. Через газовий плазмогенератор в камеру вводять аргон до тиску  $1 \cdot 10^{-3}$  –  $2 \cdot 10^{-3}$  мм рт.ст. і змінюванням стру-

му накалу катода від 0 до 200 А регулюють струм розряду плазмогенератора і щільність газорозрядної плазми.

Деталі надають обертання, подають на неї потенціал зміщення, плавно змінюючи його значення від 0 до 500...600 В, і проводять іонне очищення поверхні. При цьому інтенсивність іонного очищення і температуру нагріву деталі регулюють змінюванням струму розряду газового плазмогенератора, тобто щільністю струму іонів аргону — від 0 до  $5 \text{ мА/см}^2$ .

В процесі азотування в азотованому шарі в результаті дифузії азоту і фазових перетворень, що протікають, виникають концентраційні поля, що викликають збільшення об'єму, внаслідок чого виникають напруження, що сприяють коробленню деталей.

Пористість і крихкість шару проявляється тим раніше і тим в більшій мірі, чим раніше утворюються нітриди і інтенсивніше проходить подальше насичення азотом.

Початковий етап формування поверхневого шару при азотуванні має важливе практичне значення. Саме на цьому етапі слід підвищувати долю твердорастворного механізму і до мінімуму скорочувати, а краще і повністю запобігти протіканню реакції утворення нітридів, особливо з дуже високим вмістом азоту. При цьому скорочується тривалість азотування, оскільки дифузійна рухливість азоту в твердому розчині значно більше у порівнянні з його дифузиею в інших фазах і виключається або значно зменшується можливість виникнення пористості і крихкості поверхневого шару, а також утворення рівномірно зміцненого шару, що вкрай важливо для запобігання коробленню зі збереженням вихідних геометричних розмірів.

*Спосіб азотування реалізується поетапно наступним чином.*

Проводять нагрів виробів до заданої температури в діапазоні 400...500°C в газорозрядній плазмі аргону, що формується газовим плазмогенератором.

Проводять наступну витримку в газорозрядній плазмі аргону та азоту, що також формується газовим плазмогенератором.

На третьому етапі здійснюють дифузійне насичення поверхні виробу при температурах 500...600°C в насичуючій атмосфері азоту, при цьому газорозрядна плазма містить іони азоту і також формується газовим плазмогенератором.

### Результати експериментів

Експерименти були проведені на зразках з промислово широко використовуємих сталей 30X2H2BФА, 25X1MФ, 20X3MВФ. Зразки попередньо пришліфовували і полірували алмазною пастою зернистістю 1/0 до шорсткості 10 класу.

Для визначення характеристик змінювання геометричних розмірів зразків після азотування встановлені контрольні зразки, виконані у вигляді циліндрів  $\varnothing 20$  мм з тієї ж сталі, які пройшли повністю аналогічну попередню термообробку.

Після дифузійного насичення зразки і контрольні зразки досліджували з метою вивчення властивостей модифікованого поверхневого шару.

Для вимірювання температури деталей використовували пірометр Raytek.

Металографічні дослідження і визначення параметрів матеріалів (товщина шарів, рівномірність, дефектність і структура самого матеріалу) проводили на мікроскопах MMP-4 і Tesa Visio 300 gL. Мікротвердість шарів вимірювали за допомогою мікротвердомірів PMT-3 і «BUEHLER» при навантаженні 50 Г.

Виміри характеристик геометричних розмірів контрольних зразків проводили з точністю до 0,5 мкм до і після азотування.

Параметри плазми (іонний струм, щільність іонів, вольт-амперні характеристики, спектральні характеристики) безперервно відслідковувались та архівувалися за допомогою плазмометра «PlasmaMeter» та спектрометра «PlasmaSpectr» (рис. 1, рис. 2).

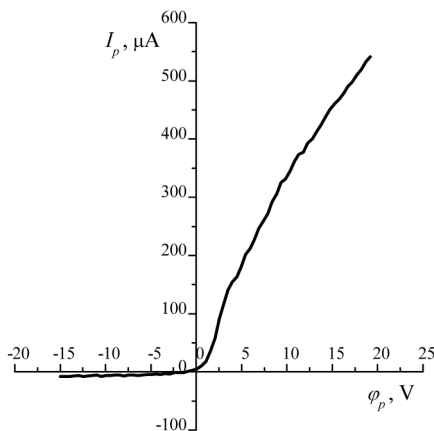


Рис. 1. Типова вольт-амперна характеристика (ВАХ) зонду при тиску  $1.2 \cdot 10^{-2}$  Торг, за допомогою якої розраховувались параметри плазми (іонний струм, щільність плазми, температура електронів, ступінь іонізації потоку)

1. В якості підкладинок використовували зразки сталі 30X2H2BФА і контрольні зразки з тієї ж сталі.

Після попереднього хімічного очищення в бензині і ректифікаційному спирті зразки розміщували у вакуумній камері установки Avinit [14], в якій був змонтований газовий плазмоденератор. Зразки закріплювали в центрі обертового стола установки і їм задавалося обертання з кутовою швидкістю 2 об/хв.

Камеру відкачували до тиску  $5 \cdot 10^{-5}$  мм рт.ст., потім напускали аргон до тиску  $3 \cdot 10^{-3} - 7 \cdot 10^{-3}$  мм рт.ст., підпалювали тліючий розряд аргону.

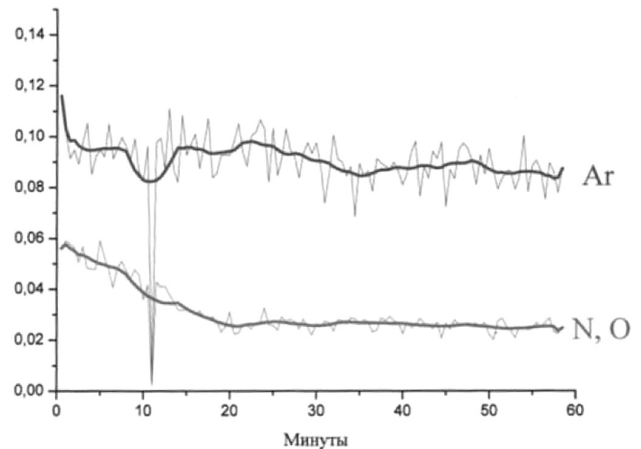


Рис. 2. Спектральні параметри плазми

Іонно-плазмову обробку зразків в плазмі тліючого розряду інертного газу-аргону здійснювали по режимам першого етапу. Обробка проводилась при потенціалі зміщення 1000–1200 В і щільності струму 3–5 мА/см<sup>2</sup> впродовж 30 хв.

На другому етапі проводили нагрівання деталей до температури 400...500°C в газорозрядній плазмі аргону, що формується газовим плазмоденератором. Через газовий плазмоденератор в вакуумну камеру вводили аргон до тиску  $1 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^{-3}$  мм рт.ст. При струмі накаливання катоду плазмоденератора 100 А, плавно регулюючи від'ємний потенціал зміщення до 400–500 В, температуру зразків доводили до 400...500°C впродовж 1 год.

Плазмоутворюючий газ аргон в камері був замінений на газову суміш  $Ar + 50\% N_2$ , що подавалася в газовий плазмоденератор при тиску  $1,5 \cdot 10^{-3}$  мм рт.ст.

Наступну ізотермічну витримку третього етапу проводили впродовж 2 час. в інтервалі 400...500°C в газорозрядній плазмі аргону і азоту.

Шляхом підвищення потенціалу зміщення до 600 В температура зразків була доведена до 530°C. Газовим плазмоденератором був сформований плазмовий потік, що містив тільки іони азоту. При цих умовах на четвертому етапі здійснювалося безпосередньо азотування — дифузійне насичення поверхні у високощільній газорозрядній плазмі азоту. Час витримки зразків — 2...3 год.

Отримані зразки досліджували з метою вивчення властивостей модифікованого поверхневого шару і вимірювання характеристик геометричних розмірів контрольних зразків.

Мікроструктура азотованого шару на сталі 30X2H2BФА показані на рис. 3 і рис. 4.

Величина твердості основного металу після азотування не змінюється  $H_c = 350...370$ . Твердість поверхневого шару сталі 30X2H2BФА після дифузійного насичення азотом підвищилася до 830 HV.

При цьому глибина азотованого шару складає 230...250 мкм при азотуванні при температурі 530°C

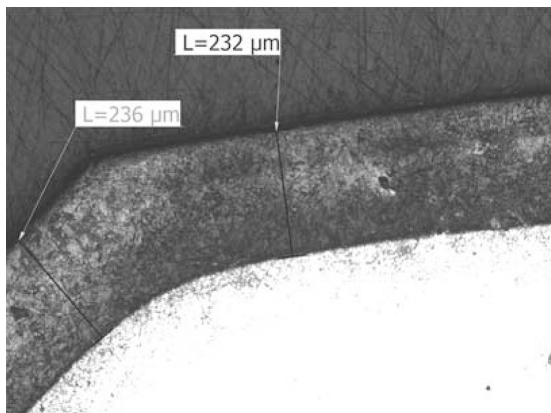


Рис. 3. Глибина азотованого шару на сталі 30X2H2BΦA (×500)

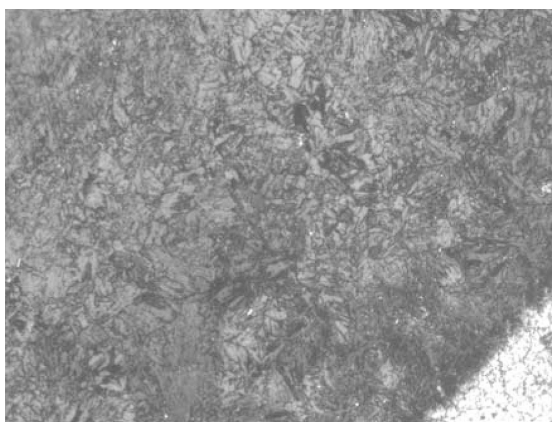


Рис. 4. Мікроструктура азотованого шару на сталі 30X2H2BΦA (×500)

впродовж 2 год, тобто ефективність азотування в 4–6 разів вище, ніж при традиційних методах азотування.

Дослідження мікроструктури азотованого шару (рис. 4) виявляють рівномірну структуру і повну відсутність крихкого поверхневого шару, характерного для традиційних методів азотування.

Як видно з табл. 1, геометричні розміри контрольних зразків залишаються з точністю до 1–2 мкм практично незмінними.

2. В якості підкладинок використані зразки сталі 25X1MΦ і контрольні зразки з тієї ж сталі. Попереднє хімічне очищення здійснювали як і в прикладі 1. Режими і час процесу аналогічні використаним у прикладі 1.

Глибина азотованого шару склала 230...250 мкм при азотуванні при температурі 530°C впродовж 2 годин, тобто ефективність азотування в 4–5 разів вище, ніж при традиційних методах азотування.

Твердість азотованого шару сталі 25X1MΦ склала 790 HV. Величина твердості основного металу після азотування не змінюється  $H_{\mu} = 350...370$ . Азотований шар має рівномірну структуру, крихкий поверхневий шар відсутній.

Виміри геометричних розмірів контрольних зразків виявляють їхню незмінність з точністю до 1–2 мкм.

3. Були проазотовані зразки із сталі 20X3MBΦ і контрольні зразки з тієї ж сталі.

Режими і час азотування аналогічні тим, що використані в прикладі 1.

Зовнішній вигляд азотованого шару на сталі 20X3MBΦ показаний на рис. 5.

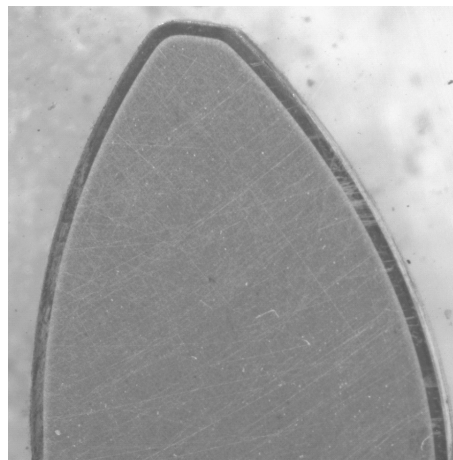


Рис. 5. Азотований шар на сталі 20X3MBΦ (×6,5)

Травлений і нетравлений шліфи азотованого шару на сталі 20X3MBΦ і місця заміру твердості приведені на рис. 6 та рис. 7.

Величина твердості основного металу після азотування не змінюється —  $H_{\mu} = 350...370$ . Твердість поверхневого шару сталі 20X3MBΦ після дифузійного насичення азотом підвищилася до 970 HV.

При цьому глибина азотованого шару склала 260...280 мкм при азотуванні при температурі 530°C впродовж 2 годин, тобто ефективність азотування в 4–6 разів вище, ніж при традиційних методах азотування.

Дослідження мікроструктури азотованого шару (рис. 7) виявляють рівномірну структуру і повну відсутність крихкого поверхневого шару, характерного для традиційних методів азотування.

Як видно з табл. 1, геометричні розміри контрольних зразків залишаються з точністю до 1–2 мкм практично незмінними.

Виконані дослідження впливу плазмового азотування Avinit N на геометричні розміри складно-профільних деталей, виготовлених із сталі 20X3MBΦ.

Обмірювання евольвентних поверхонь виконане на контрольно-вимірювальній машині Wenzel LH65 за допомогою поверхневих точок, нанесених на 3-D модель деталі.

Отримані дані показують, що плазмове азотування Avinit N не змінює вихідну геометрію евольвентних поверхонь з точністю 0,002 мм.



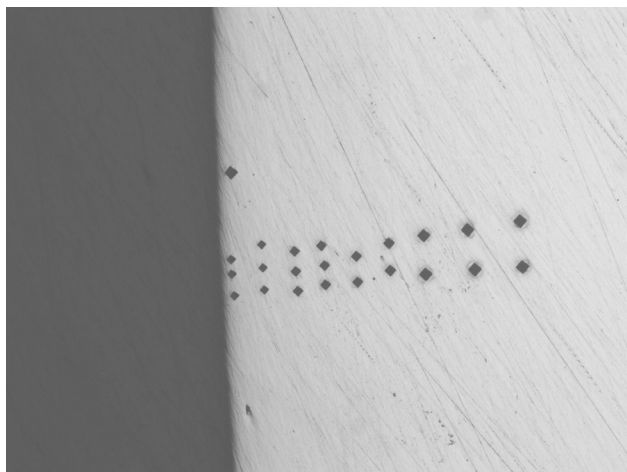


Рис. 6. Відбитки замірів мікротвердості (шліф не травлений)

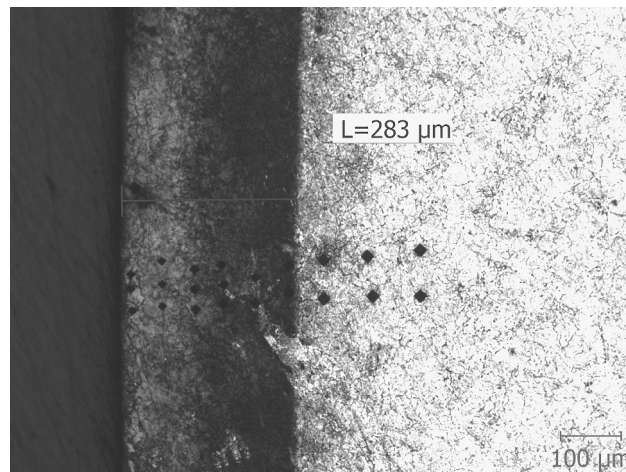


Рис. 7. Відбитки замірів мікротвердості (шліф травлений)

Таблиця 1

Параметри способу	Приклад 1 30X2H2BФА	Приклад 2 25X1МФ	Приклад 3 20X3МВФ
Температура нагрівання в ініційованій газорозрядній плазмі, Т°С	400±5	400±5	400±5
Час витримки, хв	20±10	20±10	20±10
Від’ємний потенціал очищення, В	600±5	600±5	600±5
Від’ємний потенціал іонного очищення, В	400±5	400±5	400±5
Час ізотермічної витримки, год	1,5	1,5	1,5
Тиск азоту, мм рт.ст. 10 <sup>-3</sup>	1,5±0,1	1,5±0,1	1,5±0,1
Потенціал зміщення при азотуванні, В	600±5	600±5	600±5
Температура азотування, Т°С	530±5	530±5	530±5
Час азотування, год	2	2	2
Глибина азотованого шару, мм	0,25	0,25	0,3
Твердість азотованого шару, НV	830	790	970
Твердість основи, HRC	37–39	36–40	38
Характеристика геометричних розмірів з точністю 1–2 мкм	незмінна	незмінна	незмінна

Таблиця 2

Марка матеріалу	Параметри процесу, властивості	Традиційні процеси іонного азотування	Прецизійне плазмове азотування
30X2H2BФА	Час отримання зміцненого шару товщиною 0,2...0,3 мм, час	16	2
	Температура процесу, °С	500–600	530
25X1МФ	Час отримання зміцненого шару товщиною 0,2...0,3 мм, час	16	2
	Температура процесу, °С	500–600	530
20X3МВФ	Час отримання зміцненого шару товщиною 0,2...0,3 мм, час	20	2
	Температура процесу, °С	500–600	530

Параметри здійснення способу представлені в табл. 1.

Порівняльні характеристики традиційних процесів азотування і плазмового прецизійного азотування Avinit N представлені в табл. 2.

Як свідчать експериментальні дані, отримання шару з рівномірною структурою поверхні при дифузійному насиченні азотом під дією іонів газової суміші аргону і азоту, створюємих газовим плазмогенератором, підвищення твердості деталей з сталей і сплавів при мінімальному коробленні і збереження вихідних геометричних розмірів izdeliy досягається при плазмовому прецизійному азотуванні Avinit N з отриманням рівномірно зміцненого шару при відсутності утворення крихкого шару нітрідів заліза. Температура деталей в процесі азотування для сталей 500–600°C.

При плазмовому азотуванні Avinit N інтенсифікується процес створення азотованого шару в 3–5 разів в порівнянні з обробкою традиційним способом іонного азотування в тліючому розряді. Підвищується твердість виробів за рахунок отримання рівномірно зміцненого азотованого шару без короблення деталей із збереженням вихідних геометричних розмірів.

### Преваги плазмового прецизійного азотування Avinit N

Основними перевагами плазмового прецизійного азотування Avinit N є суттєва інтенсифікація процесу азотування, отримання рівномірно зміцненого азотованого шару, відсутність крихкого шару без короблення izdeliy зі збереженням вихідних геометричних розмірів деталей. Зберігаються креслярські розміри і відсутній крихкий поверхневий шар, що дозволяє уникнути фінішного шліфування після азотування, получити операцію азотування «в розмір». При цьому інтенсифікується процес утворення азотованого шару в 3–5 разів в порівнянні з обробкою традиційним способом іонного азотування в тліючому розряді. Підвищується твердість і зносостійкість izdeliy за рахунок отримання рівномірно зміцненого шару.

В порівнянні з широко використовувемими способами азотування метод плазмового азотування має наступні основні переваги:

- відсутність деформації деталей (короблення) після обробки, стала якість обробки з мінімальним розкидом властивостей від деталі до деталі і від садки до садки;
- відсутність забруднення навколишнього середовища;
- процес є екологічно чистим, в ньому не використовуються водень, аміак, воденьмісткі сполуки;
- підвищення культури виробництва;
- зниження собівартості обробки.

Преваги плазмового азотування Avinit N проявляються і в суттєвому скороченні основних витрат виробництва. Так, наприклад, у порівнянні з газовим азотуванням у печах, плазмове азотування Avinit N забезпечує:

- скорочення тривалості обробки в 10–50 разів, як за рахунок зниження часу нагрівання і охолодження садки, так і за рахунок зменшення часу ізотермічної витримки;
- скорочення витрат робочих газів;
- скорочення витрат електроенергії;
- зниження деформації деталей, виключаючи фінішне шліфування;
- покращення санітарно-гігієнічних умов виробництва;
- повна відповідність технології усім сучасним вимогам по охороні навколишнього середовища і екологічній безпеці.

Процеси плазмового прецизійного азотування усувають недоліки традиційних промислових процесів азотування (традиційного іонного азотування, рідинного і газового азотування), скорочують суттєво їхню тривалість, забезпечують сталу якісну мікроструктуру поверхневих шарів деталей, усувають їхню крихкість, підвищують експлуатаційні властивості деталей, розширюють асортимент оброблюємих матеріалів.

Для деяких прецизійних складнопрофільних деталей, що не допускають після азотування короблення на рівні 1...2 мкм, і для яких обробка високоточним шліфуванням твердих азотованих поверхонь неможлива, плазменне азотування Avinit N «в розмір» є єдиним способом отримання готового виробу.

Плазмове прецизійне азотування Avinit N вже успішно використовується в серійному виробництві замість традиційного іонного азотування, рідинного і газового азотування.

### Література

- [1] Ю. М. Лахтин, Б. Н. Арзамасов. Химико-термическая обработка металлов. М: Металлургия, 1985. – 256 с.
- [2] Б. Н. Арзамасов, А. Г. Братухин, Ю. С. Елисеев, Т. А. Панайоти. Ионная химико-термическая обработка сплавов. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1999. – 400 с.
- [3] Р. Чаттерджи-Фишер, Ф. В. Эйзелл и др. Азотирование и карбонитрование. Пер. с нем. М: Металлургия, 1990. – 280 с.
- [4] Д. А. Прокошкин. Химико-термическая обработка металлов – карбонитрация. М.: Машиностроение, Металлургия, 1984. – 240 с.
- [5] Ю. М. Лахтин. Я. Д. Коган, Г.-И. Шпис, З. Бомер. Теория и технология азотирования. М.: Металлургия, 1991. – 320 с.
- [6] А.С. СССР 120524, С23С 11/16, опубл. 1977.

- [7] Сборник «Кратковременные процессы азотирования» НИИИНФОРМТЯЖМАШ 13, с.1720, 1976.
- [8] Патент РФ 2131480, С23С 14/06, 14/48, опубл. 1999.10.06.
- [9] Патент РФ 2210621, С23С 14/48, опубл. 2003.08.20.
- [10] Сагалович О. В. Спосіб іонно-плазмового прецизійного азотування поверхонь сталей та сплавів Avinit N / [О. В. Сагалович, В. В. Сагалович] // Pat. UA № 84664, 25.10.13.
- [11] Сагалович О. В. Спосіб іонно-плазмового прецизійного азотування поверхонь сталей та сплавів Avinit N / [О. В. Сагалович, В. В. Сагалович] // Pat. UA № 107408, 28.12.14.
- [12] Сагалович О. В. Спосіб іонно-плазмового прецизійного азотування поверхонь сталей та сплавів Avinit N / [О. В. Сагалович, В. В. Сагалович] // Pat. UA № 95405, 25.12.14.
- [13] Сагалович А. В. Спосіб плазменного прецизійного азотування поверхонь металлических изделий / [А. В. Сагалович, В. В. Сагалович] // Pat. RU № 255692, 17.06.15.
- [14] Сагалович О. В. Установка Avinit для нанесення багатоперіодних функціональних покриттів / [О. В. Сагалович, В. В. Сагалович, В. В. Попов та ін.] // Фізическая инженерия поверхности. – 2010. – т. 8. – С. 336–347.

*Sagalovych O. V., Popov V. V., Sagalovych V. V.*

Scientific technological Corporation “FED”, JSC. Ukraine, Kharkiv

#### PLASMA PRECISION NITRIDING AVINIT OF METALS AND ALLOYS

*The method Avinit N of strengthening and improving the wear resistance of products made of steels and alloys by means of plasma precision nitriding is developed.*

*The heating of parts to a temperature of 400...500°C, the subsequent isothermal exposure at this temperature and the direct diffusion saturation of the surface of parts at temperatures of 500...600°C in a nitrogen atmosphere are carried out in a high-density plasma argon and nitrogen formed by a gas plasma generator.*

*At the same time, the process of forming the nitrided layer is substantially intensified in 5–50 times compared with the treatment by traditional methods of nitriding. The hardness and wear resistance of parts is increased due to obtaining a uniformly reinforced layer without warping, while preserving the original geometric dimensions of the nitrided parts (precision nitriding “in size” with an accuracy of 1–2 microns). [dx.doi.org/10.29010/89.8]*

*Keywords:* vacuum plasma technologies, ion-plasma diffusion modification of the surface of metals, precision nitriding.

#### References

- [1] Ju. M. Lahtin, B. N. Arzamasov. Himiko-termicheskaja obrabotka metallov. M: Metallurgija, 1985. – 256 p.
- [2] B. N. Arzamasov, A. G. Bratuhin, Ju. S. Eliseev, T. A. Panajoti. Ionnaja himiko-termicheskaja obrabotka splavov. M.: Izdvo MGTU im. N. Je. Baumana, 1999. – 400 p.
- [3] R. Chatterdzhii-Fisher, F. V. Jejjell i dr. Azotirovanie i karbonitirovanie. Per. s nem. M: Metallurgija, 1990. – 280 p.
- [4] D. A. Prokoshkin. Himiko-termicheskaja obrabotka metallov – karbonitracija. M.: Mashinostroenie, Metallurgija, 1984. – 240 p.
- [5] Ju. M. Lahtin. Ja. D. Kogan, G.-I. Shpis, Z. Bomer. Teorija i tehnologija azotirovanija. M.: Metallurgija, 1991. – 320 p.
- [6] A.S. SSSR 120524, S23S 11/16, opubl. 1977.
- [7] Sbornik “Kratkovremennye processy azotirovanija” NIINFORMTJaZhMASH 13, p. 1720, 1976.
- [8] Patent RF 2131480, C23C 14/06, 14/48, opubl. 1999.10.06.
- [9] Patent RF 2210621, C23C 14/48, opubl. 2003.08.20.
- [10] Sagalovich O. V. Sposib ionno-plazmovogo precizijnogo azotuvannja poverhon' stalej ta splaviv Avinit N / [O. V. Sagalovich, V. V. Sagalovich] // Pat. UA № 84664, 25.10.13.
- [11] Sagalovich O. V. Sposib ionno-plazmovogo precizijnogo azotuvannja poverhon' stalej ta splaviv Avinit N / [O. V. Sagalovich, V. V. Sagalovich] // Pat. UA № 107408, 28.12.14.
- [12] Sagalovich O. V. Sposib ionno-plazmovogo precizijnogo azotuvannja poverhon' stalej ta splaviv Avinit N / [O. V. Sagalovich, V. V. Sagalovich] // Pat. UA № 95405, 25.12.14.
- [13] Sagalovich A. V. Sposob plazmennogo precizionnogo azotirovanija poverhnostej metallicheskikh izdelij / [A. V. Sagalovich, V. V. Sagalovich] // Pat. RU № 255692, 17.06.15.
- [14] Sagalovich O. V. Ustanovka Avinit dlja nanesennja bagatosharovih funkcional'nih pokrittiv / [O. V. Sagalovich, V. V. Sagalovich, V. V. Popov ta in.] // Fizicheskaja inzhenerija poverhnosti. – 2010. – т. 8. – Pp. 336–347.