

## ХОЛОДНЕ ПЛАСТИЧНЕ ДЕФОРМУВАННЯ ЯК ЗАСІБ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ БЕЗВОДНЕВОГО АЗОТУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

*Посвятенко Е.К., доктор технічних наук  
Алексеев В.В.*

*Показано, що холодне пластичне деформування маловуглецевих та низьколегованих сталей дозволяє у 1,5 – 2 рази підвищити ефективність безводневого азотування у тліючому розряді. Встановлено, що цей ефект пояснюється збільшенням густини дислокацій в металі після холодної пластичної деформації.  
It is shown that cold plastic deformation of low carbon and low alloy steels can improve the effectiveness of non-hydrogen nitridation in glow discharge by 1,5 - 2 times. It is confirmed that this effect is explained by an increased density of dislocations in a metal after cold plastic deformation.*

**Актуальність та стан проблеми.** Відомо, що при безводневному азотуванні у тліючому розряді (БАТР), на відміну від процесів класичного азотування, заміна водню як робочого середовища на аргонно-азотну суміш дозволяє позбутися так званого водневого окрихчення і, як наслідок, погіршення механічних властивостей серцевини деталей. Висока якість поверхневого шару та основи у процесах БАТР досягається за рахунок їх виконання при температурах, нижчих від температур високого відпускання, що виключає короблення деталей, а також за рахунок високої енергії потоку частинок, що конденсуються на поверхні. Завдяки цьому у мікрооб'ємах поверхневого шару створюються умови, які забезпечують утворення нітридів, а також зміцнення фериту або аустеніту сталі за рахунок розчинення азоту в останніх [1].

Для реалізації БАТР використовується метастабільна (додатна) ділянка вольт-амперної характеристики, так звана область сильнопоточного тліючого розряду [2]. Процеси, що протікають на поверхні катода при утворенні іонів газу можна поділити наступним чином: емісія електронів; виривання атомів з поверхні (випаровування); дифузія іонів у поверхневий шар деталі; віддача кінетичної енергії поверхні (нагрівання деталі). У декількох міліметрах від поверхні деталі іони, що прискорені в області падіння катодного потенціалу, з відносно великою кінетичною енергією потрапляють на поверхню деталі. При цьому до 90% енергії іонів перетворюється у теплову енергію. Таким чином плазма нагріває деталь до необхідної температури азотування. Значно менша частина кінетичної енергії іонів потрібна для виривання атомів з кристалічної решітки. Випаровуванню можуть піддаватися як металічні елементи так і неметалічні, зокрема вуглець, кисень, азот та ін.

Азот у плазмі знаходиться у атомарному стані і в цій формі він хімічно активний. Перед поверхнею катода відбувається утворення насичених азотом нітридів заліза. Молекули FeN конденсуються на поверхні деталі та дисоціюють і утворюють нітриди заліза більш низького порядку Fe<sub>2</sub>N, Fe<sub>3</sub>N, та Fe<sub>4</sub>N. Азот, що при цьому виділяється, дифундує у деталь або, випаровуючись, повертається у плазму.

Однак, на сьогоднішній день еволюція процесу БАТР значно уповільнилася. Очевидно, це тому, що вже майже вичерпані є можливості зміни складу газового середовища, тиску, температури, характеристик тліючого розряду, алгоритму підготовки до азотування та ведення власне процесу, а також конструктивних параметрів установки. Тим не менше, недоліком процесу БАТР залишається його тривалість.

**Мета, теоретичні передумови, методика і результати дослідження.** Виходячи із викладеного вище нами запропонована нова концепція прискорення БАТР за рахунок

попередньої підготовки деталей холодним пластичним деформуванням (ХПД). Відомо, що ХПД супроводжується підвищенням дефектності кристалічної будови металу [3]. Внаслідок деформації на 3–4 порядки підвищується густина дислокацій (з  $10^6$ – $10^9$  см<sup>-2</sup> перед деформацією до  $10^{11}$ – $10^{12}$  см<sup>-2</sup> після неї). При цьому для забезпечення неперервності деформації ґратки в різних зернах прагнуть змінити орієнтацію таким чином, щоб деформація полегшувалась. Для цього площини легкого ковзання в усіх зернах сприятливо переорієнтовуються відносно зовнішнього зусилля, тобто виникає текстура деформації. Отже, зміна комплексу фізико-механічних властивостей металу від дії ХПД і, у першу чергу, зростання на 3–5 порядків густини дислокацій, а також формування текстурованості, яка спричиняє анізотропію цих властивостей, має поліпшити дифузійні процеси при азотуванні. Таким чином, якщо це припущення вірне, то усі відомі процеси, в основі яких лежить ХПД: обкатування, розкатування, деформуєче протягування (дорнування), волочіння, прокатування, чеканка, обробка дробом і навіть, обробка різанням на певних режимах, повинні суттєво понизити тривалість БАТР.

Для експериментальної перевірки цієї гіпотези нами було проведено наступне дослідження. Зразки низьковуглецевої (C=0,2%) доевтектоїдної сталі звичайної якості із сортового прокату (штаби) були піддані повному відпалу при нагріванні до температури 950°C, витримці 30хв і охолодженні разом із піччю. Це забезпечило однорідність структури, усунення залишкових напружень, отримання мінімально можливих для даної сталі показників пластичності і найменших значень твердості та міцності, а також густини дислокацій  $10^6$ – $10^7$  см<sup>-2</sup>. Після очистки від окалини експериментальні зразки було піддано ХПД за схемою лінійного індентування тобто заглиблення штампу трикутного профілю з кутом при вершині  $2\beta=57^\circ$  у пластичний напівпростір. Радіусом округлення гострозаточеного індентора ( $\rho=0,005$ – $0,010$  мм) із інструментальної сталі (HRC 64) при цьому знехтували, оскільки вказані значення округлення були на три порядки меншими величини заглиблення індентора ( $h=2$ – $3$  мм). ХПД виконувалось на модернізованому гідравлічному пресі зусиллям 200 кН (рис. 1).



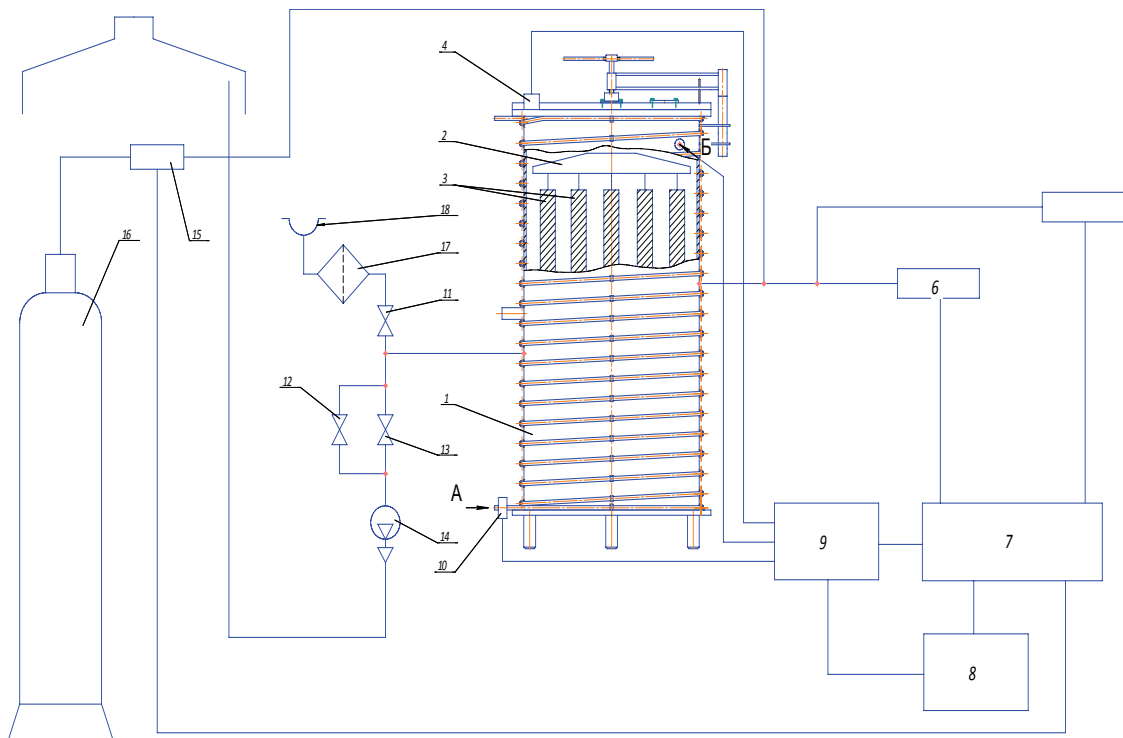
Рис 1. Гідравлічний прес зусиллям 200 кН для проведення лінійного індентування

В результаті індентування у зразку утворилась канавка трикутного профілю, навколо якої метал отримав деформаційне зміцнення різної інтенсивності. При цьому у

зоні контакту індентора зі зразком в результаті дії дотичної сили сформувався тонкий текстурований шар найбільш деформованого металу.

Наступна частина досліджень була виконана за допомогою удосконаленої установки для іонно-імпульсного азотування Інституту проблем міцності ім. Г.С.Писаренка НАН України (рис.2).

Режими БАТР були наступними: температура 530 – 550°C; тиск 87Па; напруга 400В; сила струму 12А; середовище – суміш азоту (N<sub>2</sub>-80%) і аргону (Ar-20%). Для забезпечення робочої температури, меншої температури високого відпускання, була розроблена схема живлення, яка працює в імпульсному режимі з частотою 100Гц. Для запобігання перетворення метастабільного тліючого розряду у небажаний стабільний дуговий розряд в установці для БАТР було запропоновано використовувати швидкодійне реле, завдяки чому запобігається пошкодження поверхні деталі, що зміцнюється [1].



*Рис.2 Кінематична схема установки для БАТР*

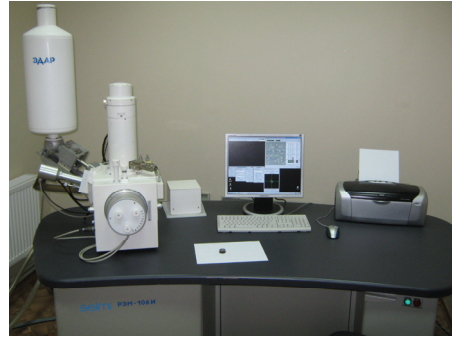
*1 – вакуумна місткість; 2 – підвіска; 3 – оброблювані деталі; 4 – контроль закриття кришки; 5 – вимірювання тиску; 6 – вимірювання температури; 7 – блок контролю та керування;*

*8 – датчик температури; 9 – блок живлення; 10 – контроль води; 11 – клапан напуску атмосферного повітря; 12 – клапан попереднього відкачування; 13 – клапан вакуумного відкачування; 14 – форвакуумний насос; 15 – клапан напуску азоту; 16 – балон з газом; 17 – повітряний фільтр; 18 – повітрязабірник*

Після процесу БАТР зразки досліджувались методами мікроскопічного аналізу, мікротвердості та електронної мікроскопії. Для мікроскопічного аналізу оптичний мікроскоп МИМ-7 було оснащено WEB-камерою EWEL (2.1MPixels) та ПЕОМ, а електронний РЕМ-106И-ПЕОМ (рис.3).



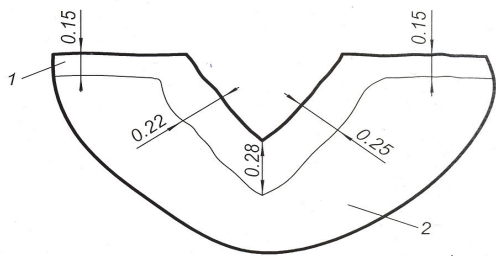
a)



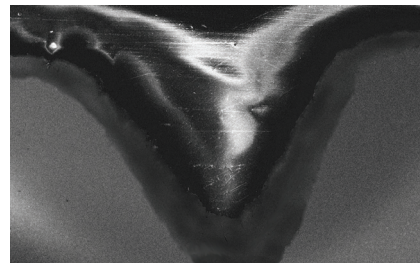
б)

Рис.3 Модулі з досліджень азотованого шару: а – на базі оптичного мікроскопу; б – на базі електронного мікроскопу

Результати мікроаналізу одного з зразків показані на рис.4, з якого випливає наступне. Поверхневий азотований шар має нерівномірну товщину по профілю канавки і прилеглих зон металу.



a)



б)

Рис.4 Профіль (а) та мікрофотографія (б) канавки після ХПД з наступним БАТР: 1 - азотований шар; 2 - основа

В області канавки товщина цього шару перевищує на 50–70% товщину азотованого шару поверхонь, віддалених від канавки на 0,4–2,4мм. В основі канавки це перевищення сягає 90%.. При цьому профіль азотованого шару в області канавки добре корелює з картиною деформаційного зміцнення, отриманою за допомогою методу мікротвердості.

**Висновки та перспективи:** В результаті проведеного дослідження встановлене наступне:

- При виготовленні, відновленні та підвищенні зносостійкості відповідальних деталей машин безводне іонно-імпульсне азотування у пульсуючій плазмі тліючого розряду є одним з найбільш ефективних методів.
- Холодне деформаційне зміцнення, що передує БАТР, дозволяє інтенсифікувати процес азотування у часі виконання операції в 1,5 – 2 рази.
- Найбільш поширеними деталями машин, при виготовленні та відновленні яких слід модифікувати саме поверхневий шар, є колінчасті та розподільчі вали, клапани, гільзи циліндрів, шестерні та інші деталі засобів транспорту.

## ЛІТЕРАТУРА

1. *Посвятенко Е.К.* Відновлення колінчастих валів двигунів внутрішнього згорання іонно-імпульсним азотуванням / Е.К.Посвятенко, В.В.Алексеев, А.В.Рутковський // Вісн. Сумськ. держ. ун-ту: Серія технічні науки (машинобудування).– Суми, 2005.– №11.– с.119-122
2. Азотирование и карбонитрирование / Р.Чаттерджи-Фишер, Ф.-В.Эйзел, Р.Хоффман и др. Пер. с нем.; Под ред. А.В.Супова.–М.Металлургия, 1990.–280с.
3. *Дяченко С.С.* Фізичні основи міцності та пластичності металів: Навч. посібник / С.С.Дяченко.– Харків: Видавництво ХНАДУ, 2003.–226с.