

УДК 621.793

## Плазмове азотування внутрішніх циліндричних поверхонь

І.В. Смирнов<sup>1</sup>, І.А. Селіверстов<sup>2</sup>, А.В. Чорний<sup>1</sup>

1 – КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

2 – Херсонський національний технічний університет, Херсон, Україна

***Анотація.** Робота була зосереджена на розробці процесів активного плазмового азотування внутрішньої поверхні в режимі аномального тліючого розряду з використанням порожнистого катода і перфорованого трубчастого анода для широко використовуваної сталі 40ХН2МА. Досліджено структуру та склад азотованих поверхонь та мікротвердість внутрішніх поверхонь.*

*В результаті дослідження встановлено зв'язок між параметрами плазмової обробки, геометричними особливостями та мікротвердістю. Застосуванням порожнистого катода були отримані дифузійні покриття з нерівномірною концентрацією азоту і утворенням дискретних структур.*

*Структура азотованої поверхні шарувата і складається з трьох зон: нітридної, перехідної та дифузійної. Азотовані шари мають підвищену твердість, за результатами вимірювання мікротвердості методом HRV. Методом склерометрії виявлені зони з більш високим значенням твердості, які розташовані вздовж внутрішньої циліндричної поверхні.*

***Ключові слова:** іонно-плазмове азотування; дискретні покриття; технологічні режими; мікротвердість; внутрішні циліндричні поверхні.*

Іонно-плазмове азотування дозволяє розв'язати проблему зміцнення внутрішніх поверхонь отворів довгомірних виробів, довжина яких в десятки разів перевищує діаметр, що є досить складним завданням практично для всіх методів інженерії поверхні. Технологіям азотування присвячено багато робіт як вітчизняних, так і закордонних вчених [1]–[2].

Тим не менш, плазмове азотування внутрішніх поверхонь обумовлено, серед іншого, геометричними особливостями порожнистого катода, які можуть призвести до крайньої відсутності плазми або виникнення плазми високої густини. Внаслідок чого, можуть утворюватися зони з нерівномірною концентрацією азоту і утворенням дискретних структур.

Мета роботи полягала в підвищенні механічних властивостей внутрішньої поверхні отворів циліндричних сталевих виробів імпульсним іонно-плазмовим азотуванням.

Визначити характер розподілу, концентрацію азоту та мікротвердість поверхневого шару в повздовжньому та поперековому перерізу, як доказової бази формування дискретного покриття.

Для досягнення поставленої мети було розроблено технологічні режими імпульсного іонно-плазмового азотування внутрішніх поверхонь на базі експериментальної вакуумної установки, оснащеної джерелом постійної регульованої напруги, високочастотним генератором та імпульсним модулятором. Завдяки своїм характеристикам ці прилади автоматично обмежують струм навантаження заданої величини та переривають процес дугоутворення, який супроводжується вибухоподібним локальним руйнуванням катодної поверхні зразка, що не припустимо.

Досліди проводили на трубчастих зразках зі сталі 40ХН2МА з зовнішнім діаметром 30 мм, внутрішнім – 12 мм та довжиною 240 мм. Хімічний склад сталі, мас. %: 0,41 С; 0,31 Si; 0,57 Mn; 0,003 S; 0,017 P; 0,8 Cr; 1,37 Ni; 0,07 W; 0,01 V; 0,21 Mo; 0,18 Cu; 0,001 Ti; 0,016 Al.

За результатами скануючої мікроскопії та хімічного аналізу встановлено, що в результаті іонно-плазмового азотування внутрішніх поверхонь із застосуванням пустотілого перфорованого анода формуються дифузійні покриття з різним хімічним та фазовим складом. Максимальна концентрація азоту на рівні 8,97 мас. % (26,38 ат. %) спостерігається на ділянках,

що знаходились напроти отворів в трубчастому аноді, які роблять на певній відстані під певним кутом. А насичена поверхня складається з трьох шарів:

1. Поверхневий шар де утворилась  $\epsilon$ -фаза, дуже тонка і крихка структура товщиною 8 мкм. Після азотування на поверхні першої зони вміст азоту сягає 8,97 мас. % (26,38 ат. %). Згідно з діаграмою стану залізо – азот при концентрації азоту близько 20 ат. % будуть утворюватися нітриди заліза переважно  $\text{Fe}_2\text{N}$ , що обумовлює наявність максимальної мікротвердості біля поверхні на рівні 805 МПа.

2. Приповерхневий шар товщиною 15 мкм, де утворилась  $\gamma'$ -фаза азотистого аустеніту. Переважно складається з нітридів  $\text{Fe}_4\text{N}$ , в другій зоні хімічний склад азотованої поверхні відрізняється як від початкового, так і азотованого шару: вміст азоту сягає 6,25 мас. % (20,8 ат. %).

3. Дифузійний підшар зі структурою зернистого перліту, складається з  $\alpha$ - та  $\gamma'$ -фази з утворенням карбідів на нітридів легуючих елементів в сталі, переважно Cr, Ni, Mo, які додатково сприяють збільшенню розчинності азоту в  $\alpha$ -фазі. В ньому сформувався азотований шар, що зазнав зміни хімічного складу: кількість азоту зменшилась до 3,5 мас. % (12,6 ат. %) на відстані 25 мкм, остання зона на межі з основою має вміст азоту 1,57 мас. % (5,96 ат. %) на відстані 46,25 мкм. На відстані близько 100 мкм кількість азоту становить 0,57 мас. % (2,22 ат. %).

За результатами вимірювання мікротвердості методом склерометрії та індентування спостерігалася однакова залежність зменшення твердості від поверхні до серцевини. За допомогою склерометричних треків вздовж заготовки можна виявити місця зміни мікротвердості, де максимальна мікротвердість визначається напроти отвору в аноді, далі від отвору визначено незначне зниження мікротвердості. Також виявлено аномальні зони високої мікротвердості на глибину до 100 мкм з високим вмістом азоту.

## Список літератури

1. Каплун В.Г., Каплун П.В. (2015) *Ионное азотирование в безводородных средах*. Хмельницький, ХНУ.
2. Hossein Aghajani, Sahand Behrangi (2016) *Plasma Nitriding of Steels*. Springer International Pub.

## Plasma nitriding of internal cylindrical surfaces

I. Smirnov<sup>1</sup>, I. Sieliverstov<sup>2</sup>, A. Chorny<sup>1</sup>

1 – Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine

2 – Kherson National Technical University, Kherson, Ukraine

**Abstract.** The work was focused on the development of processes for active plasma nitriding of the inner surface in the anomalous glow discharge mode using a hollow cathode and perforated tubular anode for the widely used 40CrNi2Mo high quality steel. The structure and composition of the nitrided surfaces and the microhardness of the internal surfaces were investigated.

The study established the relationship between plasma treatment parameters, geometric features and microhardness. Using a hollow cathode, diffusion coatings with uneven nitrogen concentrations and the formation of discrete structures were obtained.

The structure of the nitrided surface is layered and consists of three zones: nitride, transition and diffusion. The nitrided layers have an increased hardness, according to the results of microhardness measurements using the HRV method. The scratch test revealed zones with higher hardness values located along the inner cylindrical surface.

**Keywords:** ion-plasma nitriding, discrete coatings, technological modes, microhardness, internal cylindrical surfaces