

**ПОПЕРЕДНІ ПЕРЕДУМОВИ ДЛЯ ЗАСТОСУВАННЯ АЗОТУВАННЯ В  
ТЛЮЧОМУ РОЗРЯДІ З НЕЗАЛЕЖНИМИ ПАРАМЕТРАМИ**

*Обґрунтована можливість та доцільність застосування азотування з використанням тліючого розряду при незалежних (автономних) параметрах технологічного режиму.*

*Ключові слова: азотування, тліючий розряд, незалежні параметри технологічного режиму.*

I. M. PASTUKH, G. M. SOKOLOVA, V. S. KURSKOY  
Khmelnitsky National University

**THE PREDICTED PRECONDITIONS FOR APPLYING NITRATION WITH GLOW DISCHARGE AND  
INDEPENDENT PARAMETERS FOR MODIFYING METAL SURFACES**

*Abstract – Detailed below are the basic arguments and conducted analysis of the factors influencing the parameters for nitration with glow discharge. Proposed below is the differential approach to combining the abovementioned parameters with the goal of attaining new capabilities for finishing the metal surfaces.*

*Keywords: nitration, glow discharge, abovementioned parameters.*

**Вступ**

Результативність модифікаційних процесів поверхні металів в першу чергу залежить від вибору оптимальних параметрів технологічного режиму, при яких забезпечуються ті характеристики азотованих деталей, котрі найкраще відповідають умовам експлуатації. Якраз саме ці критерії є поряд з економічними вимогами вирішальними при виборі не тільки технології обробки, але і конкретних умов проведення процесу. Очевидно, що в основу аналізу результативності та ефективності технології повинна бути покладена саме відповідність наслідків модифікації в порівнянні їх з найбільш оптимальними з точки зору забезпечення максимальної працездатності деталей машин, оброблювального інструменту, оснащення тощо. Ця теза також є вирішальною для формування моделі будь-якого процесу, причому на наш погляд найбільш важлива роль повинна бути відведена питанням енергетичної взаємодії складових модифікаційного процесу, оскільки будь-який з них найбільш оптимально проходить в певних енергетичних рамках. Розроблена саме з подібних позицій енергетична модель безводневого азотування в тліючому розряді передбачала введення низки аналітичних показників, котрі по можливості об'єктивно характеризували б головні субпроцеси: утворення нітрідів, розпорошення поверхні, дифузію азоту в глибину поверхневого шару [1].

Оцінка ефективності кожного з названих субпроцесів проводиться на основі розрахунку з використанням відповідного програмного забезпечення певних критеріальних характеристик – відносних енергетичних факторів (ВЕФ) того чи іншого субпроцесу. До них відносяться:

ВЕФ розпорошувальної дії потоку іонів

$$F_{sp+} = \sum_{i=0}^{z_c-1} \int_0^{b_n(e_i)} \frac{j_{ev}(e_i)}{b_n(e_i)} e_i K_{p\phi}(b) db,$$

ВЕФ розпорошувальної дії нейтрального потоку

$$F_{spn} = \sum_{i=0}^{z_c-1} \int_0^{p/2} j_{evn}(e_i) \cos b e_i K_{p\phi}(b) db,$$

загальний ВЕФ розпорошувальної дії  $F_{sp} = F_{sp+} + F_{spn}$ ,

ВЕФ дифузійної дії потоку іонів

$$F_{sd+} = \sum_{i=0}^{z_c-1} \int_0^{b_n(e_i)} \frac{j_{ev}(e_i)}{b_n(e_i)} e_i K_{d\phi}(b) db,$$

ВЕФ дифузійної дії потоку нейтралів

$$F_{sdn} = \sum_{i=0}^{z_c-1} \int_0^{p/2} j_{evn}(e_i) \cos b e_i K_{d\phi}(b) db,$$

загальний ВЕФ дифузійної дії

$$F_{sd} = F_{sd+} + F_{sdn},$$

ВЕФ утворення нітрідів  $k$ -го компонента поверхні, включаючи молекулярну та атомарну складові

$$F_{Nik} = 2j_{evMk}(e_i) \int_{q_{min\,Mki}}^{q_{max\,ki}} \cos q \, dq + j_{evAk}(e_i) \int_{q_{min\,Aki}}^{q_{max\,ki}} \cos q \, dq,$$

загальний ВЕФ утворення нітридів всіх компонентів поверхні

$$F_N = \sum_{i=0}^{z_c-1} \sum_{k=1}^c F_{Nik}.$$

У вищенаведених формулах прийняті позначення:

$j_{evMk}(e_i)$ ,  $j_{evAk}(e_i)$  – відносні енергетичні спектри падаючого на поверхню потоку молекулярних та атомарних іонів,

$\Theta_{max}$ ,  $\Theta_{min}$  – максимальні та мінімальні кути, які розраховуються по верхньому та нижньому порогах енергії, в межах котрих можливе утворення нітридів,

$z_c$  – число шарів, на яке розбивається область катодного падіння,

$K_{pe}$ ,  $K_{oe}$  – коефіцієнти, які характеризують геометрію зіткнення часток з поверхнею,

$\beta_n$  – кут, який характеризує геометрію бомбардування поверхні нейтральними частками.

### Дослідження впливу параметрів технології на характеристики субпроцесів

Зазначені вище показники характеризують складові процесу азотування якісно, тобто дозволяють проаналізувати можливий вплив параметрів технології, але без додаткових досліджень унеможливають прогнозування конкретних значень результатів. Наведені показники умовно можна розділити на дві групи: показники впливу падаючого потоку на поверхню - фактори утворення нітридів в приповерхневому шарові та показники, які визначаються саме параметрами газового середовища. Фактори першої групи окрім параметрів технологічного режиму (склад газового середовища, напруга між електродами  $U$ , густина струму  $j$ , температура поверхні  $T$ , тиск в розрядній камері  $p$ ) залежать також від матеріалу, з якого виготовлені об'єкти обробки, насамперед – від їх хімічного складу. Головний принцип формування цих факторів зводиться до вичленення з енергетичного спектру падаючого на поверхню потоку тільки тих часток, енергія котрих з врахуванням умов її передачі часткам поверхні (кутових параметрів геометрії сутички, про які зазначалось вище) знаходиться в межах, які забезпечують реакцію утворення нітридів певного сорту. Розрахунок системи показників проводиться з використанням спеціально розробленого програмного забезпечення, при цьому до першої групи факторів віднесені:  $F_N$  – загальний ВЕФ утворення нітридів з молекулярними та атомарними складовими; до другої:  $F_{spu}$  – ВЕФ розпорозувальної дії потоку іонів,  $F_{sdu}$  – те ж, дифузійної дії,  $F_{spn}$  – ВЕФ розпорозувальної дії потоку нейтралів,  $F_{sdn}$  – те ж, дифузійної дії та інші (всього 14 характеристик).

Далі наведено результати аналізу впливу параметрів технологічного режиму на характер зміни приведених вище показників.

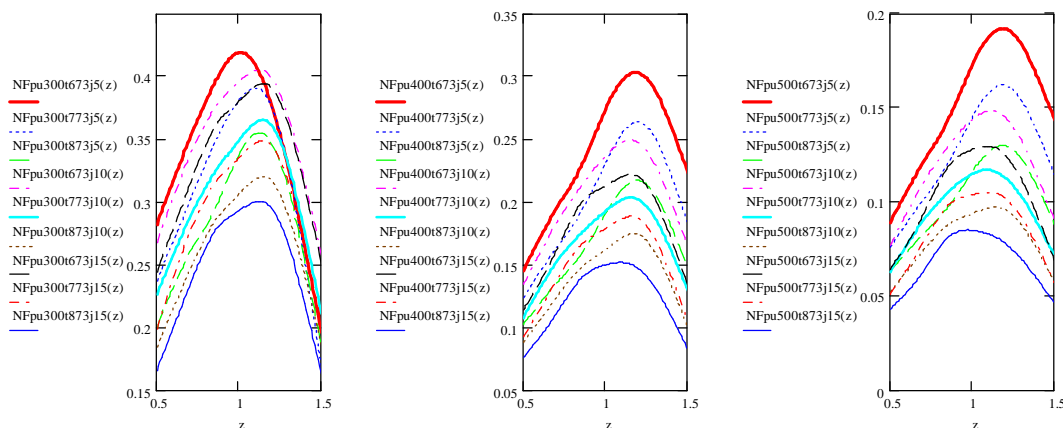
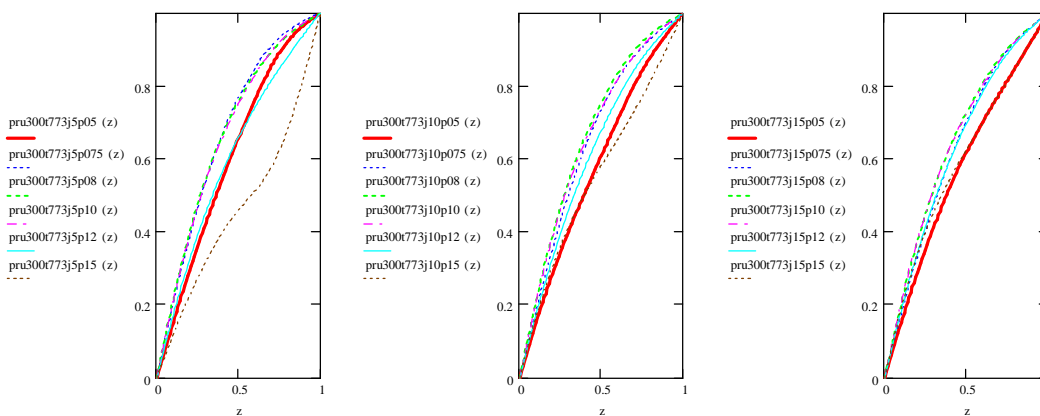


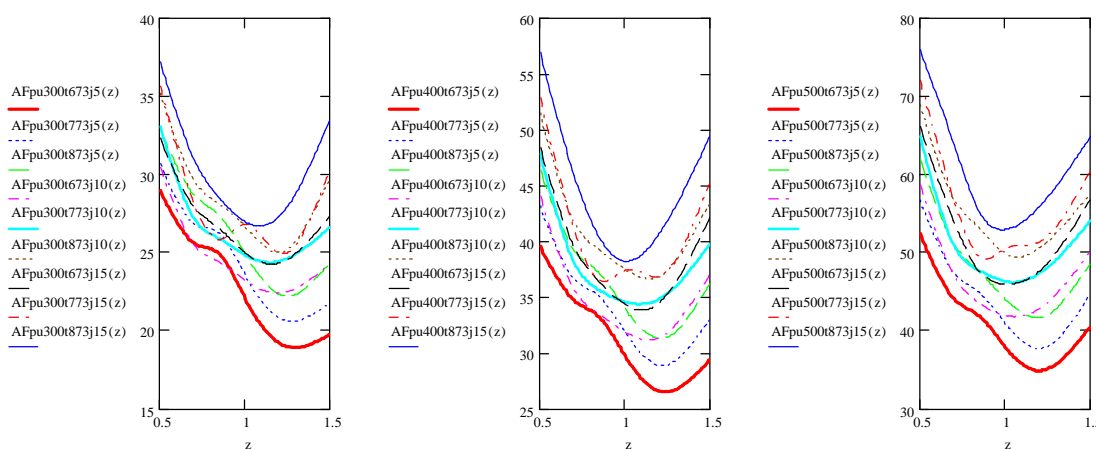
Рис. 1. Зміна ВЕФ утворення нітридів при азотуванні сталі 38Х2МЮА в газовому середовищі N75Ar25 залежно від тиску та інших параметрів технологічного режиму

З рис. 1 слідує, що тиск впливає на утворення нітридів екстремально, причому значення тиску екстремуму зміщується в залежності від інших характеристик технології. Позначення на вертикальній шкалі розшифровуються по типу u300t873 – напруга на електродах камери 300 В, температура поверхні 873°К. Збільшення напруги знижує інтенсивність утворення нітридів, оскільки при цьому зростає енергія часток падаючого потоку, що інтенсифікує розпорознення поверхневого шару та дифузію. Ріст температури призводить при однаковому тиску до зменшення азоту в одиниці об'єму газового середовища, що також знижує швидкість утворення нітридів.



**Рис. 2.** Зміна ВЕФ утворення нітрідів в залежності від вмісту азоту (одиниця відповідає суміші N100) та інших параметрів технологічного режиму

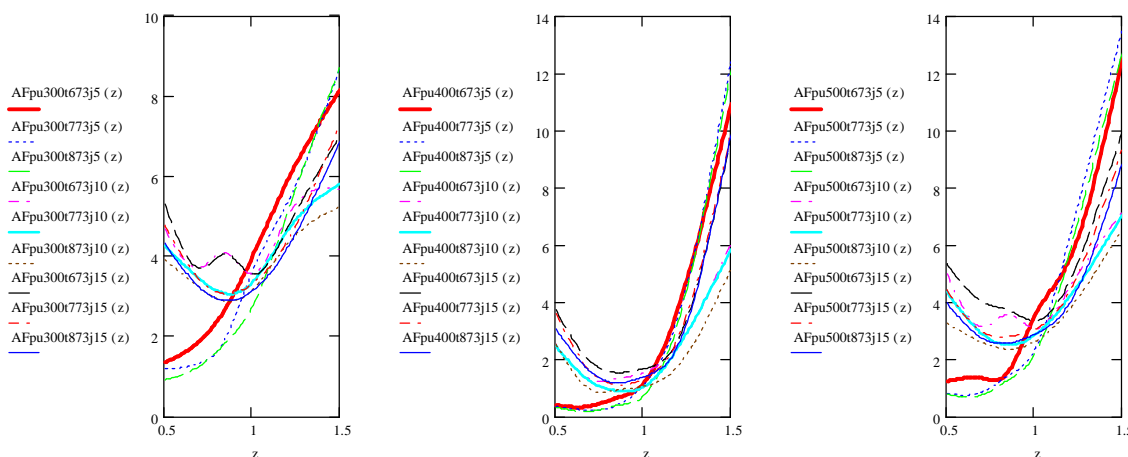
Вплив вмісту азоту в газовому середовищі (рис. 2) дозволяє вибрати оптимальний склад суміші по об'єму.



**Рис. 3.** Зміна добутку енергії іонів на їх відносний розподіл по енергетичних рівнях залежно від тиску та інших параметрів технологічного режиму

Більш складно впливають параметри технологічного режиму на добуток енергії іонів на їх розподіл за енергією (рис. 3). Характер впливу екстремальний, проте межі коливань більш значні, порівняно з іншими факторами. Ще більш складніший вплив параметрів технологічного режиму на добуток енергії нейтральних компонентів падаючого потоку та їх розподіл по енергетичних рівнях (рис. 4).

Збільшення напруги (рис. 5) однозначно підвищує енергетичну дію заряджених компонентів середовища на поверхню, для нейтралів чітко спостерігається екстремальний характер зміни, проте, оскільки вплив останніх менший, то сумарний фактор дифузійної дії практично не відхиляється від лінійної залежності. Вплив густини струму суттєво відрізняється від аналогічних характеристик для напруги, чим і пояснюється наявність на рис. 4 та 5 мінімумів, котрі в якійсь мірі є відображенням питомої потужності розряду.



**Рис. 4.** Зміна добутку енергії нейтральних компонентів падаючого потоку на їх відносний розподіл по енергетичних рівнях залежно від тиску та інших параметрів технологічного режиму

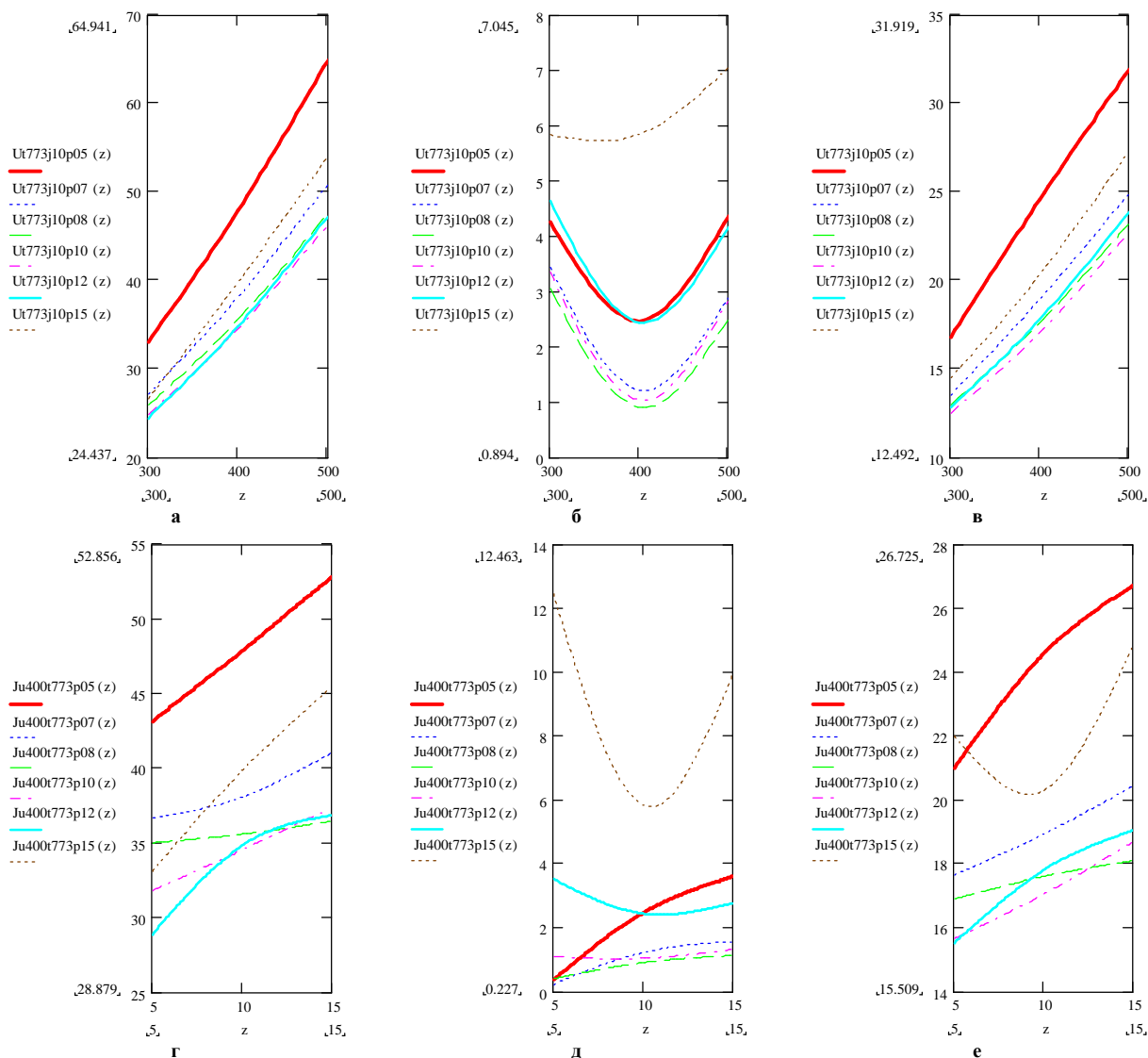


Рис. 5. Вплив напруги (а, б, в), густини струму (г, д, е) та інших параметрів технологічного режиму на добутки енергії на розподілі іонів (а, г), нейтралів (б, д) по енергетичних рівнях і сумарний ВЕФ дифузійної дії у повному спектрі кутів входу (в, е) для газового середовища N75Ar25

Аналіз впливу параметрів технологічного процесу на фактори окремих субпроцесів свідчить про можливість керування результатами модифікації в широких межах. Проте при цьому не враховується той суттєвий момент, що в реальному процесі практично всі характеристики взаємозалежні та взаємопов'язані. Причиною цього є те, що для підтримання певного технологічного режиму, наприклад температурного режиму, в кожній конкретній ситуації рівновага настає при певному співвідношенні напруги, струму (питомого струму), тиску та складу газового середовища. При цьому визначальним фактором є температура процесу. Очевидно, що при забезпеченні незалежності параметрів технології відкриваються широкі додаткові можливості як для інтенсифікації процесу, так і для якісного керування наслідками модифікації. В цьому випадку, наприклад, незалежно від умови підтримання температури можливе пригнічення або, навпаки, інтенсифікація тих чи інших субпроцесів, а через них – створення різних структур модифікованого шару.

#### Висновок

Розробка технології безводневого азотування в тліючому розряді з незалежними (автономними) параметрами технологічного режиму відкриває нові можливості для удосконалення процесу.

#### Література

1. Пастух И. М. Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде / И. М. Пастух. – Харьков : Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», 2006. – 364 с.

#### References

1. Pastukh I. M. Theoriya i praktyka bezvodородного азотирования в тлеющем разряде – Kharkov, National Science Center "Kharkov Institute of Physics and Technology". 2006 – 364 p.