

УДК 621.78/(66.088+537.52+66.046)

І.М. ПАСТУХ, М.В. ЛУК'ЯНЮК, В.О. КУРСКАЯ

Хмельницький національний університет

ЗМІНА НАПРУГИ ПРИ ВМИКАННІ СТРУМУ В УСТАНОВЦІ ДЛЯ АЗОТУВАННЯ В ТЛІЮЧОМУ РОЗРЯДІ З НЕСТАЦІОНАРНИМ ЖИВЛЕННЯМ

Виконано аналіз зміни напруги в установці для азотування в тліючому розряді зі змінним живленням.

The analysis of change of voltage is executed in a nitridings plant in a gas discharge with a variable feed.

Ключові слова: азотування, тліючий розряд, нестационарне живлення, вмикання, напруга.

Перехідні процеси, які супроводжують вмикання струму в установках азотування в тліючому розряді з нестационарним живленням, як зазначалось в [1–3], суттєво впливають на перебіг всіх субпроцесів формування модифікованого поверхневого шару. В принципі найбільш суттєвими серед них є ті, що характеризують утворення нітридів (в загальному підході – дифундидів, якщо мова йде взагалі про модифікаційні процеси з використанням вакуумно-дифузійних газорозрядних технологій, до яких в першу чергу і відноситься азотування в тліючому розряді), розпорошення поверхневого шару і дифузія нітридів (дифундидів) в глибину приповерхневого шару. Очевидно, що на перебіг цих субпроцесів впливають як ті параметри технологічного процесу, котрі залежать від початкового складу поверхневого шару модифікованого об'єкту та від складу газового середовища, температури поверхні, так і параметри, що характеризують енергетичну сторону процесу. До них в першу чергу відносяться напруга між електродами камери та густина струму. Як було показано в [2, 3], густина струму відображає інтенсивність основоположних субпроцесів – іонізації, дисоціації, рекомбінації, що є першоосновою для утворення атомарного азоту (дифузанту), а, відтак – формування молекул нітридів (дифундидів), одночасно для інтенсифікації дифузії атомарного азоту в глибину поверхні. Другий енергетичний параметр – напруга між електродами камери формує насамперед енергетичну сторону модифікації. Причому суть справи цього аспекту не стільки у величині енергетичного рівня контрчасток сутічок як в газовому середовищі, та і в поверхневому шарі, скільки у співвідношенні цього енергетичного рівня з енергетичними межами конкретних субпроцесів. Обґрунтування цієї тези знаходимо, в першу чергу, в тому, що згідно з одним з фундаментальних положень фізичної хімії [4], в першу чергу, реалізуються ті субпроцеси, які в даній конкретній ситуації енергетично найбільш вигідні. Це положення також підтверджене в енергетичній моделі технологічного процесу азотування в тліючому розряді [5]. В практичному аспекті енергетична основа технологічного режиму, наприклад, може проявлятися в тому, що при малих енергетичних параметрах ініціаторів субпроцесів може стимулюватися утворення нітридів, при більших – прискорюватись за рахунок ударної дії падаючого потоку дифузії азоту (дифузанту) в глибину поверхні, ще при більшій енергії на передній план виступають фактори розпорошення часток поверхні, що може навіть призвести до повного руйнування попередньо утворених поверхневих структур.

В [5, 6] запропонована система аналітичних критеріїв, які на основі практичної апробації якісно в повній мірі адекватно відображають реальні процеси модифікації металеві поверхні азотуванням в тліючому розряді. До цих критеріїв належать в першу чергу відносні енергетичні фактори відповідних субпроцесів, а також сумарні добутки величин енергій на кількісний розподіл часток різних типів - заряджених та нейтральних – за цими енергетичними рівнями.

На рис. 1 [7] показано вплив напруги, густини струму на деякі фактори, котрі характеризують процеси модифікації поверхні (з метою обмеження об'єму роботи наведені тільки залежності для приблизно середніх значень реальних параметрів технологічного режиму). Збільшення напруги 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 ефект оптимальної питомої потужності, встановлений Б. М. Арзамасовим, оскільки характеристики, в основі яких лежить густина струму, мають чітко виражені екстремуми. Ще одна обставина в певній мірі свідчить про роль енергетики сутічок в газовому середовищі у керуванні процесом модифікації. Співвідношення між сумарними факторами розпорошувальної та дифузійної дій суттєво більше в сумішах, де переважає аргон. З практики відомо, що при азотування азотоактивних матеріалів типу титанових сплавів, сталей з підвищеним вмістом хрому доцільно використовувати саме такі газові середовища. В цьому випадку підвищена активність поверхні до утворення нітридів, пов'язана з відносно низьким рівнем енергії утворення нітридів титану та хрому, призводить до швидкого росту тонкого, але щільного, шару нітридів, який практично унеможливує подальшу дифузію азоту в глибину поверхні. Загальна товщина модифікованого шару при цьому незначна. Азотування в середовищах, де переважає аргон, підвищує ефект розпорошення поверхні, співвідношення між інтенсивністю утворення шарів нітридів та твердого розчину стає більш прийнятним для необхідних результатів азотування.

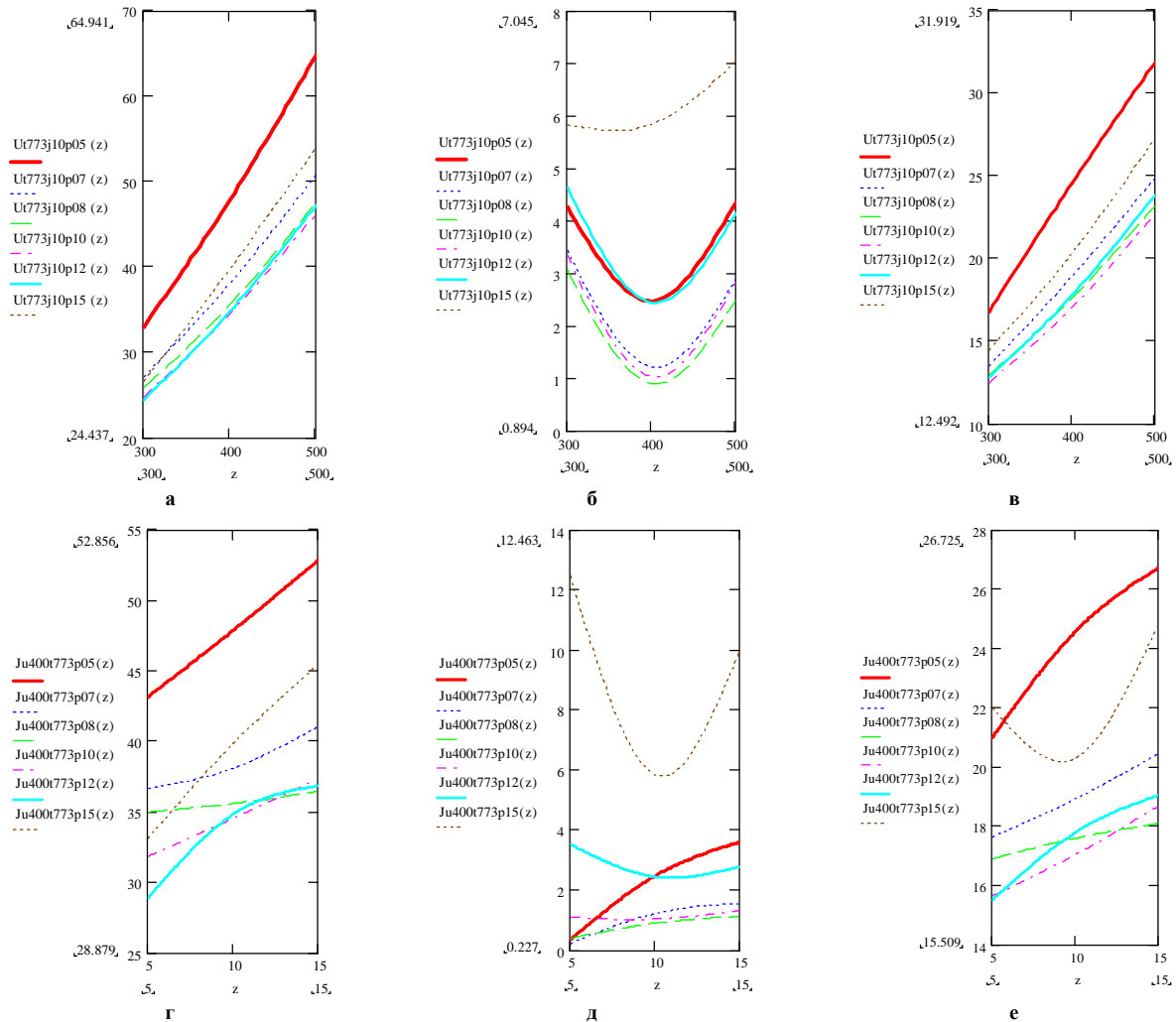


Рис. 1. Вплив напруги (а, б, в), густини струму (г, д, е) та інших параметрів технологічного режиму на добутки енергії на розподілі іонів (а, г), нейтралів (б, д) по енергетичних рівнях і сумарний ВЕФ дифузійної дії у повному спектрі кутів входу (в, е) для газового середовища N75Ar25 (азот -75%, аргон – 25% по об'єму)

Таким чином, наведена аргументація свідчить про важливість ролі напруги, особливо принципове значення має характер зміни напруги в процесах з нестационарним живленням. У продовження проведеного в [3] аналізу зміни струму при його подачі на електроди розрядної камери перейдемо до питання щодо характеру зміни при цьому напруги. Для спрощення використання матеріалу розрахункова схема буде повторена [3] на рис. 2. На рис. 2 прийняті умовні позначення: E – електрорушійна сила (ерс) джерела живлення, R_ϕ , C_ϕ – відповідно опір та ємність фільтра згладжування, R_σ – баластний опір, L – еквівалентна індуктивність камери, U_2 – ерс фіктивного джерела, чисельно рівна напрузі горіння на електродах камери в усталеному режимі. Позитивний напрямок напруги u та струму i камери відповідають загальноприйнятій в технологічній практиці.

З врахуванням прийнятих на рис. 2 додатних напрямків закон зміни напруги в момент вмикання струму виглядатиме

$$u(t) = -L \frac{di}{dt} - U_2.$$

Похідна струму

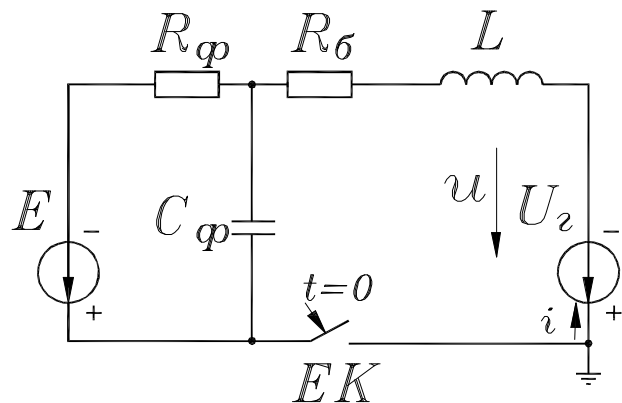


Рис. 2. Еквівалентна схема установки в режимі замкнення ключа

$$\frac{di}{dt} = \frac{\Delta E}{R_1 + R_2} \left[\begin{array}{l} d e^{-dt} \left(ch \, adt + \frac{d - w^2 R_1 C}{ad} sh \, adt \right) - \\ - ad e^{-dt} \left(sh \, adt + (d - w^2 R_1 C) ch \, adt \right) \end{array} \right], \quad (1)$$

де для зручності та спрощення форми подальших викладок позначено $R_\phi = R_1$, $R_\sigma = R_2$, $C_\phi = C$,

$$\Delta E = E - U_\sigma,$$

$$2d = \frac{1}{R_1 C} + \frac{R_2}{L},$$

$$w^2 = \frac{R_1 + R_2}{R_1 LC},$$

$$a = \sqrt{1 - w^2/d^2}.$$

З врахуванням введених позначень формула (1) остаточно матиме вигляд

$$\frac{di}{dt} = \frac{\Delta E}{R_1 + R_2} w^2 R_1 C e^{-dt} \left(ch \, adt - \frac{1 - \frac{1}{R_1 C d}}{a} sh \, adt \right).$$

Враховуючи, що $w^2 R_1 LC = R_1 + R_2$, отримаємо вираз

$$L \frac{di}{dt} = \Delta E e^{-dt} \left(ch \, adt - \left(1 - \frac{1}{R_1 C d} \right) \frac{1}{a} sh \, adt \right). \quad (2)$$

Більш детально розглянемо вираз у внутрішніх круглих дужках. Оскільки

$$d = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_1 C} + \frac{R_2}{L} \right), \text{ то } R_1 C d = \frac{1}{2} \left(1 + R_1 C \frac{R_2}{L} \right) \approx \frac{1}{2} R_1 C \frac{R_2}{L} \gg 1,$$

оскільки $R_1 C \gg \frac{L}{R_2}$.

З цієї причини величиною $\frac{1}{R_1 C d}$ в круглих дужках формули (2) можна знехтувати порівнюючи її

з одиницею. В цьому випадку отримаємо наближений вираз на заміну формули (2)

$$L \frac{di}{dt} = \Delta E e^{-dt} \left(ch \, adt - \frac{1}{a} sh \, adt \right).$$

Переходячи до безрозмірного часу $x = dt$, отримаємо

$$\begin{aligned} u(x) &= -U_\sigma - \Delta E e^{-dx} \left(ch \, ax - \frac{1}{a} sh \, ax \right) = \\ &= -U_\sigma \left[1 + \frac{\Delta E}{U_\sigma} e^{-dx} \left(ch \, ax - \frac{1}{a} sh \, ax \right) \right]. \end{aligned} \quad (3)$$

Формулою (3) можна скористуватись безпосередньо для аналізу напруги на електродах камери при різних значеннях $a = \sqrt{1 - w^2/d^2}$ в межах $0 < a < 1$. Для випадку $a = 0$ будемо мати критичний режим. Тоді, розкриваючи невизначеність другої складової в круглих дужках формули (3), отримаємо

$$u(x) = -U_\sigma \left[1 + \frac{\Delta E}{U_\sigma} e^{-x} (1 - x) \right]. \quad (4)$$

При $w^2 > d^2$ отримаємо коливальний режим. Тоді

$$u(x) = -U_2 \left[1 + \frac{\Delta E}{U_2} e^{-x} \left(\cos bx - \frac{1}{b} \sin bx \right) \right], \quad (5)$$

де $b = \sqrt{w^2/d^2 - 1} > 0$.

Вирази (4) та (5) якісно вірно відображають реальний хід процесу $u(x)$: в початковий момент часу ($x=0$) напруга камери $u(0) = -E$, далі зі збільшенням x $u(x)$ прагне досягти стаціонарного значення $u(\infty) = -U_2$. Важливий практичний висновок полягає в тому, що при включенні камери в протилежність струмові перенапруга на електродах камери практично відсутня.

Для ілюстрації отриманих результатів нижче на рис. 3–5 наводяться графіки функцій

$$j_1(x) = 1 + \frac{\Delta E}{U_2} e^{-x} \left(ch ax - \frac{1}{a} sh ax \right),$$

$$j_2(x) = 1 + \frac{\Delta E}{U_2} e^{-x} \left(1 - \frac{1}{a} x \right),$$

$$j_3(x) = 1 + \frac{\Delta E}{U_2} e^{-x} \left(\cos bx - \frac{1}{b} \sin bx \right).$$

Рис. 3–5 підтверджують попередньо зроблений вище висновок стосовно несуттєвої перенапруги. Проте слід зазначити, що в момент включення струму (подачі його на електроди камери) має місце навпаки певна частина фази, коли напруга на електродах камери дещо нижча напруги горіння. Очевидно, що в цьому випадку розряд може бути відсутній або сумарні енергетичні характеристики суттєво знижуються проти номінального значення, що неминуче відобразиться на перебігу субпроцесів фазоутворення. Особливо це стосується ситуації, коли характер запалювання розряду – коливальний. В цьому режимі мають місце як перенапруження порядку 1-1,5%, так і зниження напруги нижче значення напруги горіння на 5-10%.

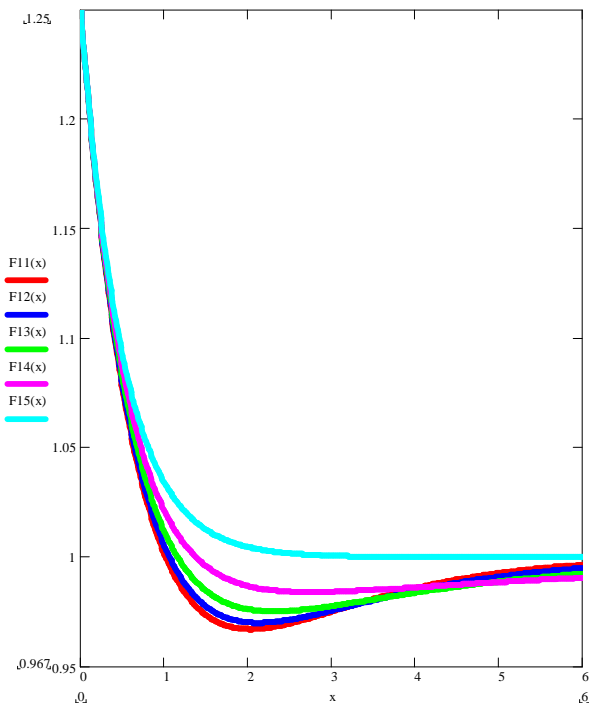


Рис. 3. Графік функцій $f_1(x)$ (знизу вгору $\alpha=0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1; \Delta E=0,25$)

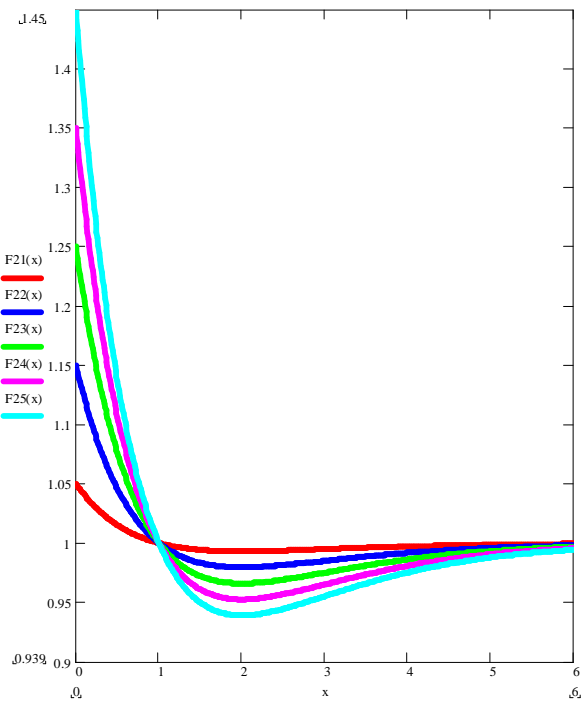


Рис. 4. Графік функцій $f_2(x)$ (знизу вгору в перетині $x=2$ $\Delta E=0,45; 0,35; 0,25; 0,15; 0,05$)

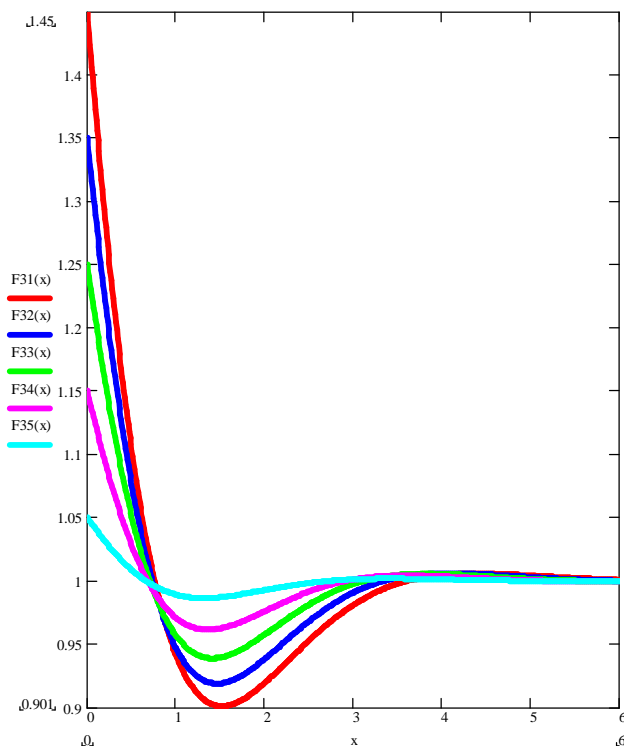


Рис. 5. Графік функцій $f_3(x)$ (знизу вгору в перетині $x=1,5$ $\beta=1,1; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5$; відповідно $\Delta E=0,45; 0,35; 0,25; 0,15; 0,05$)

Висновок. Проведений аналіз перехідних процесів зміни напруги при вмиканні живлення дозволяє визначити вплив на фазові перетворення в поверхневому шарі характеристики, яка відображає в певній мірі енергетику модифікації поверхні при азотуванні в тліючому розряді з нестационарним живленням.

Література

1. Пастух І.М. Вихідні положення визначення електричних характеристик при азотуванні в тліючому розряді з нестационарним живленням / І.М. Пастух, М.В. Лук'янюк, В.О. Курская // Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницький, 2012. – № 1. – С. 7–10.
2. Пастух І.М. Аналітичні критерії утворення нітридів при азотуванні в тліючому розряді з нестационарним живленням / І.М. Пастух, М.В. Лук'янюк, В.О. Курская // Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницький, 2012. – №2. – С. 25–33.
3. Пастух І.М. Перехідні процеси вмикання струму в установці для азотування в тліючому розряді з нестационарним живленням / І.М. Пастух, М.В. Лук'янюк, В.О. Курская // Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницький, 2012. – № 1. – С. 11–15.
4. Герасимов Я.И. Курс физической химии / Герасимов Я.И. – М. : Химия, 1970. – Т. 1 – 592 с., т. 2 – 623 с.
5. Пастух И.М. Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде / Пастух И.М. – Харьков, 2006. – 364 с.
6. Пастух І.М. Фізико-технічна обробка поверхні металів безводневим азотуванням в тліючому розряді : дис. ... докт. техн. наук : 05.03.07. – К., 2008. – 675 с.
7. Пастух І.М. Практична апробація положень теорії азотування в тліючому розряді / І.М. Пастух, О.С. Здибель // Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницький, 2007. – № 1. – С. 7–25.

Надійшла 21.6.2012 р.
Статтю представляє: д.т.н. Пастух І.М.