

УДК 621.78/ (66.088+537.52+66.046)

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

Хмельницький національний університет

ВИХІДНІ ПОЛОЖЕННЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ АЗОТУВАННІ В ТЛІЮЧОМУ РОЗРЯДІ З НЕСТАЦІОНАРНИМ ЖИВЛЕННЯМ

Обґрунтована спрощена модель установки для подальшого аналізу електричних характеристик перехідних нестационарних процесів.

The simplified model of device for subsequent analysis of electric parameters of non-stationary transients process is grounded.

Ключові слова: азотування, тліючий розряд, нестационарне живлення, електричні параметри.

Проведені раніше дослідження електричних характеристик азотування в тліючому розряді [1] стосуються процесів при умовно стаціонарному живленні розряду. Класифікація подібних режимів розряду як умовних обґрунтовується тим, що фактично при будь-якій складності блоку живлення установок для азотування в тліючому розряді напруга на електроди розрядної камери подається з певними, більшими чи меншими, але пульсаціями. Інша справа, що ці пульсації відносно номінальних значень напруги незначні і, звичайно, мінімальні значення практично дорівнюють номінальним, тобто їх не можна в жодній мірі кваліфікувати як віднульові. В цій же роботі встановлені залежності величини напруги, як головного чинника енергетичних характеристик часток падаючого потоку, від параметрів технологічного режиму, в першу чергу – складу газового середовища, тиску, температури поверхні азотованих деталей тощо. Досліджені реальні характеристики розряду на промислових установках для модифікації поверхні металевих об'єктів методом азотування в тліючому розряді. Встановлена наявність екстремальної залежності електричних характеристик, включаючи потужність розряду, від тиску в розрядній камері, що підтверджує сформульовану, але не пояснену, Арзамасовим Б. М. тезу стосовно впливу наявності мінімуму питомої потужності (що при однотипній садці співпадає з мінімумом потужності розряду) на якість азотування [2, 3]. В подальшому з позицій енергетичної моделі обґрунтування цієї тези було знайдено в тому, що потужність як похідна від величин струму та напруги має мінімум саме в тому випадку, коли ці два параметри при зміні тиску змінюються екстремально, при цьому аналітичні характеристики продуктивної здатності в напрямку створення нітридів та розпорошення поверхні знаходяться в області оптимального співвідношення, що і призводить до найкращих показників азотування [4]. Оскільки при умовно стабільному живленні розряду фаза запалювання чи гасіння розряду за часом становлять мізерну частку від загальної тривалості процесу власне модифікації (фаза очистки поверхні катодним бомбардуванням при цьому не враховується, оскільки в цьому випадку однозначно превалює один процес – розпорошення поверхні), то перехідні процеси для подібних технологій не грають практично ніякої більш-менш суттєвої ролі насамперед хоча б тому, що їх питома вага мізерна. Зовсім інша ситуація виникає у випадку використання нестационарного живлення, наприклад – при циклічно комутованому розряді, коли частота циклів знаходиться в межах від одного до десятка кілогерц, а шпаруватість крім того ще зменшує тривалість часу наявності напруги на електродах камери. Тоді перехідні процеси при запалюванні та при гасінні розряду за часом становлять помітну частку активної фази періоду циклу комутації і залежно від характеру зміни струму та напруги можуть суттєво вплинути на формування нітридних фаз, дифузії азоту в глибину поверхні та її розпорошення, а відтак – на власне процес формування поверхневого модифікованого шару. Таким чином загальна задача вивчення особливостей зміни електричних характеристик при нестационарному живленні зводиться до двох головних моментів: процеси при запалюванні розряду та при його гасінні. В цій роботі розглядаються початкові положення підходів до дослідження означених задач. Окреме питання, яке не включено в цей цикл робіт, становить задача впливу аналогової зміни за довільним законом електричних параметрів розряду на процес формування фазових структур. мається на увазі наступне. При змінному характерові живлення залежно від особливостей закону напруги в певний момент реакція ланцюга живлення на цю зміну може бути різною. Наприклад, при плавних зростанні чи зменшенні напруги джерела живлення перехідні процеси практично не спостерігаються, відповідно їх роль в стимулюванні будь-яких складових (субпроцесів) модифікації поверхні практично не спостерігається. Навпаки, якщо напруга змінюється стрімко, то сплески напруги на електродах розрядної камери можуть стимулювати відповідні субпроцеси, наприклад – розпорошення поверхні, дифузії в глибину поверхневого шару тощо.

Таким чином поставлена задача оцінки характеру зміни основних електричних величин (струму та напруги розрядної камери) процесу азотування металевих деталей з використанням циклічно комутованого розряду. Спрощена ідеалізована схема відповідної установки, призначеної для реалізації вказаного процесу, приводиться на рис. 1, де B – випрямляч, Φ – фільтр, що згладжує напругу, PK – розрядна камера, R_6 – баластний реостат, EK – електронний ключ.

Частота f комутації електронного ключа може знаходитись в межах від одного до десятків кілогерц. Таким чином, напруга u на електродах розрядної камери та струм камери i , котрі є періодичними функціями з періодом $T=1/f$, може знаходитись в межах від десятків до сотень мікросекунд. З літературних джерел, присвячених фізиці газового розряду та його технічним застосуванням, слідує, що вказані проміжки часу порівнянні з характерними часовими показниками «народження та «загибелі» розрядних процесів [5-7]. Це означає, що реальна форма імпульсів струму та напруги на електродах камери може суттєво відрізнятись від прямокутної, а в загальному випадку – взагалі форма зміни цих параметрів у часі значно не співпадатиме з теоретично заданою. В цілому зазначені моменти призведуть по суті до наявності неконтрольованих факторів впливу на технологічний процес. При цьому фактично можливі перевантаження по струмові, перенапруження, а в цілому – зміна енергетичних параметрів процесу азотування, що з врахуванням встановленого в [4] може принципово спотворити результати азотування аж до отримання негативних наслідків (наприклад – у зв'язку з перегрівом та відпусканням основи, коли показники поверхневої мікротвердості замість зростання суттєво зменшуються). В принципі не виключена можливість азотування з оберненою полярністю, коли деталь може бути анодом, а корпус камери – катодом. І теоретична, і практична можливість подібного процесу доказана в [1, 8– 11].

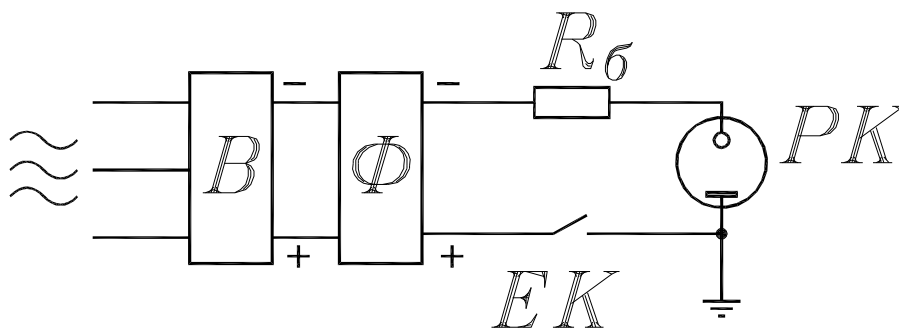


Рис. 1. Ідеалізована схема установки

Газорозрядні процеси, викликані дією змінних електричних полів, розглянуті в ряді джерел, наприклад [5, 7, 12]. Проте безпосереднє використання результатів цих робіт для задачі, яка розглядається в цій роботі, було б не цілком виправдано з наступних причин:

- головна увага в цих роботах приділена так званим емнісним високочастотним розрядам ($f > 1$ МГц), в той же час відзначається [5] наявність «складних заплутаних обставин, притаманних низькочастотним розрядам, ...до повної ясності поки що далеко»;
- установку на рис. 1, якщо підходити з позицій строгої теорії, слід розглядати як систему з параметричним елементом ЕК, на яку діють постійна напруга джерела і в загальному випадку заміна цієї моделі безкомутаційною схемою з імпульсним джерелом живлення на вході некоректна;
- досліджуючи газорозрядні процеси, цілком природно прагнуть виключити вплив так званих «схемних» ефектів, які можуть завуалювати суть фізичних явищ в газі, в той же час аналіз роботи технологічної установки повинен проводитись системно з врахуванням більш-менш суттєвих (в тому числі – паразитних) її параметрів;
- критично слід відноситись до розповсюджені думки щодо можливості розгляду імпульсних режимів розряду при низьких ($f \leq 1$ кГц) частотах як послідовності стаціонарних режимів: адже при незмінній крутизні фронту та зрізу імпульсів характер відгуку системи на них не залежить від частоти слідування імпульсів, хоча, звичайно, часова щільність цих відгуків буде змінюватись.

Коротко розглянемо процеси в камері, які протікають від моменту замикання ключа ЕК до настання стаціонарного режиму. Як відомо [7], розрізняють два етапи в ході запалювання розряду: етап запізнювання з часом t_z та етап формування розряду t_ϕ . Перший етап відраховується від моменту прикладення напруги до електродів камери до появи біля катоду першої електронної лавини. У випадку циклічної комутації часом t_z напевне допустимо знехтувати, враховуючи залишкову іонізацію розрядного проміжку після кожного попереднього циклу розряду, хоча ця теза потребує додаткового дослідження з врахування тієї обставини, що степінь іонізації в досліджуваних процесах надзвичайно мала (по порядку величин – $10^{-6} \dots 10^{-8}$).

Як зазначається в [7], хід процесів на етапі формування розряду t_ϕ визначається потребою того, щоб послідовно наростаючі за інтенсивністю лавини призвели врешті до збільшення струму в область значень, близьких до струму стаціонарного горіння розряду i . Ця інтенсивність наростання лавин має першооснову, пов'язану з перерозподілом напруженості поля в проміжку між електродами камери, коли вона ослаблюється біля аноду (це викликано компенсацією об'ємного розряду електронів іонами) та підсилюється в прикатодній області в процесі скорочення проміжку, котрий сприймає на себе більшу частину прикладеної до електродів напруги. Ще однією причиною може бути наявне зростання інтенсивності іонно-електронної емісії, причиною чого є збільшення напруженості поля біля катоду.

Закон наростання струму в стадії пробую для плоского газового проміжку, коли перенапругу ще

можна вважати незмінною $\Delta u - u_3 > 0$, наводиться в [5].

$$i(t) = i_0 e^{\alpha d} \left[\frac{m}{m-1} \exp\left(\frac{m-1}{m} \cdot \frac{t}{\tau}\right) - \frac{1}{m-1} \right],$$

де i_0 – запальний струм від зовнішнього іонізатора,
 τ – час витягування на катод іонів від самого анода,
 α – іонізаційний коефіцієнт,
 d – відстань між електродами,
 $m = g(e^{\alpha d} - 1)$ – коефіцієнт відтворення,
 γ – коефіцієнт вторинної емісії,
 u_3 – напруга запалювання розряду.

Там же стверджується, що струм зростає по експоненціальному закону, причому тим швидше, чим більша степінь перенапруження та величина $(\mu - I)$. Масштабом часу зростання струму служить величина τ $(\mu - I)$. Якщо емісія проходить під дією фотонів, τ має порядок часу не іонів, а електронів, тобто пробій газового проміжку розвивається на два-три порядки швидше. Іонізаційний коефіцієнт α суттєво залежить від поля, а $e^{\alpha d}$ та коефіцієнт відтворення μ на додаток за експоненціальним законом залежить від α . З цієї причини достатньо невеликого перенапруження в декілька процентів, щоб величина μ помітно перевищила одиницю і пробій розвивався достатньо швидко. В [5] стверджується, що іонізований стан, в який приходить газ після пробою, частіше всього виникає за час $10^{-4} - 10^{-8}$ с. Для приладів аномального тліючого розряду в порівнянні з нормальним тліючим розрядом ймовірно справедлива тенденція скорочення цього часу, причому чого є великі перенапруження.

Відзначимо, що наведений вираз відноситься лише до початкової ділянки залежності струму, обумовленого лавиноподібним розмноженням зарядів, від часу. При цьому не враховані стабілізуючі фактори, наприклад – параметри зовнішнього середовища, під дією яких в кінцевому результаті струм установки приймає стаціонарне значення, а напруга знижується від значення напруги запалювання u_3 до напруги горіння u_f . Більш того, відносно короткочасний та достатньо вивчений процес запалювання не вносить суттєвої новизни в аналіз роботи досліджуваної технологічної установки, в той же час вивчення енергетично вагомий складової процесу встановлення стаціонарного стану представляє значний практичний інтерес. На жаль, рішення подібних задач ускладнюється із-за фактичної неможливості створення скільки-небудь загальних адекватних моделей розглядуваних процесів для технологічних установок при величезній різноманітності садок та режимів, а також у зв'язку з нелінійним характером моделей. В таких умовах основним представляється експериментальний метод дослідження. Проте теоретичний аналіз навіть значно спрощених лінійних моделей системи, який не претендує на точність результатів, може виявити певні тенденції процесів, що проходять. Тому в якості подібної моделі вибрана розрядна камера у вигляді двополюсника індуктивного характеру. Можливість, хоча і обмежена, такого представлення пояснюється тим, що внаслідок інерційності процесів в перехідних режимах зміна струму газорозрядних приладів сплізнується стосовно зміни напруги на електродах установки [6, 12]. Це призводить до появи в установці реактивної складової змінному струму. З ростом частоти спектральних складових напруги реактивний опір зростає, що якраз і свідчить про аналогію ланцюга, в який входить індуктивність. Наглядна ілюстрація до відзначеного є в [6]: вимірний на частоті $f = 50$ кГц повний опір одного з типів газорозрядних стабілітронів приблизно дорівнює 5...10 кОм, в той час, як диференційний опір (резисторний опір змінному струмові) склав 100 Ом.

Висновок. В подальшому варіанти моделі камери у вигляді двополюсника індуктивного характеру передбачається використати для аналізу перехідних процесів як при замиканні, так і при розмиканні електронного ключа. При цьому передбачається, що перехідні процеси при замиканні та розмиканні ЕК не перекриваються, що дозволяє розглядати ці процеси незалежно.

Література

1. Пастух И.М. Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде / Пастух И.М. – Харьков, Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», 2006. – 364 с.
2. Арзамасов Б.Н. Роль удельной мощности разряда при ионной химико-термической обработке сплавов / Б.Н. Арзамасов, Т.А. Панайоти // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2000. – № 6. – С. 31–34.
3. Арзамасов Б.Н. Ионная химико-термическая обработка сплавов / Арзамасов Б.Н. – М. : Из-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 1999. – 400 с.
4. Фізико-технічна обробка поверхні металів без водневим азотуванням в тліючому розряді : дис. ... д-ра. техн. наук : 05.03.07 / Пастух І.М. – К., 2008. – 675 с.
5. Райзер Ю.П. Физика газового разряда / Райзер Ю.П. – М. : Наука, 1987. – 592 с.

6. Каганов И.Л. Ионные приборы / Каганов И.Л. – М. : Энергия, 1972. – 528 с.
 7. Френсис Г. Ионизационные явления в газах / Френсис Г. – М. : Атомиздат, 1964. – 179 с.
 8. Пастух І.М. Проблематика моделювання процесу азотування в тліючому розряді / І.М. Пастух, О.С. Здибель // Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницький, 2005. – № 1. – С. 7–11.
 9. Об азотировании анода в тлеющем разряде. Электронная обработка материалов / [Крейндель Ю.Е., Пономарева Л.П., Пономарев В.П., Слосман А.И.]. – 1984. – № 4. – С. 32–34.
 10. Дуплексная обработка инструментальных сталей в вакууме / А.А. Андреев, В.В. Кунченко, Л.П. Саблев, В.М. Шулаев // Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов в машиностроении: Сб. докл. второго Международного симпозиума ОТТОМ-2. – Харьков, 2001. С. 48–56.
 11. Нагрев материалов потоками электронов из плазмы вакуумно-дугового разряда с холодным катодом / Л.П. Саблев, А.А. Андреев, Р.И. Ступак, В.М. Шулаев // Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов в машиностроении: Сб. докл. 3-й Международной конференции ОТТОМ-3. – Харьков, 2002. С. 38–44.
 12. Герасимов С.М. Физические основы электронной техники / Герасимов С.М., Белан М.В., Москалюк В.А. – К. : Вища школа, 1081. – 368 с.

Надійшла 17.12.2011 р.
 Статтю представляє: д.т.н. Пастух І.М.

УДК. 539.3

М.Г. СУР'ЯНИКОВ, Г.М. КОЗОЛУП
 Одеський національний політехнічний університет
 Г.Б. ПАРАСКА
 Хмельницький національний університет

ДОДАТОК МЕТОДУ ГРАНИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ДО РОЗРАХУНКУ РЕБРИСТИХ ПЛАСТИН

Розглянуто метод граничних елементів до розрахунку ребристих пластин. Побудовано фундаментальні функції, функції Гріна і виконано формування векторів зовнішніх навантажень.

The method of boundary elements in the calculation of ribbed plates. We construct the fundamental features of the Grien function and written form vectors of external loads.

Ключові слова: метод граничних елементів.

Вступ

Ребриста пластина являє собою сполучення взаємодіючих при деформації елементів — власне пластини і ребер (одномірних стрижнів). Напружено-деформований стан кожного з цих елементів, обумовлений у рамках відомих прикладних теорій, має свої особливості. У зв'язку з цим при вивченні ребристих пластин виникає необхідність побудови спеціальної теорії, що враховує основні особливості, властиві окремим елементам, і умови їхньої спільної роботи. Представляється, що для розв'язання цієї задачі може виявитися ефективним чисельно-аналітичний метод граничних елементів [1, 2].

Метод дослідження

Диференційне рівняння вигину пластинки при наявності ребер має вид [3]

$$\frac{\partial^4 W}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 W}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 W}{\partial y^4} = \frac{\bar{q}}{D}, \quad (1)$$

де $W = W(x, y)$ – прогин пластинки; $\bar{q} = \bar{q}(x, y)$ – вільний член рівняння, що враховує не тільки зовнішні навантаження, але і наявність підкріплювальних ребер у подовжньому напрямку, під яким будемо розуміти напрямку, рівнобіжний осі y (рис. 1).

Шляхом застосування для (1) методу Канторовича-Власова ця двомірна задача може бути зведена до одномірної, як того потребує загальна концепція методу граничних елементів [2].

Тоді прогин точки серединної площини пластини буде

$$W(x, y) = W(y)X(x), \quad (2)$$

де $X(x)$ — функція поперечного розподілу прогинів пластини, яка має точно описувати форму вигнутої поверхні пластини в напрямку осі x . Цій вимозі повною мірою задовольняють криві прогину балки, що має такі ж умови обпирання, як і пластина, у напрямку осі x .

Існують два способи для вибору цієї функції: статичний і динамічний [2]. При статичному способі прогин балки визначається прикладеним до неї статичним навантаженням (рис. 2). При динамічному способі прогини балки виражаються її формами власних коливань (рис. 3).

Підставимо (2) в (1) і у відомі з теорії вигину пластин вираження статичних параметрів (згинальних моментів і приведених поперечних сил). Множачи потім обидві частини кожного вираження на $X(x)$ й інтегруючи в межах $[0; l_1]$, одержимо задачу Коші одномірної моделі вигину прямокутної пластини,