

Рис. 3. Розподіл твердості по товщині азотованих шарів за різними режимами азотування в тліючому розряді (табл. 1), розрахований за формулою (2): а – сталь 3X15, б – сталь 38XMOA, в – титановий сплав BT8

Література

1. Теория и технология азотирования / Ю.М. Лахтин, Я.Д. Коган, Г.И. Ипис, З. Бемер // М. Металлургия, – 1991. – 320 с.
2. Арзамасов Б.Н. Химико-термическая обработка металлов в активизированных газовых средах / Арзамасов Б.Н. – М., Машиностроение. – 1976. – 224 с.
3. Ионная химико-термическая обработка сплавов / Б.Н. Арзамасов, А.Г. Братухин, Ю. Елисеев, Т.А.Панайоти // М.,Изд.МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 1999. – 400 с.
4. Каплун В.Г. Оптимізація технології азотування сталі 38XMOA в тліючому розряді за параметрами зносостійкості в розплаві склонаповнених пластмас / В.Г. Каплун, П.В.Матвійшин, Н.С. Машовець // Проблеми трибології (Problems of Tribology). – 2011. – № 3. – С. 106 – 109.
5. Прокошин Д.А. Исследование ионного азотирования титана / Д.А. Прокошкин, Т.А. Панайоти, Г.В. Соловьев // Изв. Вузов, Машиностроение. – 1995. – № 5. – С. 107– 110.
6. Пастух И.М. Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде / Пастух И.М. – Харьков, ХФТИ. – 2006. – 364 с.
7. Каплун П.В. Вплив покриттів на зносостійкість і довговічність підшипників кочення: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01 / Каплун П.В. – К., 2004. – 181 с.
8. Машовець Н.С. Трибологічні характеристики титанових сплавів після низькотемпературного безводневого азотування в тліючому розряді: дис. ... канд. тех. наук 05.02.04. / Машовець Н.С. – Хмельницький, 2009. – 194 с.
9. Каплун В.Г. Оптимизация технологии ионного азотирования в безводородных средах по параметрам прочности / В.Г.Каплун, Н.Ф. Семенов, А.В. Паршенко // Управление трибологическими и прочностными свойствами механических систем. К., УМКВО. – 1990. – С. 113– 118.
10. Красовский Г.И. Планирование эксперимента / Г.И. Красовский, Б.В.Филаретов. – Минск: Изд. БГУ, 1982. – 302 с.

Надійшла 5.5.2012 р.
Статтю представляє: дт.н. Каплун В.Г.

УДК 621.78/ (66.088+537.52+66.046)

І.М. ПАСТУХ, М.В. ЛУК'ЯНИЮК, В.О. КУРСКАЯ
Хмельницький національний університет

ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ ВМІКАННЯ СТРУМУ В УСТАНОВЦІ ДЛЯ АЗОТУВАННЯ В ТЛІЮЧОМУ РОЗРЯДІ З НЕСТАЦІОНАРНИМ ЖИВЛЕННЯМ

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

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

Ключові слова: азотування, тліючий розряд, нестационарне живлення, вмикання, струм

В роботі [1] обґрунтовані початкові положення визначення електричних параметрів технологічного режиму азотування в тліючому розряді з нестационарним живленням. Там же встановлено, що в подальшому варіанти моделі камери у вигляді дипольника індуктивного характеру передбачається використати для

аналізу перехідних процесів як при замиканні, так і при розмиканні електронного ключа (ЕК). При цьому передбачається, що перехідні процеси при замиканні та розмиканні ЕК не перекриваються, що дозволяє розглядати ці процеси незалежно. Подальший аналіз вказує також на доцільність з метою більш чіткої диференціації інформації розглядати окремо питання стосовно перехідних процесів струму та напруги, оскільки їх вплив на модифікаційні процеси принципово відрізняється (струм чи густина струму характеризують кількісні параметри субпроцесів модифікації, напруга в основному визначає енергетичні рівні взаємодії всіх факторів фазових перетворень в поверхневому шарові).

Еквівалентна схема установки в режимі замкнення електронного ключа ЕК показана на рис. 1.

На рис. 1 використані умовні позначення: E – електрорушійна сила (ерс) джерела живлення, R_{ϕ} , C_{ϕ} – відповідно опір та ємність фільтра згладжування, R_{δ} – 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. Варто зазначити, що еквівалентна схема на рис. 1 не відображає короткочасного процесу зародження та початкової стадії розвитку газового розряду. Також не врахована реакція власної ємності «темної» камери в момент її включення, котра вважається несуттєвою з технологічної точки зору.

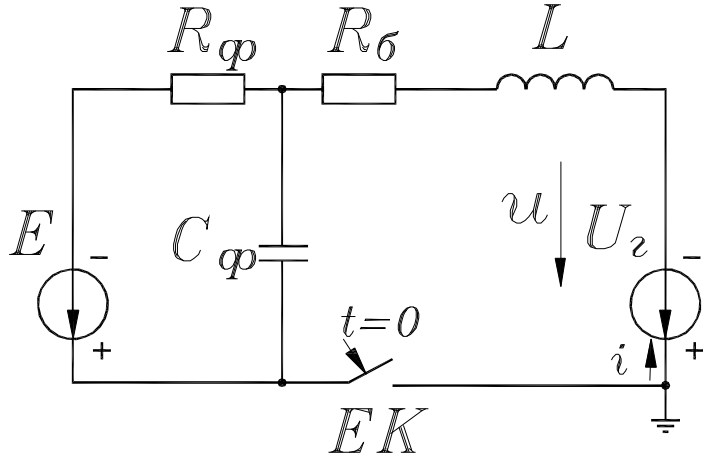


Рис. 1 Еквівалентна схема установки в режимі замкнення ключа

Для аналізу схеми на рис. 1 представимо її у вигляді операторної схеми заміщення (рис. 2), в якій всі елементи початкової схеми замінено операторними відображеннями. Додавання операторного джерела ерс в ємнісній гілці схеми на рис. 2 викликано необхідністю відображення ненульової початкової напруги на конденсаторі C_{ϕ} .

$$u_C(0_+) = u_C(0_-) = E$$

Перетворимо схему на рис. 2 по теоремі про еквівалентний генератор напруги (рис. 3), де $E_e(p)$ та $Z_e(p)$ – відповідно, операторна ерс та внутрішній опір еквівалентного генератора напруги.

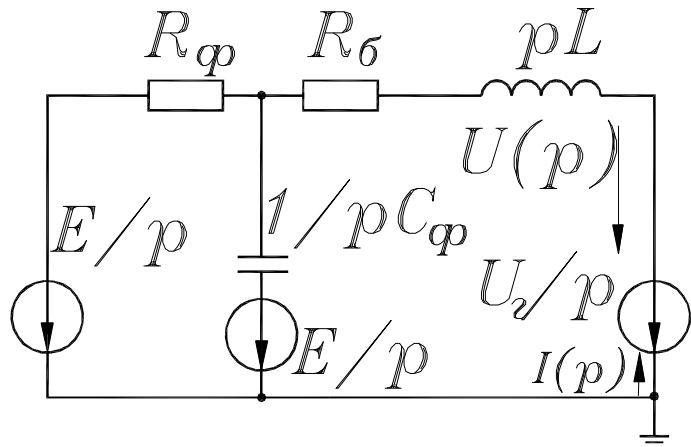


Рис. 2 Операторна схема заміщення

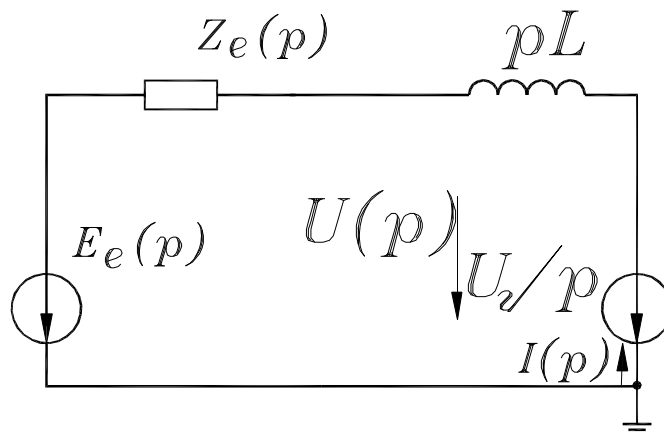


Рис. 3 Перетворена схема

Використавши відомі методи холостого ходу та короткого замикання, отримаємо

$$E_E(p) = E/p,$$

$$Z_E(p) = \left(R_{\phi} \cdot \frac{1}{pC_{\phi}} / \left(R_{\phi} + \frac{1}{pC_{\phi}} \right) \right) + R_{\delta} = \frac{R_{\phi}}{1 + pC_{\phi}R_{\phi}} + R_{\delta}.$$

Операторне відображення струму камери матиме вигляд

$$I(p) = \frac{E_{\mathcal{D}}(p) - U_{\Gamma}/p}{Z_{\mathcal{D}}(p) + pL} = \frac{\Delta E/p}{Z_{\mathcal{D}}(p) + pL},$$

де $\Delta E = E - U_{\Gamma}$.

Для зручності подальших викладок перепозначимо $R_{\Phi} = R_1$, $R_{\sigma} = R_2$, $C_{\Phi} = C$, тоді

$$\begin{aligned} I(p) &= \frac{\Delta E}{p} \cdot \frac{1 + pR_1C}{R_1 + (R_2 + pL) \cdot (1 + pR_1C)} = \\ &= \frac{\Delta E}{p} \cdot \frac{1 + pR_1C}{\left(p^2 + p \frac{L + R_1R_2C}{R_1LC} + \frac{R_1 + R_2}{R_1LC} \right) R_1LC}. \end{aligned}$$

Після введення позначень

$$2d = \frac{1}{R_1C} + \frac{R_2}{L} \text{ та } w^2 = \frac{R_1 + R_2}{R_1LC}$$

остаточно отримаємо

$$I(p) = \frac{\Delta E}{R_1 + R_2} \cdot w^2 \frac{1 + pR_1C}{p(p^2 + 2dp + w^2)}.$$

Для переходу від відображення до оригіналу можливе використання таблиць обернених перетворень Лапласа або формули розкладення (наприклад, [2]). В результаті вираз для визначення струму камери

$$i(t) = \frac{\Delta E}{R_1 + R_2} \cdot w^2 \left[\frac{1}{w^2} + \frac{1 + p_1R_1C}{p_1(2p_1 + 2d)} \cdot e^{p_1t} + \frac{1 + p_2R_2C}{p_2(2p_2 + 2d)} \cdot e^{p_2t} \right],$$

де $p_{1,2} = -d \pm \sqrt{d^2 - w^2}$ – корені рівняння $p^2 + 2dp + w^2 = 0$.

Після підстановки коренів та деяких перетворень отримаємо

$$i(t) = \frac{\Delta E}{R_1 + R_2} \cdot \left[1 - e^{-dt} \left(\frac{e^{adt} + e^{-adt}}{2} + \frac{d - w^2R_1C}{ad} \cdot \frac{e^{adt} - e^{-adt}}{2} \right) \right],$$

де $a = \sqrt{1 - w^2/d^2}$.

Для подальшого аналізу зручно ввести параметр безрозмірного часу $x = \delta t$, тоді

$$i(x) = \frac{\Delta E}{R_1 + R_2} \cdot \left[1 - e^{-x} \left(\frac{e^{ax} + e^{-ax}}{2} + \frac{1 - w^2R_1C/d}{a} \cdot \frac{e^{ax} - e^{-ax}}{2} \right) \right].$$

З метою деякого можливого спрощення отриманої формули розглянемо співвідношення

$$\frac{w^2R_1C}{d} = \frac{2(R_1 + R_2)}{L(1/R_1C + R_2/L)} \approx \frac{2(R_1 + R_2)}{R_2},$$

що цілком справедливо при $R_1C_1 \gg L/R_2$. Оскільки остання нерівність, яка характеризує інерційні властивості фільтру згладжування, виконується практично завжди, то остаточно

$$i(x) = \frac{\Delta E}{R_1 + R_2} \cdot \left[1 - e^{-x} \left(\frac{e^{ax} + e^{-ax}}{2} - \frac{1 + 2R_1/R_2}{a} \cdot \frac{e^{ax} - e^{-ax}}{2} \right) \right].$$

В певних умовах більш доречно простіша форма попереднього виразу

$$i(x) = \frac{\Delta E}{R_1 + R_2} \cdot \left[1 - e^{-x} \left(cha x - \frac{1 + 2R_1/R_2}{a} \cdot sha x \right) \right].$$

Отриманий вираз проаналізуємо при різних співвідношеннях величин R_1 та R_2 , проте простіше цей аналіз виконується для випадку, коли $R_1 = R_2 = R$, що зазвичай найдоцільніше з технічних причин. Тоді

$$i(x) = \frac{\Delta E}{2R} \cdot \left[1 - e^{-x} \left(cha x - \frac{3}{a} \cdot sha x \right) \right].$$

Параметр α визначає характер відгуку: при $w < \delta$ параметр α – дійсне додатне число і відгук аперіодичний; при $w > \delta$ значення числа α уявне, при цьому відгук має коливальний характер. Особливий випадок (критичний режим) спостерігається у випадку, коли $w = \delta$, тобто $\alpha = 0$. Розкриваючи невизначеність у виразі для струму при $a \rightarrow 0$, отримуємо

$$i(x) = \frac{\Delta E}{2R} \cdot \left[1 + e^{-x} \left(\left(2 \frac{R_1}{R_2} + 1 \right) \cdot x - 1 \right) \right],$$

або при рівності $R_1 = R_2 = R$,

$$i(x) = \frac{\Delta E}{2R} \cdot \left[1 + e^{-x} (3 \cdot x - 1) \right].$$

Дослідження на екстремум останнього виразу показує, що максимальне значення $i(x)$ досягається при $x = 4/3 \approx 1,33$ і дорівнює $i_{\max} \approx 1,79 \Delta E / 2R$, тобто суттєво перевищує стаціонарне значення $E/2R$. Графік функції

$$f_1(x) = \frac{i(x)}{\Delta E / 2R} = 1 + e^{-x} (3 \cdot x - 1),$$

котра представляє собою нормовану часову залежність струму в критичному режимі, наведено на рис. 4.

Аналогічні залежності

$$f_2(x) = 1 - e^{-x} \left(\frac{e^{ax} + e^{-ax}}{2} - \frac{3}{a} \cdot \frac{e^{ax} - e^{-ax}}{2} \right)$$

для аперіодичного режиму при різних значеннях параметра α показані на рис. 5.

Характерний для всіх кривих сплеск струму може складати біля 80 % по відношенню до стаціонарного значення. Очевидно, що при більш точному аналізі кількісні відношення зміняться, але важлива для практики тенденція перевантажень по струму безсумнівно збережеться. Важливо також відзначити, що зі збільшенням параметра α час стабілізації струму до значення стаціонарного струму зростає, що важливо також враховувати при дослідженні фазових перетворень в поверхневому шарі.

Для випадку коливального режиму параметр α зручно представити у вигляді

$$a = j\sqrt{w^2/d^2 - 1} = jb,$$

де $b = \sqrt{w^2/d^2 - 1} > 0$.

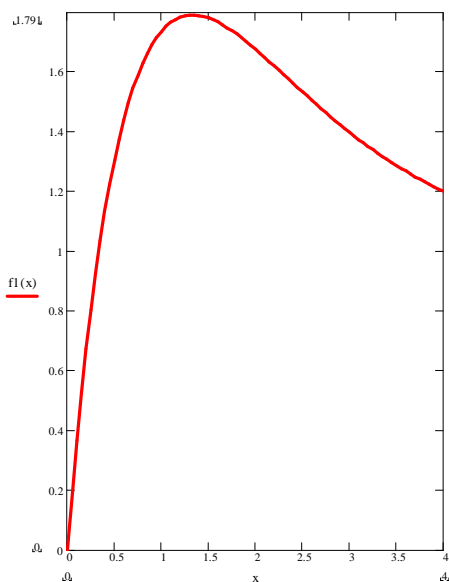


Рис. 4 Графік функції $f_1(x)$

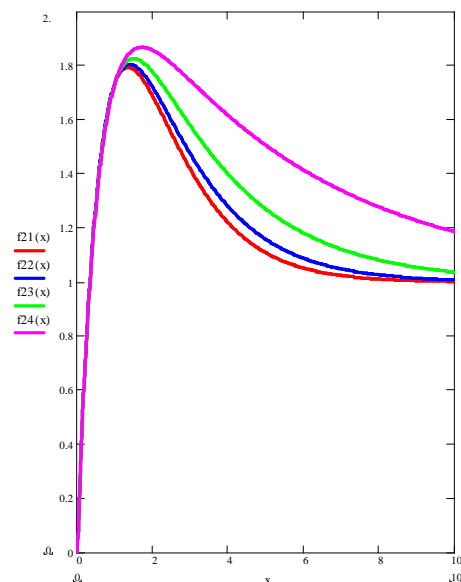


Рис. 5 Графік функцій $f_2(x)$ (знизу вгору $a=0,2; 0,4; 0,6; 0,8$)

Тоді вирази для визначення струму отримають вигляд

$$i(t) = \frac{\Delta E}{R_1 + R_2} \cdot \left[1 - e^{-x} \left(\cos bx - \frac{1 + 2R_1/R_2}{b} \cdot \sin bx \right) \right],$$

а при $R_1 = R_2 = R$

$$i(t) = \frac{\Delta E}{R_1 + R_2} \cdot \left[1 - e^{-x} \left(\cos bx - \frac{3}{b} \cdot \sin bx \right) \right].$$

Сімейство кривих

$$f_3(x) = 1 - e^{-x} \left(\cos bx - \frac{3}{b} \cdot \sin bx \right)$$

при різних значеннях параметра β показано на рис. 6. При цьому криві в послідовності знизу доверху (в правій частині рис. 6) відповідають параметру β 4; 2; 1; 0,8; 0,6; 0,4; 0,2. Разом з коливальним характером ці криві відзначаються більшою крутизою фронтів порівняно з попереднім випадком. Як слідує з рис. 6 при великих значеннях параметра β превалює коливальний характер перехідних процесів струму, але при його зменшенні що не далі зростає час стабілізації струму.

Висновок. Проведений аналіз перехідних процесів зміни струму при вмиканні живлення дозволяє визначити вплив на фазові перетворення в поверхневому шарі кількісної характеристики, якою є густина струму.

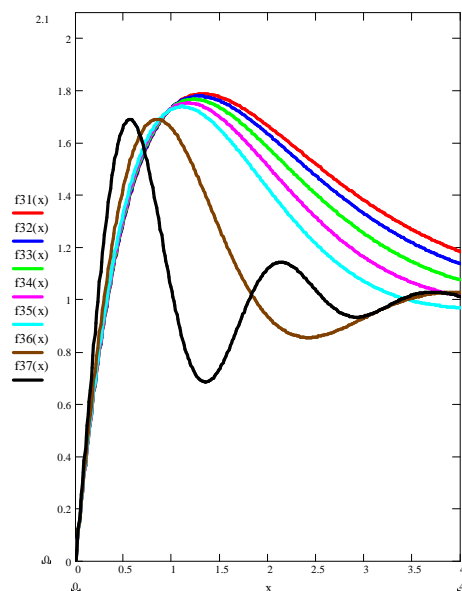


Рис. 6 Графік функції $f_3(x)$

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. Атабеков Г.И. Линейные электрические цепи / Атабеков Г.И. – М.: Энергия, 1978. – 591 с.

Надійшла 13.5.2012 р.

Статтю представляє: д.т.н. Пастух І.М.

УДК 624.13

В.В. КОВТУН, О.А. ДОРОФЄЄВ
Хмельницький національний університет

ВПЛИВ ВНУТРІШНЬОГО КУЛОНОВОГО ТЕРТЯ ТА ДИЛАТАНСІЇ НА ДЕФОРМУВАННЯ ДИСКРЕТНОГО СЕРЕДОВИЩА В УМОВАХ ПЛОСКОЇ ДЕФОРМАЦІЇ

Розглядаються результати експериментальних і теоретичних досліджень впливу внутрішнього кулонового тертя та дилатансії на процес деформування дискретного середовища як у граничній, так і в дограничній стадіях.

The article clears with the results of the experimental and theoretical studies of the impact of internal Coulomb friction and dylatansiya on the process of deformation of a discrete medium in both stages: marginal and premarginal.

Ключові слова: дискретне середовище; внутрішнє кулонове тертя; дилатансія.

Вступ

Під дискретним середовищем розуміють просторову область (континуум), заповнену фізично дискретним матеріалом: сухим піском, зерном, гравієм, щебенем та іншими природними чи штучно створеними зернистими, гранульованими, дисперсними матеріалами. До цього класу також відносять масиви тріщинуватих гірських порід. Найчастіше таке середовище працює в умовах плоскої деформації.

Принциповою особливістю дискретних матеріалів є відсутність зв'язності між частинками (не сприйняття розтягуючих зусиль), і те, що деформування матеріалу відбувається переважно внаслідок взаємного проковзування частинок, якому протидіють сили тертя в мікроконтактах між ними.

Завдяки цим специфічним особливостям механіка дискретного середовища займає проміжне становище між механікою твердого деформівного тіла та механікою рідин – гідромеханікою. З точки зору реології дискретні матеріали є більш складними об'єктами ніж суцільне тверде тіло, рідина чи газ. Можливо тому для описання напружено-деформованого стану дискретного середовища поки не розроблено загально визнаної теоретичної моделі, подібної моделям деформівного твердого тіла або моделям гідромеханіки чи газової динаміки.

Стан проблеми

Наукова проблема полягає у розробці теоретичної моделі, яка дозволяла б описувати напружено-