

УДК 620.193.16

DOI: 10.18372/0370-2197.1(110).20923

*Д.В. ЗДОРЕНКО, М.С. СТЕЧИШИН, В.В. ЛЮХОВЕЦЬ, М.В. ЛУК'ЯНЮК**Хмельницький національний університет, м. Хмельницький, Україна*

ЗМІЦНЕННЯ ВНУТРІШНІХ ПОВЕРХОНЬ ОТВОРІВ ІЗ ВІДНОСНО МАЛИМ ДІАМЕТРОМ

Встановлено основні закономірності та умови азотування в тліючому розряді отворів відносно малого діаметра. Проаналізована можливість головних процесів азотування таких отворів при різних типах існування газового розряду. Запропоновані рекомендації стосовно параметрів енергетичного розряду в газі для забезпечення ефективності процесу модифікації внутрішніх поверхонь отворів відносно малого діаметра. Наведені основні закономірності, які характеризують технологічні особливості азотування внутрішньої поверхні отворів.

Ключові слова: *зносостійкість, азотування, отвори відносно малого діаметру, енергетичні параметри розряду.*

Вступ. Практично всі кінематичні пари тертя з поступальним рухом конструктивно підпадають під категорію отворів з відносно малим діаметром, тобто відношення довжини (глибини) отвору до його діаметрального розміру перевищує значення чотирьох [1]. Цей показник, прийнятий в якості критерію геометричних співвідношень, обґрунтовується тим, що, як відомо, процес азотування подібних конструктивних елементів аналогічний за своєю природою розряду з пустотілим катодом [2]. З теорії цього процесу відомо, що реально поле проникає всередину отворів на глибину не більше двох діаметральних розмірів (якщо отвори – не круглі, то двох менших діаметральних розмірів). Числовий критерій віднесення об'єктів азотування до категорії отворів з відносно малим діаметром в кількості чотирьох діаметрів стосується конструкцій, в яких отвори наскрізні. Для глухих заглиблень або отворів значення критерію може бути зменшене до двох.

Практичне значення вирішення поставленої задачі надзвичайно велике, оскільки в машинобудуванні практично всіх напрямків використовується безліч деталей з отворами відносно малого діаметра, внутрішня поверхня яких є робочою і зносостійкість якої має принципове значення для підвищення ресурсу продукції, її працездатності та терміну нормальної роботи. Прикладами таких деталей можуть служити внутрішні поверхні пневмо- та гідроциліндрів, внутрішні поверхні матеріальних циліндрів термопластавтоматів, внутрішні поверхні плунжерних насосів паливної апаратури двигунів, стволів мінометів [3, 4] т. ін.

Застосовуються різні технології модифікації внутрішніх поверхонь подібних пар: цементация, пічне азотування, газове хромування тощо. Та усі вони мають ряд недоліків: крихкість поверхневих шарів, велика тривалість процесу насичення при пічному азотуванні (96 год), зміна розмірів і необхідність подальшої чистової обробки при цементации.

Всі зазначені недоліки відсутні при використанні технологічного процесу азотування в тліючому розряді. Деталь до модифікації обробляється в чистових розмірах, що суттєво відзначається на їх собівартості виготовлення. Процес на

порядок менш тривалий в порівнянні з пічним, а при застосуванні безводневих середовищ не тільки стає можливим забезпечення всіх вимог екологічної безпеки, але і знижуються показники крихкості [5].

Проте азотування в тліючому розряді при постійному струмові живлення не забезпечує обробку внутрішньої поверхні рівномірно по всій глибині, а при значних відношеннях довжини до діаметра внутрішня поверхня отвору віддалена від торців практично не азотується [6]. Тому розроблена технологія процесу безводневого азотування в тліючому розряді (БАТР) з циклічно-комутованим живленням [7, 8].

Аналіз останніх досліджень і публікацій, Проте азотування в тліючому розряді при постійному струмові живлення не забезпечує обробку внутрішньої поверхні рівномірно по всій глибині, а при значних відношеннях довжини до діаметра внутрішня поверхня отвору віддалена від торців практично не азотується [6]. Тому розроблена технологія процесу безводневого азотування в тліючому розряді (БАТР) з циклічно-комутованим живленням [7, 8].

Важливість для реального виробництва дослідження модифікації деталей з робочими поверхнями у вигляді отворів відносно малого діаметра проаналізована в [1, 9]. Очевидно, що переважна більшість випадків стосовно процесів азотування в тліючому розряді подібних об'єктів модифікації відповідає за своїм фундаментальними ознаками газорозрядним процесам з пустотілим катодом [2, 3]. Проте підлягає окремому аналізу вплив на характер процесів обробки співвідношень розмірів отворів та геометричних характеристик власне газового розряду.

Аналіз розмірних параметрів області катодного падіння (ОКП) напруги розряду [2, 6] свідчить про те, що розряд з пустотілим катодом характеризується малою протяжністю зони темного катодного простору (порівняно із звичайним аномальним розрядом), тому цей діапазон ОКП іони та електрони проходять майже без сутичок. Практично всі дослідники розряду з пустотілим катодом [2, 6, 9] вважають, що головною ознакою кваліфікації розряду з пустотілим катодом є умова хоча б часткового або повного перекриття зон негативного свічення від різних (протилежних) частин катода. Тільки у цьому випадку виникає ефект розряду з пустотілим катодом.

Формулювання цілей статті (постановка завдання). Аналіз процесів азотування в тліючому розряді отворів відносно малого діаметра в обов'язковому порядку повинен враховувати співвідношення розмірів цих отворів з геометричними параметрами ОКП.

Виклад основного матеріалу дослідження. В роботах [2, 6, 9] рахують, що електрони з відносно малим перетином сутичок рухаються як у вакуумі та їхня траєкторія не співпадає з силовими лініями поля. Іони ж навпаки, маючи значний перетин резонансної перезарядки, що пояснюється малими значеннями швидкості, особливо на початкових стадіях утворення іонів, рухаються внаслідок багаторазових сутичок по траєкторії, яка практично співпадає з силовими лініями поля. Відзначається, що імпульсний струм живлення розряду допускає значно більші значення сили струму. При цьому не спостерігаються переходи тліючого розряду в дуговий, оскільки реально тривалість розряду має значення порядку мікросекунд при частоті, що вимірюється кілогерцами. Аналіз розмірних параметрів області катодного падіння (ОКП) напруги розряду [2], свідчить про те,

що розряд з пустотілим катодом характеризується малою протяжністю зони темного катодного простору (порівняно із звичайним аномальним розрядом), тому цей діапазон ОКП іони та електрони проходять майже без сутичок. Практично всі дослідники розряду з пустотілим катодом [3, 9] вважають, що головною ознакою кваліфікації розряду з пустотілим катодом є умова хоча б часткового або повного перекриття зон негативного свічення від різних (протилежних) частин катода. Тільки у цьому випадку виникає ефект розряду з пустотілим катодом. В [9] відзначається, що існує тотожність між початком зростання струму розряду та моментом перекриття зон негативного свічення ОКП від двох протилежних частин катода. Очевидним з цього факту є висновок, що аналіз процесів азотування в тліючому розряді отворів відносно малого діаметра в обов'язковому порядку повинен враховувати співвідношення розмірів цих отворів з геометричними параметрами ОКП.

З викладеного аналізу джерел очевидна необхідність дослідження азотування отворів з відносно малим діаметром в тліючому розряді на основі саме теорії газорозрядних процесів. При цьому особливу роль відіграють характеристики розряду, рівно як і параметри потоків часток, котрі бомбардують поверхню.

Схема умовного розподілу напруги катодного падіння в околі отвору показана на рис. 1.

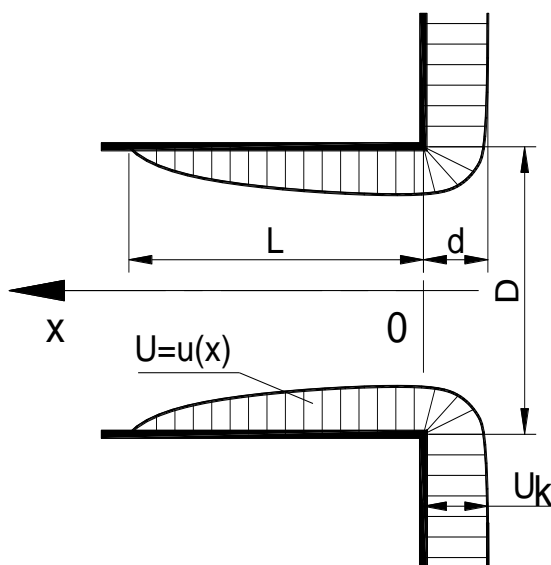


Рис. 1 Схема параметрів розряду в отворі.

Попередньо введемо наступні передумови: 1) стік часток, які формують падаючий потік в зоні торця отвору прямо пропорційний напруженості поля; 2) швидкість ковзання цих часток у стокові постійна для всіх ділянок з однаковою напруженістю поля; 3) потік часток на анодній межі ОКП прямо пропорційний напруженості поля на протилежній ділянці катода; 4) напруженість поля вздовж ділянки катода змінюється по певному монотонному закону; 5) міжелектродне падіння напруги по всій поверхні катода умовно однакове.

Для попередніх викладок прийнято лінійний закон зміни напруженості поля (рис.1) з можливим наступним корегуванням характеру зміни. Виходячи із

значених вище передумов, число часток, які стікають через площу отвору анодній межі ОКП за одиницю часу для компенсації часток, котрі у вигляді іонів та швидких нейтральних часток бомбардують поверхню:

$$n_{DS} = n V_S \cdot \frac{\pi D^2}{4}, \quad (1)$$

де n – концентрація часток в газовому середовищі в одиниці об'єму,

V_S – швидкість ковзання часток в газовому середовищі на анодній межі ОКП.

Очевидно, що швидкість ковзання у зв'язку з нерівномірним розподілом напруженості по поверхні стінок отвору буде неоднаковою. Тому середнє значення швидкості ковзання в зоні стінок отвору при лінійному законі розподілу напруженості поля:

$$\bar{V}_S = \frac{1}{2} V_S \cdot L/L = 0,5 V_S. \quad (2)$$

Кількість часток, що бомбардують стінки отвору:

$$n_{LS} = \bar{V}_S \cdot s_K = 0,5 V_S \pi D L n = n_{DS}, \quad (3)$$

де s_K – площа катода на стінках отвору.

Після підстановки вище визначених виразів довжина поверхні отвору, на якій спостерігається розряд при умовно лінійному законі розподілу напруженості поля дорівнює діаметру (координата середини розподілу знаходиться на відстані половини діаметра від торця отвору). Таким чином пояснюється той факт, що азотування отворів відносно великої довжини не може забезпечити модифікацію всієї поверхні отвору. В реальних умовах глибина модифікованої поверхні отвору може бути дещо більшою за рахунок ефекту звичайного газового азотування, проте результативність цієї складової незначна, оскільки в отворі відсутні умови для генерації атомарного азоту як потужного стимулятора процесу [10, 11], а молекулярні частки азоту, енергія яких відповідає рівню теплового руху, не сприяють азотуванню.

Прийнятий апріорі закон зміни напруги в осьовому напрямку отвору потребує уточнення, причому найбільш достовірний метод для вирішення подібної задачі – експериментальний, оскільки для аналітичного рішення потрібно найбільш ймовірно врахувати також обернений зв'язок між розподілом напруги та діаметром отвору, який, як показано вище в певній мірі лімітує інтенсивність потоку часток всередину отвору. При відомому законі розподілу напруги вздовж отвору середнє значення напруги:

$$\bar{U} = \frac{\int_0^{2D} U(x) dx}{2D}. \quad (4)$$

Межа аналізу закону розподілу напруги $2D$ прийнята з огляду на дані, котрі наведені в [2].

Перехід цих даних у відносні до діаметра отвору значення довжини та відносні стосовно напруги катодного падіння U_k значення розподілу напруги наведені в табл. 1, а графік взаємозалежностей цих величин – на рис. 2

(квадратами позначено експериментальні дані, суцільною лінією – апроксимація цих даних). При цьому рівнянням апроксимації має вид:

$$\frac{U(x)}{U_k} = (1+x)^{-4.5}$$

Таблиця 1.

Відносні параметри розподілу напруги вздовж отвору

x/D	0	0,05	0,08	0,13	0,16	0,21	0,26	0,52	0,42	0,56	0,7	1	1,286	2
$U(x)/D_k$	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,05	0,01	0,005	0

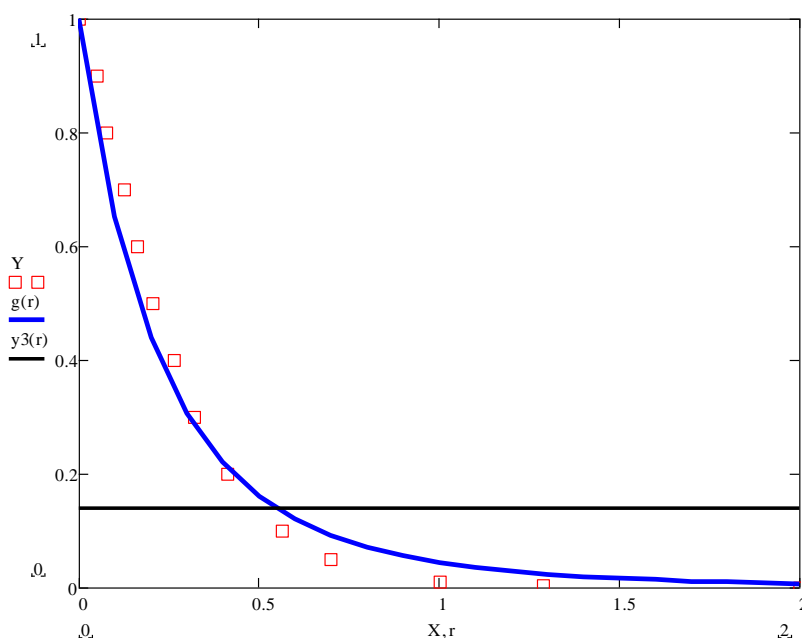


Рис. 2 Розподіл напруги вздовж отвору (у відносних параметрах табл. 1)

З рис. 2 знаходимо, що середньому значенню відносної напруги 0,14, відповідає відносна координата $x/D=0,55$, яка незначно відрізняється від визначеної вище.

Очевидно, що відповідно до зміни розподілу напруги впродовж отвору будуть змінюватись і інші характеристики розряду, насамперед напруженість поля та ширина ОКП. В свою чергу це вплине на всі субпроцеси модифікації аж до повного припинення її на певній відстані від торця отвору. Проте останній висновок не може бути однозначним по тій причині, що в певних випадках отворів великого діаметра спостерігається азотування по всій внутрішній поверхні, хоча відношення довжини отвору до діаметра значне. Подальші задачі можуть бути сформульованими, базуючись на класифікаційному аналізові ситуацій, що можуть мати місце при порівнянні розмірів отворів з параметрами розряду.

Очевидно, що вирішальну роль відіграватиме відношення діаметра отвору до ширини ОКП і по вказаному критерію можливі наступні ситуації.

1. Діаметр отвору менший подвійної ширини ОКП ($D < 2d$). У цьому випадку ОКП протилежних частин катода частково (в граничному випадку – повністю) перекриваються, схема відповідає умовам існування розряду з пустотілим катодом. Електрони при цьому перелітають через границю протилежної ОКП, входять в поле, яке гальмує їх рух аж до повної зупинки та повернення в «свою» область. У зв'язку з тим, що у напрямку до виходу з отвору напруга зростає, має місце осьова сила, яка рухає електрони в напрямку торця отвору. Електрони таким чином рухаються по коливальній затухаючій траєкторії до виходу з отвору. Оскільки загальний шлях при цьому зростає, то це приводить до збільшення числа сутічок з нейтральними молекулами та інтенсивності іонізації. Це і становить головну причину появи в центральній частині отвору більш інтенсивного свічення як характерної ознаки розряду з пустотілим катодом. Закон коливального руху електронів повинен суттєво залежати від осової координати вильоту його зі стінки отвору, оскільки падіння напруги, а відповідно напруженість поля, ширина ОКП залежать від відстані до торця отвору, враховуючи згаданий вище нерівномірний закон розподілу потенціалу вздовж отвору.

2. Діаметр отвору дорівнює подвійній ширині ОКП. Оскільки все рівно електрони за інерцією залітають в протилежну зону ОКП (найбільш ймовірно на величину середнього значення довжини вільного пробігу), то аналогічно попередньому спостерігатиметься ефект розряду з пустотілим катодом, хоча і в меншій мірі. Аналогічні ділянки мають місце і на рис. 3 в тих місцях, де перекриття зон ОКП тільки починається, тому аналітичний апарат можна використати той же, що і в попередньому випадку.

3. Діаметр отвору дещо більший подвоєної ширини ОКП. В центрі отвору залишається область, в якій поле не діє (площа цієї ділянки $0,25 \pi(D - 2\delta)^2$). Через цю центральну частину проходить постачання дифузантив пропорційно тій частині струму розряду, яка проходить через приторцьову частину поверхні (з врахуванням нерівномірності розподілу напруги в цій же приторцьовій частині отвору). Ймовірно може мати і місце обернена причина – гальмування постачання по законам, аналогічним гідродинаміці, що і визначає обмеженість внутрішньої області отвору, яка потенційно може азотуватись. Цей опір рухові часток через торець в якості основоположних факторів може мати як критичну швидкість дрейфу часток, так і сутічковий характер руху часток (вплив параметрів технологічного режиму на довжину вільного пробігу, ймовірності відбиття часток в певному напрямку після сутічки, резонансної перезарядки та інших субпроцесів).

4. Діаметр отвору значно перевищує подвоєну ширину ОКП. Через центральну частину отвору при допустимій критичній швидкості дрейфу часток газового середовища, яка визначається цілою низкою факторів, згаданих в п. 3, внутрішня порожнина модифікованого об'єкту постачається компонентами газу, які служать основою для утворення нітридів. Саме ця критична швидкість стоку лімітує площу стінок отвору, яка може азотуватись, оскільки для більш-менш рівномірного розподілу часток по всій внутрішній поверхні отвору їх кількість повинна бути достатньою для всіх субпроцесів азотування. Ймовірно існує критичне значення між співвідношеннями діаметра отвору до подвоєної ширини

ОКП та довжини отвору до його діаметра (можливий варіант – внутрішньої площі отвору до площі отвору без площі перетину ОКП), що потребує додаткового дослідження.

Висновки. 1. Проведений аналіз вказує на певні обмеження азотування отворів з відносно малим діаметром при використанні традиційних варіантів технології азотування в тліючому розряді. Оскільки навіть при малих значеннях відношення довжини отвору до його діаметра важко забезпечити наявність розряду по всій внутрішній поверхні отвору, то інтенсивність процесів утворення нітридів лімітується тільки параметрами газового азотування, продуктивність якого, як відомо, суттєво нижча у порівнянні з азотуванням із застосуванням газорозрядних процесів. Подальші дослідження повинні стосуватись кінетики руху часток газу в умовах дії нестационарного живлення. Саме в цьому випадку ймовірно попадання іонізованих часток поза межі приторцьової зони отвору, що може стати причиною інтенсифікації азотування внутрішніх поверхонь отвору.

2. Встановлено основні закономірності та умови азотування в тліючому розряді отворів відносно малого діаметра. Проаналізована можливість головних процесів азотування таких отворів при різних типах існування газового розряду. Запропоновані рекомендації стосовно параметрів електричного розряду в газі для забезпечення ефективності процесу модифікації внутрішніх поверхонь отворів відносно малого діаметра. Наведені основні закономірності, які характеризують технологічні особливості азотування внутрішньої поверхні отворів.

Список літератури

1. Пастух І. М., Люховець В. В., Курской В. С. Особливості азотування в тліючому розряді з нестационарним живленням отворів з відносно малим діаметром // Вісник ХНУ, №3, 2013, Технічні науки. С. 195-199.
2. Москалев Б. И. Разряд с полым катодом / Б. И. Москалев // М.: Энергия, 1969. 184с.
3. Kwon S. C., Lee G. H., Yoo M. C. A comparative study between pulsed and D. C. ion nitriding behavior in specimens with blind holes // 1st International conference of ion nitriding.. Cleveland, Ohio. – 1986. – P. 77-81
4. М.С. Стечишин, В.В.Люховець, Н.М.Стечишина, Д.В.Здоренко. Вплив технологічних параметрів азотування в тліючому розряді на міцність стволів мінометів. Матеріали Міжнародної ІV науково-практичної інтернет-конференції “Актуальні проблеми бойового застосування та експлуатації і ремонту зразків озброєння та військової техніки”. Вінниця. 2025. -4с.
5. Каплун В. Г., Каплун В. Г. Ионное азотирование в безводородных средах : монография. Хмельницкий: ХНУ, 2015. 315 с.
6. Пастух І. М. Енергетичний аналіз моделей азотування в тліючому розряді. Вісник Хмельницького національного університету. Хмельницький, 2006. № 5. С. 7 - 14.
7. Пастух І. М., Лук'янюк М. В. Азотування в циклічно-комутованому розряді: початкові положення. Вісник ХНУ, № 6, 2008, Технічні науки. С. 38 - 41.
8. Курской В. С., Люховець В. В., Здибель О. С. Апаратна реалізація живлення циклічно-комутованого розряду в установках азотування. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. 2017. № 3. С. 27–31.

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

10. Kolbel J. Die Nitridschichtbildung beider Glimmnitrierung. Forschungsberichte des Landes Nordrhein. Westfalen. 1995, № 1555. P. 1 - 19.

11. Пастух І. М., Люховець В. В. Ефект накачування іонів азоту в отвори відносно малого діаметра. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. 2016. № 3. С. 138–146.

Отримано: 5 лютого 2026

Прийнято: 7 березня 2026

Опубліковано: 9 квітня 2026

Здоренко Денис Вікторович – магістр кафедри галузевого машинобудування та агроінженерії Хмельницького національного університету, вул. Інститутська 11, м. Хмельницький, Україна, 29016, e-mail: d.zdorenko@bgv.com. <http://orcid.org/0009-0004-3872-3797>.

Стечишин Мирослав Степанович – доктор технічних наук, професор кафедри галузевого машинобудування та агроінженерії Хмельницького національного університету, вул. Інститутська 11, м. Хмельницький, Україна, 29016, e-mail: miro011951@gmail.com. <http://orcid.org/0000-0001-5780-2790>.

Люховець Володимир Васильович – кандидат технічних наук, доцент кафедри галузевого машинобудування та агроінженерії Хмельницького національного університету, вул. Інститутська 11, м. Хмельницький, Україна, 29016, e-mail: vladimirlider76@gmail.com. <http://orcid.org/0000-0002-6978-7820>.

Лук'янюк Микола Васильович – кандидат технічних наук, доцент кафедри галузевого машинобудування та агроінженерії Хмельницького національного університету, вул. Інститутська 11, м. Хмельницький, Україна, 29016, e-mail: adm_mv@ukr.net. <http://orcid.org/0000-0003-1641-8068>.

D.V. ZDORENKO, M.S. STECHISHYN, V.V. LIUKHOVETS, M.V. LUK'YANIUK

STRENGTHENING OF INTERNAL SURFACES OF HOLES WITH RELATIVELY SMALL DIAMETERS

Increasing the wear resistance of the internal surfaces of small holes, which include holes with a ratio of the internal diameter to the length (depth) of the hole exceeding the value of four for through holes and two for blind holes, is of important national economic importance. Almost all kinematic friction pairs with translational motion in machine building (internal surfaces of pneumatic and hydraulic cylinders, surfaces of material cylinders of thermoplastic automatic machines, surfaces of plunger pumps of fuel equipment of engines, barrels of mortars, guns, etc.) belong to this category of holes. One of the effective ways to increase the wear resistance of such holes is hydrogen-free glow discharge nitriding (BAT). However, glow discharge nitriding with constant current supply does not ensure uniform treatment of the internal surface over the entire depth, and with significant length-to-diameter ratios, the internal surface of the hole remote from the ends is practically not nitrided. Therefore, the technology of the hydrogen-free nitriding process in a glow discharge (GBN) with cyclically switched power supply (CSPS) has been developed.

The main regularities and conditions of nitriding in a glow discharge of relatively small diameter holes are established. The possibility of the main processes of nitriding of such holes under different types of gas discharge is analyzed. Recommendations are offered regarding the parameters of the energy discharge in the gas to ensure the efficiency of the process of modifying the internal surfaces of relatively small diameter holes. The main regularities that characterize the technological features of nitriding of the internal surface of holes are given.

Keywords: wear resistance, nitriding, relatively small diameter holes, discharge energy parameters.

References

1. Pastukh I. M., Liukhovets V. V., Kurskoi V. S. Osoblyvosti azotuvannia v tliiuchomu rozriadi z nestatsionarnym zhyvleniam otvoriv z vidnosno malym diametrom // Visnyk KhNU, №3, 2013, Tekhnichni nauky. S. 195-199.
2. Moskalev B. Y. Razriad s polym katodom / B. Y. Moskalev // M.: Enerhyia, 1969. 184s.
3. Kwon S. C., Lee G. H., Yoo M. C. A comparative study between pulsed and D. C. ion nitriding behavior in specimens with blind holes // 1st International conference of ion nitriding.. Cleveland, Ohio. – 1986. – P. 77-81
4. M.S. Stechishyn, V.V.Liukhovets, N.M.Stechyshyna, D.V.Zdorenko. Vplyv tekhnolohichnykh parametriv azotuvannia v tliiuchomu rozriadi na mitsnist stvoliv minometiv. Materialy Mizhnarodnoi IV naukovo-praktychnoi internet-konferentsii "Aktualni problemy boiovoho zastosuvannia ta ekspluatatsii i remontu zrazkiv ozbroiennia ta viiskovoi tekhniki". Vinnytsia. 2025. -4s.
5. Kaplun V. H., Kaplun V. H. Yonnoe azotyrovanye v bezvodородnykh sredakh : monohrafiya. Khmelnytskyi: KhNU, 2015. 315 s.
6. Pastukh I. M. Enerhetychni analiz modelei azotuvannia v tliiuchomu rozriadi. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Khmelnytskyi, 2006. № 5. S. 7 - 14.
7. Pastukh I. M., Lukianiuk M. V. Azotuvannia v tsyklichno-komutovanomu rozriadi: pochatkovi polozhennia. Visnyk KhNU, № 6, 2008, Tekhnichni nauky. S. 38 - 41.
8. Kurskoi V. S., Liukhovets V. V., Zdybel O. S. Aparatna realizatsiia zhyvlennia tsyklichno-komutovanoho rozriadu v ustanovkakh azotuvannia. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky. 2017. № 3. S. 27–31.
9. Pastukh Y. M. Teoriya y praktyka bezvodородnoho azotyrovannia v tleiushchm razriadi / Y. M. Pastukh. – Kh. : Natsyonalnyi nauchnyi tsentr «Kharkovskiy fizyko-tekhnicheskyi ynstitut», 2006. – 364 s.
10. Kolbel J. Die Nitridschitbildung beider Glimmnitrierung. Forschungsberichte des Landes Nordrhein. Westfalen. 1995, № 1555. P. 1 - 19.

11. Pastukh I. M., Liukhovets V. V. Efekt nakachuvannia ioniv azotu v otvory vidnosno maloho diametra. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky. 2016. № 3. S. 138–146.

Zdorenko Denys Viktorovych – Master of Science, Department of Industrial Mechanical Engineering and Agricultural Engineering, Khmelnytskyi National University, 11 Instytutska St., Khmelnytskyi, Ukraine, 29016, e-mail: d.zdorenko@bgv.com. <http://orcid.org/0009-0004-3872-3797>.

Stechyshyn Myroslav Stepanovych – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Industrial Mechanical Engineering and Agricultural Engineering, Khmelnytskyi National University, 11 Instytutska St., Khmelnytskyi, Ukraine, 29016, e-mail: miro011951@gmail.com. <http://orcid.org/0000-0001-5780-2790>.

Liukhovets Volodymyr Vasyliovych – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Industrial Mechanical Engineering and Agricultural Engineering, Khmelnytskyi National University, 11 Instytutska St., Khmelnytskyi, Ukraine, 29016, e-mail: vladimirlider76@gmail.com. <http://orcid.org/0000-0002-6978-7820>.

Luk'yaniuk Mykola Vasyliovych – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Industrial Mechanical Engineering and Agricultural Engineering, Khmelnytskyi National University, 11 Instytutska St., Khmelnytskyi, Ukraine, 29016, e-mail: adm_mv@ukr.net. <http://orcid.org/0000-0003-1641-8068>.