

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ЛЮХОВЕЦЬ ВОЛОДИМИР ВАСИЛЬОВИЧ

УДК 620.193.16

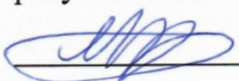
ДИСЕРТАЦІЯ
ЗНОСОСТІЙКІСТЬ КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ ПРИ АЗОТУВАННІ В
ЦИКЛІЧНО-КОМУТОВАНОМУ РОЗРЯДІ

Спеціальність 05.02.04 – Тертя та зношування в машинах

Галузь знань 13 – механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

 В. В. ЛЮХОВЕЦЬ

Науковий керівник : Стечишин Мирослав Степанович,
доктор технічних наук, професор

Хмельницький – 2024

АНОТАЦІЯ

Люховець В. В. Зносостійкість конструкційних сталей при азотуванні в циклічно-комутованому розряді. – Кваліфікаційна наукова робота на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.02.04 “Тертя та зношування в машинах” (13 – Механічна інженерія). – Хмельницький національний університет, м. Хмельницький, 2024.

Фізико-технічні процеси обробки поверхонь металів з використанням в якості інтенсифікатора електричного розряду в газовому середовищі відносяться до найменш енергоємних та універсальних за призначенням і використанням. Проте широкому впровадженню процесів БАТР перешкоджає відсутність загальних теоретичних основ, за яких стали б можливими оптимізація, ефективне керування та проектування технологічних процесів.

Метою досліджень є розвиток теоретичних і розробка практичних основ підвищення зносостійкості металів безводневим азотуванням в циклічно-комутованому розряді, а також встановлення основних закономірностей та умов азотування довгомірних отворів для забезпечення їх зносостійкості.

Аналіз джерел вказує на те, що всі відомі моделі процесу в теоретичному плані в значній мірі носять гіпотетичний характер, оскільки в повній мірі не підтверджуються експериментально. Цілий ряд варіантів реалізації вакуумно-дифузійних газорозрядних технологій взагалі не можуть бути пояснені на основі згаданих моделей. При їх формуванні практично не використовується аналітичний апарат, ігнорується необхідність пояснення деяких явищ, які принципово впливають на прийнятність теорії, відсутні критерії, а звідси і методи керування процесом з метою досягнення запланованих та необхідних для експлуатації показників модифікації. Наявність об’ємної бази технологічних даних, яка не має під собою узагальнюючої теорії, не тільки не сприяє оптимізації технологічного процесу, але навпаки часто призводить до протилежних наслідків, оскільки дані для однотипних умов нерідко вступають

в протиріччя між собою.

В роботі розвинуто положення теорії дифузійних газорозрядних процесів модифікації поверхні металів, які базуються на пріоритеті енергетичних підходів. З таких позицій теоретичні основи досліджуваних технологій не розглядались жодним з попередніх дослідників, але якраз подібні підходи відкривають абсолютно нові можливості розкриття тонкого механізму явищ, котрі мають місце при реалізації процесів даного типу, і далі – розробки практичних аспектів використання технології.

Концептуальною основою теоретичних підходів, які використані в роботі є енергетична модель групи досліджуваних процесів, суть якої полягає в тому, що в певних конкретних умовах у першу чергу реалізуються ті з елементарних субпроцесів, котрі енергетично найбільш вигідні та ймовірні з огляду на рівні енергії чинників, що стимулюють ці субпроцеси. Для реалізації вказаних положень послідовно досліджено формування енергетичних характеристик стимуляторів процесу, насамперед, елементів потоків, які взаємодіють з поверхнею. При цьому за основу прийнято фактор енергетичного впливу потоків на поверхню як з позицій кількості, так і енергетичних рівнів часток. Саме комбінація цих характеристик має вирішальне значення для формування характеристик основних елементарних процесів.

Значний науковий інтерес з перспективою широкого практичного використання становить задача застосування живлення, відмінного від безперервного. Ці питання теоретично теж ніким не досліджувались. В той же час реально всі процеси вакуумно-дифузійної газорозрядної модифікації поверхні металів проходять в нестаціонарних електричних полях, оскільки забезпечити живлення абсолютно постійним струмом практично неможливо. Зміна характеристик поля призводить до першочергового проходження одного з декількох конкуруючих субпроцесів, які забезпечують або утворення дифундидів на поверхні, або їх розпорошення, або дифузію азоту в глибину поверхневого шару. Саме з допомогою керованої форми електричних показників поля в розрядній камері можлива нейтралізація в необхідній мірі

запірного ефекту утворення на поверхні дифундидів, що дозволить не тільки підвищити ефективність модифікації, але й скеровано забезпечувати необхідні її кінцеві результати, в тому числі і структуру поверхневого модифікованого шару.

Виходячи з концепції енергетичної моделі, теоретично обґрунтовано та проведено експериментальну перевірку впливу форми керуючого сигналу на ефективність процесів модифікації, оскільки цей фактор суттєво впливає на трибологічні характеристики азотованих шарів.

Трибологічні дослідження проводились на основі положень фізико-хімічної механіки матеріалів, розроблених Г.В. Карпенко, Г.О. Прейсом, А. Евансом і К. Пріс, Ф. Хеммітом, а також теорії структурного пристосування поверхневих азотованих шарів при терті Костецького Б. І. та механо-хімічної моделі процесу тертя і зношування Шевелі В. В. і Олександренка В. П.

В результаті реалізації досліджень отримано, на положеннях фізики газорозрядних процесів, принципово нові наукові результати, котрі пов'язані з вирішенням практичних задач. Узагальнені теоретичні положення енергетичної моделі процесів досліджуваного типу дозволяють сформувати систему аналітичних критеріїв, розробити принципово нові методики проектування та автоматизованого управління технологічними процесами цієї групи. Викладені вище основні концептуальні підходи в порівнянні з відомими публікаціями кваліфікують їх як принципово нові у світовій науковій практиці.

Теоретичні положення, розроблені в роботі, передбачається використати не тільки в практиці застосування технологічних процесів досліджуваного типу, але у підготовці фахівців при викладанні навчальних курсів принципово нових напрямків теорії та практики газорозрядних процесів обробки поверхні металів. З теоретичних результатів, котрі одержані в ході виконання досліджень, випливають абсолютно нові, інноваційні методики та алгоритми керування процесом.

Враховуючи багатогалузевий характер можливого використання означеної технології модифікації, теоретичні дослідження процесу особливо

актуальні для багатьох галузей промисловості України. Наявність напрацювань у вибраному напрямку направлено на подальше зростання виробництва в Україні високотехнологічного устаткування та продукції.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

- Вперше запропоновано ввести критерій концентрації поля, що дозволило розв'язати аналітичну задачу встановлення взаємозв'язків геометрії поверхні та параметрів електричного поля, а також їх вплив на зносостійкість азотованих в циклічно-комутованому розряді поверхонь сталей.

- Вперше отримано аналітичний вираз для визначення середньої швидкості електронів в тліючому розряді, для цього використано модель базової швидкості, яку має електрон, що пролетів без зіткнень від катода до певної точки області катодного падіння.

- Виявлено явище-ефект релаксаційних процесів в приповерхневих шарах сталей, азотованих в циклічно-комутованому розряді. Релаксують структури та напруження, що утворюються в поверхневих шарах цих матеріалів під дією тиску і температури в зоні тертя.

- Встановлено, що підвищення майже в 2 рази зносостійкості поверхонь довгомірних отворів сталевих деталей, азотованих в циклічно-комутованому розряді, зумовлено ефектом накачування іонів азоту в отвір і, як наслідок, рівномірного розподілу поверхневої мікротвердості по усій довжині.

- Отримала подальший розвиток методологія підвищення зносостійкості сталей безводневим азотуванням в циклічно-комутованому розряді, що є наслідком зміни співвідношення структурних складових фазового складу поверхневого модифікованого шару.

- Підвищення зносостійкості сталевих деталей вузлів тертя в 1,35...1,75 разів азотуванням в циклічно-комутованому розряді зумовлена тим, що періодична зміна полярності електродів камери сприяє процесам очистки поверхні від адсорбційного шару, що позитивно впливає на характер насичення поверхні азотом (градієнт зміни мікротвердості по глибині азотованого шару знижується від 1,7 до 3,5 рази).

Практичне значення одержаних результатів:

- Застосування запропонованого комплексу апаратури в якості ключа, при азотуванні в тліючому розряді з нестационарним живленням, дозволило реалізувати весь спектр робочих струмів та напруг, що відкриває шлях до практичного використання нестационарного розряду для модифікації поверхонь металевих сплавів та підвищення їх зносостійкості.

- Дослідження зносостійкості зразків в режимі сухого тертя забезпечує суттєво більшу продуктивність проведення експериментів. На відміну, від експериментів з граничним тертям, сухе тертя може застосовуватись для різних сталей, з однаковим значенням тиску в зоні контакту, що дозволяє полегшити порівнювання результатів та сприяє об'єктивності висновків щодо ефективності різних процесів модифікації поверхні. За результатами проведених експериментальних досліджень таким компромісним тиском може бути значення в 16 МПа. Встановлений ефект релаксаційних перетворень поверхонь тертя, які були азотовані в циклічно-комутованому розряді, вимагає рекомендувати для забезпечення адекватності та співставлення результатів проводити дослідження зносостійкості таких поверхонь протягом однієї безперервної зміни.

- При БАТР з живленням струмом промислової частоти здешевлюється установка для реалізації процесу. (патент України № 112983). Розроблена технологія впроваджена для зміцнення зубчастих обойм, зубчастих втулок, вал-шестерень, коліс зубчастих на ТОВ «МАГМА», м. Маріуполь, що показала збільшення зносостійкості від 1,35 до 1,85 порівняно із зміцненням струмом високої частоти.

- Можливість комутації форми імпульсів, зміни їх полярності привела до розробки цілої низки способів і технологій азотування (патенти України, № 113576, №115969, №112984, №112613 та №111949) направлених на підвищення зносостійкості виробів з металів: перехідних втулок з внутрішніми і зовнішніми конічними різьбами; шнеків термопласт-автоматів; впроваджено на ТОВ «Завод

бурового обладнання», м. Коростень, на ПП «Юркон», на Хмельницькій маслосирбазі і об'єднанні «Хмельпиво».

Результати теоретичних та експериментальних досліджень роботи використовуються в навчальному процесі ХНУ на кафедрі галузевого машинобудування та агроінженерії при викладанні дисциплін «Прогресивні технології зміцнення», «Трактори і автомобілі».

Ключові слова: зносостійкість, підвищення трибологічних характеристик, сухе тертя, конструкційні сталі, азотування, циклічно-комутований розряд, математичне моделювання.

Основні результати дисертаційних досліджень опубліковано в 28 наукових працях.

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Монографії

1. Пастух И. М., Соколова Г. Н., Люховец В. В., Здыбель А. С. Теоретические основы процесса безводородного азотирования в тлеющем разряде. *Перспективные тренды развития науки: техника и технологии* : коллективная монография. Одесса: Куприенко С. В., 2016. С. 123–135. (Проаналізовані переваги і недоліки процесів азотування з ЦКР).

2. Skyba M., Stechyshyn M., Stechyshyna N., Martynyuk A., Lyukhovets V. Physico-chemical and tribological properties of nitrogenated layers of structural steel. *Actual problems of modern science: Collective monograph*. Bydgoszcz, Poland, 2021. P. 488–499. (Досліджено зносостійкість азотованих шарів на сталях 45 і 38Х2МЮА).

У виданнях, що внесені до переліку міжнародних наукометричних баз

3. Pastukh I. M., Lyukhovets' V. V. Average Velocity of Electrons in the Cathode Fall Region during Glow-Discharge Nitriding. *Technical Physics*. 2017, Vol. 62, №4, pp. 527–536. ISSN 1063-7842. Scopus. (Проведена експериментальна перевірка розрахункових значень середньої швидкості електронів).

4. Stechyshyn M.S., Stechyshyna N. M., Dykha O. V., Martynyuk A. V., Liukhovets V. V., Lukyanyuk M. V. Corrosion-mechanical wear of nitrided steels in acidic medium UDC 620.194. *Materials Science: Springer*. USA, 2023. № 58 (5). P. 597–601. (*Проаналізовано вплив режимів БАТР на КМЗ конструкційних сталей*).

У фахових виданнях

5. Каплун П. В., Люховець В. В., Глушак Г. С. Дослідження трибологічних характеристик та довговічності конструктивних елементів з дифузійними і комбінованими покриттями. *Вісник Технологічного університету Поділля: Технічні науки*. Хмельницький, 2000. Ч. 1. №5. С. 85–87. (*Знаходження і аналіз трибологічних характеристик отриманих покриттів*).

6. Пастух І. М., Люховець В. В., Лук'янюк М. В. Аналіз процесів азотування в тліючому розряді отворів з відносно малим діаметром. *Вісник Хмельницького національного університету*. Технічні науки. Хмельницький, 2014. № 5. С. 6–9. (*Для аналізу запропоновано лінійний закон розподілу напруженості електричного поля*).

7. Пастух І. М., Люховець В. В. Внутрішні локальні винятки поверхні, азотованої в тліючому розряді. *Вісник Хмельницького національного університету*. Технічні науки. Хмельницький, 2015. № 6. С. 12–15. (*Запропонована схема внутрішнього локального винятку та лінійного розподілу поперечних та повздовжніх полів розподілу напруження і параболічний закон падіння напруги*).

8. Пастух І. М., Люховець В. В. Ефект накачування іонів азоту в отвори відносно малого діаметра. *Вісник Хмельницького національного університету*. Технічні науки. Хмельницький, 2016. № 3. С. 138–146. (*Експериментально перевірені параметри технологічного режиму з ЦКР для азотування отворів*).

9. Пастух І. М., Соколова Г. М., Люховець В. В. Обґрунтування азотування в тліючому розряді з живленням змінним струмом. *Вісник Хмельницького національного університету*. Технічні науки. Хмельницький,

2017. № 1. С. 7–9. (*Проведено аналіз переваг і недоліків АТР з живленням змінним струмом*).

10. Курской В. С., Люховець В. В., Здибель О. С. Апаратна реалізація живлення циклічно-комутованого розряду в установках азотування. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. Хмельницький*, 2017. № 3. С. 27–31. (*Запропонована схема послідовного з'єднання ключових елементів для комутування*).

11. Стечишин М. С., Олександренко В. П., Лук'янюк М. В., Люховець В. В., Лук'янюк М. М. Технологія азотування в тліючому розряді сталей різального комплексу м'ясоподрібнювальних машин. *Проблеми трибології. Хмельницький*, 2017. № 2. С. 50–54. (*Визначені трибологічні характеристики азотованих сталей*).

12. Скиба М. Є., Стечишина Н. М., Медведчук Н. К., Стечишин М. С., Люховець В. В. Безводне азотування у тліючому розряді як метод підвищення зносостійкості конструкційних сталей. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. Хмельницький*, 2019. № 5. С. 7–12. (*Дослідження та аналіз впливу процесів БАТР на зносостійкість металів*).

13. Стечишина Н. М., Люховець В. В., Стечишин М. С. Вплив технологічних параметрів карбоазотування на зносостійкість сталі 45. *Проблеми тертя та зношування. Київ: НАУ*, 2019, №3(84). С.76-82. (*Досліджена зносостійкість карбоазотованої сталі 45*).

14. Stechyshyn M.S., Lyukhovets V. V., Stechyshyna N. M., Tsepenyuk M. I. Wear resistance of structural steels nitroded in cyclic-commuted discharge at limit modes of friction. *Problems of Tribology. Khmelnytskyi: KHNU*, 2022. V. 27. №3/105. P. 27-33. (*Проведення експериментальних випробувань при граничних режимах тертя*).

Патенти на винаходи

15. Спосіб підвищення корозійної стійкості металевих поверхонь: пат. 111949 Україна: МПК С 23 С 8/00, С 23 С 8/48, С 23 С 8/68. № u 2016 06058 ;

заявл. 03.06.2016; опубл. 25.11.2016, Бюл. № 22. 3 с. (*Запропоновано проведення карбонітрування*).

16. Спосіб азотування в тліючому розряді оберненої полярності з періодичною очисткою поверхні: пат. 112613 Україна: МПК С 23 С 8/36, С 23 С 8/48. № у 2016 06139 ; заявл. 06.06.2016 ; опубл. 26.12.2016, Бюл. № 24. 3 с. (*Запропонована періодична очистка поверхні*).

17. Спосіб азотування в тліючому розряді з періодичною очисткою поверхні: пат. 112984 Україна: МПК С 23 С 8/36, С 23 С 8/24. № у 2016 05934 ; заявл. 01.06.2016 ; опубл. 10.01.2017, Бюл. №1. 3 с. (*Знайдено період тривалості очистки*).

18. Спосіб азотування в тліючому розряді з живленням змінним струмом: пат. 112983 Україна: МПК С 23 С 8/36, С 23 С 8/48. № у 2016 05929; заявл. 01.06.2016; опубл. 10.01.2017, Бюл. №1. 3 с. (*Проведена експериментальна перевірка*).

19. Спосіб азотування азотоактивних металів в тліючому розряді з періодичною очисткою поверхні : пат. 113576 Україна: МПК С 23 С 8/36, С 23 С 8/48. № у 2016 06403; заявл. 13.06.2016 ; опубл. 10.02.2017, Бюл. №3. 3 с. (*Запропоновано подачу короткочасного імпульсу напруги та визначено її величину*).

20. Спосіб азотування в тліючому розряді з оберненою полярністю: пат. 113569 Україна: МПК С 23 С 8/36, С 23 С 8/48. № у 2016 06036; заявл. 03.06.2016; опубл. 10.02.2017, Бюл. № 3. 3 с. (*Проведені експериментальні дослідження*).

21. Спосіб азотування в тліючому розряді з оптимізацією технологічного режиму: пат. 115969 Україна: МПК С 23 С 8/36, С 23 С 8/48. № у 2016 06133; заявл. 06.06.2016; опубл. 10.05.2017, Бюл. №9. 3 с. (*Проаналізовано вплив фазових структурних складових азотованого шару на трибологічні характеристики сталей*).

22. Пристрій для азотування в тліючому розряді з живленням змінним струмом : пат. 118327 Україна: МПК С 23 С 8/36, С 23 С 8/48. № у 2016 06460;

заявл. 13.06.2016; опубл. 10.08.2017, Бюл. № 15. 3 с. (*Запропоновано включити в пристрій блок автоматичного відключення напруги*).

Апробація матеріалів дисертації

23. Люховець В. В. Перспективи азотування малих отворів у тліючому розряді з нестаціонарним живленням. *11-й Міжнародний симпозиум українських інженерів-механіків у Львові: тези доповідей*. Львів: КІНПАТРИ ЛТД, 2013. С. 195.

24. Люховець В. В. Азотування в тліючому розряді деталей з малими отворами із застосуванням змінного живлення. *Ольвійський форум - 2014: стратегії країн Причорноморського регіону в геополітичному просторі: тези*. Миколаїв: Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2014. С. 52–53.

25. Люховець В. В. Процеси азотування в тліючому розряді отворів з відносно малим діаметром. *12-й Міжнародний симпозиум українських інженерів-механіків у Львові: тези доповідей*. Львів: КІНПАТРИ ЛТД, 2015. С. 90–91.

26. Люховець В. В. Азотування в тліючому розряді отворів малого діаметра. *Збірка тез доповідей восьмої міжнародної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Перспективні технології на основі новітніх фізико-матеріалознавчих досліджень та комп'ютерного конструювання матеріалів»*. Київ, 2015. С. 45.

27. Курской В. С., Курская В. О., Люховець В. В. Зміцнення робочих поверхонь сільськогосподарського знаряддя методом азотування в тліючому розряді. *Наукові здобутки у вирішенні актуальних проблем виробництва та переробки сировини, стандартизації і безпеки продовольства : Збірник праць за підсумками VIII Міжнародної науково-практичної конференції вчених, аспірантів і студентів (м. Київ, 17 квітня 2019 р. – 18 квітня 2019 р.)*. Київ: РВВ НУБіП України, 2019. С. 189–191. (*Проведення експериментальних та експлуатаційних випробувань*).

28. Стечишин М. С., Люховець В. В., Здоренко Д. В., Курской В. В. Азотування довгомірних отворів. *16-й Міжнародний симпозиум українських*

інженерів-механіків у Львові : Матеріали симпозиуму. Львів: КІНПАТРИ ЛТД, 2023.С. 68-69. (Теоретичні і експериментальні дослідження азотування отворів).

ANNOTATION

Lyukhovets V. V. - Wear resistance of structural steels during nitriding in a cyclically switched discharge. - Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for obtaining the scientific degree of candidate of technical sciences (doctor of philosophy) on the specialty 05.02.04 "Friction and wear in machines" (13 - Mechanical engineering). – Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, 2024.

Physico-technical processes of processing metal surfaces with the use of electric discharge as an intensifier in a gas medium are among the least energy-intensive and universal in terms of purpose and use. However, the lack of general theoretical foundations, which would enable optimization, effective management and design of technological processes, hinders the widespread implementation of BATR processes.

The purpose of the research is the development of theoretical and practical foundations of increasing the wear resistance of metals by anhydrous nitriding in a cyclically switched discharge, as well as establishing the basic laws and conditions of nitriding of long holes to ensure their wear resistance.

The analysis of sources indicates that all known models of the process are theoretically largely hypothetical, as they are not fully confirmed experimentally. A number of options for the implementation of vacuum-diffusion gas-discharge technologies cannot be explained at all on the basis of the mentioned models. Analytical apparatus is practically not used in their formation, the need to explain some phenomena that fundamentally affect the acceptability of the theory is ignored, there are no criteria, and hence the methods of managing the process in order to achieve the planned and necessary for operation modification indicators. The presence of a voluminous database of technological data, which does not have a

generalizing theory, not only does not contribute to the optimization of the technological process, but on the contrary often leads to the opposite consequences, since data for the same type of conditions often contradict each other.

The paper develops the position of the theory of diffusion gas-discharge processes of metal surface modification, which are based on the priority of energy approaches. From such positions, the theoretical foundations of the researched technologies were not considered by any of the previous researchers, but precisely such approaches open completely new possibilities for revealing the subtle mechanism of phenomena that take place during the implementation of processes of this type, and further - the development of practical aspects of the use of technology.

The conceptual basis of the theoretical approaches used in the work is the energy model of the group of researched processes, the essence of which is that under certain specific conditions those of the elementary subprocesses are implemented first of all, which are energetically most advantageous and probable in view of the energy levels of the factors that stimulate these subprocesses. To implement these provisions, the formation of energy characteristics of process stimulators, primarily of flow elements that interact with the surface, has been consistently studied. At the same time, the factor of energy impact of flows on the surface is taken as a basis, both in terms of the number and energy levels of particles. It is the combination of these characteristics that is of decisive importance for the formation of the characteristics of the main elementary processes.

Significant scientific interest with the prospect of wide practical use is the problem of applying power other than continuous. These issues have also not been studied theoretically by anyone. At the same time, in reality, all processes of vacuum-diffusion gas-discharge modification of the surface of metals take place in non-stationary electric fields, since it is practically impossible to provide power with an absolutely constant current. A change in the characteristics of the field leads to the priority passage of one of several competing sub-processes, which ensure either the formation of diffuses on the surface, or their dispersion, or the diffusion of nitrogen into the depth of the surface layer. It is with the help of the controlled form of the

electric field indicators in the discharge chamber that it is possible to neutralize to the required extent the blocking effect of the formation of diffundides on the surface, which will allow not only to increase the efficiency of the modification, but also to provide the necessary final results, including the structure of the surface modified layer. Based on the concept of the energy model, the influence of the shape of the control signal on the efficiency of the modification processes was theoretically substantiated and experimentally verified, since this factor significantly affects the tribological characteristics of nitrided layers.

Tribological studies were carried out on the basis of the provisions of physico-chemical mechanics of materials developed by G. V. Karpenko, G. O. Preis, A. Evans and K. Preis, F. Hammit, as well as the theory of structural adjustment of surface nitrided layers during friction by B. I. Kostecki and the mechano-chemical model of the friction and wear process by V. V. Sheveli and V. P. Oleksandrenko.

As a result of the research, fundamentally new scientific results related to the solution of practical problems were obtained on the principles of the physics of gas discharge processes. Generalized theoretical provisions of the energy model of processes of the researched type make it possible to form a system of analytical criteria, to develop fundamentally new methods of designing and automated control of technological processes of this group. The main conceptual approaches described above, in comparison with known publications, qualify them as particularly new in world scientific practice.

The theoretical provisions developed in the work are intended to be used not only in the practice of applying technological processes of the type under study, but also in the training of specialists when teaching training courses in fundamentally new areas of the theory and practice of gas-discharge processes of metal surface treatment. From the theoretical results obtained in the course of research, completely new, innovative methods and algorithms of process control emerge. Taking into account the multi-sectoral nature of the possible use of the specified modification technology, theoretical studies of the process are especially relevant for many branches of industry in Ukraine.

The presence of developments in the chosen direction is aimed at the further growth of the production of high-tech equipment and products in Ukraine.

The scientific novelty of the obtained results is as follows:

- For the first time, it was proposed to introduce the field concentration criterion, which made it possible to solve the analytical problem of establishing the relationships between the surface geometry and electric field parameters, as well as their influence on the wear resistance of steel surfaces nitrided in a cyclically switched discharge.
- For the first time, an analytical expression was obtained for determining the average speed of electrons in a glow discharge; for this, a model of the basic speed of an electron that flew without collisions from the cathode to a certain point of the cathode fall region was used.
- The phenomenon-effect of relaxation processes in the near-surface layers of steels nitrided in a cyclically switched discharge was revealed. Relax the structures and stresses formed in the surface layers of these materials under the influence of pressure and temperature in the friction zone.
- It was established that the wear resistance of the surfaces of long holes of steel parts, nitrided in a cyclically switched discharge, is increased by almost 2 times, due to the effect of pumping nitrogen ions into the hole and, as a result, the uniform distribution of surface microhardness along the entire length
- The methodology of increasing the wear resistance of steels by anhydrous nitriding in a cyclically switched discharge, which is a consequence of changing the ratio of the structural components of the phase composition of the surface modified layer, received further development.
- The increase in the wear resistance of steel parts of friction nodes by 1.35...1.75 times by nitriding in a cyclically switched discharge is due to the fact that the periodic change in the polarity of the chamber electrodes contributes to the processes of cleaning the surface from the adsorption layer, which positively affects the nature of the saturation of the surface with nitrogen (the gradient of change microhardness along the depth of the nitrided layer decreases from 1.7 to 3.5 times).

Practical significance of the obtained results:

- The use of the proposed complex of equipment as a key, during nitriding in a glow discharge with non-stationary power supply, made it possible to implement the entire range of operating currents and voltages, which opens the way to the practical use of non-stationary discharge for modifying the surfaces of metal alloys and increasing their wear resistance.

- The study of the wear resistance of samples in the dry friction mode ensures a significantly higher productivity of conducting experiments. Unlike limit friction experiments, dry friction can be applied to different steels, with the same pressure value in the contact zone, which facilitates the comparison of results and contributes to the objectivity of conclusions about the effectiveness of different surface modification processes. According to the results of experimental studies, such a compromise pressure can be 16 MPa. The established effect of relaxation transformations of friction surfaces, which were nitrided in a cyclic-commutated discharge, requires recommending to conduct a study of the wear resistance of such surfaces during one continuous shift to ensure adequacy and comparison of results.

- In the case of an armored personnel carrier powered by industrial frequency current, the installation for the implementation of the process becomes cheaper. (patent of Ukraine No. 112983). The developed technology was implemented to strengthen gear brackets, gear bushings, gear shafts, and gear wheels at "MAGMA" LLC, Mariupol, which showed an increase in wear resistance from 1.35 to 1.85 compared to high-frequency current strengthening.

- The possibility of switching the form of pulses, changing their polarity led to the development of a number of methods and technologies of nitriding (patents of Ukraine, No. 113576, No. 115969, No. 112984, No. 112613 and No. 111949) aimed at increasing the wear resistance of metal products, namely: transitional bushings with internal and external conical threads; screws of thermoplastic machines; and implemented at LLC "Drilling Equipment Factory", Korosten, at PE "Yurkon", at Khmelnytskyi Maslosyrbaz and "Khmelpivo" association.

The results of the theoretical and experimental studies of the work are used in the educational process of the KhNU at the Department of Mechanical Engineering when teaching the disciplines "Progressive strengthening technologies", "Tractors and cars".

Key words: wear resistance, improvement of tribological characteristics, dry friction, structural steels, nitriding, cyclically switched discharge, mathematical modeling.

Scientific works in which the main scientific results of the dissertation are published:

Monographs

1. I. M. Pastukh, G. N. Sokolova, V. V. Lyukhovets, A. S. Zdybel. Theoretical foundations of the hydrogen-free nitriding process in a glow discharge. *Prospective trends in the development of science: technique and technology*: collective monograph. Odessa: S. V. Kuprienko, 2016. P. 123–135. (*The advantages and disadvantages of nitriding processes with TSK were analyzed*).

2. Skyba M., Stechyshyn M., Stechyshyna N., Martynyuk A., Lyukhovets V. Physico-chemical and tribological properties of nitrogenated layers of structural steel. *Actual problems of modern science*: Collective monograph. Bydgoszcz, Poland, 2021. P. 488–499. (*The wear resistance of nitrided layers on steels 45 and 38X2MIOA was studied*).

In publications included in the list of international scientometric bases

3. Pastukh I. M., Lyukhovets' V. V. Average Velocity of Electrons in the Cathode Fall Region during Glow-Discharge Nitriding. *Technical Physics*. 2017, Vol. 62, No. 4, pp. 527–536. ISSN 1063-7842. Scopus. (*Experimental verification of calculated values of the average speed of electrons was carried out*).

4. Stechyshyn M.S., Stechyshyna N.M., Dykha O.V., Martynyuk A.V., Lyukhovets V.V., Lukyanyuk M.V. Corrosion-mechanical wear of nitrided steels in acidic medium UDC 620.194. *Materials Science: Springer*. USA, 2023. No. 58 (5). R. 597–601. (*The influence of the modes of armored personnel carriers on the KMZ of structural steels was analyzed*).

In professional publications

5. Kaplun P.V., Lyukhovets V.V., Hlushchak G.S. Research of tribological characteristics and durability of structural elements with diffusion and combined coatings. *Bulletin of the Technological University of Podillia: Technical Sciences*. Khmelnytskyi, 2000. Part 1. No. 5. P. 85–87. (*Finding and analysis of the tribological characteristics of the obtained coatings*)

6. I. M. Pastuh, V. V. Lyukhovets, M. V. Lukyaniuk. Analysis of nitriding processes in the glow discharge of holes with a relatively small diameter. *Bulletin of the Khmelnytskyi National University*. Technical sciences. Khmelnytskyi, 2014. No. 5. P. 6–9. (*A linear law of electric field intensity distribution is proposed for analysis*).

7. I. M. Pastuh, V. V. Lyukhovets Internal local exceptions of a surface nitrided in a glow discharge. *Bulletin of the Khmelnytskyi National University*. Technical sciences. Khmelnytskyi, 2015. No. 6. P. 12–15. (*Proposed scheme of internal local exception and linear distribution of transverse and longitudinal fields of stress distribution and parabolic law of stress drop*).

8. I. M. Pastuh, V. V. Lyukhovets. The effect of pumping nitrogen ions into relatively small diameter holes. *Bulletin of the Khmelnytskyi National University*. Technical sciences. Khmelnytskyi, 2016. No. 3. P. 138–146. (*Experimentally verified parameters of the technological mode with TSKR for nitriding holes*).

9. Pastukh I. M., Sokolova H. M., Lyukhovets V. V. Justification of nitriding in a glow discharge with AC power. *Bulletin of the Khmelnytskyi National University*. Technical sciences. Khmelnytskyi, 2017. No. 1. P. 7–9. (*An analysis of the advantages and disadvantages of ATP with AC power was carried out*).

10. Kurskoy V. S., Lyukhovets V. V., Zdybel O. S. Hardware implementation of power supply of cyclically switched discharge in nitriding installations. *Bulletin of the Khmelnytskyi National University*. Technical sciences. Khmelnytskyi, 2017. No. 3. P. 27–31. (*Proposed scheme of serial connection of key elements for switching*).

11. Stechyshyn M. S., Oleksandrenko V. P., Lukyaniuk M. V., Lyukhovets V. V., Lukyaniuk M. M. Technology of nitriding in the glow discharge of steels of the

cutting set of meat grinders. *Problems of tribology*. Khmelnytskyi, 2017. No. 2. P. 50–54. (*Identified tribological characteristics of nitrided steels*).

12. Skyba M.E., Stechyshyn N.M., Medvedchuk N.K., Stechyshyn M.S., Lyukhovets V.V. Anhydrous nitriding in a glow discharge as a method of increasing the wear resistance of structural steels. *Bulletin of the Khmelnytskyi National University. Technical sciences*. Khmelnytskyi, 2019. No. 5. P. 7–12. (*Research and analysis of the influence of the BATR processes on the wear resistance of metals*).

13. Stechyshyn N. M., Lyukhovets V. V., Stechyshyn M. S. Influence of technological parameters of carbon nitriding on the wear resistance of steel 45. *Problems of friction and wear*. Kyiv: NAU, 2019, No. 3(84). P.76-82. (*Explored wear resistance of carbonitrided steel 45*).

14. Stechyshyn M.S., Lyukhovets V.V., Stechyshyn N.M., Tsepenyuk M.I. Wear resistance of structural steels nitroded in cyclic-commuted discharge at limit modes of friction. *Problems of Tribology*. Khmelnytskyi: KHNU, 2022. V. 27. No. 3/105. P. 27-33. (*Conducting experimental tests at the limit modes of friction*).

Patents for inventions

15. The method of increasing the corrosion resistance of metal surfaces: pat. 111949 Ukraine: IPC C 23 C 8/00, C 23 C 8/48, C 23 C 8/68. No. u 2016 06058; statement 03.06.2016; published 25.11.2016, Bull. No. 22. 3 p. (*Carbonitration is proposed*).

16. The method of nitriding in a glow discharge of reversed polarity with periodic cleaning of the surface: pat. 112613 Ukraine: IPC C 23 C 8/36, C 23 C 8/48. No. u 2016 06139; statement 06.06.2016; published 26.12.2016, Bull. No. 24. 3 p. (*Periodic cleaning of the surface is suggested*).

17. The method of nitriding in a glow discharge with periodic cleaning of the surface: pat. 112984 Ukraine: IPC C 23 C 8/36, C 23 C 8/24. No. u 2016 05934; statement 01.06.2016; published 10.01.2017, Bul. No. 1. 3 p. (*The cleaning duration period was found*).

18. The method of nitriding in a glow discharge with AC power: pat. 112983 Ukraine: IPC C 23 C 8/36, C 23 C 8/48. No. u 2016 05929; statement 01.06.2016; published 10.01.2017, Bul. No. 1. 3 p. (*Experimental verification was carried out*).

19. The method of nitriding of nitrogen-active metals in a glow discharge with periodic cleaning of the surface: pat. 113576 Ukraine: IPC C 23 C 8/36, C 23 C 8/48. No. u 2016 06403; statement 13.06.2016; published 10.02.2017, Bul. No. 3. 3 p. (*It is proposed to apply a short-term voltage pulse and determine its value*).

20. The method of nitriding in a glow discharge with reversed polarity: pat. 113569 Ukraine: IPC C 23 C 8/36, C 23 C 8/48. No. u 2016 06036; statement 03.06.2016; published 10.02.2017, Bul. No. 3. 3 p. (*Experimental research conducted*).

21. The method of nitriding in a glow discharge with optimization of the technological mode: pat. 115969 Ukraine: IPC C 23 C 8/36, C 23 C 8/48. No. u 2016 06133; statement 06.06.2016; published 10.05.2017, Bul. No. 9. 3 p. (*The influence of the phase structural components of the nitrided layer on the tribological characteristics of steels was analyzed*).

22. Device for nitriding in a glow discharge with alternating current power: pat. 118327 Ukraine: IPC C 23 C 8/36, C 23 C 8/48. No. u 2016 06460; statement 13.06.2016; published 10.08.2017, Bul. No. 15. 3 p. (*It is suggested to include an automatic voltage cut-off unit in the device*).

Approbation of dissertation materials

23. Lyukhovets, V. V. Prospects of nitriding of small holes in a glow discharge with non-stationary power supply. *11th International Symposium of Ukrainian Mechanical Engineers in Lviv*: abstracts of reports. Lviv: KINPATRI LTD, 2013. P. 195.

24. Lyukhovets V.V. Nitriding in glow discharge of parts with small holes using variable power supply. *Olbia Forum - 2014: strategies of the countries of the Black Sea region in the geopolitical space*: theses. Mykolaiv: Publishing house of ChSU named after Petra Mohyly, 2014. P. 52–53.

25. Lyukhovets, V. V. Nitriding processes in the glow discharge of holes with a relatively small diameter. *12th International Symposium of Ukrainian Mechanical Engineers in Lviv: abstracts of reports*. Lviv: KINPATRI LTD, 2015. P. 90–91.

26. Lyukhovets V. V. Nitriding in the glow discharge of holes of small diameter. *A collection of abstracts of reports of the eighth international conference of students, postgraduates and young scientists "Promising technologies based on the latest physical and materials science research and computer-aided design of materials"*. Kyiv, 2015. P. 45.

27. Kurskoi V. S., Kurskaya V. O., Lyukhovets V. V. Strengthening of working surfaces of agricultural implements by nitriding method in glow discharge. *Scientific achievements in solving actual problems of production and processing of raw materials, standardization and food safety: Collection of works based on the results of the VIII International Scientific and Practical Conference of Scientists, Postgraduate Students and Students (Kyiv, April 17, 2019 - April 18, 2019)*. Kyiv: RVV NUBiP of Ukraine, 2019. P. 189–191. (*Conducting experimental and operational tests*).

28. Stechyshyn M. S., Lyukhovets V. V., Zdorenko D. V., Kurskoy V. V. Nitriding of long-sized holes. *16th International Symposium of Ukrainian Mechanical Engineers in Lviv: Proceedings of the symposium*. Lviv: KINPATRI LTD, 2023. 68-69. (*Theoretical and experimental studies of nitriding of holes*).

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	25
ВСТУП.....	26
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ.....	33
1.1 Вакуумно-дифузійні процеси БАТР в нестационарних полях живлення	33
1.2 Аналіз енергетичних моделей азотування в тліючому розряді.....	40
1.3 Зносостійкість азотованих в тліючому розряді конструкційних сталей.....	51
Висновки до розділу 1.....	53
РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ, ОБЛАДНАННЯ І МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	55
2.1 Досліджувані матеріали.....	55
2.2 Установка для проведення БАТР з автономними енергетичними режимами поверхневого зміцнення.....	57
2.3 Апаратна реалізація режиму азотування в циклічно-комутованому тліючому розряді.....	61
2.4 Методика проведення металографічних досліджень.....	70
2.5 Методика проведення трибологічних досліджень.....	72
2.6 Оснастка для моделювання БАТР отворів з відносно малим діаметром.....	74
Висновки до розділу 2.....	76
РОЗДІЛ 3. ЗНОСОСТІЙКІСТЬ КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ ПІСЛЯ БАТР В НЕСТАЦІОНАРНИХ ЕЛЕКТРИЧНИ ПОЛЯХ.....	77
3.1 Обґрунтування БАТР з живленням змінним струмом.....	77
3.2 Пристрій для підвищення зносостійкості сталей азотуванням в ЦКР зі змінним струмом.....	82
3.3 Спосіб азотування в ЦКР з живленням змінним струмом.....	84
3.4 Зносостійкість внутрішніх локальних винятків поверхонь.....	86
3.5 Аналітична модель внутрішніх локальних винятків поверхні.....	88

Висновки до розділу 3.....	91
РОЗДІЛ 4. ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ДОВГОМІРНИХ ОТВОРІВ ЗМІЩЕНИХ БАТР.....	93
4.1 Аналіз процесів азотування довгомірних отворів.....	93
4.2 Аналіз варіантів співвідношень параметрів отворів та розряду	98
4.3 Обґрунтування ефекту накачування іонів азоту в довгомірні отвори.....	100
4.4 Зносостійкість внутрішніх поверхонь довгомірних отворів при БАТР.....	116
Висновки до розділу 4.....	122
РОЗДІЛ 5. ЗНОСОСТІЙКІСТЬ КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ ПІСЛЯ БАТР З ЦИКЛІЧНО-КОМУТОВАНИМ РОЗРЯДОМ.....	124
5.1 Алгоритм визначення класифікаційних критеріїв при утворенні нітридів в АТР з нестаціонарним живленням.....	124
5.2 Середня швидкість електронів в області катодного падіння при азотуванні в тліючому розряді.....	130
5.3 Дослідження зносостійкості азотованих в циклічно-комутованому розряді конструкційних сталей при граничному терті	132
5.4 Зносостійкість азотованих конструкційних сталей в циклічно- комутованому розряді в умовах сухого тертя.....	142
Висновки до розділу 5.....	148
ВИСНОВКИ.....	149
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	152
ДОДАТКИ.....	166
Додаток А. Список публікацій здобувача за темою дисертації.....	166
Додаток Б. Патенти України.....	171
Додаток В. Графіки дослідження зносостійкості внутрішніх поверхонь отворів, змін мікротвердості азотованого шару і дифрактограми зразків із сталі 40Х і сталі 45	179

Додаток Д. Визначення параметрів режиму азотування за комбінацією відносних енергетичних факторів.....	193
Додаток Е. Програма розрахунку середньої швидкості електронів.....	197
Додаток Ж. Оптимізація процесу азотування у тліючому розряді за критерієм зносостійкості (сталі 38Х2МЮА).....	202
Додаток З. Акти випробовувань	207

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

БАТР – безводневе азотування в тліючому розряді.

АТР – азотування в тліючому розряді.

ЦКР – циклічно-комутований розряд.

ВДГРТ – вакумно-дифузійні газорозрядні технології.

СПЧ – струм промислової частоти.

ЕРГ – Електричний розряд в газі.

ПП – падаючий потік.

ЕСПП – енергетичний спектр падаючого потоку.

ОКП – область катодного падіння.

ВЕФ – відносний енергетичний фактор.

ДЕФ – динамічний енергетичний фактор.

ТО – термічна обробка.

ХТО – хіміко-термічна обробка.

М + С – система метал+середовище (кавітаційно-ерозійне зношування).

М1 + С + М2 – система метал+середовище+метал (зношування при терті в КАС).

КАС – корозійно-активні середовища.

ВСТУП

Актуальність теми. Серед великої кількості видів поверхневого зміцнення металів безводневе азотування в тліючому розряді (БАТР) можна віднести до технологій універсального застосування. Це підтверджується тим, що дана технологія може застосовуватись як для деталей і вузлів тертя, так і для інструменту, призначеного для обробки різних матеріалів (метали, деревина, мінерали тощо), штампів, прес- та форм для лиття (формування виробів з пластмас, легких сплавів тощо). Крім підвищення зносостійкості, поверхневої міцності, жаростійкості і жароміцності процес забезпечує у значній мірі корозійну стійкість, втомну витривалість при циклічних навантаженнях, значно підвищує фізико-механічні характеристики при статичних навантаженнях тощо.

Найбільш поширена технологія азотування в аміачних газових середовищах, що є наслідком наслідування традицій пічного азотування. Проте в результаті цього варіанту процесу виникають негативні явища водневого окрихчення, попри те, що показники твердості при цьому можуть бути і вищими. Іншим негативним наслідком є екологічна небезпечність процесу. Перелік тільки цих недоліків обгрунтовує перспективність безводневого азотування в тліючому розряді, який є абсолютно екологічно чистим та забезпечує кращі показники пластичності поверхні. У цьому напрямку відомі роботи Каплуна В. Г., Ляшенка Б. А., Олександренка В. П., Пастуха І. М., Похмурського В. І., Стечишина М. С., Kellera K., Kolbela J.

Відомі теоретичні моделі процесу, сформовані в багатьох роботах, зосереджують увагу в основному на дифузійних явищах в модифікованому поверхневому шарі, проте не можуть адекватно пояснити деякі процеси, характерні для азотування в тліючому розряді. Тому актуальність розробки теоретичних основ, які базуються насамперед на базових положеннях фізики газорозрядних процесів та примінення їх до пояснення процесів БАТР, безсумнівна. Саме таким шляхом можливо не тільки розкрити тонкий механізм взаємодії частинок в газовому середовищі та частинок зіткнення падаючого

поток з поверхнею, але й розкрити нові потенціальні можливості технології.

Очевидно, що остання частина поставленої задачі досліджень повинна проводитись на нанорівні, оскільки чисто термодинамічні підходи дають тільки загальну картину явища, часто не відкриваючи перспективних можливостей азотування поверхні металів та їх сплавів.

Крім того, доцільно розглянути питання пов'язані з безпосередньою реалізацією технологій БАТР, включаючи аспекти розробки устаткування та організаційно-економічних передумов впровадження процесу.

Тенденцією останнього періоду розвитку досліджуваного напрямку стало використання циклічного живлення. Маючи всі переваги, що характерні для БАТР, цей метод дозволяє певні спрощення технологічних умов модифікації, насамперед пов'язані з відсутністю переходу тліючого розряду в дуговий суттєво знижуючи вимоги до характеру позиціонування деталей в садці. Практично їх можна встановлювати на будь-яку поверхню або підвішувати на самих простих пристроях. При цьому не виникає локального горіння в місцях контакту, що так характерно для схеми при живленні постійним струмом. Проте з іншої сторони, враховуючи, що певний час розряд взагалі відсутній – тривалість власне фази азотування збільшується.

В теоретичному плані процес азотування в переривчастому (циклічно-комутованому розряді) практично не досліджувався. Відсутні основи, на базі яких можливе проектування технологічних режимів, їх оптимізація. Немає критеріїв, на основі яких прогнозувались би результати формування триботехнічних систем вказаним методом, проте актуальність подібних проблем не викликає сумніву виходячи з того, що покращення показників зносостійкості є чи не головним завданням поверхневої модифікації. В методологічному плані певну проблему складають питання оцінки стану поверхні після модифікації, а також методика визначення характеристик стійкості триботехнічних систем, що вирішувалася на основі механо-хімічної моделі процесу тертя та зношування Шевелі В. В. і Олександренка В. П. Перераховані аспекти, а також розробка питань, пов'язаних з апаратною

реалізацією циклічно-комутованих процесів БАТР з взаємозалежними та автономними енергетичними параметрами і становить суть цієї роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження виконані згідно Законів України «Про наукову і науково-технічну діяльність» від 26.11.2015 №848 – VIII та «Про пріоритетні напрямки розвитку науки і техніки» від 11.07.2001 №2623 – IV, планів наукових досліджень ХНУ в рамках держбюджетних робіт, які виконувалися на кафедрі галузевого машинобудування та агроінженерії ХНУ: «Наукові підходи і технології підвищення зносостійкості і довговічності важко навантажених конструкційних елементів при циклічному контактному навантаженні» (№ держ. рестр. 0115U000226), «Наукові основи підвищення контактної витривалості та зносостійкості конструктивних елементів з покриттями при терті кочення» (№ держ. рестр. 0117U001167) та держбюджетних робіт, які проводилися в ПНФТЦ ХНУ за темами: «Теорія процесів модифікації металевих поверхонь в тліючому розряді з автономними параметрами розряду» (№ держ. рестр. 0115U000222) і «Теоретичні та практичні основи інтенсифікації вакуумно-дифузійних процесів в тліючому розряді металевих поверхонь деталей військового та подвійного призначення» (№ держ. рестр. 0119U100679).

Мета і завдання дослідження.

Метою досліджень є розвиток теоретичних і розробка практичних основ підвищення зносостійкості металів безводневим азотуванням в циклічно-комутованому розряді, а також встановлення основних закономірностей та умов азотування довгомірних отворів для забезпечення їх зносостійкості.

Цій меті підпорядковані наступні завдання:

- теоретично обґрунтувати і практично дослідити процес азотування в циклічно-комутованому розряді з можливістю формування зносостійких азотованих шарів на конструкційних сталях;
- модернізувати установку для реалізації автономних режимів азотування з циклічно-комутованим розрядом для підвищення трибологічних

характеристик конструкційних сталей шляхом послідовного з'єднання ключових елементів та організації для них синхронного керування;

- виявити закономірності зношування конструкційних сталей, азотованих в енергетичних полях з нестаціонарним живленням;

- встановити вплив локальних винятків поверхонь на процес азотування та зносостійкість деталей, зміцнених в енергетичних полях з нестаціонарним живленням;

- дослідити процеси БАТР довгомірних отворів в циклічно-комутованому розряді з метою підвищення їх зносостійкості;

- дослідити вплив БАТР в циклічно-комутованому розряді на зносостійкість азотованих поверхонь конструкційних сталей при граничному та сухому терті;

- розробити рекомендації щодо визначення режимів азотування металів в циклічно-комутованому розряді для підвищення зносостійкості та передати їх на виробництво.

Об'єкт дослідження – процес безводневого азотування металів в циклічно-комутованому розряді та їх вплив на тертя та зношування зміцнених поверхонь конструкційних сталей.

Предмет дослідження – закономірності формування трибологічних характеристик конструкційних сталей після БАТР в циклічно-комутованому розряді.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження проводилися на основі фундаментальних положень трибології, фізики низькотемпературних газорозрядних процесів, енергетичній теорії БАТР.

Лабораторні та стендові дослідження проводилися на створених або модернізованих установках. Обробка результатів експериментальних досліджень виконана із застосуванням комп'ютерних технологій з використанням методів математичної статистики та пакетів прикладних програм.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

- Вперше запропоновано ввести критерій концентрації поля, що дозволило розв'язати аналітичну задачу встановлення взаємозв'язків геометрії поверхні та параметрів електричного поля, а також їх вплив на зносостійкість азотованих в циклічно-комутованому розряді поверхонь сталей.

- Вперше отримано аналітичний вираз для визначення середньої швидкості електронів в тліючому розряді, для цього використано модель базової швидкості, яку має електрон, що пролетів без зіткнень від катода до певної точки області катодного падіння.

- Виявлено явище-ефект релаксаційних процесів в приповерхневих шарах сталей, азотованих в циклічно-комутованому розряді. Релаксують структури та напруження, що утворюються в поверхневих шарах цих матеріалів під дією тиску і температури в зоні тертя.

- Встановлено, що підвищення майже в 2 рази зносостійкості поверхонь довгомірних отворів сталевих деталей, азотованих в циклічно-комутованому розряді, зумовлено ефектом накачування іонів азоту в отвір і, як наслідок, рівномірного розподілу поверхневої мікротвердості по усій довжині.

- Отримала подальший розвиток методологія підвищення зносостійкості сталей безводневим азотуванням в циклічно-комутованому розряді, що є наслідком зміни співвідношення структурних складових фазового складу поверхневого модифікованого шару.

- Підвищення зносостійкості сталевих деталей вузлів тертя в 1,35...1,75 разів азотуванням в циклічно-комутованому розряді зумовлена тим, що періодична зміна полярності електродів камери сприяє процесам очистки поверхні від адсорбційного шару, що позитивно впливає на характер насичення поверхні азотом (градієнт зміни мікротвердості по глибині азотованого шару знижується від 1,7 до 3,5 рази).

Практичне значення одержаних результатів:

- Застосування запропонованого комплексу апаратури як ключа при азотуванні в тліючому розряді з нестационарним живлення дозволило

реалізувати весь спектр робочих струмів та напруг, що відкриває шлях до практичного використання нестационарного розряду для модифікації поверхонь металевих сплавів та підвищення їх зносостійкості.

- Дослідження зносостійкості зразків в режимі сухого тертя забезпечує суттєво більшу продуктивність проведення експериментів. На відміну від експериментів з граничним тертям, сухе тертя може застосовуватись для різних сталей, з однаковим значенням тиску в зоні контакту, що дозволяє полегшити порівнювання результатів та сприяє об'єктивності висновків щодо ефективності різних процесів модифікації поверхні. За результатами проведених досліджень таким компромісним тиском може бути значення в 16 МПа. Встановлений ефект релаксаційних перетворень поверхонь тертя, які були азотовані в циклічно-комутованому розряді, вимагає рекомендувати для забезпечення адекватності та співставлення результатів проводити дослідження зносостійкості таких поверхонь протягом однієї безперервної зміни.

- При БАТР з живленням струмом промислової частоти здешевлюється установка для реалізації процесу (патент України № 112983). Розроблена технологія, впроваджена для зміцнення зубчастих обойм, зубчастих втулок, вал-шестерень, коліс зубчастих на ТОВ «МАГМА», м. Маріуполь, показала збільшення зносостійкості від 1,35 до 1,85 порівняно із зміцненням струмом високої частоти.

- Можливість комутації форми імпульсів та зміни їх полярності призвела до розробки цілої низки способів і технологій азотування (патенти України, № 113576, №115969, №112984, №112613 та №111949) спрямованих на підвищення зносостійкості виробів з металів: перехідних втулок з внутрішніми і зовнішніми конічними різьбами; шнеків термопласт-автоматів; впроваджено на ТОВ «Завод бурового обладнання», м. Коростень, на ПП «Юркон», на Хмельницькій маслосирбазі та об'єднанні «Хмельпиво».

Результати теоретичних та експериментальних досліджень роботи використовуються в навчальному процесі ХНУ на кафедрі галузевого

машинобудування та агроінженерії при викладанні дисциплін «Прогресивні технології зміцнення», «Трактори і автомобілі».

Апробація результатів дисертації. Основні наукові та експериментальні результати оприлюднено на наукових конференціях професорсько-викладацького складу кафедри галузевого машинобудування та агроінженерії ХНУ (2016 – 2019 р.); на Міжнародних науково-технічних конференціях: 11-ому Міжнародному симпозиумі українських інженерів-механіків у Львові (Львів, КІНПАТРИ ЛТД, 2013); Ольвійському форумі – 2014: стратегії країн Причорноморського регіону в геополітичному просторі (Миколаїв: Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2014); 12-ому Міжнародному симпозиум українських інженерів-механіків у Львові (Львів, КІНПАТРИ ЛТД, 2015); на восьмій міжнародній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Перспективні технології на основі новітніх фізико-матеріалознавчих досліджень та комп'ютерного конструювання матеріалів» (Київ, 2015); VIII Міжнародній науково-практичній конференції вчених, аспірантів і студентів «Наукові здобутки у вирішенні актуальних проблем виробництва та переробки сировини, стандартизації і безпеки продовольства» (м. Київ, 2019); 16-ому Міжнародному симпозиумі українських інженерів-механіків у Львові (Львів, КІНПАТРИ ЛТД, 2023).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 28 наукових праць, у тому числі 10 статей у фахових виданнях, 2 у виданнях, що входять до Міжнародної науково-метричної бази, 6 тез доповідей на Міжн. наук. техн. конф., отримано 8 патентів України. Опублікована 2 монографії.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, який налічує 125 найменувань і 7 додатків. Повний обсяг роботи становить 211 сторінок друкованого тексту, з них основного тексту 151 сторінки, 79 рисунків, 9 таблиць.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1 Вакуумно-дифузійні процеси БАТР в нестационарних полях живлення

Процеси БАТР, в основі яких лежить використання вакуумно-дифузійних газорозрядних технологій, детально проаналізовано в роботах [1]. При цьому найбільш доцільною, на наш погляд, є така система рівнів вибору параметрів: фазовий склад середовища, що містить активний елемент модифікації; тип процесу модифікації; стан середовища; активатор процесу [3]. Подана система класифікаційних критеріїв відповідала завданням дослідження, а саме: створенню моделі процесу для обґрунтування енергетичного підходу БАТР. Основною початковою гіпотезою було прийнято умову постійності електричних параметрів розряду протягом усієї фази обробки. Як відомо, таких параметрів є два: густина струму j і напруга U між електродами. З деякими умовностями можна вважати, що густина струму формує інтенсивність часток падаючого потоку, а напруга між електродами, здебільшого, формує енергію його часток. З цієї причини твердження про мінімум питомої потужності [2], як критерію результативного та оптимального режиму модифікації, сумнівне, оскільки одне і теж значення потужності може бути отримане як безкінечна кількість варіантів добутків зазначених вище параметрів, але результати обробки, очевидно, при цьому можуть бути діаметрально протилежними [3]. Дійсно, при малій густині струму, але значних напругах, спостерігається інтенсивне розпорошення поверхні, що характерне для фази катодної очистки поверхні і, навпаки, при протилежній комбінації цих параметрів: значній густині струму, але малих значеннях напруги, будуть спостерігатися процеси утворення нітридів та дифузії азоту в глибину поверхні. Реально, навіть в тих процесах модифікації, які складаються з однієї фази зі стабільними параметрами режиму в часі, напруга може кваліфікуватись як умовно постійна,

оскільки будь-яке джерело живлення, що в загальному вигляді складається з трансформатора, випрямляча та регулятора напруги, на виході обов'язково формує певні більші чи менші пульсації [3]. Далі, в міру нагрівання і виході на режимні параметри електричні характеристики об'єкта, що модифікується, автоматично змінюються аж до повної стабілізації, коли вся система знаходиться в рівновазі, оскільки настає її тепловий баланс. Нарешті, залежно від зміни структури модифікованого поверхневого шару змінюється і характер взаємодії падаючого потоку з поверхнею об'єкта, що в умовах стабілізації температури поверхні може вимагати певного корегування електричних характеристик розряду. Таким чином, електричні параметри головного посилювача АТР реально не можуть бути стабільними. Оскільки вони в основному і формують інтенсивність усіх елементарних субпроцесів, з яких складається модифікація, то коригована його енергетична модель, як першооснова, повинна враховувати саме цю обставину. Отже, подальші дослідження процесу модифікації вимагають, в першу чергу, встановлення системи взаємозв'язків складових АТР [3].

Схема уточненої класифікації структури факторів впливу на результати модифікації подано на рис. 1.1 [1]. До цієї схеми слід внести ще деякі додаткові пояснення. В джерелах [1, 6–8] описано результати експериментів із зворотною полярністю та проаналізовано їх з точки зору положень енергетичної моделі. Загалом можна застосовувати процес у розряді зі змінною напругою як комбінацію варіантів із прямою та оберненою полярністю [9]. За успішної реалізації цього варіанту живлення відпала б необхідність випрямлення струму. Проте дуже ускладнилась би реалізація довільної форми сигналу вихідної напруги. В загальному вигляді нестаціонарне живлення може бути постійним чи циклічно-комутованим, іншими словами – пульсуючим.

Структура процесу модифікації може бути монофазною, тобто складатись з однієї фази, або багатofазною (поліфазною). В будь-якому випадку кожна фаза може бути за тривалістю макро- або мікрофазою. Передусім поняття моно- і поліфазності визначає аналіз періодів, з яких складається процес модифікації,

тривалість котрих може порівнюватись із загальним часом модифікації.

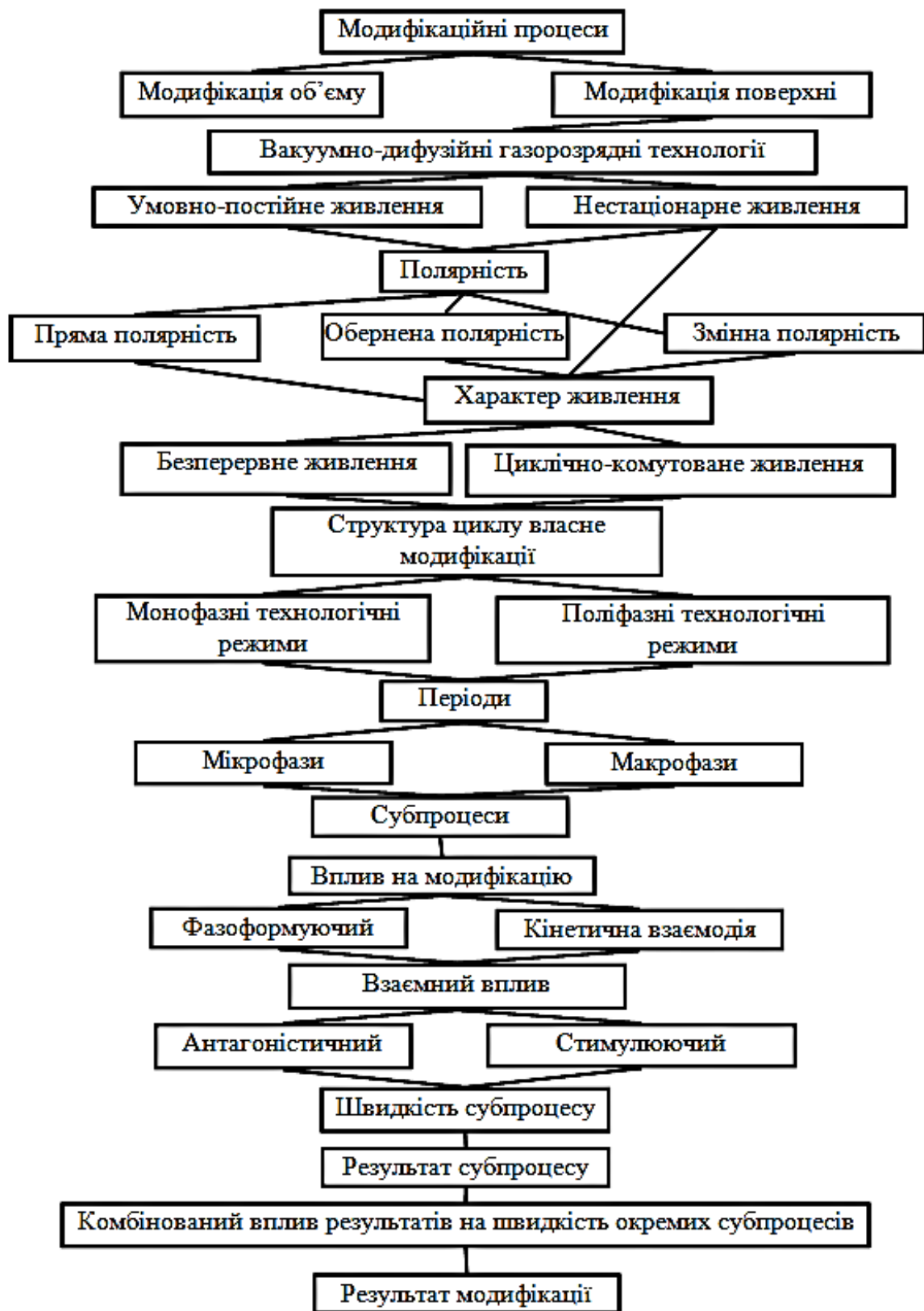


Рис. 1.1 – Загальна структура факторів впливу на результат модифікації поверхонь

Підтвердженням поліфазних процесів можуть служити режими, параметри яких ступінчасто змінюються декілька разів протягом модифікації, в тому числі процеси, коли температура послідовно зростає з певним проміжком в часі, що в свою чергу допомагає збільшити глибину модифікованого шару. Коли ж мова йде про макро- і мікрофази, то насамперед слід зазначити, що час тривалості періодів цих фаз найбільш логічно порівнювати з часом переходу тліючого розряду в дуговий. Інакше кажучи, мікрофазою потрібно вважати період часу, коли сигнал змінюється циклічно (напруги між електродами, причому – необов'язково стабільної), а його тривалість не перевищує час, потрібний для того, щоб тліючий розряд перейшов в дуговий. Як відомо, саме дуговий розряд створює суттєві проблеми для стабілізації тліючого розряду в розрядній камері, особливо – в умовах постійного живлення [3].

Основні субпроцеси вакуумно-дифузійних газорозрядних технологій, які були викладено раніше в роботі [1], подано на рис. 1.2. Результат впливу на модифікацію поверхні тих чи інших субпроцесів може бути різним тому, що одні з них безпосередньо або через інші субпроцеси можуть формувати фазовий склад модифікованої поверхні (дифузанти), другі ж тільки можуть позначитись на кінетиці взаємопов'язаних з ними субпроцесів (дифунданти). Тобто вплив субпроцесів може бути як стимулюючий, що сприяє росту швидкості формування фаз, так і гальмуючим її.

Результатом подібного комбінованого взаємовпливу в певний момент процесу стає швидкість конкретного субпроцесу, котра є функцією не тільки системи інших субпроцесів, але і їх взаємодії [3]:

$$Y_c = \varphi(R_1, R_2, R_m, P_1, P_2, P_n), \quad (1.1)$$

де c – індекс досліджуваного субпроцесу; R – результат певного субпроцесу, кількість яких в моделі процесу модифікації від одиниці до m ; P – параметр технологічного режиму, число яких в моделі процесу модифікації від одиниці до n .

З іншого боку, сам результат будь-якого субпроцесу в певний проміжок часу залежить від закону зміни функції його швидкості. Отже, очевидно, що реальна модель процесу модифікації, як сукупності взаємодії та взаємовпливу всіх основних факторів, що характеризують модифікаційний процес, є істотно складною конструкцією. Цілком природно, що з врахуванням складу модифікаційного процесу, відображеного на рис. 1.2, його моделлю буде досить складна система як в прикладному, так і в теоретичному плані [3].

Для практичного оперування цією моделлю ймовірно виникне необхідність у додатковому аналізі впливу кожного з субпроцесів із визначенням тільки найбільш важливих. Цей порядок має важливе значення ще й тому, що саму суть переваг модифікації з застосуванням тліючого розряду з нестационарним живленням становить можливість швидкого коригування ходом утворення структури модифікованого шару за рахунок штучного мотивування субпроцесів, які в даний конкретний момент спонукатимуть першочергову реалізацію тих з них, що мають важливе значення для отримання триботехнічної системи з потрібними властивостями. Створення моделі подібних процесів дасть змогу не тільки забезпечити автоматизацію модифікаційних технологій, але й також дасть можливість керування їх втілення [3, 10–16].

Здійснена вище аргументація наводить на висновок, що при переході на нестационарне (циклічне) живлення тліючого розряду, який виступає посилювачем модифікаційного процесу з використанням вакуумно-дифузійної газорозрядної технології, в його енергетичну модель потрібно ввести певні правління:

- при модифікації поверхні з нестационарним живленням енергетичний спектр падаючого потоку повинен враховувати не тільки розподіл по енергетичних рівнях, основою для якого є формування кінетики падаючого потоку, але й мінливий характер параметрів режиму в часі;
- відносний енергетичний фактор слід перетворити в приведений відносний енергетичний фактор, в якому буде враховуватися змінний характер

дії енергетичного спектра падаючого потоку [3].

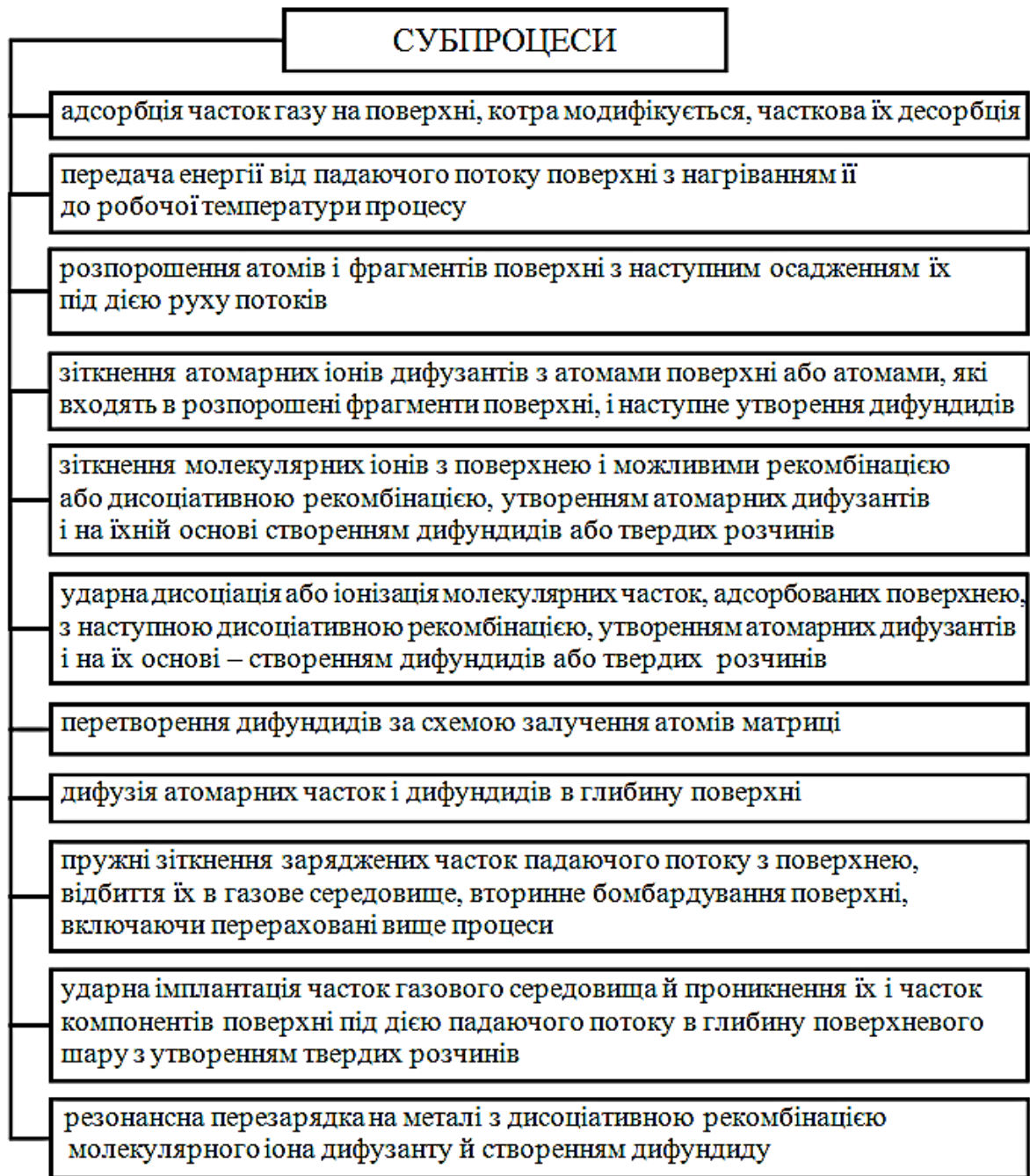


Рис. 1.2 – Схема протікання субпроцесів вакуумно-дифузійної газорозрядної технології модифікації металів

Проведені дослідження електричних характеристик азотування в тліючому розряді [1] стосуються процесів азотування при умовно стаціонарному живленні розряду. Класифікація подібних режимів розряду як умовних обґрунтовується тим, що фактично при будь-якій складності блоку

постійного живлення установок для азотування в тліючому розряді напруга на електроди розрядної камери подається з певними, але імпульсами. Інша справа, що ці імпульси відносно номінальних значень напруги незначні, і мінімальні значення практично дорівнюють номінальним, тобто їх не можна кваліфікувати як віднульові. В цій роботі встановлено залежності величини напруги, як основного чинника енергетичних характеристик частинок падаючого потоку, від параметрів технологічного режиму, в першу чергу це стосується складу газового середовища, температури поверхні азотованих деталей, тиску тощо [2, 10, 11].

Досліджено дійсні характеристики розряду на промисловому устаткуванні для модифікації поверхні металевих об'єктів (деталей) методом азотування в тліючому розряді. Встановлено наявність дослідної залежності електричних характеристик, включно з потужністю розряду, від тиску в розрядній камері, що підтверджує розкриту, але не пояснену, тезу Арзамасова Б. М. стосовно впливу мінімальної питомої потужності (що при однотипному завантаженні камери співпадає з мінімумом потужності розряду) на якість азотованих поверхонь [2, 3]. Пізніше, враховуючи енергетичну модель обґрунтування цієї тези, було встановлено, що потужність як похідна від напруги та величини струму має мінімум у тому випадку, коли ці дві величини при зміні тиску змінюються екстремально. За цих обставин характеристики продуктивної здатності в напрямку розпорошення поверхні та утворення нітридів знаходяться в зоні оптимального взаємовідношення, що і призводить до покращення показників азотування [1, 2, 11].

Оскільки при умовно постійному живленні розряду фаза запалювання або згасання розряду за часом становлять досить малу частку від загальної тривалості процесу модифікації, тому перехідні процеси для подібних технологій не відіграють практично ніякої ролі, бо їх питома вага мізерна.

У випадку застосування нестационарного живлення виникає зовсім інша ситуація. Наприклад, при використанні циклічно-комутованого розряду, коли робоча частота циклів може знаходитися в межах від 1 до 10 кГц, а, крім того,

ще на зменшення тривалості часу подачі напруги на електроди камери впливає шпаруватість. Тоді перехідні процеси при гасінні та запалюванні розряду за часом становлять помітну частку тривалості активної фази періоду циклу комутації, і залежно від характеру зміни напруги та струму можуть суттєво вплинути на дифузію азоту в глибину поверхні, розпорошення поверхні та формування нітридних фаз, а відтак – на власне процес формування поверхневого модифікованого шару деталі. Таким чином, головне завдання вивчення особливостей зміни електричних характеристик при змінному (циклічному) живленні зводиться до двох основних моментів: процеси при запалюванні розряду та гасінні розряду [2, 11].

В даній роботі розглядаються вихідні положення підходів до дослідження поставлених завдань. При нестационарному характері живлення, залежно від особливості зміни закону напруги, в певний момент реакція електричного поля на цю зміну може бути різною. Наприклад, при плавному зростанні напруги чи її зменшенні на джерелі живлення перехідні процеси практично не спостерігаються, відповідно їх роль в стимулюванні субпроцесів модифікації поверхні практично не спостерігається. Навпаки, якщо напруга змінюється стрімко (зростає або падає), то ці сплески на електродах розрядної камери можуть стимулювати відповідні субпроцеси: при зростанні напруги відбувається розпорошення поверхні, а при її зменшенні проходить дифузія в глибину поверхневого шару [2, 11].

Таким чином сформовано завдання оцінки впливу і характеру зміни головних електричних величин (сили струму та напруги розрядної камери) процесу модифікації поверхонь при використанні циклічно-комутованого розряду.

1.2 Аналіз енергетичних моделей азотування в тліючому розряді

Відомо декілька концептуально відмінних моделей процесу: технологічні моделі у вигляді бази даних дослідних та виробничих реалізацій процесу;

термодинамічна модель [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13]; модель Кольбеля Й. – Лахтіна Ю. М. [14, 15-21], яка розроблялася школою вчених МАДІ солідарно зі школою німецьких вчених; модель Арзамасова Б. М. [5], запропонована школою МВТУ ім. М. Е. Баумана.

Найбільш простою є перша модель, коли в міру накопичення досвіду АТР виробів, що відрізняються не тільки маркою матеріалу, попередньою ХТО, але й особливостями форми, вимогами наступного застосування й т.п., технологічні режими, головними факторами яких є склад газового середовища, його тиск, температура поверхні, міжелектродна напруга й густина струму, оптимізуються і зводяться в банк даних у вигляді таблиць, номограм та в інших формах, зручних для практичного використання. На жаль, на цьому переваги цієї моделі вичерпано, тому що будь-яка більш-менш істотна зміна початкових умов призводить до необхідності інтуїтивного вибору параметрів технологічного режиму обробки.

Термодинамічна модель, як відомо із класичної фізичної хімії, «не дозволяє робити висновки про внутрішню будову речовини і механізми протікання процесів і у цьому виявляється обмеженість термодинамічного методу» [22]. Саме ця обставина дозволяє на основі зазначеної моделі в кращому разі одержати узагальнену картину якісних взаємовідносин вихідних і кінцевих характеристик процесу. Та й то в більшості випадків потрібен цілий ряд функцій, одержання яких становить певну складність або взагалі малоймовірне, а без них результати застосування моделі неправдоподібні, за словами самих авторів моделі [5].

Очевидно, що вихід може бути тільки в детальному дослідженні елементарних підпроцесів, котрі відбуваються при АТР як в ЕРГ, так і на межі газ-поверхня, причому в цьому випадку недостатньо обмежитися підходом з позиції мікротехнологій, тому що найбільш точне уявлення про процеси модифікації поверхневого шару можна одержати на нанорівні, тобто коли будуть розглядатися взаємодії часток молекулярних або атомарних розмірів. Саме таке завдання ставили перед собою автори двох останніх моделей.

Відповідно до моделі Кольбеля – Лахтіна (рис. 1.3) іони азоту в газовому середовищі зіштовхуються з частинками розпорошеного заліза, утворюють нітрид FeN, молекули якого під впливом спрямованого до поверхні падаючого потоку адсорбуються поверхнею; внаслідок взаємодії саме між молекулами таких нітридів відбувається їхнє послідовне перетворення – Fe_2N , Fe_3N , Fe_4N і вивільняється атомарний азот, який дифундує в глибину поверхневих шарів, утворюючи твердий розчин.

Модель має декілька проблемних моментів. Першим з них є фундаментальний принцип ймовірності утворення нітридів шляхом зіткнення двох атомів азоту й заліза в газовому середовищі, можливість якого рішуче заперечує Арзамасов Б. М. [5].

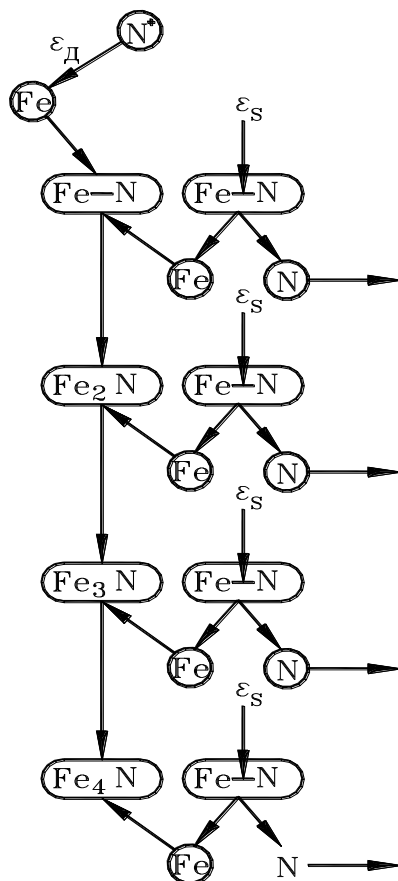


Рис. 1.3 – Енергетична схема процесу АТР за Кольбелем-Лахтінім

Однак утворення нітриду ще не завершує процес модифікації поверхні. Відповідно до моделі Кольбеля-Лахтіна далі проходять найбільш важливі процеси утворення складніших нітридів, які є генератором атомарного азоту, котрий служить як вихідний елемент для наступного циклу утворення нижчих нітридів, так і фактором забезпечення дифузії азоту в товщу металу (утворення твердого розчину). Звідси виникає основне питання про первинність для всього процесу АТР утворення нітридів або первинного накопичення азоту до деякої критичної концентрації, після

чого починають утворюватися нітриди [15]. Тези про первинність накопичення атомарного азоту в поверхні дотримується школа Арзамасова Б. М. [5].

В «гіпотетичній», як зазначає автор, моделі Арзамасова Б. М. [5] вихідним елементом, що визначає всі наступні процеси, служить бомбардуюча частка – позитивний іон. Однак настільки виняткова роль атомарних іонів істотно звужує технологічні можливості АТР. Насамперед, за допомогою такої моделі неможливо пояснити факт азотування при зворотній полярності, тобто варіант, коли оброблювана деталь служить не катодом, як це загально прийнято в АТР, а анодом. Арзамасов Б. М. стверджує [5], що «...насичення азотом спостерігалось тільки в тому випадку, якщо дротяні зразки були катодом, а в інших випадках, коли зразки служили анодом, азотування не спостерігалось».

Однак задовго до написання роботи [5] вже були опубліковані результати експериментів щодо АТР при зворотній полярності в середовищі аміаку [23]. В установці для АТР деталь служила анодом, причому автоматична система підтримувала його температуру, яка дорівнювала температурі катода. Було встановлено, що при однаковій температурі катода й анода швидкість утворення азотованого шару на обох електродах приблизно однакова, але зміна твердості по глибині шару від поверхні до серцевини для анода більш плавна, ніж для катода.

Як наслідок вище представленого аналізу, сформульовано енергетичну модель АТР, схему якої показано на рис. 1.4 [1].

На рис. 1.4 прийнято умовні позначення: ПП – падаючий потік, Me – компонент поверхні, два концентричних кола – будь-який компонент газу, N, N₂ – атомарний або молекулярний азот. Додатково енергетичні рівні позначені: ε_A , ε_{XC} – енергії фізичної й хімічної адсорбції, ε_E – енергія електрона, що вилетів з поверхні в результаті іонно-електронної емісії, ε_{TE} – енергія електрона, що вилетів з поверхні в результаті термоелектронної емісії, ε_n – енергія іонізації молекули або атома азоту, ε_T – енергія термічного впливу падаючого потоку на поверхню, ε_{PI} – енергія резонансної перезарядки, ε_d – енергія дисоціації молекули, ε_{Nd1} , ε_{Nd2} – енергії перетворення нітридів [1, 3, 28].

- зіткнення атомарних іонів дифузантив з атомами поверхні або атомами, які входять в розпорошені фрагменти поверхні, і наступне утворення дифундидів [1, 3, 28];

- зіткнення молекулярних іонів з поверхнею і, залежно від енергетичного рівня, можливими рекомбінацією або дисоціативною рекомбінацією, утворенням атомарних дифузантив і на їхній основі створенням дифундидів або твердих розчинів [1, 3, 28];

- ударна дисоціація або іонізація молекулярних часток, адсорбованих поверхнею, з наступною дисоціативною рекомбінацією, утворенням атомарних дифузантив і на їх основі – створенням дифундидів або твердих розчинів [1, 3];

- перетворення дифундидів за схемою залучення атомів матриці [1, 3, 28];

- дифузія атомарних часток і дифундидів у глибину поверхні [1, 3, 28];

- пружні зіткнення заряджених часток падаючого потоку з поверхнею та відбиття їх в газове середовище, вторинне бомбардування поверхні, включаючи можливість перерахованих вище процесів, характерних для часток певного виду й енергії [1, 3, 28];

- ударна імплантація часток газового середовища й проникнення їх і часток компонентів поверхні під дією падаючого потоку в глибину поверхневого шару з утворенням твердих розчинів [1, 3, 28];

- резонансна перезарядка на металі з дисоціативною рекомбінацією молекулярного іона дифузанти й створенням дифундиду [1, 3, 28].

Основні положення енергетичної моделі зводяться до наступного:

- 1) існують умови, спричинені як видом поверхні, так і характеристиками технологічного режиму, при яких будь-які із зазначених вище процесів можуть мати місце;

- 2) імовірність того або іншого процесу визначається співставленням і відповідністю ЕСПП енергетичним характеристикам, у межах яких він можливий;

- 3) у першу чергу відбуваються ті процеси, які в даних визначених умовах енергетично найбільш вигідні;

4) важлива роль адсорбційних процесів, через адсорбційний шар падаючий потік може впливати як на компоненти газового середовища, накопичені на поверхні, так і на саму модифіковану поверхню;

5) основним джерелом генерації атомарного азоту, концентрація якого найбільш істотно впливає на інтенсивність АТР, є процес дисоціації молекул електронним ударом або як результат рекомбінації молекулярних іонів безпосередньо на поверхні.

Принципи енергетичної моделі дозволяють формувати фактори впливу на процес АТР, включаючи кінцеві результати, а також прогнозувати оптимальні характеристики технологічних режимів. Саме ця енергетична модель розроблена І.М. Пастухом і лягла в основу усіх подальших експериментальних і теоретичних досліджень поданих у дисертації.

Загальна класифікація процесів модифікації поверхні із застосуванням тліючого розряду відносить їх до вакуумно-дифузійних газорозрядних технологій [1, 24, 25]. Більшість теоретичних досліджень процесу БАТР відноситься до варіантів з постійним джерелом живлення розрядної камери. Проте принципово можливі й інші варіанти живлення, які дозволяють досягти певних технологічних переваг.

Детальний аналіз азотування в тліючому розряді саме за критерієм безперебійності (постійне) живлення приводить до схеми на рис. 1.5. При цьому слід відмітити, що в переважній більшості випадків устаткування для азотування в тліючому розряді виготовлялось за схемою прямої полярності (умовна назва), коли деталь виступає катодом, оскільки в теорії панувала думка, відповідно до якої азотування деталей, до яких подається позитивний заряд джерела живлення (зворотна полярність), неможливе [5]. Проте, починаючи з кінця 80-х років минулого століття, було проведено цілий ряд досліджень, в тому числі і дослідних, які довели, що і при такій схемі підключення азотування можливе, важливо лише передбачити інший метод нагріву поверхні деталей до температури, необхідної для протікання технологічного режиму, на відміну від катодного бомбардування. Особливо цей

варіант процесу дієвий при нагріванні поверхні дуговим розрядом, коли густина струму цього розряду суттєво більша, ніж у тліючому [26, 28].

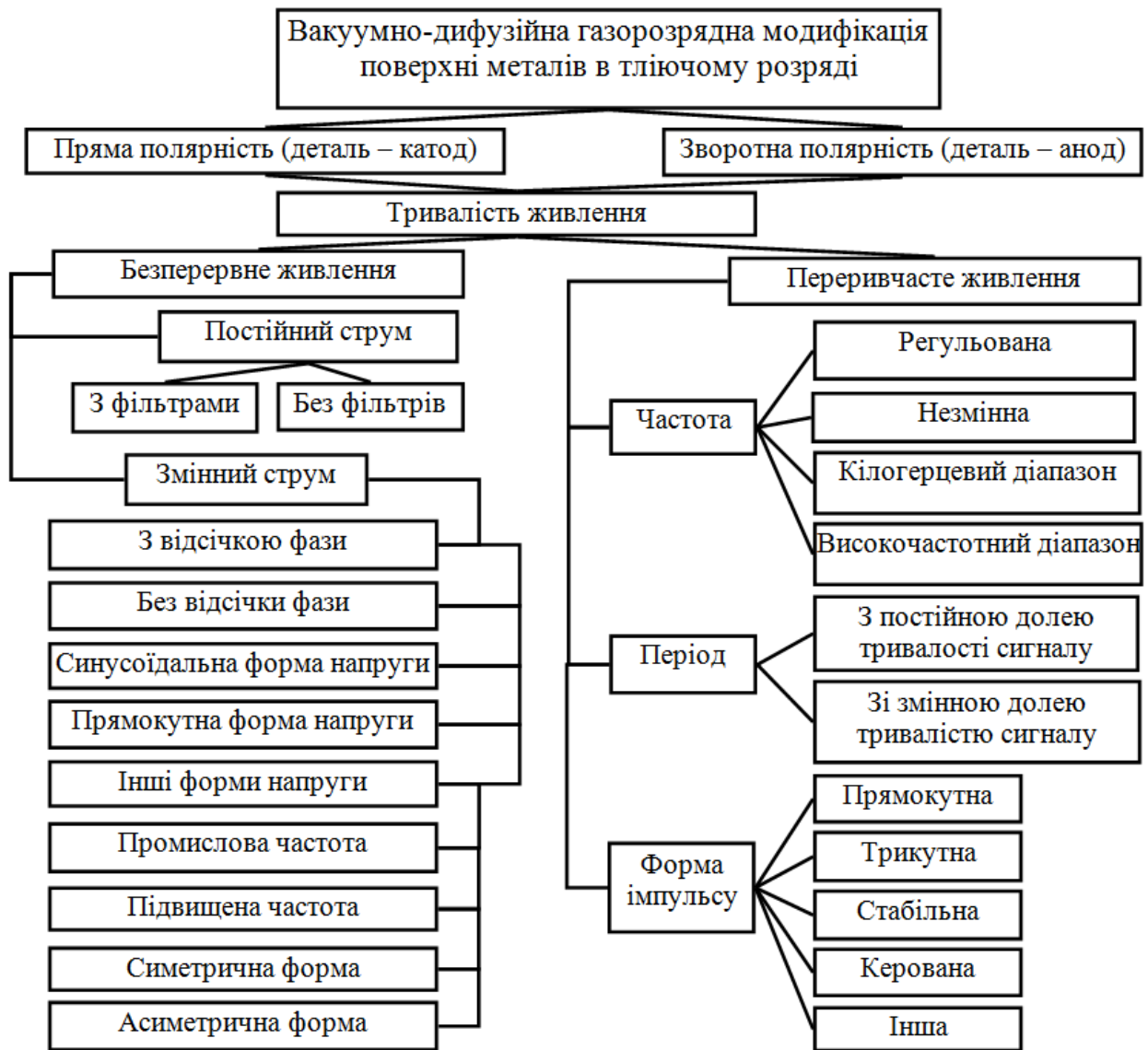


Рис.1.5 – Класифікація процесів АТР за характеристиками джерел живлення [27, 28]

У перспективі спосіб азотування зі зворотною полярністю при належному теоретичному обґрунтуванні може використовуватись як один з досить перспективних варіантів, оскільки при цьому формуються умови для відносно низької енергії падаючого потоку в зоні енергій утворення нітридів. У такий спосіб, низькоенергетичний спектр падаючого потоку можливо буде

допомагати росту активності утворення нітридів при зменшенні інтенсивності їх розпорошення [27, 28].

Спочатку впроваджувались технології азотування з безперервним живленням. Такі системи принципово простіші і забезпечують передачу великої кількості енергії падаючому потоку на поверхню деталей, що обробляються. В результаті це допомагає кращій інтенсивності модифікації і меншій її тривалості в часі. Краща стабільність розряду спостерігається при застосуванні фільтрів пульсацій, але це ускладнює блоки живлення та їхню вартість і зростають витрати електроенергії [28].

В блоках живлення із перемінним струмом можливі варіанти відключення однієї з фаз (як правило – позитивної, якщо застосовується процес з прямою полярністю) повністю або частково. Без такого відключення збільшується нагрівання анода, та знижується інтенсивність модифікування поверхні азотуванням. Проте останнє може призводити до більш м'якого режиму азотування, відповідно – до кращих показників пластичності модифікованого шару. Деякого зменшення негативного впливу позитивної фази на процес азотування можливо досягти асиметрією сигналу напруги за рахунок переміщення її середнього значення у від'ємну зону. Загалом форма сигналу напруги може бути синусоїдальною, прямокутною або довільною з потрібними програмованими її змінами. Очевидно, що при використанні прямокутної форми сигналу напруги при інших незмінних параметрах досягається більша енергонасиченість падаючого потоку, як наслідок, більша жорсткість режиму, але менша тривалість процесу обробки. Досить нескладним є варіант використання напруги промислової частоти (50 Гц) від трансформатора, при якому відпадає необхідність застосування випрямлячів (діодних мостів). Живлення ж струмом підвищеної (заданої) частоти певною мірою подібне за принципом (виключаючи дію позитивної фази) до азотування з циклічним живленням [28].

При азотуванні з постійним живленням є суттєвий недолік технологічного плану, який полягає в підвищеній складності розміщення

деталей в камері. Це пов'язано з тим, що в усіх місцях розміщення деталей, де є щілини більші 0,5 мм, виникає дуговий розряд. Це призводить до локального перегрівання деталей.

Необхідність дотримуватися зазначених вимог при розміщенні деталей в садці ускладнює конструкцію підвісок чи столів, які б забезпечували щільне розміщення деталей на них в камері. Але навіть при реалізації цих умов щодо щільного базування деталі на підвісці чи столі наявність фасок на опорній поверхні деталей може теж викликати певну проблему, оскільки опорні поверхні деталей разом з поверхнею стола формують клиноподібну щілину.

Ще одним недоліком, особливо у зіставленні з газовим пічним азотуванням, є його низька ефективність модифікації отворів, особливо довгомірних. Виходячи з теорії розряду з пустотілим катодом, відомо, що напруженість поля в отворі практично дорівнює нулю на глибині більше двох діаметрів [28, 86]. Одержання необхідних результатів азотування отворів можна досягнути за рахунок суттєвого збільшення часу проведення обробки, але в такій постановці процес йде за схемою звичайного пічного газового азотування.

Останні роки все ж в більш помітних об'ємах використовуються технології азотування в тліючому розряді з нестаціонарним живленням – циклічно-комутований розряд (ЦКР). Головний принцип формування ЦКР полягає в тому, що час тривалості сигналу в циклі повинен бути меншим за час переходу тліючого розряду в дуговий, а тривалість паузи – більшою від часу гасіння дугового розряду, якщо б дуговий розряд виник. При таких умовах практично відпадає потреба в пристроях автоматичного гасіння дугового розряду, або вони можуть застосовуватись за спрощеною схемою. Садка камери може формуватись з вимогами не складнішими, ніж для випадку звичайного пічного азотування. Інакше кажучи, якщо знехтувати питанням нерівномірності розподілу температури поверхні, яке спричинене взаємним нагрівання від деталі, що стоїть поряд, то в садці їх можна розставляти досить близько чи застосовувати будь-які опорні поверхні, гачки для підвішування і таке інше. При цьому наявні локальні винятки (пази, щілини, різьби тощо)

поверхні практично ніякої негативної ролі не відіграють. Дослідним шляхом встановлено, що, використовуючи ЦКР, вдається азотувати довгомірні отвори невеликого діаметра при значній їх глибині [28, 29, 30]. Однак, оскільки подача енергії падаючому потоку проходить тільки в частині циклу, то тривалість азотування знижується, а в деяких випадках власне процес азотування в два і більше разів триваліший, ніж при азотуванні з постійним струмом [28, 31].

Переривчасте живлення за допомогою ЦКР характеризується декількома характеристиками: частотою (періодом) та формою імпульсу. Ідеально було б мати можливість регулювати частоту сигналу комутації, оскільки вона разом з можливістю змінювати шпаруватість (відношення періоду циклу до тривалості сигналу) найбільш суттєво впливатиме на результати обробки [28, 32-37]. Варіант із застосуванням високочастотного поля дозволяє використати стандартні генератори живлення (за умови відключення позитивної фази), хоча з'являються проблеми з екранізацією елементів устаткування для запобігання виникненню радіоперешкод. Але коли використовуються джерела живлення, котрі можуть регулювати шпаруватість, допускається реалізація в одній установці як постійного, так і нестаціонарного живлення. Подібна універсальність дає можливість оптимально використовувати потенційні можливості процесу, тому що при наявності ускладнень, пов'язаних з конфігурацією деталей (локальні винятки, отвори тощо), можливо використати ЦКР, при цьому збільшиться тривалість фази власне азотування. Якщо ж конфігурація (форма) деталі не складна, то вигідно перейти на більш продуктивний спосіб живлення постійним струмом. Аналогічний вибір можна робити, коли виникає потреба використати менш жорсткі технологічні режими. Відповідно до форми імпульсу, це питання потрібно насамперед розглядати як об'єкт теоретичних експериментів формування енергетичного спектру падаючого потоку при нестаціонарній напрузі, як у фазі зростання напруги, так і її зниження. Певне значення, можливо, в цьому сенсі можуть відігравати види напруги [28, 31].

Відомі теоретичні моделі процесу, сформовані в роботах [38–42],

значною мірою акцентують увагу на дифузійних явищах в модифікованому поверхневому шарі, проте не можуть адекватно пояснити деякі процеси, супутні азотуванню в тліючому розряді [43–45].

В теоретичному плані процес азотування в тліючому циклічно-комутованому розряді (АТЦКР) потрібно розглядати, виходячи з концепції енергетичної моделі [1, 4, 28].

Вказані вище аспекти становлять основу нового науково-технічного завдання – азотування конструкційних сталей в циклічно-комутованому розряді. Практичне застосування результатів дослідження насамперед спрямоване на впровадження позитивних властивостей процесів азотування з нестационарним живленням розряду.

1.3 Зносостійкість азотованих в тліючому розряді конструкційних сталей

Складні умови експлуатації сучасних пар тертя визначають велику кількість різноманітних вимог до застосовуваних матеріалів і видів зміцнювальних технологій нанесення покриттів. Для виготовлення спряжених рухомих з'єднань використовують як тверді, так і пластичні матеріали та покриття.

Для відкритих пар тертя (ланцюгові передачі, зубчасті колеса, робочі органи сільськогосподарських ґрунтообробних машин тощо) застосовують матеріали з високою твердістю поверхонь або аналогічні покриття. Для закритих пар тертя (підшипники кочення й ковзання, зубчасті колеса редукторів і т. п.) застосовують матеріали та покриття, які забезпечують м'яку поверхню однієї з контактуючих пар тертя. Останнє призводить до високого припрацювання зони контакту, а відтак і до значного підвищення зносостійкості пари тертя. Для закритих пар бажано сконцентрувати процеси тертя в поверхневому шарі, який володіє пластичністю і не наклепується в ході

багаторазової пластичної деформації, тобто дотримуватися правила позитивного градієнта механічних властивостей [3-5].

Для захисту поверхонь тертя від захоплювання необхідне утворення поверхневих плівок твердих вторинних розчинів кисню або оксидів на активованій в процесі тертя поверхні [4, 25].

Велике значення мають і теплофізичні властивості поверхні, що дозволяють на стадії приробки пластифікувати поверхню за рахунок низької теплопровідності зони контакту, а в подальшому – зменшити вірогідність виникнення температурних спалахів за рахунок значної теплоємності поверхневого шару.

Аналіз фізико-хімічних властивостей показує, що більшість нітридів мають високу твердість [43], і азотовані деталі можуть використовуватися у відкритих парах тертя.

У закритих парах тертя необхідно використовувати нітриди заліза, що мають низьку твердість і забезпечують виконання правила позитивного градієнта механічних властивостей [3-5].

Зменшення і наступна стабілізація коефіцієнта тертя при утворенні оксидних структур підтверджено для заліза, сталі, тугоплавких металів [25, 40]. Також показано, що при зношуванні нітрида TiN коефіцієнт тертя на повітрі зменшується при $t = 700 - 800$ °C, тобто в період активного окиснення і утворення оксидних плівок.

Термодинамічна оцінка взаємодії металів і нітридів з киснем показує, що нітриди заліза більш активно взаємодіють з киснем, аніж із залізом.

Теплофізичні характеристики покриттів також суттєво впливають на зносостійкість. В початковий період контакту трибологічних пар (період їх приробки) за рахунок того, що теплопровідність нітридів нижча за теплопровідність металевої матриці, температура поверхні в зоні контакту підвищується і вона пластифікується. Останнє дозволяє зменшити вірогідність захоплювання 1-го роду. У міру збільшення температури в зоні контакту

підвищується і теплоємність нітридів, а їх висока температура плавлення дозволяють зменшити вірогідність схоплювання 2-го роду.

Отже, для забезпечення зносостійкості закритих пар тертя необхідно при азотуванні забезпечити такі характеристики поверхневого шару:

- 1) високу пластичність і мінімальну наклепуваність при деформаціях;
- 2) забезпечення відсутності за рахунок високої теплоємності складових азотованого шару, максимумів температури в зоні тертя;
- 3) утворення з киснем твердих розчинів.

Багаточисельні результати проведених досліджень впливу БАТР для підвищення зносостійкості закритих і відкритих трибологічних пар при забезпеченні вище вказаних характеристик азотованих поверхневих шарів дозволяють суттєво підвищити надійність і довговічність роботи деталей вузлів тертя в корозійно-активних, абразивних середовищах, в оливі і при терті кочення [1, 5, 21].

Так, для конструкційних сталей 20, 45, 45Х, 38ХМЮА, Х12М при азотуванні за оптимальними режимами (для сталі 45Х; $T = 520^{\circ}\text{C}$, $p = 265$ Па, середовище – 75 об. % N_2 + 25 об. %Ar і $\tau = 4$ год) дозволяють до 10 разів знизити інтенсивність їх зношування в нейтральних і лужних середовищах [5] і в 3 рази при терті в оливі. Наведені дані стосуються БАТР при постійному струмові живлення газорозрядної камери.

У той же час при застосуванні живлення в ЦКР набагато спрощується позиціонування деталей в садці, та з'являється можливість в більш повній мірі використовувати робочий об'єм камери і в поєднанні з автономними режимами живлення, при азотуванні в ЦКР значно розширюються технологічні режими зміцнення [2, 6, 13, 28].

Висновки до розділу 1

1. Встановлено, що залежно від енергетичних умов при модифікації поверхні шляхом АТР мають місце основні конкуруючі, взаємодоповнюючі і

взаємозаперечуючі субпроцеси: утворення нітридів, дифузійне насичення поверхневого шару азотом і розпорошення поверхні. Енергетичні умови перебігу головних субпроцесів суттєво відрізняються. Так, утворення нітридів відбувається при низьких енергіях, натомість процес розпорошення поверхні активізується при високих значеннях напруги, а процеси дифузії азоту в глибину металу при високих значеннях струму.

2. Встановлено, що із 4-х існуючих енергетичних моделей азотування найбільш адекватно описує протікання усіх етапів субпроцесів АТР енергетична теорія Пастуха І. М., розроблена в Подільському науковому фізико-технологічному центрі при Хмельницькому національному університеті, яку з відповідними доповненнями і уточненнями можна застосовати для проведення досліджень і аналізу трибологічних характеристик металів при БАТР з нестаціонарним джерелом живлення.

3. Проаналізовано наявну класифікацію процесів АТР, яка доповнено включенням критеріїв видів джерел живлення (постійних та циклічно-комутованих).

4. Відмічено основні відмінності та необхідні апаратурні, технологічні доповнення потрібні для проведення БАТР в циклічно-комутованому розряді, виявлено проблемні питання процесу азотування з необхідними, наперед заданими характеристиками зносостійкості.

РОЗДІЛ 2

МАТЕРІАЛИ, ОБЛАДНАННЯ І МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Досліджувані матеріали

Для дослідження вибрано конструкційні сталі марок: 20 і 45 – вуглецеві якісні, 40Х – хромиста та 38Х2МЮА – хромоалюмінієва з молібденом високоякісна, які найчастіше використовують для азотування в тліючому розряді.

Дослідження елементного складу виконано на енергодисперсійному рентгенофлуоресцентному спектрометрі «Спрут» виробництва «Укррентген» з SDD детектором X-123 (Amptek, США) [46]. Ідентифікацію марки сталі виконано шляхом визначення вмісту восьми хімічних елементів [47]. Результати аналізу хімічного складу вказаних сталей подано у рядках «Аналіз» таблиці 2.1. У рядках «ДСТУ» таблиці зазначено хімічний склад досліджуваних сталей, що відповідає стандартам за постійними домішками, які вводяться в сталь спеціально, а саме: ДСТУ 7809:2015 (для сталі 45) та ДСТУ 7806:2015 (для сталей 40Х та 38Х2МЮА). Контроль хімічного складу зазначених сталей за випадковими домішками стандартом не передбачено.

Проведені дослідження зразків на здатність поглинання аргону у процесі азотування показали відсутність наявності аргону у поверхневих шарах сталей.

Отже, розчинність аргону у досліджуваних сталях відсутня, а тому отримані результати пов'язані виключно зі взаємодією на межі розділення активованого азоту газової суміші з поверхнею сталі.

Після азотування контрольні зразки циліндричної форми діаметром 6 мм і довжиною 21 мм розрізали навпіл в діаметральній площині при режимах різання, що забезпечували незмінність структури модифікованого поверхневого шару.

Таблиця 2.1

Хімічний склад досліджуваних конструкційних сталей

Марка сталі		Вміст легуючих елементів, %							
		C	Si	Mn	Cr	Ti	Al	P	S
Сталь 20	ДСТУ	0,17–0,24	0,17–0,37	0,35–0,65	$\leq 0,25$	–	–	–	–
	Аналіз	0,21	0,33	0,475	0,05	–	–	0,014	0,019
Сталь 45	ДСТУ	0,42–0,5	0,17–0,37	0,5–0,8	$\leq 0,25$	–	–	–	–
	Аналіз	0,41	0,37	0,575	0,07	0,076	0,099	0,017	0,029
40X	ДСТУ	0,36–0,44	0,17–0,37	0,5–0,8	0,8–1,1	–	–	–	–
	Аналіз	0,42	0,36	0,7	1,0	0,056	0,090	0,011	0,016
38X2МЮА	ДСТУ	0,35–0,42	0,2–0,45	0,3–0,6	1,35–1,65	0,15–0,25	0,7–1,1	–	–
	Аналіз	0,42	0,44	0,56	1,62	0,22	1,0	0,015	0,026

2.2 Установка для проведення БАТР з автономними енергетичними режимами поверхневого зміцнення

Дослідження впливу енергетичних параметрів процесу АТР на його результати (структуру і фазовий склад модифікованого шару, його загальну глибину, товщину нітридної зони, твердість модифікованої поверхні, її розподіл по товщині азотованого шару, а також трибологічні властивості) є важливим науковим і практичним завданням, що дозволяє провести оптимізацію режимів азотування для підвищення працездатності деталей в заданих умовах експлуатації.

Азотування досліджуваних зразків проводились на установці УАТР-1, призначеній для поверхневої модифікації деталей, інструменту та оснащення методом безводневого азотування в тліючому розряді.

Структуру установки для азотування в тліючому розряді показано на рис. 2.1.

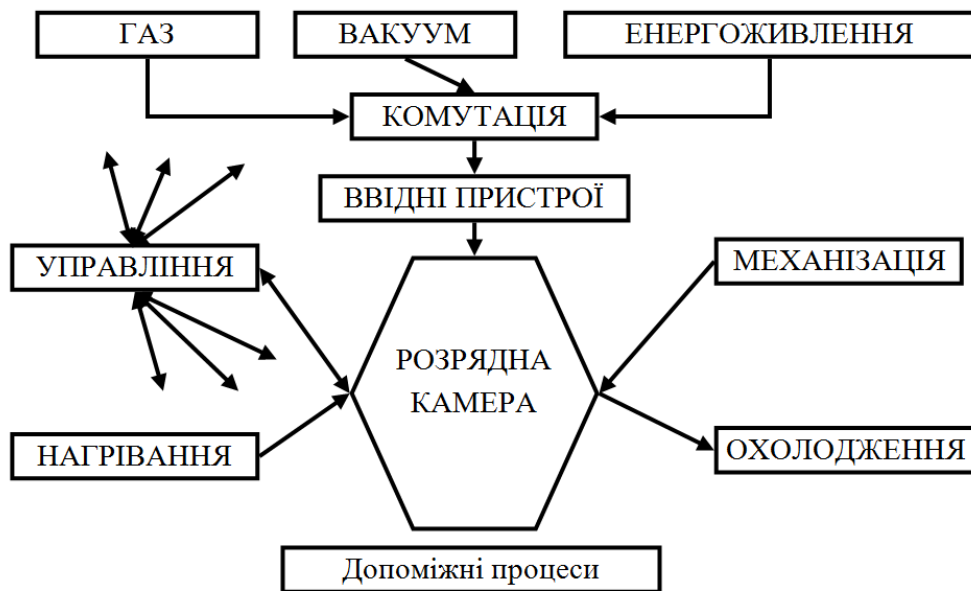


Рис. 2.1 – Загальна структура установки для азотування в тліючому розряді

Процес АТР відбувається у розрядній камері, корпус якої заземлено і одночасно з'єднано з анодом, а катодом є модифікована деталь, що підвішується на спеціальній підвісці.

В окремих шафах змонтовано: газову систему з балонами для газоподібних компонентів і двоступеневу систему очищення газової суміші; систему керування, в яку може входити баластний реостат для вибору варіативного режиму електроживлення. Блок живлення складається з тиристорного трифазного регулятора напруги та двоплечного діодного випрямляча. До камери через еластичне з'єднання підключено вакуумну систему. Охолодження камери і перетворювача здійснюється проточною технічною водою. Газоподібні компоненти газової суміші вводять у заданому об'ємному співвідношенні у змішувальний балон, звідки вони після очищення від вологи і кисню надходять у розрядну камеру. У камері за допомогою вакуумної системи підтримується певне розрідження, що створює умови для стабільного тліючого розряду між анодом і катодом при різних електричних параметрах, характерних для певних фаз процесу. Модифіковані деталі, які послідовно з'єднані з катодом, піддаються бомбардуванню падаючим потоком, що сприяє інтенсифікації всіх субпроцесів, характерних для АТР.

Принципову схему установки показано на рис. 2.2.

Особливістю цієї установки є використання, як насичене середовище, безводневих газових сумішей (суміші азоту з аргоном), що виключає водневе окрихчування поверхні металу. Відсутність водню в насиченому середовищі вимагає застосування особливо чистих насичувальних газів (99,99%) і значної герметичності системи газопостачання та вакуумної камери. Навіть невелика кількість кисню (0,1%) спричиняє утворення окисів на поверхні металу і різко знижує дифузію азоту в метал. Тому, на відміну від установок, що працюють в середовищах аміаку, сумішах азоту з воднем, установка (представлена) має в системі газозабезпечення кисневий уловлювач, який нейтралізує залишки кисню в середовищі перед його попаданням у вакуумну камеру.

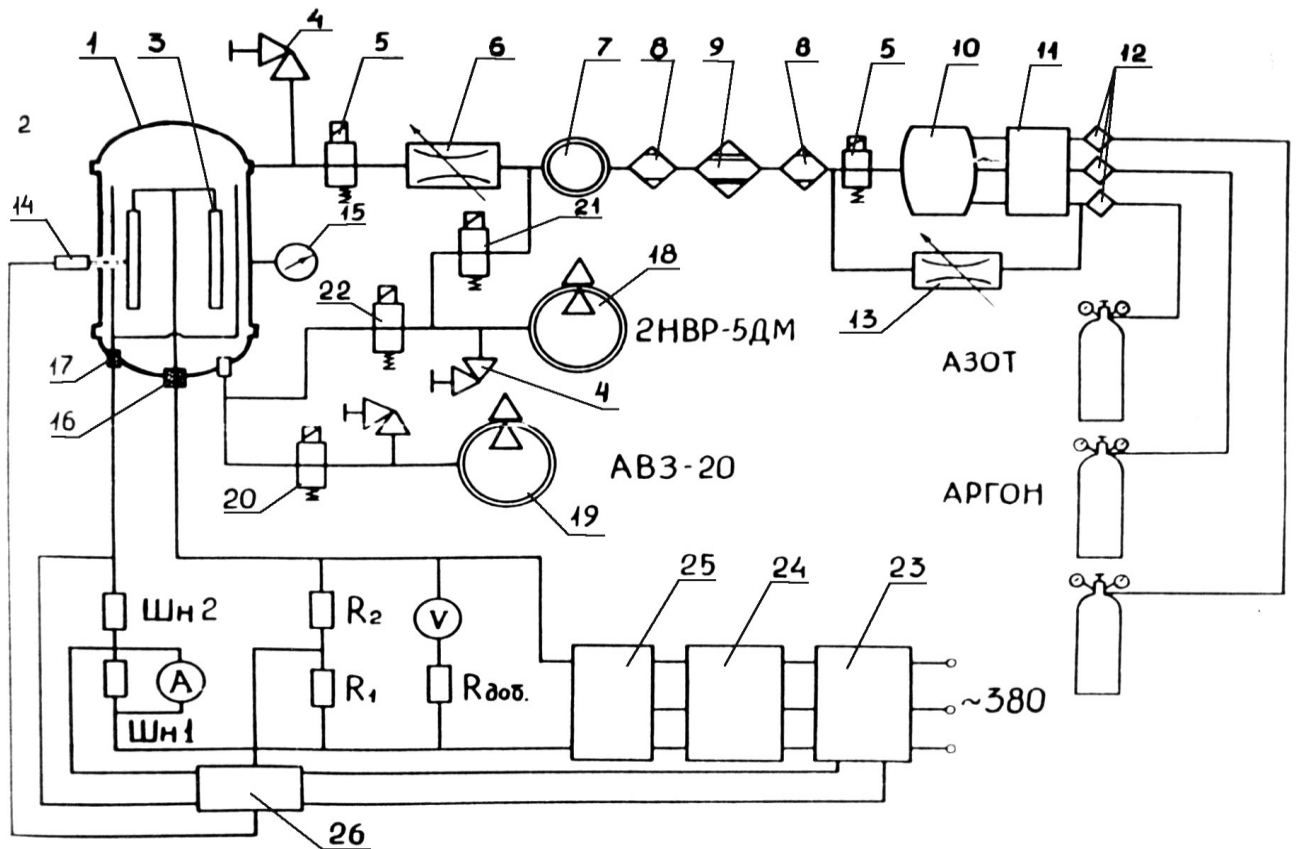


Рис. 2.2 – Принципова схема установки “УАТР-1”

1 – вакуумна камера; 2 – анод; 3 – катод; 4 – клапан натікання повітря; 5, 20, 21, 22 – електромагнітні вакуумні клапани; 6, 13 – дросель; 7 – розхідомір газів; 8 – вологовідділювач; 9 – киснева пастка; 10 – змішувач газів; 11 – дозатор; 12 – фільтри; 14 – датчик температури; 15 – вакуумметр; 16 – струмоввід катоду; 17 – струмоввід аноду; 18, 19 – вакуумні насоси; 23 – регулятор напруги; 24 – силовий підвищувальний трансформатор; 25 – випрямляч струму; 26 – блок стабілізації тліючого розряду

З метою забезпечення незалежності енергетичних параметрів режимів АТР установку було модернізовано. Для реалізації вказаного завдання було запропоновано конструктивне рішення, представлене на рис. 2.3.

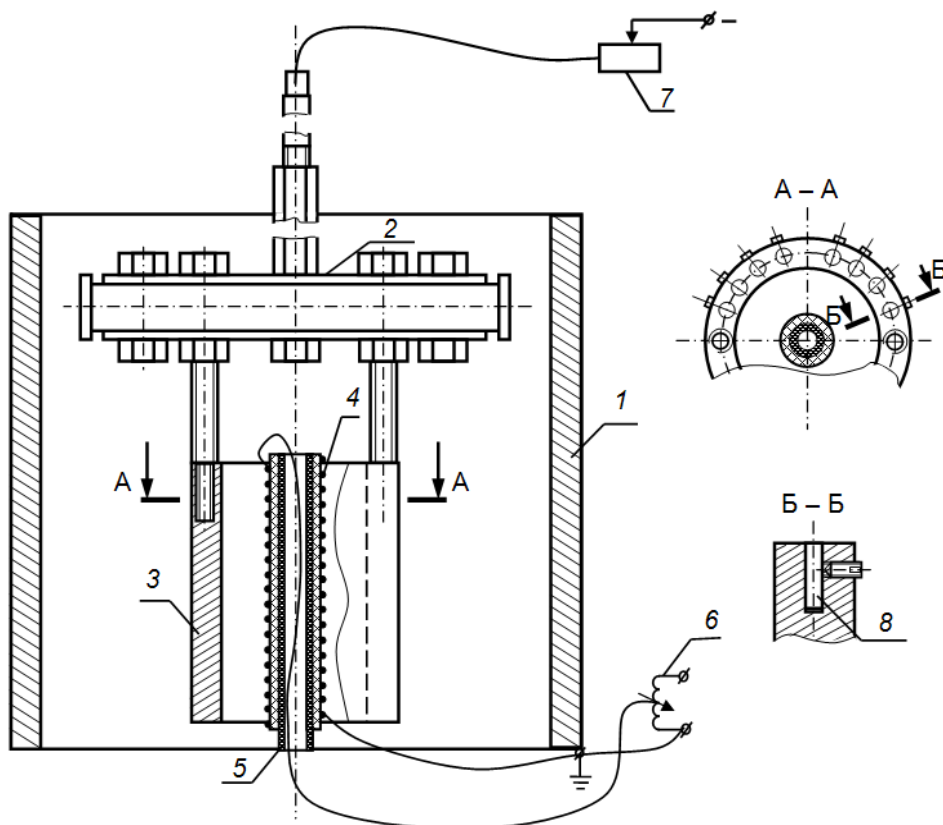


Рис. 2.3 – Схема пристосування для реалізації процесу азотування у тліючому розряді з автономними параметрами насичення: 1 – корпус камери; 2 – підвісна оснастка; 3 – стакан із зразками; 4 – нагрівач; 5 – керамічна трубка; 6 – автотрансформатор; 7 – баластний реостат; 8 – зразки

Корпус камери 1 служить анодом, всередині якого розміщено підвісну оснастку катода 2, до неї приєднано стакан із зразками 3, де встановлюються зразки 8. З внутрішньої сторони стакан нагрівається спіральним нагрівачем 4 на керамічній трубці з виводом одного з кінців ніхромової обмотки через центральну керамічну трубку 5. Ступінь нагріву регулюється за допомогою автотрансформатора 6. Баластний реостат 7 застосовується для зміни співвідношень між струмом і напругою.

Контроль температури проводився за допомогою пірометра моделі АПРС-М. Вимірювальну систему прилада таровано в умовах, які відповідають реальному тліючому розряду.

2.3 Апаратна реалізація режиму азотування в циклічно-комутованому тліючому розряді

Серед великої кількості методів керованого впливу на перебіг азотування в тліючому розряді досить актуальними є ті, що пов'язані з живленням камери змінним струмом, в тому числі з циклічно-комутованим струмом [48].

Застосування режиму циклічної комутації при азотуванні в тліючому розряді дає додаткові переваги, у порівнянні з традиційним азотуванням в тліючому розряді, покращення ефективності та якості технологій БАТР. Зокрема з'являється можливість азотування деталей складної конфігурації: наявність глибоких та вузьких пазів, довгомірних отворів малого діаметра та значної глибини тощо. Для отворів менше 8 мм імпульсне (циклічне) живлення більш ефективне, оскільки відбувається азотування внутрішніх поверхонь отворів [48, 49].

Застосування електронного ключа в схемі живлення камери дозволяє, не змінюючи потужності сигналу, що виділяється на катоді, збільшити напругу катодного падіння таким чином, щоб збільшити кінетичну енергію іонів.

Головною проблемою при організації циклічно-комутованого живлення є підбір елементної (транзистори, мікросхеми тощо) бази. Донедавна ключовим елементом електронного ключа були електронні лампи. Відомі різновиди реалізації такого живлення із застосуванням водневого тиратрона ТГІ1-500/16 [49]. Дослідний стенд, використаний в роботі, є дещо удосконаленою аналогічною схемою (рис 2.4) [48, 49].

В розробленій схемі напруга на катод робочої камери подається з автотрансформатора ЛАТР і розв'язуючого трансформатора TV1 через діодний міст VD, щоб забезпечити зміну напруги в межах від 0 до 3000 В. Оскільки в схемі не вистачає активного захисту від переходу тліючого розряду в дуговий, його роль частково виконує дросель L. Тому для періодичного переривання струму в тліючому розряді використано водневий тиратрон (Л1) ТГІ1-16/500. Частота припинення подачі струму задається генератором керуючих імпульсів

(ГУИ1). Анод тиратрона об'єднується з катодом розрядного вузла, а катод заземляється. При подачі на сітку тиратрона позитивних імпульсів з амплітудою близько 420В він періодично відкривається, і в розрядному вузлі загоряється розряд [48].

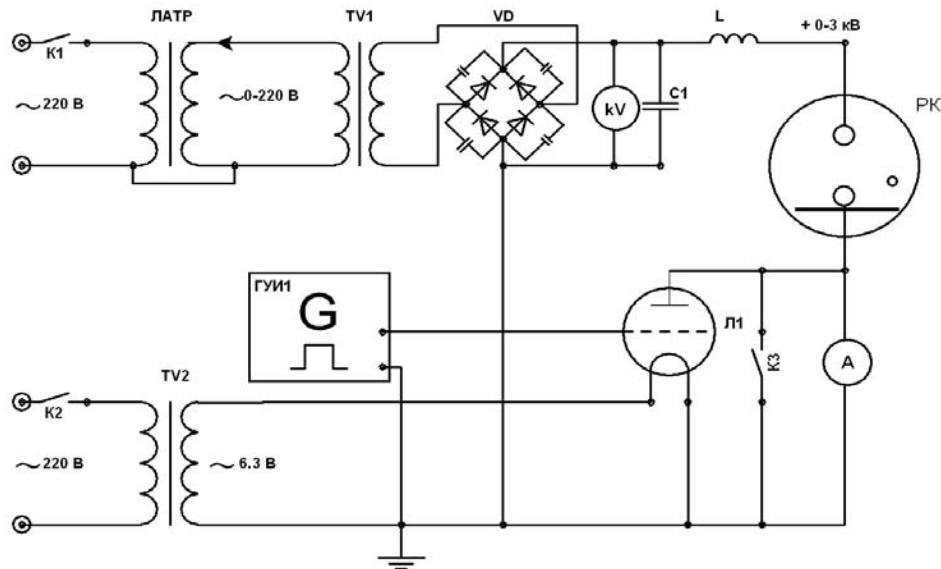


Рис. 2.4 – Реалізація азотування в тліючому розряді з циклічно-комутованим живленням з тиратроном в якості ключового елемента [48]

Сьогодні на зміну електронних ламп як ключових елементів імпульсних схем прийшли напівпровідникові прилади: транзистори та тиристори. Вдалий приклад реалізації циклічно-комутованого живлення з транзистором наведено в [48, 49]. Функціональну схему розробленого контролера переривчастого режиму подано на рис. 2.5.

Особливістю реалізації цієї схеми контролера є акцент на захисті від переходу тліючого розряду в дуговий та захисті від перевантажень електронного ключа, оскільки практичний досвід застосування такої схеми підтвердив її живучість та працездатність при використанні широкого діапазону напруги та струму. Однак було виявлено суттєвий недолік, який виявився у виході з ладу силового ключа, через пробій транзистора високою напругою при тому, що значення робочої напруги контролювалися та знаходилися в допустимих межах. Така робота транзисторів

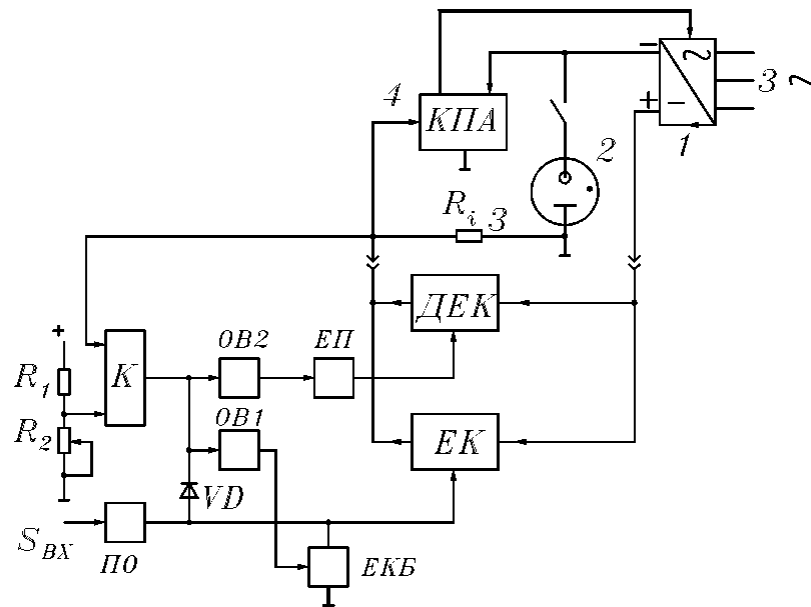


Рис. 2.5 – Функціональна схема контролера переривчастого режиму:

1 – трифазний випрямляч; 2 – розрядна камера; 3 – датчик струму;
 4 – контролер процесу азотування; R_i – датчик струму; R_1 , R_2 – задавачі порогу; K – компаратор; S_{BX} – вхідний керуючий сигнал; $ПО$ – підсилювач-обмежувач; $ОВ1$, $ОВ2$ – одновібратори; $ЕК$ – електронний ключ;
 $ДЕК$ – допоміжний електронний ключ; $ЕП$ – емітерний повторювач;
 $ЕКБ$ – електронний ключ блокування; VD – діод блокування [48]

електронного ключа може бути пов'язана з тим, що характерною ознакою, притаманною для циклічно-комутованого живлення, є вихід сплесків напруги на електродах розрядної камери, що можуть підштовхувати відповідні субпроцеси, наприклад: розпорошення поверхні деталі, дифузію азоту в глибину поверхневого шару тощо. Через те, що робоча камера з певними припущеннями може бути представлена у вигляді індуктивного навантаження [48, 49], характерні сплески напруги виникають як при замиканні схеми «джерело живлення – робоча камера», так і при його розмиканні (рис. 2.6).

Характерний для всіх кривих сплеск струму та напруги може складати понад 80% відносно його робочого значення [49]. У процесі дослідження режимів роботи електронного ключа було встановлено режими, при яких амплітуда сплесків напруги комутованого струму становить понад 3000 В при

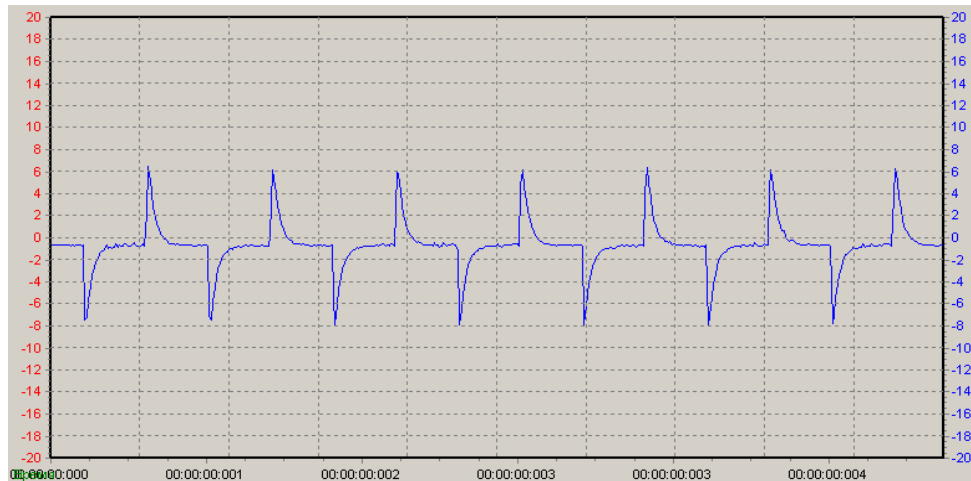


Рис. 2.6 – Характерний вигляд осцилограми падіння напруги на робочій камері при азотуванні в циклічно-комутованому тліючому розряді [48]

величині пікового струму понад 20 А. Тому гарантувати перемикання струму в таких умовах, зважаючи на існуючу елементну базу, є досить важким завданням. Оскільки значна більшість напівпровідникових елементів має максимальне значення робочої напруги, яка не перевершує значення в 1200 В. Враховуючи цю інформацію, правильно було б реалізувати схему ключа з послідовним підключенням транзисторів. Традиційну схему послідовного підключення транзисторів продемонстровано на рис. 2.7 [48, 49].

Однак така схема продуктивно працює при відносно малих частотах комутації (близько 1 кГц), тому зі збільшенням кількості транзисторів частотні показники тільки погіршуються, що обмежує робочі границі частот комутації. Для створення електронного ключа, який би міг працювати на більш високих граничних частотах, необхідно створити одночасне управління всіма транзисторами схеми (рис. 2.8). Реалізація такого управління можлива лише при існуванні гальванічно-ізолюваного драйвера [48].

Для досягнення цієї мети можна використати оптрон або трансформатор. Кожен із запропонованих варіантів має свої переваги та недоліки, тому було обрано керування затворами ключових транзисторів за допомогою інтегрального оптронного драйвера HCNW-3120. Мікросхема забезпечує

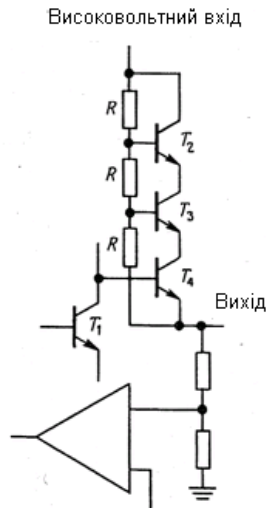


Рис. 2.7 – Послідовне включення транзисторів для підвищення напруги пробою

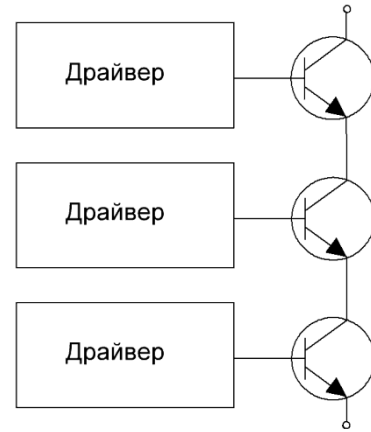


Рис. 2.8 – Структурна схема послідовного з'єднання транзисторів з синхронним керуванням [48]

піковий струм управління затворами транзисторів 2А (в режимі встановлення високого і низького рівня сигналів), що дозволяє застосовувати її без додаткових каскадів. Напруга живлення драйвера знаходиться в межах від 15 до 30 В. Важливим параметром також є напруга гальванічної розв'язки оптопар. В такому випадку вона становить не менше 5000 В, що дозволяє застосовувати мікросхему при різних значеннях напруги катодного падіння робочої камери. Схему драйвера одного силового транзистора представлено на рис. 2.9 [48].

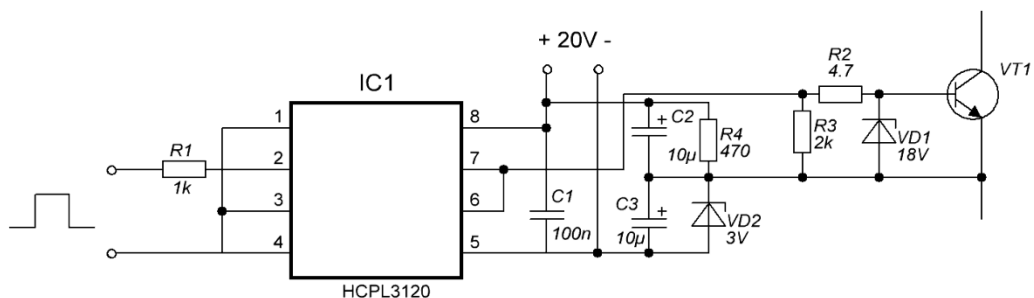


Рис. 2.9 – Схема драйвера силового транзистора

Для гарантованого покращення роботи такої схеми було ухвалено два ключових рішення: налаштування напруги на кожному з елементів та створення схеми керування. Головною проблемою при забезпеченні послідовного підключення є симетрична роботи кожного з елементів системи,

тому що при наявності несиметричності в роботі елементів, коли один з них відкривається та закривається раніше за інші, що в свою чергу призводить до підвищених втрат тепла на цьому елементі, а отже зниженню надійності системи загалом. Для реалізації статичної симетрії було використано резистори R1 – R3, включені паралельно кожному з транзисторів T1 – T3. Умовою динамічної симетрії є забезпечення малих відхилень часу проходження сигналу в драйвері. Для цього можуть бути використані RC або RCD схем, які можуть дуже ефективно підтримувати динамічну симетрію. Ці схеми зменшують, а потім балансують швидкість dv/dt при комутації. Однак, вимогою для більшості пасивних силових компонентів є висока надійність елементів RC або RCD ланцюгів, які повинні витримувати високі напруги. Перевага пасивного динамічного симетрування полягає у відсутності додаткової схеми керування транзистором, і для цього достатньо використати стандартний драйвер [49]. На рис. 2.10 представлено схему з'єднання силових ключів з урахуванням вищезазначеного [48].

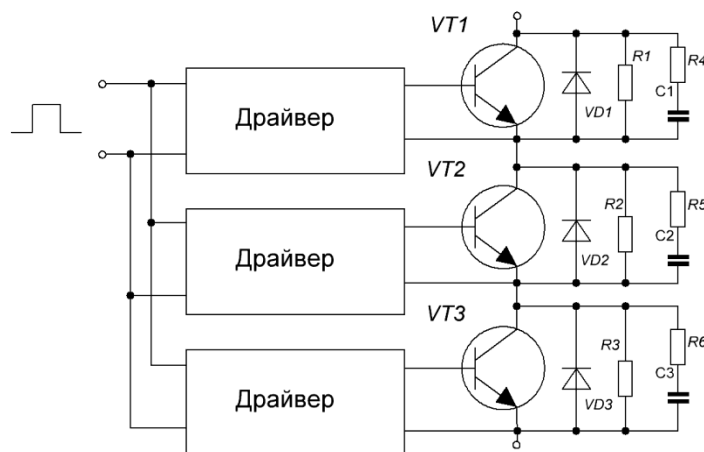


Рис. 2.10 – Схема послідовного з'єднання ключових елементів

У результаті проблему перевищення гранично допустимого значення напруги на головних елементах електронного ключа було знято. Проте залишається нагальним питання параметрів керуючого сигналу, зокрема сигналу та коефіцієнта заповнення імпульсу (шпаруватості). На рис. 2.11 подано осцилограму напруги на електродах робочої камери. Як видно з рисунка, мікрофази наявності живлення на електродах розрядної камери

чергуються з мікрофазами його відсутності. Таким чином, змінюючи параметри роботи електронного ключа, можна регулювати часові характеристики «запалювання» та «згасання» розрядних процесів. Виходячи з того, що форма керуючої напруги є прямокутною, до таких параметрів слід віднести частоту та шпаруватість сигналу. В розрізі того, що при запалюванні та згасанні розряду має місце коливальний процес (робоча камера є LC-контуром), а також з огляду на особливості роботи електронного ключа, актуальним є питання вибору граничних значень частоти та шпаруватості керуючого сигналу [48].



Рис. 2.11 – Осцилограми напруги катодного падіння азотованих з циклічно-комутованим живленням зразків із сталі 38Х2МЮА частотою 1кГц, 50 В/под.

Дослідженнями було встановлено, що мінімальною допустимою межею частоти керуючих сигналів імпульсів є частота близько 500 Гц, тоді як верхня межа частоти, зважаючи на існування коливального процесу зі сталими для заданих умов роботи камери параметрами, може бути обмежена частотою імпульсів в 10кГц. Такі величини керуючого сигналу застосовуються для сигналу у формі меандру, тобто коли коефіцієнт заповнення сигналу (шпаруватість) становить 50%. Критерією, що обмежує частоту і коефіцієнт заповнення сигналу, є стала часу перехідних процесів в камері та на елементах електронного ключа. Коефіцієнт заповнення зв'язаний з частотою імпульсів наступною залежністю [48]:

$$D = \tau \cdot \nu \quad (2.1)$$

де τ – тривалість імпульсу, с; ν – частота імпульсів, Гц.

Час подачі імпульсу не повинен бути меншим за тривалість проміжних процесів, оскільки при цьому електронний ключ буде працює досить

нестабільно і може вийти з ладу при високих викидах напруги. Таким чином умова працездатності ключа запишеться наступним чином [48]:

$$\tau \gg \tau_{\min}, \quad (2.2)$$

де $\tau_{\min}$ – мінімально допустимий час імпульсу, який чисельно дорівнює тривалості перехідних процесів [48].

Звідти визначаємо граничне значення коефіцієнта заповнення [48]:

$$D = \tau_{\min} \cdot \nu. \quad (2.3)$$

Зважаючи на те, що знайдена в ході досліджень стала часу проміжних процесів камери не перевищувала значення в 30 мкс, то для діапазону частот від 0,5 до 10 кГц робочу зону представлено на рис. 2.12 [48].

Практична реалізація вищеописаного пристрою контролера переривчастого режиму (КПР) на установці азотування в тліючому циклічно-комутованому розряді підтвердила його працездатність в умовах реальних технологічних процесів. При цьому досягнуті всі заплановані вищевідзначені передумови, які відкривають шлях до експериментального застосування циклічно-комутованого розряду для модифікації поверхні металевих сплавів на зовсім іншій основі. Застосування означеного методу дозволяє вирішувати цілий ряд проблем технологічного порядку, серед яких найголовніша – модифікація деталей складної форми, з отворами та заглибленнями малих поперечних та великих за протяжністю розмірів. Подібні деталі вдавалось ефективно азотувати тільки з використанням пічного азотування в аміачних газових середовищах, тобто процесу, який в сучасних умовах неприйнятний не тільки з огляду на його економічні показники, але й, насамперед, з позицій екологічної безпеки. Крім того, суттєво зменшується імовірність пошкодження поверхні, викликаного випадковим переходом тліючого розряду в дуговий, що часто спостерігається при застосуванні безперервного живлення розрядної камери.

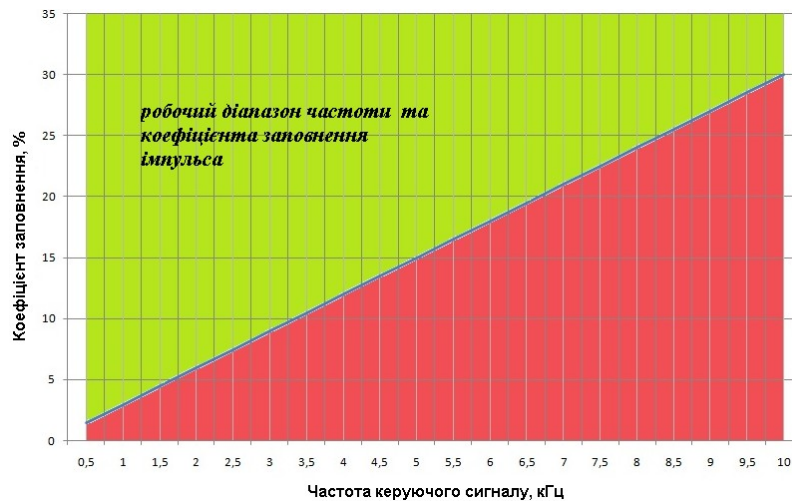


Рис. 2.12 – Робочий діапазон коефіцієнта заповнення імпульсу керуючого сигналу

Крім того, розроблено пристрій для азотування в тліючому розряді з живленням змінним струмом, який забезпечує можливість суттєвого спрощення устаткування та зниження його вартості [50, 51].

В пристрій для азотування в тліючому розряді з живленням змінним струмом, що включає блок живлення камери, який містить тиристорний регулятор напруги, трансформатор, баластний реостат, датчики струму та напруги, блок автоматичного відключення, згідно з корисною моделлю введено джерело з нестаціонарним живленням зі змінним струмом заданої частоти.

Суть корисної моделі полягає насамперед в можливості суттєвого спрощення конструкції установки для азотування в тліючому розряді та підвищенні її надійності, а також в зменшенні вартості устаткування, що вирішується шляхом заміни безперервного джерела живлення розряду із випрямлячем та фільтрами для згладжування включно на джерело з нестаціонарним живленням зі змінним струмом заданої частоти. При цьому підвищується надійність роботи установки, а також за рахунок суттєвого зниження амортизаційних нарахувань та втрат електричної енергії зменшується собівартість обробки азотованих деталей. Використання змінного струму також впливає на хід та результати азотування, оскільки періодична зміна полярності електродів камери сприяє процесам очистки поверхні від адсорбційного шару,

що, в свою чергу, позитивно впливає на характер насичення поверхні азотом та сприяє суттєвій зміні фазового складу поверхневого модифікованого шару [52, 53].

Експериментально перевірена можливість працездатності заявленого пристрою для азотування в тліючому розряді на діючій промисловій установці підтвердила можливість його реалізації та працездатність, при цьому суттєво спростилась конструкція допоміжного устаткування і відповідно його вартість та вартість експлуатації. Помітно знизилась потреба в електричній енергії за рахунок відсутності втрат на випрямлення струму, що також позитивно відобразилося на собівартості обробки. Аналіз результатів металографічних досліджень модифікованого шару вказує на наявність більш рівномірного градієнту твердості по глибині (градієнт знизився в 1,7-3,5 разів), що, в свою чергу, підвищує зносостійкість деталей.

2.4 Методика проведення металографічних досліджень

Завданням металографічного дослідження є встановлення взаємозв'язку між якісними і кількісними характеристиками структури металевих матеріалів, з одного боку, та їхніми фізичними, механічними, експлуатаційними та іншими властивостями, з іншого боку.

Дослідження проводилися на спеціальним чином підготовлених металографічних шліфах. Для виготовлення шліфів контрольні зразки після азотування розрізались в діаметральній площині. З метою запобігання сколюванню шару та неплоскості аналізованої поверхні («завал шліфа») зразки закріплювалися у спеціальних оправках (струбцинах) з прокладками з фольги міді, після чого досліджувані поверхні піддавалися шліфуванню, поліруванню, промиванню і травленню. Травлення зразків для виявлення структури модифікованого шару виконувалось за допомогою тривідсоткового спиртового розчину азотної кислоти HNO_3 .

Аналіз отриманих зразків виконувався у три етапи: мікроскопія – аналіз зображення з метою виявлення структури матеріалу; вимірювання твердості (твердометрія); рентгенофазовий аналіз.

Мікроскопічний метод дослідження структури. Вимірювання товщини нітридної зони проводилися за допомогою металографічного мікроскопа МІМ-10, що дозволяє здійснювати візуальне спостереження та фотографування мікроструктури металів, а також кількісний аналіз фазового та структурного складу.

Товщина нітридної зони модифікованого шару розраховувалась як середнє арифметичне значень вимірювань, проведених у 50 точках досліджуваного зразка. Загальна товщина азотованого шару визначалась відповідно до ДСТУ2494-94.

Методику вимірювання мікротвердості виробів і зразків з металів та сплавів стандартизовано й проведено згідно з ДСТУ ISO 6507-1:2007.

Мікротвердість вимірювали на приладі ПМТ-3 при навантаженні 0,98 Н (0,1 кг) з фіксацією значень як на поверхні, так і на певній відстані від неї вглиб зразка, а саме: 0, 25, 50, 100, 200, 300, 500 мкм.

Дослідження елементного складу виконані на енергодисперсійному рентгенофлуоресцентному спектрометрі “Спрут” виробництва “Укррентген” з SDD детектором X-123 (Amptek, США)

Рентгенофазовий аналіз [54–56] здійснено на рентгенівському дифрактометрі загального призначення ДРОН-3 у фільтрованому випромінюванні залізного анода, в діапазоні кутів 2θ від 20° до 100° з кроком сканування $0,1^\circ$ і часом експозиції 10 с. Рентгенозйомка виконувалась від плоских торців циліндричних зразків, підданих азотуванню в глибину модифікованого шару.

2.5 Методика проведення трибологічних досліджень

Експериментальні дослідження зразків на зносостійкість проводились на універсальній машині тертя моделі 2168УМТ для випробування матеріалів. Машина складається з наступних основних частин: установки випробувальної, пульта керування, пульта з силовим обладнанням і з'єднувальних пристроїв (рис. 2.13).

Для закріплення зразків на супорті машини було виготовлено спеціальні державки задля забезпечення контакту по всій поверхні торця зразка [57–59]. Їх конструкція наведена на рис. 2.14, загальний вид супорта машини тертя – на рис. 2.15, а взаємне розміщення зразка і контртіла при їх контактуванні – на рис. 2.16.

Елементом конструкції, який забезпечує самовстановлення зразка на контртілі, є сферичний шарнір. Кульку попередньо було піддано відпуску, потім у ній висверлили отвір, який дорівнює діаметру зразка, після чого її розпиляли на дві частини.



Рис. 2.13 – Загальний вигляд універсальної машини тертя УМТ-2168

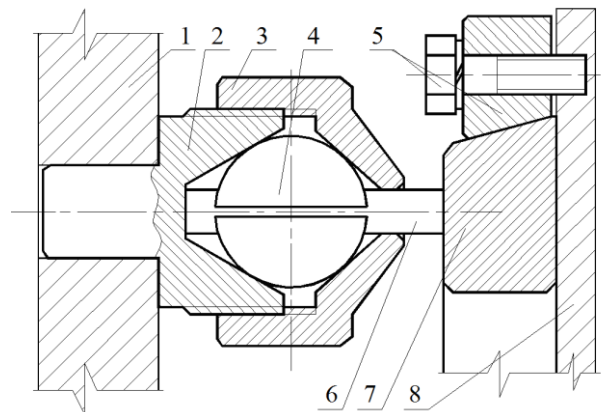


Рис.2.14 – Схема закріплення досліджуваних зразків:

1 – супорт, 2 – сидло, 3 – гайка, 4 – сферичний шарнір, 5 – фіксатор контртіла, 6 – зразок, 7 – контртіло, 8 – планшайба

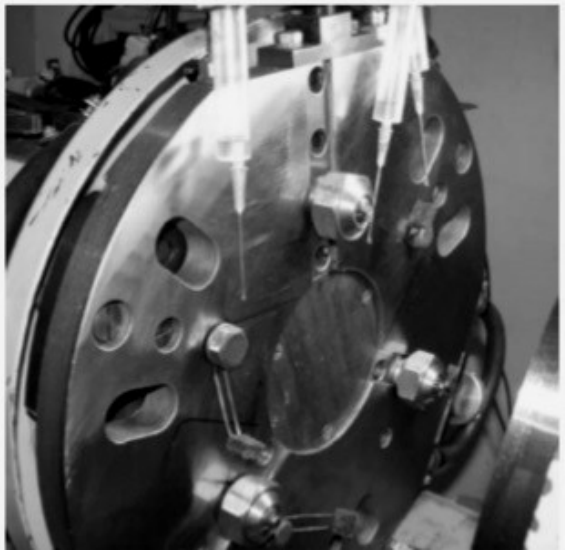


Рис. 2.15 – Загальний вид супорта
машини тертя



Рис. 2.16 – Взаємне розміщення зразка
і контртіла при їх контактуванні

Для встановлення зразків необхідно підвести супорт з державками до контртіла. За рахунок сили притискання, котра відповідає номінальному тиску в контакті, вони самовстановлювались, і після цього вся конструкція фіксувалась затягуванням гайок. Візуальний контроль свідчить про високу якість контакту: пляма контакту по всій площі взірця спостерігається вже на перших відрізках шляху тертя [57].

Обрана методика дослідження повинна надати якісну картину зміни інтенсивності зношування сталей по глибині азотованого шару та її залежності від структурних складових азотованого шару, які визначаються режимами азотування. При цьому найбільш суттєвою методичною проблемою при проведенні випробувань на зносостійкість є неможливість врахування усіх чинників, які діють на пару тертя в умовах експлуатації. Це пояснюється не лише багатоманітністю та складністю цих процесів, але й відсутністю серед науковців єдиних поглядів на механізм зношування та критерії зносостійкості матеріалів.

Аналіз літературних джерел [60–67] дозволив визначити наступні характеристики проведення трибологічних випробувань: схема тертя – «диск – палець»; тип контакту – ковзання площини по площині (торець циліндричного

зразка ковзає по плоскому металевому диску); вектор відносної швидкості при цьому направлений по дотичній до площини контакту); характер взаємного переміщення – вірець нерухомий, контртіло обертається (вірець проковзує по контртілу на доріжці достатньо великого радіуса, який порівняно з розмірами вірця забезпечує мінімальну різницю швидкостей в усіх точках площини контакту); матеріал контртіла – сталь ШХ15 із твердістю основи HRC61; тиск у зоні контакту $P = 16$ МПа; швидкість ковзання $v = 0,1$ м/с; контрольований параметр – лінійний знос h , що визначався як зміна у результаті проходження ділянки довжиною l лінійного розміру вірця, виміряного по нормалі до поверхні тертя.

У міру проходження шляху тертя крок фіксації результатів випробувань змінювався (табл. 2.3).

Таблиця 2.3

Періодичність вимірювання результатів випробування

Ділянка шляху тертя, м	0 – 50	50 – 200	200 – 400	400 – 1000	більше 1000
Крок вимірювання, м	5	10	25	50	100

Випробування припинялися при настанні катастрофічного зношування.

2.6 Оснастка для моделювання БАТР отворів з відносно малим діаметром

Експериментальні дослідження моделювання БАТР отворів проводилися на пристрої для оцінки якості внутрішніх поверхонь представленому на рис. 2.17. Моделлю є пустотілий циліндр, в який на різних відстанях від торця просвердлено серію радіальних отворів. В ці отвори вставляються зразки (рис. 2.18). Таким чином, кожний зразок азотується з двох торців, що дає можливість, по-перше, азотувати із зовні та з середини моделі при практично однаковій температурі, по-друге, порівнювати результати азотування двох

поверхонь, при цьому різниця в умовах полягає тільки в розташуванні цих поверхонь: зовнішнє чи внутрішнє [68].

Всі інші фактори, які могли б впливати на результати модифікації, практично ідентичні. Наявність серії радіальних отворів створює можливість одночасного азотування зразків, виготовлених з різних сталей при однакових параметрах технологічного процесу, що суттєво прискорює експериментальні дослідження. Повна довжина моделей становить 360 і 400 мм, а діаметр отворів 20 і 40 мм. Таким чином найбільший коефіцієнт відношення довжини отвору до його діаметра склав 18 та 10 відповідно [68].

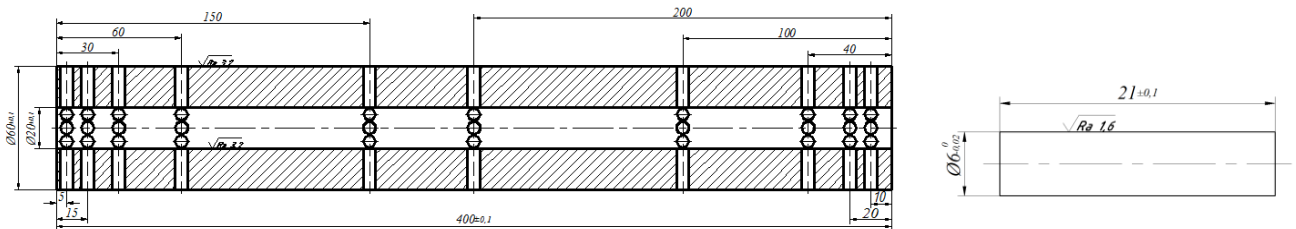


Рис. 2.17 – Ескіз моделі циліндра

Рис. 2.18 – Ескіз зразка

Азотування проводилось на модернізованій установці для безводневого азотування УАТР-1 з циклічно-комутованим розрядом. Газовим середовищем слугувала азотно-аргонова суміш із співвідношенням компонентів по об'єму 75% азоту і 25% аргону [68].

Зразки встановлювались в радіальні отвори і утримувались там за рахунок певного натягу. Цим досягалась не тільки утримання зразків в отворах, але і також відсутність горіння біля торців зразків особливо при живленні розрядом постійного струму. Поява цього явища є цілком реальною, оскільки спостерігається вже при зазорах близько 0,5 мм. В той же час використання подібного методу фіксації зразків значно спрощує конструкцію моделі, виключивши з неї пристрої типу гвинтових затискачів, цанг і т. д [68].

Висновки до розділу 2

1. Розглянуто питання апаратного забезпечення АТР з нестаціонарним (циклічно-комутованим) живленням.

2. Проведено дослідження всіх існуючих методів втілення електронного ключа та їх режимів праці. Встановлено і проаналізовано основні недоліки існуючих ключів та запропоновано практичне рішення для вирішення поставленого завдання з урахуванням значних викидів напруги на комутуючий сигнал, які виникають внаслідок замикання або розмикання схеми. Для вирішення цієї проблеми було запропоновано рішення, яке полягає у послідовному з'єднанні елементів та організації для них синхронного керування.

3. З'ясовано питання узгодження параметрів керуючого сигналу з характеристиками робочої камери.

4. Застосування запропонованого комплексу як ключа при реалізації нестаціонарного живлення при АТР дозволило використати весь діапазон робочих напруг та струмів, що відкриває шлях до експериментального використання нестаціонарного розряду для модифікації поверхонь металевих сплавів.

5. Вибрано спосіб дослідження зносостійкості азотованих металів, яке проводилося за схемою «диск – палець» в умовах сухого тертя, що дозволяє значно скоротити час проведення експериментів, необхідних для отримання порівнювальних між собою даних.

6. Сконструйовано і виготовлено пристрій для моделювання процесів БАТР отворів відносно малих діаметрів, який дозволяє проводити дослідження кінетики формування азотованого шару на зовнішніх та внутрішніх поверхнях зміцнених деталей в ЦКР.

РОЗДІЛ 3

ЗНОСОСТІЙКІСТЬ КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ ПІСЛЯ БАТР В НЕСТАЦІОНАРНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛЯХ

3.1 Обґрунтування БАТР з живленням змінним струмом

З початком промислового використання технологій азотування в тліючому розряді продовжуються дослідження теоретичних основ, вдосконалення технологій та конструкцій і типів устаткування [69]. Широке застосування в промисловості безводневого азотування призвело до виключення з газових середовищ аміаку і, таким чином, до принципового покращення умов роботи устаткування і обслуговуючого персоналу, екологічності процесу, а також до одержання більш широкої різноманітності фазових структурних складових азотованого шару [1]. В свою чергу, це розширює спектр експлуатаційних показників відповідно до вимог та умов навантаження фрикційного контакту [6, 14, 50, 62].

Значна частина досліджень присвячена методам забезпечення розряду при принципово різних апаратних реалізаціях джерел живлення [13, 48, 49]. Окрім азотування з постійним живленням від джерела постійного струму, використовуються установки з додатковим підігрівом від спеціальних екранів чи терморадіаційних підігрівачів, що дозволяє зменшити зв'язок між електричними параметрами технологічного режиму і режимними факторами, перш за все – температурою, оскільки енергетичним фактором забезпечення її є не тільки тліючий розряд. Розробка нових теоретичних підходів базується, насамперед, на базових положеннях фізики газового розряду [13, 70–77].

Технологічний процес в принципі став багатостадійним, при якому він складається з макро- або мікрофаз, що теж суттєво впливає на результати та продуктивність процесу обробки.

Принципово інших результатів азотування досягнуто за рахунок впровадження циклічно-комутованого розряду, в якому порівняно з періодом

часу, достатнім для гасіння переходу тліючого розряду в дуговий, переривається подача живлення на електроди камери. Окрім спрощення систем управління в установках з циклічно-комутованим живленням, менш складними стають питання позиціонування деталей в камері, оскільки при цьому вже не грають такої ролі наявність зазорів між деталями та оснасткою для їх розміщення в камері. Однак, враховуючи те, що живлення електродів камери при застосуванні змінного струму проходить не весь час, а в значно менший період, продуктивність обробки зменшується приблизно в тій же мірі. Певну проблему становлять викиди напруги та струму на початку та в кінці циклу живлення, які можуть провокувати локальне пошкодження оброблюваної поверхні [78]. Нарешті останній аргумент на користь подальших пошуків та вдосконалення як процесу, так і устаткування, є спрощення систем управління процесом азотування.

Метою проведення досліджень є аналіз умов для спрощення конструкції установок для азотування в тліючому розряді, а також можливості застосовувати як живлення електродів розрядної камери змінним струмом промислової частоти (СПЧ).

Структуру та функціональне призначення окремих складових (на прикладі трикамерної установки) показано на рис. 3.1. В установці, за умови живлення процесу постійним струмом, в блок живлення повинні в обов'язковому порядку входити такі складові: регулятор напруги (задається напруга на вході в систему живлення); підвищуючий трансформатор (під впливом керуючого сигналу від регулятора напруги змінює напругу аж до значень, порядку 1200 В – при закінченні фази очистки поверхні катодним бомбардуванням); випрямляч, що перетворює змінний струм в умовно постійний (умовно постійний пов'язано з тим, що після випрямляча форма вихідної напруги включає пульсації більшої чи меншої величини в порівнянні з номінальною напругою); баластний реостат для перерозподілу електричного струму на вході в камеру. Керування блоком живлення проводиться від системи управління за допомогою ручного задавача і аж до автоматичного принципу

підтримки напруги на певному значенні [13].

При циклічно-комутованому живленні мають місце значні викиди напруги на початку та в кінці імпульсу (аж до значень, які можуть викликати місцеве пошкодження поверхні), крім того (можливо найбільш вагомий аргумент), система управління розрядом значно ускладнюється за рахунок обов'язкового включення генераторів керуючих імпульсів, які працюють на частоті порядку 1 – 5 кГц. Як заначалось вище, при циклічно-комутованому розряді суттєво знижується продуктивність процесу модифікації [2, 13, 48, 50].

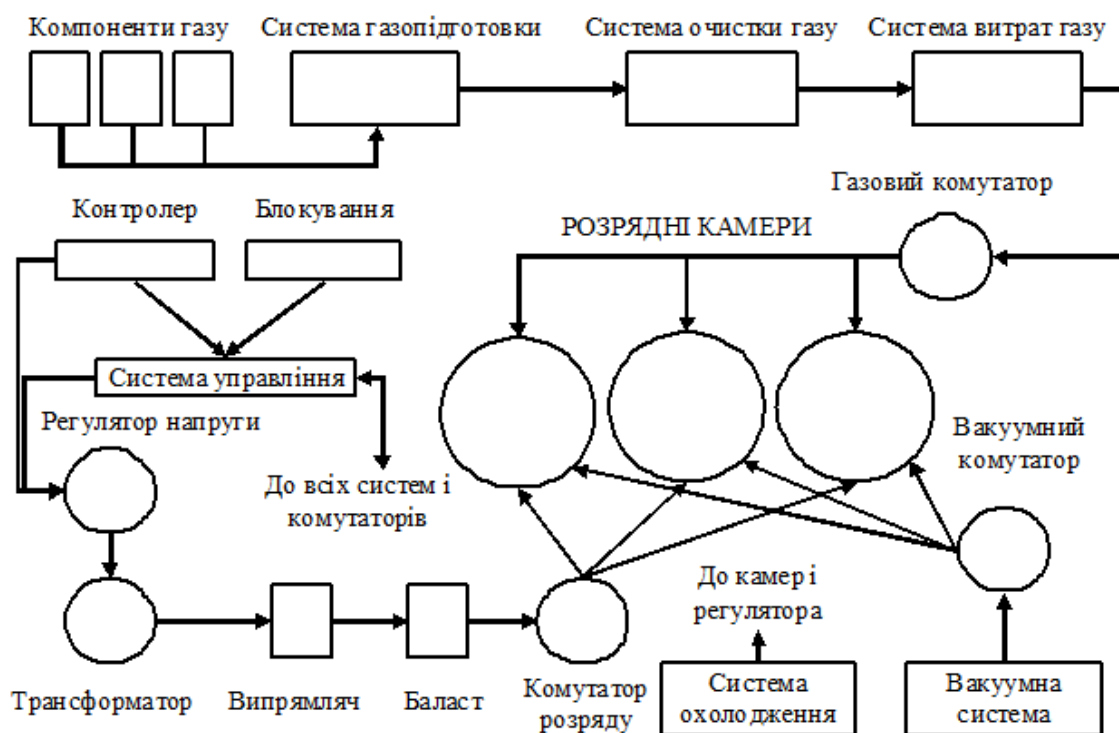


Рис. 3.1 – Блок-схема трикамерної установки

Описана вище структура живлення установок для азотування в тліючому розряді найбільш придатна для монофазових процесів, коли весь технологічний процес проходить при незмінних технологічних параметрах. Проте, при цьому слід мати на увазі, що головне завдання блоку живлення – не самоціль підтримки певних електричних характеристик розряду, а забезпечення стабільної температури на поверхні оброблюваних деталей як параметра, котрий першочергово впливає на формування заданого фазово-структурного

складу поверхні об'єктів модифікації, а через нього на трибологічні властивості [13].

В принциповому плані перспективи практичного застосування азотування в тліючому розряді з живленням змінним струмом промислової частоти (АТР СПЧ) визначаються якраз з врахуванням цієї обставини як визначальної, оскільки при змінній амплітуді струму відповідно в той період, коли на електроди камери подається від'ємна напруга, вже нагрівається не катод, яким служить садка, а анод чи складова частина установки, яка виконує роль анода (при наявності ізоляції подібного анода від камери). Очевидно, що при такому конструктивному рішенні необхідно забезпечити надійну ізоляцію анода від корпусу, оскільки у випадку її порушення виникне реальна загроза ураження електричним струмом [13].

Оскільки у випадку застосування АТР СПЧ живлення електродів відбувається однофазним струмом, то конструкція трансформатора суттєво спрощується, а вартість зменшується мінімум в три рази. Аналогічно логічним було б виготовити та застосувати однофазний регулятор напруги, що в сукупності з однофазним трансформатором неминуче позитивно вплине на вартість всієї установки. При цьому зменшаться амортизаційні витрати, що також позитивно вплине на собівартість. Певний вклад в зниження вартості установок вносить відсутність випрямляча та баластного реостата.

З цього аналізу виникає питання досягнення температури азотованої поверхні необхідної для проведення запланованого технологічного режиму. В разі неможливості виконання цієї задачі можна застосовувати додаткові нагрівачі для забезпечення незалежності енергетичних параметрів розряду. Таким чином, можливе застосування технологічних режимів з підвищеною напругою розряду або силою струму, які дозволяють сформувати необхідну за умовами наступної експлуатації фазову структуру поверхневого модифікованого шару [13].

Наступним завданням постановочного характеру є дослідження електричних характеристик процесу, що пов'язано із необхідністю

встановлення величини напруги запалювання розряду та його стійкого горіння в режимі аномального. Необхідно також встановити аналітичні або експериментальні залежності параметрів технологічного режиму з врахуванням його енергетичних передумов. Отже, потрібно встановити межі енергетичних характеристик, що необхідні для реалізації процесу.

Наступне питання – дослідження процесу формування заданої фазової структури при АТР СПЧ. Суть полягає в тому, що процес азотування є завжди комбінацією окремих субпроцесів: утворення нітридів, розпорошення поверхні та дифузії азоту в глибину поверхневого шару. При звичайному азотуванні (постійний струм) між окремими субпроцесами встановлюється рівновага, як правило на користь утворення нітридів та дифузії. Процес в умовах цієї рівноваги проходить стаціонарно і з різною інтенсивністю, яка залежить не тільки від енергетичних умов, але і від матеріалу азотованих деталей. Відомо, що хромисті сталі можливо азотувати тільки в газових середовищах, де превалює нейтральний компонент. Це пов'язано з тим, що хром відносить до азотоактивних матеріалів. Вже в початковий період азотування на поверхні утворюється моношар азоту, який в подальшому виконує роль перешкоди для проникнення азоту в глибину поверхні. Азотування практично не проходить і товщина шару нітридів дуже незначна. Враховуючи значну відносну тривалість півперіоду подачі на електроди камери від'ємної напруги (0,02 с), цілком доречним буде сподіватись на те, що під дією потоку електронів моношар нітридів буде руйнуватись, а в наступний півперіод, коли потік направлено на катод (деталь), сприятиме інтенсифікації як нітридоутворення, так і дифузії азоту в глибину поверхневого шару [13].

Отже, в принципі азотування в тліючому розряді з живленням струмом промислової частоти можливе. При цьому суттєво спрощується та здешевлюється установка для реалізації процесу. Останній фактор сприятиме, окрім інших аспектів, більш широкому впровадженню технології, оскільки купівля установок за сьогоденніми цінами для більшості підприємств є проблемною [13].

Наступні питання як предмет експериментів стосуються електричних характеристик розряду.

3.2 Пристрій для підвищення зносостійкості сталей азотуванням в ЦКР із змінним струмом

Процес азотування деталей в тліючому розряді зазвичай проходить з використанням постійного джерела живлення розряду. Так, при використанні розряду з постійним живленням на зовнішній поверхні деталі порівняно за невеликий проміжок часу (тривалість процесу азотування 4 год) можна одержати модифіковану поверхню з заданими властивостями при високій стабільності розряду. Значним недоліком цього процесу є те, що деталі складної конфігурації (з великою кількістю малих отворів, з вузькими щілинами, з гострими вершинами) потребують відповідної підготовки цих деталей до азотування. Потрібно належним чином закривати всі ці отвори і щілини, бо вони суттєво ускладнюють процес азотування при використанні неперервного джерела живлення розряду і можуть провокувати виникнення коронних та дугових розрядів, що призводить до перегрівання деталі, і в більшості випадків сам процес азотування стає неможливим.

Одним із варіантів вирішення цієї проблеми є використання тліючого розряду з нестационарним живленням. При використанні змінного струму промислової частоти не потрібно створювати нове обладнання, а лише необхідно модернізувати вже існуюче. Суть модернізації полягає в заміні безперервного джерела живлення розряду на джерело з нестационарним живленням розряду зі змінним струмом заданої частоти. Регулювання частоти комутації, або як ще називають шпаруватість – відношення періоду циклу до тривалості сигналу, та форми самого сигналу дає можливість впливати на результати обробки поверхні. Вплив форми та частоти сигналу живлення розряду на процес азотування відбувається за рахунок відключення електричного поля, що дозволяє змінювати траєкторію польоту частинок

падаючого потоку. Тобто вимкнуте електричне поле дає можливість частинкам ще якийсь час рухатись за інерції по дотичній до їхньої траєкторії і проникати на значно більшу глибину. А також впливати на неможливість переходу тліючого розряду в дуговий.

Застосування циклічно-комутованого розряду змінного живлення дає можливість азотувати деталі зі щілинами, з отворами малого діаметра, не застосовуючи при цьому спеціальної оснастки, і можна не боятися виникнення коронних та дугових розрядів. Як недолік слід відмітити, що процес азотування збільшується в два і більше разів, оскільки сам процес передачі енергії відбувається тільки при тривалості сигналу.

Пристрій для азотування в тліючому розряді з постійним струмом, блок живлення камери якого містить тиристорний регулятор напруги, трансформатор, випрямляч, баластний реостат, датчики струму та напруги, блок автоматичного відключення. Недоліком вказаного пристрою є його складність та значні втрати енергії на перетворювачі струму, необхідність додатково використовувати спеціальні фільтри для згладжування струму. В основу роботи поставлено завдання створити пристрій для азотування в тліючому розряді з живленням змінним струмом, який забезпечував би можливість суттєвого спрощення устаткування та зниження його вартості.

Поставлене завдання вирішується тим, що в пристрій для азотування в тліючому розряді з живленням змінним струмом, що включає блок живлення камери, який містить тиристорний регулятор напруги, трансформатор, баластний реостат, датчики струму та напруги, блок автоматичного відключення, введено джерело з нестаціонарним живленням зі змінним струмом заданої частоти. Суть запропонованого пристрою полягає насамперед в можливості суттєво спростити конструкцію установки для азотування в тліючому розряді та підвищити її надійності, а також зменшити вартість устаткування, що вирішується шляхом заміни безперервного джерела живлення розряду із випрямлячем та фільтрами для згладжування включно на джерело з нестаціонарним живленням зі змінним струмом заданої частоти. При цьому

підвищується надійність роботи установки, а також за рахунок суттєвого зниження амортизаційних нарахувань та втрат електричної енергії зменшується собівартість обробки азотованих деталей. Використання змінного струму також впливає на хід та результати азотування, оскільки періодична зміна полярності електродів камери сприяє процесам очистки поверхні від адсорбційного шару, що, в свою чергу, позитивно впливатиме на характер насичення поверхні азотом та сприятиме суттєвій зміні фазового складу поверхневого модифікованого шару [51].

Експериментально перевірена можливість працездатності заявленого пристрою для азотування в тліючому розряді на діючій промисловій установці підтвердила можливість його реалізації та працездатність, при цьому суттєво спростилась конструкція устаткування, а відповідно, його вартість та вартість експлуатації. Помітно знизилась потреба в електричній енергії за рахунок відсутності втрат на випрямлення струму, що також позитивно відобразилось на собівартості обробки. Аналіз результатів металографічних досліджень модифікованого шару вказав на наявність більш рівномірного градієнту твердості по глибині (градієнт знизився в 1,7–3,5 рази), що, в свою чергу, підвищує зносостійкість деталей та якісні показники обробки деталей (патент України №118327).

3.3 Спосіб азотування в ЦКР з живленням змінним струмом

Найбільш розповсюдженими є спосіб іонно-плазмового зміцнювання поверхні та пристрої для його здійснення, в якому деталь протягом всього процесу слугує катодом з живленням від джерела постійного струму. Недоліком вказаного способу є те, що його реалізація можлива при наявності регульованого джерела постійного струму, а також спеціальних пристроїв управління. Поставлене завдання розробки способу азотування в тліючому розряді з живленням змінним струмом, який забезпечував би можливість спрощення живлення процесу, вирішується шляхом живлення процесу від

джерела змінного струму промислової частоти, при цьому напруга повинна змінюватися залежно від параметрів технологічного режиму модифікації поверхні деталей. Суть запропонованої ідеї полягає в тому, що деталь та корпус камери або її спеціальна оболонка, які служать електродами, отримують живлення різної полярності, причому деталі садки та корпус камери або його спеціальна деталь, які виконують роль електродів, отримують живлення від джерела змінного струму промислової частоти або кратної їй, а напруга змінюється залежно від параметрів технологічного режиму модифікації поверхні деталей. На відміну від традиційних методів, азотування в тліючому розряді в яких деталь завжди є катодом, а оболонка камери або її спеціальна деталь служать анодом, вимагає наявності джерела постійного струму. За таких умов постійно виникає загроза переходу тліючого розряду в дуговий, що також ускладнює процес, оскільки при можливому випадку такого явища деталь отримує пошкодження локальної ділянки або всієї поверхні. Крім того, навіть при наявності складних пристроїв для перетворення струму живлення, отримати стабільно постійне живлення електродів розрядної камери неможливо, тобто якоюсь мірою процес протікає при живленні непостійним струмом, хоча і стабільної полярності. Проведені експерименти на діючій промисловій установці вказують на можливість реалізації вказаного способу азотування в тліючому розряді з живленням змінним струмом промислової частоти.

За потреби частоту струму можна легко змінювати, застосовуючи простий перетворювач частоти за допомогою електромеханічного пристрою. У цьому випадку суттєво спрощується процес регулювання параметрів технологічного процесу, підвищується надійність реалізації технології, що відповідно позитивно впливає на собівартість обробки металевих деталей [15].

Ідея використання змінного струму промислової частоти як джерела живлення при АТР, можливості комутації форми імпульсів, зміни їх полярності сприяла розробці за участі автора цілої низки способів і технологій азотування [7, 8, 9, 15, 56, 57, 63].

3.4 Зносостійкість внутрішніх локальних винятків поверхонь

Розподіл густини струму по металевій поверхні, яка модифікується азотуванням в тліючому розряді, відіграє суттєву роль насамперед як параметр режиму, котрий належить до групи енергетичних характеристик технології азотування. Наявність локальних винятків поверхні як зовнішніх у вигляді гострих ребер, виступів тощо, так і внутрішніх, що мають форму пазів, отворів, призводить в цих місцях до концентрації поля і густини струму. В свою чергу, локальне підвищення передачі енергії, яке характерне для локальних винятків, обумовлює більш інтенсивне порівняно з рештою поверхні її нагрівання.

Негативні наслідки вказаного явища можуть призвести до місцевого перегрівання поверхні, а відтак до відпуску, зниження фізико-механічних та трибологічних показників модифікованої деталі. Подібні результати спостерігаються при більшій, порівняно з іншою частиною поверхні, швидкості нагрівання садки.

Теоретичні основи взаємодії електричного поля із зовнішніми локальними винятками поверхні розглянуті в працях Пастуха І. М. [1, 79, 80].

Стосовно питань, пов'язаних з теорією внутрішніх локальних винятків поверхні, там же наводяться тільки загальні відомості про них та основні принципи вирішення завдання [81, 82]. З цієї причини головною метою є розробка аналітичних основ взаємодії електричного поля з внутрішніми локальними винятками поверхні. При цьому моделлю вибрано найбільш загальний варіант – внутрішній локальний виняток клиновидної форми (рис. 3.2). Пази прямокутного перетину, отвори відносно малого діаметра становлять окремий, більш простий варіант прийнятої до розгляду схеми.

Розміри клиновидного паза, особливо ширина на вході, дорівнює ширині області катодного падіння. Залежно від цього співвідношення ОКП всередині паза може частково або навіть повністю (в напрямку глибини паза) взаємно перекриватись. Введемо поняття зон повного (А), часткового (В) перекриття та зони звичайного розряду (С). Характер перекриття, як буде показано нижче,

має суттєве значення при визначенні траєкторії руху електронів, які вилетіли з поверхні, оскільки в зонах А та В вони перебувають під силовим впливом одночасно двох полів від двох стінок паза. Рухаючись в проміжку між цими стінками під впливом просторової системи сил, електрони можуть перетинати лінію симетрії паза, тобто траєкторія їх руху відповідає певною мірою коливальному рухові, що суттєво збільшує довжину шляху, котрий пройде електрон в порівнянні з рухом по нормалі до поверхні в ОКП звичайного розряду. Відповідно зростає ймовірність іонізаційних процесів, що в свою чергу призводить до локального зростання струму розряду.

Очевидно, що співвідношення довжин зон перекриття суттєво змінюється залежно від порівняння ширини паза з шириною ОКП δ . Критичною межею є відношення рівності половини ширини паза b та ширини ОКП, при якому весь внутрішній простір паза є зоною повного перекриття.

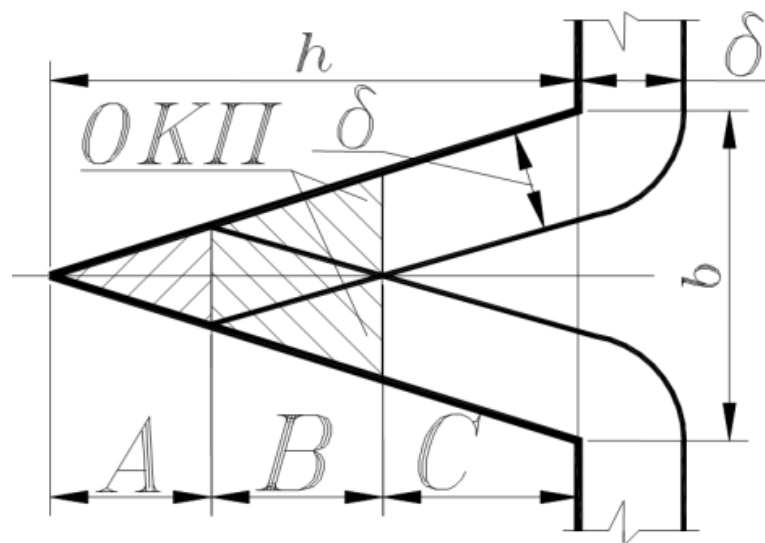


Рис. 3.2 – Схема внутрішнього локального винятку поверхні (А – зона повного перекриття розряду, В – зона часткового розряду, С – зона звичайного розряду)

При переході до паза прямокутної форми або отвору слід врахувати особливості перекриття ОКП, а також відомий з літератури по розряду з пустотілим катодом факт стосовно розподілу електричного поля вздовж паза. Мається на увазі встановлений експериментально розподіл поля на глибину не більшу подвійної ширини паза (двох діаметрів отвору) [83].

3.5 Аналітична модель внутрішніх локальних винятків поверхні

Розрахункову схему внутрішнього локального винятку поверхні у вигляді клиноподібного паза показано на рис. 3.3.

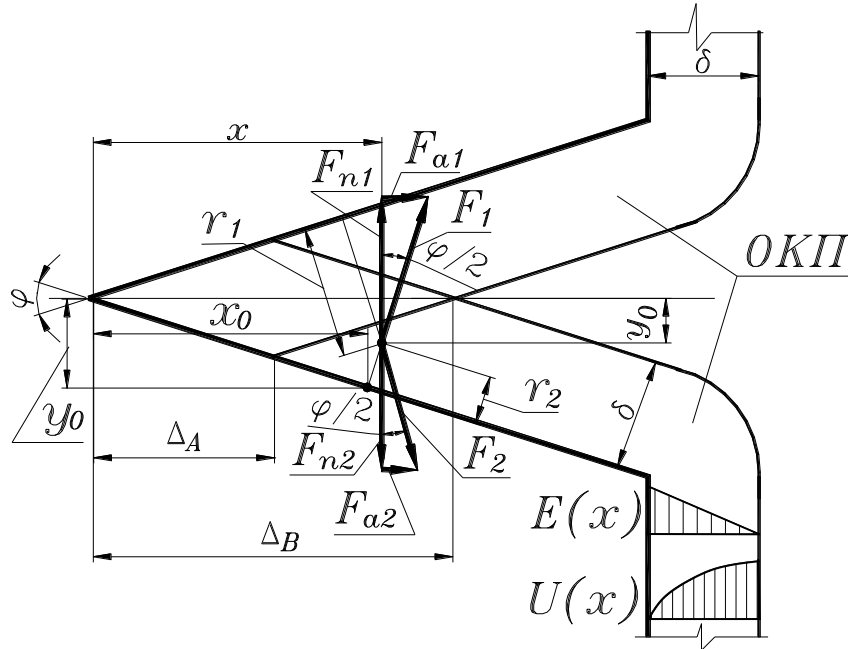


Рис. 3.3 – Розрахункова схема внутрішнього локального **винятка** поверхні

Розміри паза співвідносяться $b/2h = \operatorname{tg} \varphi/2$, звідки $\varphi = \arctg b/2h$.

Рівняння верхньої грані паза: $y = x \cdot \operatorname{tg} \varphi/2$, а нижньої – $y = x \cdot (-\operatorname{tg} \varphi/2) = x \cdot \operatorname{tg}(-\varphi/2)$.

У зонах повного або часткового перекриття полів на електрон, який вилетів з будь-якої точки на грані (наприклад, з нижньої) і початкові координати якої x_0, y_0 , можуть одночасно діяти три електричних поля: поперечні від двох граней E_1 і E_2 та поздовжнє E_a . Враховуючи прийнятий лінійний закон розподілу напруженості поперечних полів $E(x)$ та параболічний закон зміни падіння напруги в ОКП – $U(x)$ [80, 84, 85], напруженості поля визначаються:

$$E_1 = \frac{2U_K}{\delta} \left(1 - \frac{r_1}{\delta} \right), \quad (3.1)$$

$$E_2 = \frac{2U_K}{\delta} \left(1 - \frac{r_2}{\delta} \right), \quad (3.2)$$

$$E_a = \frac{2U_K}{\Delta_B} \left(1 - \frac{x}{\Delta_B} \right). \quad (3.3)$$

де U_K – катодне падіння напруги; δ – ширина ОКП; r_1, r_2 – поточні відстані від електрона до граней паза; Δ_B – відстань від вершини паза до межі області часткового перекриття, визначається за формулою:

$$\Delta_B = \frac{\delta}{\sin(\arctan(b/2h))}.$$

Поточні відстані від електрона до граней дорівнюють:

$$r_1 = \frac{0,5bx + hy}{\sqrt{\frac{b^2}{4} + h^2}}, \quad r_2 = \frac{-0,5bx + hy}{\sqrt{\frac{b^2}{4} + h^2}}.$$

Повздовжня сила, яка діє на електрон, розраховується за формулою:

$$F_a = q_e E_a,$$

де q_e – заряд електрона.

Результуюча сила, яка діє на електрон в поперечному напрямку, дорівнює:

$$F_n = F_{n1} - F_{n2} = F_1 \cos \frac{\varphi}{2} - F_2 \cos \frac{\varphi}{2} = q_e \cdot \cos \frac{\varphi}{2} \left(\frac{2U_K}{\delta} \left(\frac{r_2}{\delta} - \frac{r_1}{\delta} \right) \right). \quad (3.4)$$

Результуючу силу в повздовжньому напрямку знаходимо за формулою:

$$F_a = F_{a1} + F_{a2} + q_e E_a = F_{n1} \sin \frac{\varphi}{2} + F_{n2} \sin \frac{\varphi}{2} + q_e \frac{2U_K}{\Delta_B} \left(1 - \frac{x}{\Delta_B} \right). \quad (3.5)$$

Сума проекцій всіх сил, які діють в горизонтальному напрямку, визначається наступним чином:

$$F_a = F_{a1} + F_{a2} + q_e E_a = F_{n1} \sin \frac{\varphi}{2} + F_{n2} \sin \frac{\varphi}{2} + q_e \frac{2U_K}{\Delta_B} \left(1 - \frac{x}{\Delta_B} \right). \quad (3.6)$$

Суму проекцій всіх сил на горизонтальну вісь розраховуємо за

формулою:

$$\sum X_i = m_e \frac{d^2 x}{dt^2} = F_a. \quad (3.7)$$

Сума проекцій всіх сил на вертикальну вісь дорівнює:

$$\sum Y_i = m_e \frac{d^2 y}{dt^2} = F_n. \quad (3.8)$$

Двічі інтегруючи, отримаємо вираз для горизонтальної вісі:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{F_a}{m_e}; \quad \frac{dx}{dt} = \frac{F_a}{m_e} t + C_1; \quad x = \frac{F_a}{2m_e} t^2 + C_1 t + C_2. \quad (3.9)$$

Аналогічно для вертикальної вісі отримаємо:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = \frac{F_n}{m_e}; \quad \frac{dy}{dt} = \frac{F_n}{m_e} t + C_3; \quad y = \frac{F_n}{2m_e} t^2 + C_3 t + C_4. \quad (3.10)$$

Сталі інтегрування визначаються, якщо врахувати, що $t = 0$,

$$\frac{dx}{dt} = 0; \quad x = x_0; \quad C_2 = x_0; \quad C_1 = 0; \quad x = \frac{F_a t^2}{2m_e} + x_0, \quad (3.11)$$

$$\frac{dy}{dt} = 0; \quad y = y_0; \quad C_4 = y_0; \quad C_3 = 0; \quad y = \frac{F_n t^2}{2m_e} + y_0. \quad (3.12)$$

Коефіцієнт концентрації поля визначається як відношення сумарної довжини траєкторій електронів в межах зони перекриття до сумарної довжини траєкторій електронів на плоскій ділянці лінії грані, довжина якої $\frac{\delta}{\text{tg}(\varphi/2)}$.

Якщо врахувати, що:

$$t^2 = \frac{1}{\frac{F_a}{2m_e}} (x - x_0) = \frac{1}{\frac{F_n}{2m_e}} (y - y_0), \quad (3.13)$$

$$\text{то } \frac{2m_e}{F_a}(x - x_0) = \frac{2m_e}{F_n}(y - y_0); \quad \frac{(x - x_0)}{F_a} = \frac{(y - y_0)}{F_n}; \quad \frac{y}{F_n} = \frac{(x - x_0)}{F_a} + \frac{y_0}{F_n},$$

$$\text{звідки } y(x) = \frac{F_n}{F_a}(x - x_0) + y_0.$$

Таким чином, коефіцієнт концентрації поля для внутрішніх локальних винятків в формі клиноподібного паза дорівнює:

$$K_E = \frac{1}{\delta} \int_0^{\delta/\operatorname{tg}(\varphi/2)} \left(\int_{X_0}^{\Delta_B} \sqrt{1 + \left(\frac{d(y(x))}{dx} \right)^2} dx \right) dX. \quad (3.14)$$

На основі отриманої залежності створено комп'ютерну програму визначення коефіцієнтів концентрації електричного поля для локальних винятків деталей з метою попередження випадків виникнення електродугового розряду [83].

Висновки до розділу 3

1. При БАТР в ЦКР із живленням струмом промислової частоти зменшується вартість установки для реалізації процесу. Останній фактор сприятиме, з-поміж, більш широкому впровадженню технології.

2. Проаналізовано види локальних винятків поверхні, розглянуто їх вплив на концентрацію електричного поля та її зміну, як фактор нерівномірності результатів модифікації. Введено критерій концентрації поля, вирішено аналітичну задачу взаємозв'язків геометрії поверхні та параметрів електричного поля. Досліджено вплив розмірів внутрішніх локальних винятків на концентрацію електричного поля. Результати досліджень можна використовувати для точного визначення розподілу густини струму по поверхні азотування.

3. Розроблений аналітичний апарат може застосовуватись для розрахунку

показників концентрації електричного поля в тліючому розряді, який використовується для поверхневої модифікації металевих деталей.

4. Використання змінного струму також впливає на хід та результати азотування, оскільки періодична зміна полярності електродів камери сприяє процесам очистки поверхні від адсорбційного шару, що позитивно впливає на характер насичення поверхні азотом (градієнт зміни мікротвердості по глибині азотованого шару знижується в 1,7 – 3,5 рази), сприяє суттєвій зміні фазового складу поверхневого модифікованого шару і дозволяє розширити технологічні можливості азотування щодо отримання необхідних експлуатаційних характеристик робочих поверхонь, зокрема трибологічних характеристик.

РОЗДІЛ 4

ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ДОВГОМІРНИХ ОТВОРІВ ЗМІЦНЕНИХ БАТР

4.1 Аналіз процесів азотування довгомірних отворів

Важливість впровадження у виробництво дослідження модифікації деталей з робочими поверхнями у вигляді довгомірних отворів проаналізовано в багатьох роботах [86-89]. Очевидно, що переважна більшість випадків стосовно процесів азотування в тліючому розряді подібних об'єктів модифікації відповідає за своїми фундаментальними ознаками газорозрядним процесам з пустотілим катодом [83, 86]. Проте підлягає окремому аналізу вплив на характер процесів обробки співвідношень розмірів отворів та геометричних характеристик власне газового розряду [89, 90].

Москальов Б. І. вважає, що електрони з відносно малим перетином сутичок рухаються як у вакуумі, 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 у кілоГерцах. Аналіз розмірних параметрів області катодного падіння напруги розряду [88], 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. Більшість дослідників розряду з пустотілим катодом [87, 91] 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 [92] відмічається, що існує тотожність між початком зростання струму розряду та моментом перекриття зон негативного свічення ОКП від двох протилежних частин катода. Очевидним з цього чиннику є такий висновок, що при аналізі процесів азотування в тліючому розряді довгомірних отворів необхідно враховувати співвідношення розмірів цих отворів з геометричними параметрами ОКП. Тому рекомендації, викладені в роботі [88], де стверджується, що критичним діаметром отворів, які можна азотувати, наприклад, з переривчастим живленням розряду при частоті у декілька кілогерц, є значення 8 мм. При цьому вказаний розмірний параметр абсолютно не співвідноситься з характеристиками режиму азотування, більшість з яких є вирішальними для розмірів ОКП. Тобто, першочерговою умовою є поява ефекту розряду з пустотілим катодом [87, 93].

Важливо також зазначити, що в [86, 94] прямо вказується на те, що теорія, яку викладено в джерелах, присвячених особливостям розряду з пустотілим катодом, не ставить собі за мету проведення якісного оцінювання переходу від тліючого розряду в розряд з пустотілим катодом або, тим більше, оцінювання абсолютних величин параметрів розряду (падіння напруги, густини струму і т. ін.). Позитивно також слід оцінювати пропозицію враховувати у складі падаючого на катод потоку швидких нейтральних атомів, котрі утворились внаслідок перезарядки іонів, проте конкретної реалізації цієї тези не приводиться.

З викладеного аналізу джерел очевидно є необхідність дослідження азотування отворів з відносно малим діаметром в тліючому розряді на основі теорії газорозрядних процесів. При цьому особливу роль відіграють як характеристики розряду, так і параметри потоків частинок, котрі бомбардують поверхню [88, 90].

Актуальність поставленого завдання безсумнівна, якщо навести декілька прикладів з практичного застосування об'єктів модифікації металевої поверхні. Практично всі кінематичні пари тертя з поступальним рухом, причому

неважливо циліндричної вони форми чи довільної, конструктивно підпадають під категорію довгомірних отворів, тобто відношення довжини (глибини) отвору до його діаметрального розміру перевищує значення чотирьох [89–91]. Цей показник, прийнятий як критерій геометричних співвідношень, обґрунтовується тим, що, як відомо, процес азотування подібних конструктивних елементів аналогічний за своєю природою розряду з пустотілим катодом. 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) [86, 92, 93]. 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 можна зменшити до двох. Продовжуючи наведення прикладів досліджуваних в цій роботі конструкцій, можна відзначити плунжерні пари паливних насосів дизельних двигунів внутрішнього згорання, матеріальні циліндри термопластавтоматів тощо. Модифікація внутрішньої поверхні зі збільшенням зносостійкості особливо актуальна для матеріальних циліндрів термопластавтоматів, які переробляють полімери з абразивними наповнювачами, наприклад, склонаповнені пластмаси [95]. Схему умовного розподілу напруги катодного падіння в околі отвору показано на рис. 4.1.

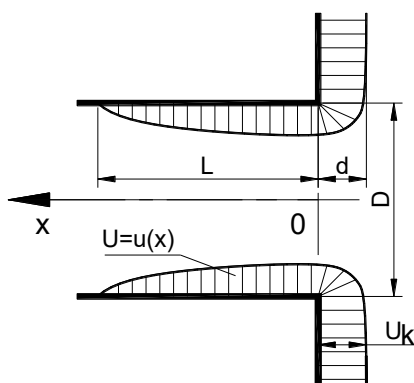


Рис. 4.1 – Схема параметрів розряду в отворі

Попередньо введемо передумови, які зводяться до наступного: а) стік частинок, які формують падаючий потік в зоні торця отвору, прямо пропорційний напруженості поля; б) швидкість ковзання цих частинок в стокові постійна для всіх ділянок з однаковою напруженістю поля; в) потік часток на анодній межі ОКП прямо пропорційний напруженості поля на протилежній ділянці катода [96];

г) напруженість поля вздовж ділянки катода змінюється за певним законом;

д) міжелектродне падіння напруги по всій поверхні катода умовно однакове.

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 буде дорівнювати:

$$\overline{V}_S = \frac{1}{2} V_S \cdot L/L = 0,5 V_S. \quad (4.2)$$

Кількість часток, що бомбардують стінки отвору, встановлюємо за формулою:

$$n_{LS} = \overline{V}_S \cdot s_K = 0,5 V_S \pi D L n = n_{DS}, \quad (4.3)$$

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 [2, 86], а молекулярні частки азоту, енергія яких відповідає рівню теплового руху, не сприяють азотуванню.

Прийнятий апріорі закон зміни напруги в осьовому напрямку отвору потребує уточнення, а найбільш достовірним методом для вирішення подібного завдання є експериментальний [97]. При законі розподілу напруги вздовж отвору середнє значення напруги дорівнює:

$$\overline{U} = \frac{\int_0^{2D} U(x) dx}{2D}, \quad (4.4)$$

Межу аналізу закону розподілу напруги $2D$ прийнято з огляду на дані, котрі наведено в [83].

Перехід цих даних у відносні до діаметра отвору значення довжини та відносні стосовно напруги катодного падіння U_k значення розподілу напруги подано в табл. 4.1, а графік взаємозалежностей цих величин – на рис. 4.2 (квадратами позначено експериментальні дані, суцільною лінією – апроксимація цих даних). При цьому рівнянням апроксимації має такий вигляд:

$$\frac{U(x)}{U_k} = (1 + x)^{-4,5}. \quad (4.5)$$

Таблиця 4.1

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
$U(x)/U_k$	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

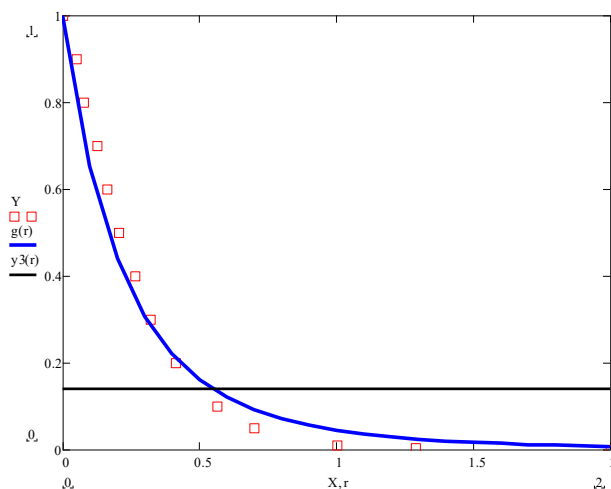


Рис. 4.2 – Розподіл напруги вздовж отвору
(у відносних параметрах табл. 4.1)

З рис. 4.2 знаходимо, що середньому значенню відносної напруги 0,14, відповідає відносна координата $x/D = 0,55$, яка несуттєво 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 з тієї причини, що в деяких випадках отвори великого діаметра піддавалися азотуванню по всій внутрішній поверхні, хоча відношення довжини отвору до

діаметра значне. Подальші завдання можна сформулювати, опираючись на класифікаційний аналіз ситуацій, що можуть мати місце при порівнянні розмірів отворів з параметрами розряду [86, 89].

4.2 Аналіз варіантів співвідношень параметрів отворів та розряду

Очевидно, що вирішальну роль відіграватиме відношення діаметра отвору до ширини ОКП. За вказаним критерієм можливі наступні ситуації.

1. Діаметр отвору менший подвійної ширини ОКП ($D < 2d$). У цьому випадку ОКП протилежних частин катода частково (в межевому 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» зону. У зв'язку з тим, що у напрямку до виходу з отвору напруга зростає, має місце осьова сила, яка рухає електрони до торця отвору. Електрони таким чином рухаються коливальною затухаючою траєкторією до виходу з отвору (рис. 4.3). Оскільки загальний шлях при цьому зростає, то це призводить до збільшення числа сутічок з нейтральними молекулами та інтенсивності іонізації, що є головною причиною появи в центральній частині отвору більш інтенсивного свічення як характерної ознаки розряду з пустотілим катодом. Закон коливального руху електронів повинен суттєво залежати від осьової 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 [87, 98].

Для встановлення ефективності впливу особливостей руху електронів в ділянці перекриття зон ОКП на енергетичні характеристики розряду необхідно дослідити кінетику їх руху, при цьому слід зважати на змінний характер ширини ОКП, спричинений падінням напруги впродовж отвору. Аналіз кінетики руху електронів, окрім іншого, повинен враховувати також, що

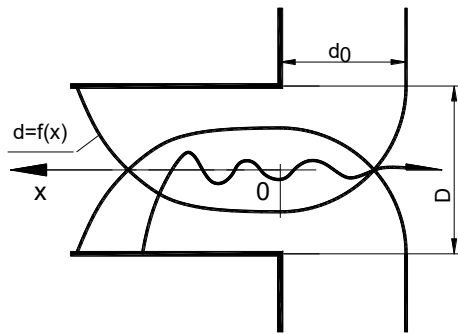


Рис. 4.3 – Схема руху електронів з перекриттям ОКП

відштовхування протилежним полем призводить до зміни швидкості, відповідно, і енергії електрона, зміщуючи її в зону, яка або сприяє інтенсифікації іонізаційних процесів, або, їх пригнічує. Якщо енергія електронів при цьому увійде в діапазон значень, найбільш сприятливих для іонізації, то це і стане важливим фактором зростання енергетики розряду, характерного для розряду з пустотілим катодом [87, 99].

2. Діаметр отвору дорівнює подвійній ширині ОКП. Оскільки електрони всеодно за інерцією залітають в протилежну зону ОКП (найбільш ймовірно на величину середнього значення довжини вільного пробігу), то спостерігатиметься ефект розряду з пустотілим катодом, хоча і в меншій мірі. Подібні ділянки можна побачити і на рис. 4.3 в тих місцях, де перекриття зон ОКП тільки починається, тому аналітичний апарат можна використати той, що і в попередньому випадку.

3. Діаметр отвору дещо більший подвоєної ширини ОКП. В центрі отвору залишається зона, в якій поле не діє (площа цієї ділянки $0,25 \pi (D - 2\delta)^2$). Через цю центральну частину проходить постачання дифузantів пропорційно тій частині струму розряду, яка проходить через приторцьову частину поверхні. Ймовірно, можлива обернена причина – гальмування постачання по законах, аналогічних гідродинаміці, що і визначає обмеженість внутрішньої ділянки отвору, яка потенційно може азотуватись. Цей опір рухові часток через торець може мати як критичну швидкість дрейфу частинок, так і суттєвий характер руху частинок [86].

4. Діаметр отвору значно перевищує подвоєну ширину ОКП. Через центральну частину отвору при допустимій критичній швидкості дрейфу частинок 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 азотовану площу стінок отвору, 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 [86, 89].

4.3 Обґрунтування ефекту накачування іонів азоту в довгомірні отвори

Довгомірними отворами в деталях слід вважати наскрізні або глухі отвори, відношення довжини яких до діаметра більше 2 – 4 рази. Обґрунтування цих меж (менше значення – для не наскрізних) полягає в тому, що, як встановлено в [87], на глибині отвору близько двох діаметрів напруженість поля електричного розряду становить всього 0,02% від напруженості на торці отвору. З врахуванням цього показника реально можна вважати отворами відносно малого діаметра наскрізні отвори, відношення довжини яких до діаметра більше трьох, для не наскрізних – 1,5 рази.

Практичне значення вирішення поставленого завдання надзвичайно велике, оскільки практично в всіх напрямках машинобудування 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 [87, 100]. Прикладами таких деталей можуть служити внутрішні поверхні пневмо- та гідроциліндрів, матеріальних циліндрів термопластавтоматів, плунжерних насосів паливної апаратури двигунів тощо [101, 102].

Застосовуються різні технології модифікації внутрішніх поверхонь подібних пар. Найчастіше використовують цементацію, але її головним

недоліком є формозмінність деталей, що вимагає додаткової чистової обробки внутрішніх поверхонь отворів. При цьому зростає трудомісткість виготовлення деталей та їх вартість [96, 97].

Модифікація вказаних поверхонь можлива з використанням пічного азотування, проте цей технологічний процес надзвичайно тривалий (до 96 годин), ресурсозатратний, в плані організації виробництва бажана наявність деталей на повне завантаження печей, що не завжди прийнятно, особливо для індивідуального або малосерійного виробництва. Ще одна небажана особливість процесу пічного азотування полягає у використанні аміаку як робочого агента. Відомо, що азотування в аміачних газових середовищах хоч і забезпечує більшу твердість оброблюваної поверхні, але і обумовлює її більшу крихкість. Крім того, при певних режимах пічного азотування спостерігається утворення тріщин у зв'язку з наявністю значних напружень в поверхневому шарі [102, 103].

Всі зазначені недоліки відсутні при використанні технологічного процесу азотування в тліючому розряді. Деталь до модифікації обробляється в чистових розмірах, тобто додаткова наступна після модифікації механічна обробка стає зайвою, що принципово відзначається на собівартості виготовлення деталей, процес на порядок менш тривалий в порівнянні з пічним, а при застосуванні безводневих середовищ не тільки стає можливим забезпечення всіх вимог екологічної безпеки, але й суттєво знижуються показники крихкості [104 – 106].

Проте азотування в тліючому розряді при звичайних умовах 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 [107].

Метою є аналіз умов, при яких вказаний вище недолік може бути нівельовано аж до забезпечення можливості азотування внутрішніх поверхонь отворів відносно малого діаметра.

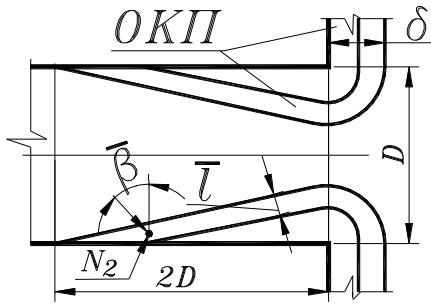


Рис. 4.4 – Схема області катодного падіння в околі торця довгомірного отвору

Щодо ефективності процесу азотування у тліючому розряді (АТР) загальноприйнятим є положення, згідно з яким його ефективність значною мірою визначається наявністю в околі оброблюваної поверхні іонізованих атомарних чи молекулярних частинок [2].

Розглянемо можливість міграції іонізованих частинок молекулярного та атомарного азоту в глибину отворів відносно малого діаметра при стаціонарному живленні розряду. Схему, для спрощення – тільки одного з торців отвору, показано на рис. 4.4.

Область катодного падіння має ширину δ , яка поступово вздовж отвору в глибину зменшується і на відстані подвійного діаметра $2D$ від торця дорівнює нулю [86]. Частинки азоту N_2 або N входять в ОКП під довільним кутом $\bar{\beta}$, який визначається за методикою [108]:

$$\bar{\beta}(p, j, U, v) = 90(1 - a(p, j, U)^{-v}) - b(p, j, U)ve^{-0,1v^c}, \quad (4.6)$$

де a, b, c – константи; v – аналог швидкості, $v = V \cdot 10^{-4}$ м/с.

Кращі результати апроксимації (кореляційне відношення між розрахунковими та апроксимаційними даними – 0,999) досягаються при використанні залежності виду:

$$\bar{\beta}(p, U, v) = 90(1 - a(p, U)^{-2av}) - b(p, U)ve^{-0,1v^c}. \quad (4.7)$$

Коефіцієнт a визначається за допомогою залежності:

$$a(U, p) = K_{a1}(p) + K_{a2}(p)U + K_{a3}(p)U^2 + K_{a4}(p)U^3, \quad (4.8)$$

де, для молекулярного іона азоту:

$$\begin{cases} K_{a1}(p) = 1,445 + 0,2737 p - 0,1344 p^2; \\ K_{a2}(p) = -5,278 \cdot 10^{-4} + 3,595 \cdot 10^{-4} p - 1,694 \cdot 10^{-4} p^2; \\ K_{a3}(p) = -7,917 \cdot 10^{-7} - 7,639 \cdot 10^{-7} p + 3,472 \cdot 10^{-7} p^2; \\ K_{a4}(p) = -2,932 \cdot 10^{-10} + 2,894 \cdot 10^{-10} p - 1,447 \cdot 10^{-10} p^2, \end{cases} \quad (4.9)$$

для атомарного іона азоту:

$$\begin{cases} K_{a1}(p) = 0,14 + 3,0125p - 1,71875p^2; \\ K_{a2}(p) = 0,0061444445 - 0,014930556p - 0,00840277779p^2; \\ K_{a3}(p) = -8,8333333 \cdot 10^{-6} + 2,125 \cdot 10^{-5}p - 1,1805555 \cdot 10^{-5}p^2; \\ K_{a4}(p) = 3,7654321 \cdot 10^{-9} - 9,1049383 \cdot 10^{-9}p + 5,0154321 \cdot 10^{-9}p^2. \end{cases} \quad (4.10)$$

Нейтральна частинка входить в поверхневий прошарок, ширина якого становить середню довжину вільного пробігу $\bar{l}$ частки в ОКП, що визначається за формулою:

$$\bar{l} = kT / p\sigma_{vc}, \quad (4.11)$$

де k – постійна Больцмана, J/K°; T – температура за шкалою Кельвіна, K°; p – тиск в розрядній камері; σ_{vc} – приведений перетин сутичок компонента газового середовища, м².

Для молекулярного азоту приведений перетин сутичок в азотно-аргоновому середовищі дорівнює:

$$\sigma_{vc N_2} = \pi (r_{N_2} + r_{N_2})^2 \times K_{pN_2} + \pi (r_{N_2} + r_{Ar})^2 \times K_{pAr}, \quad (4.12)$$

для атомарного азоту приведений перетин сутичок в азотно-аргоновому середовищі визначають за формулою:

$$\sigma_{vc N} = \pi (r_N + r_{N_2})^2 \times K_{pN_2} + \pi (r_N + r_{Ar})^2 \times K_{pAr}, \quad (4.13)$$

де r_{N_2} , r_N , r_{Ar} – радіуси молекул, атомів азоту та атомів аргону відповідно, $r_{N_2}=1,85 \times 10^{-10}$, $r_N=0,938 \times 10^{-10}$ м, $r_{Ar}=1,82 \times 10^{-10}$ м.; K_{pN_2} , K_{pAr} – коефіцієнти об'ємної концентрації азоту та аргону в газовому середовищі, для середовища складу N75Ar25: $K_{pN_2}=0,75$, $K_{pNAr}=0,25$.

Ширина ОКП визначається через вихідний параметр еталонної ширини [1]. Еталонною прийнято ширину ОКП для суміші, що містить 100% азоту (середовище N100), при температурі $T=300^\circ\text{K}$). Таким чином:

$$\delta_{N_2 300} = 1,54 p^{-0,89} + 1,84 p^{0,58} j^{-(1,04 p^{-0,39})}, \quad (4.14)$$

де p – тиск в камері, тор, j – густина струму, A/m^2 .

Для конкретних умов, які відрізняються від прийнятих при розрахунку еталонної ширини, ширина ОКП корегується. В остаточному варіанті при температурі поверхні деталі $T = 300...900^\circ K$, тискові в розрядній камері $p = 0,4...1,2$ тора, густині струму $j = 4...50 A/m^2$ ширина ОКП (мм) може визначатись для довільного середовища за формулою:

$$\delta_W(j, p, T) = d_{N_2 300}(j, p) \cdot K_{TN}(j, T) \cdot K_\sigma(k_\sigma) \cdot K_{T\sigma}(k_\sigma), \quad (4.15)$$

де $K_{TN}(j, T)$ – температурний коефіцієнт для середовища N100 (кореляційне відношення не нижче 0,98).

$$K_{TN}(j, T) = (0,302 + 0,514 j^{-0,419}) + (0,002013 - 0,001663 j^{-0,749}) T \quad (4.16)$$

$K_\sigma(k_\sigma)$ – коефіцієнт впливу відношення приведених інтегральних перетинів (константа $a_\sigma=0,38$) визначається за формулою:

$$K_\sigma(k_\sigma) = (1 + a_\sigma) - a_\sigma k_\sigma; \quad (4.17)$$

$K_{T\sigma}(k_\sigma)$ – поправка до температурного коефіцієнта, яка враховує склад газового середовища, дорівнює:

$$K_{T\sigma}(k_\sigma) = 0,285 + 0,715 k_\sigma. \quad (4.18)$$

Приведений інтегральний перетин іонізації розраховується за виразом

$$\sigma_\Sigma = \sum_1^i K_{pW_i} \cdot \sigma_{\Sigma W_i}, \quad (4.19)$$

де K_{pW_i} – коефіцієнт об'ємної долі компонента в газовому середовищі, i – кількість компонентів газової суміші; $\sigma_{\Sigma W_i}$ – інтегральний перетин іонізації для

будь-якого компонента W газового середовища,

$$\sigma_{\Sigma W} = \int_0^{\infty} \sigma_{ueW}(\bar{V}_e) \cdot 10^{26} \cdot dV, \quad (4.20)$$

де $\sigma_{ueW}(V_e)$ – залежність перетину ударної іонізації електроном будь-якого компонента газової суміші від середньої швидкості електрона (коефіцієнт 10^{26} введено для того, щоб дані були зручнішими в подальшій обробці і передбачає, що перетин ударної іонізації визначається в м^2) [87].

Обробка відомих величин перетинів іонізації дає значення інтегральних та, відповідно, приведених інтегральних перетинів ударної іонізації для окремих компонентів та типових газових середовищ: N100 – 30,81; Ar100 – 41,97; N25Ar75 – 39,18; N50Ar50 – 36,39; N75Ar25 – 33,6; N90H10 – 29,62.

Проте зручніше в подальшому оперувати відношенням приведених інтегральних перетинів до деякого базового значення k_σ , за якого вибрано приведений інтегральний перетин для середовища N100. Тоді відношення приведених інтегральних перетинів k_σ для інших середовищ становить: N25Ar75 – 1,272; N50Ar50 – 1,181; N75Ar25 – 1,091; Ar100 – 1,362; N90H10 – 0,961, N10Ar90 – 1,326 [109, 110].

Для найбільш застосовуваних параметрів технологічного режиму: газове середовище N75Ar25, температура $T=560^\circ\text{C}=833^\circ\text{K}$, тиск $p=0,9$ мм. рт. ст.=120 Па, напруга $U=800$ В, густина струму $j=15$ А/м² – основні параметри, котрі стосуються ОКП та процесів у ній, пов'язаних з іонами азоту, можна визначити на основі аналітики, представленій вище.

Еталонна ширина ОКП дорівнює:

$$\delta_{N_2 300} = 1,54 \cdot 0,9^{-0,89} + 1,84 \cdot 0,9^{0,58} 15^{-(1,04 \cdot 0,9^{-0,39})} = 1,783 \text{ мм.}$$

Температурний коефіцієнт для середовища N100 становить:

$$K_{TN}(j, T) = (0,302 + 0,514 \times 15^{-0,419}) + \\ + (0,002013 - 0,001663 \times 15^{-0,749}) \cdot 833 = 1,964$$

Коефіцієнт впливу відношення приведених інтегральних перетинів

$$K_{\sigma}(k_{\sigma}) = (1 + 0,38) - 0,38 \times 1,091 = 0,965.$$

Поправка до температурного коефіцієнта, яка враховує склад газового середовища,

$$K_{T\sigma}(k_{\sigma}) = 0,285 + 0,715 \times 1,091 = 1,065.$$

Ширина ОКП (мм) для середовища з прийнятими параметрами режиму

$$\delta_W(j, p, T) = 1,783 \cdot 1,964 \cdot 0,965 \cdot 1,065 = 3,599 \text{ мм.}$$

Напруженість електричного поля біля катода визначається за формулою:

$$E_K = 2 \times U_K / \delta_W(j, p, T), \quad (4.21)$$

де U_K – напруга катодного падіння, В.

$$E_K = 2 \times 1000 \times 800 / 3,77 = 4,446 \times 10^5 \text{ В/м.}$$

Виходячи з передумови, що в першому зі сторони анода прошарку вільного пробігу ОКП немає достатніх умов для утворення іонів молекулярного азоту, приведений перетин сутичок визначається для молекулярного азоту [86, 111]. Атоми азоту зазвичай утворюються в результаті рекомбінації молекулярних іонів, тобто визначення приведенного перетину сутичок для атомарного азоту немає сенсу.

$$\sigma_{vc N_2} = \pi \left(1,85 \times 10^{-10} + 1,85 \times 10^{-10} \right)^2 \times 0,75 + \pi \left(1,85 \times 10^{-10} + 1,82 \times 10^{-10} \right)^2 \times 0,25 = 42,81 \times 10^{-20} \text{ м}^2.$$

Довжина вільного пробігу $\bar{l} = 1,381 \times 10^{-23} \times 833 / 120 \times 42,81 = 0,000224 \text{ м.}$

Таким чином, при параметрах технологічного режиму, прийнятих для аналізу, ОКП може включати близьк шістнадцяти прошарків вільного пробігу.

Напруженість електричного поля катодної межі першого від аноду прошарку вільного пробігу при прийнятому лінійному законі її зміни в ОКП становить приблизно 27787 В/м.

Швидкість електронів на катодній межі першого від аноду прошарку вільного пробігу визначається відповідно до методики, розробленої Пастухом І. М. [1]. Ця методика передбачає умовне розбиття ОКП на 50 ділянок. Найкраще крива зміни середньої швидкості на рис. 4.5 описується формулою:

$$\overline{V}_e(z) = V_{e0} + a_V z \cdot e^{-b_V z^{c_V}} \cdot 10^6, \quad (4.22)$$

де a_V , b_V , c_V – коефіцієнти, які залежать від умов електричного розряду в газі (ЕРГ): склад суміші, тиск газового середовища, температура газової компоненти, густина струму; z – номер прошарку ОКП при їх загальній кількості 50, який зв'язаний з координатою поля y в напрямку від катода формулою:

$$y = 0,02 \cdot \delta \cdot z, \quad (4.23)$$

де V_{e0} – початкова середня швидкість електронів біля катода, м/с.

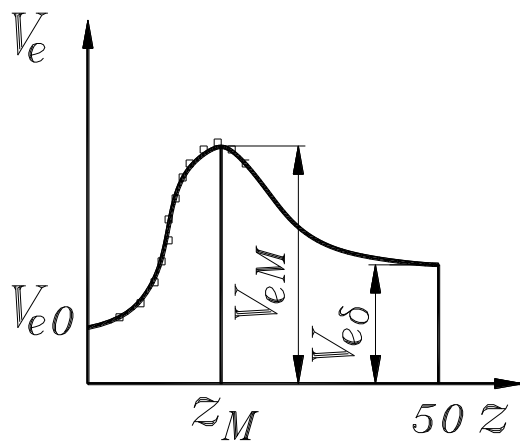


Рис. 4.5 – Зміна середньої швидкості електронів по ширині області катодного падіння

Електрон вилітає з катода, маючи енергію приблизно 1 еВ [112], яка забезпечує йому швидкість $V_{e0} = 0,5931 \cdot 10^6$ м/с. Після досягнення максимального значення V_{eM} в шарові z_M швидкість плавно зменшується до величини $V_{e\delta}$, що відповідає усталеній енергії електрона на межі входу його в позитивний стовп. Оскільки ця енергія дорівнює 2 еВ (кількість електронів з

енергією 3-4 еВ на два-три рази менша [70, 87]), то їй відповідає швидкість електрона $V_{e\delta} = 0,839 \cdot 10^6$ м/с.

За допомогою розробленої методики визначено коефіцієнти рівняння (4.22) в два етапи: спочатку залежно від умов, в яких існує електричний розряд в газі, розраховано максимальні значення швидкості V_{eM} та номер прошарку, в котрому розташований цей максимум, а потім ці два значення переведено в

значення коефіцієнтів для рівняння (4.22). Для суміші, яка повністю складається з азоту, максимальне значення середньої швидкості електронів в м/с як функції тиску p (в межах від 0,4 до 1,2 тора), густини струму j (від 4 до 120 А/м²), температури газової компоненти T (від 300 до 873°К), міжелектродного потенціалу U (від 250 до 550 В) розраховується системою рівнянь в послідовності виключення факторів впливу [1, 87]: тиску в торах:

$$\begin{cases} K_{p1}(p) = 1,565 - 1,415 p + 0,85 p^2 \\ K_{p2}(p) = 0,075 + 0,064 p - 0,066 p^2 \\ K_{p3}(p) = 0,0008601 - 0,0006156 p + 0,0003584 p^2 \\ K_{p4}(p) = -0,245 + 0,284 p - 0,166 p^2 \\ K_{p5}(p) = 0,004206 - 0,003856 p + 0,002291 p^2 \\ K_{p6}(p) = 0,063 + 0,089 p - 0,078 p^2 \\ K_{p7}(p) = 0,000002069 - 0,000001228 p + 0,00000075 p^2 \\ K_{p8}(p) = -0,178 + 0,134 p - 0,084 p^2 \end{cases}, \quad (4.24)$$

густини струму в А/м²:

$$\begin{cases} K_{pJ1}(p, j) = K_{p1}(p) \cdot j^{K_{p2}(p)} \\ K_{pJ2}(p, j) = K_{p3}(p) \cdot j^{K_{p4}(p)} \\ K_{pJ3}(p, j) = K_{p5}(p) \cdot j^{K_{p6}(p)} \\ K_{pJ4}(p, j) = K_{p7}(p) \cdot j^{K_{p8}(p)} \end{cases}, \quad (4.25)$$

температури (в градусах Кельвіна):

$$\begin{cases} K_{TPJ1}(T, p, j) = K_{pJ1}(p, j) + K_{pJ2}(p, j) \cdot T \\ K_{TPJ2}(T, p, j) = K_{pJ3}(p, j) + K_{pJ4}(p, j) \cdot T \end{cases}, \quad (4.26)$$

міжелектродного потенціалу, В:

$$\bar{V}_{eM}(U, T, p, j) = (K_{TPJ1}(T, p, j) + K_{TPJ2}(T, p, j) \cdot U) \cdot 10^6. \quad (4.27)$$

Аналогічно визначається номер прошарку, в якому середня швидкість електронів буде максимальною, але, як це було встановлено [1], оскільки положення максимуму не залежить від міжелектродного потенціалу U , то кількість факторів виключення буде меншою, а саме: тиск:

$$\begin{cases} K_{ZP1}(p) = 13,648 - 19,871 p + 11,766 p^2 \\ K_{ZP2}(p) = 0,167 + 0,144 p - 0,153 p^2 \\ K_{ZP3}(p) = 0,021 - 0,026 p + 0,014 p^2 \\ K_{ZP4}(p) = -0,079 + 0,193 p - 0,131 p^2 \end{cases}, \quad (4.28)$$

густина струму:

$$\begin{cases} K_{ZPJ1}(p, j) = K_{ZP1}(p) \cdot j^{K_{ZP2}} \\ K_{ZPJ2}(p, j) = K_{ZP3}(p) \cdot j^{K_{ZP4}} \end{cases}, \quad (4.29)$$

температура:

$$z_M(T, p, j) = K_{ZPJ1}(p, j) + K_{ZPJ2}(p, j) \cdot T, \quad (4.30)$$

з наступним заокругленням до ближчого цілого значення.

Оскільки коефіцієнт a_V впливає тільки на величину максимального значення середньої швидкості, але зовсім не змінює положення максимуму, то доречно вибір починати саме з цього параметра за системою рівнянь [87]:

$$\begin{cases} K_{a1}(z_M) = 1900 \cdot z_M^{-4,5} - 0,002241 \\ K_{a2}(z_M) = 9,581 \cdot z_M^{-1,652} \\ a_V(z_M, \bar{V}_{eM}) = K_{a1}(z_M) + K_{a2}(z_M) \bar{V}_{eM} \cdot 10^{-6} \end{cases}. \quad (4.31)$$

Тоді, враховуючи значення середньої швидкості електронів в початковій, кінцевій та в точці максимуму, вводячи позначення [87]

$$w = \ln \left(\frac{\bar{V}_{eM} - V_{e0}}{a_V z_M \cdot 10^6} \right), \quad (4.32)$$

$$v = \ln \left(\frac{0,004918}{a_V} \right), \quad (4.33)$$

одержимо вирази для визначення інших двох коефіцієнтів:

$$c_V = \frac{\ln w - \ln v}{\ln z_M - 3,912}, \quad (4.34)$$

$$b_V = -\frac{v}{50^{c_V}} = -\frac{w}{z_M^{c_V}}. \quad (4.35)$$

Для прийнятих вище прикладів параметрів технологічного режиму визначасмо:

$$\begin{cases} K_{p1}(p) = 1,565 - 1,415 \times 0,9 + 0,85 \times 0,9^2 = 0,98 \\ K_{p2}(p) = 0,075 + 0,064 \times 0,9 - 0,066 \times 0,9^2 = 0,07914 \\ K_{p3}(p) = 0,0008601 - 0,0006156 \times 0,9 + 0,0003584 \times 0,9^2 = 0,000596364 \\ K_{p4}(p) = -0,245 + 0,284 \times 0,9 - 0,166 \times 0,9^2 = -0,12386 \\ K_{p5}(p) = 0,004206 - 0,003856 \times 0,9 + 0,002291 \times 0,9^2 = 0,00259131 \\ K_{p6}(p) = 0,063 + 0,089 \times 0,9 - 0,078 \times 0,9^2 = 0,07992 \\ K_{p7}(p) = 0,000002069 - 0,000001228 \times 0,9 + 0,00000075 \times 0,9^2 = 0,0000015713 \\ K_{p8}(p) = -0,178 + 0,134 \times 0,9 - 0,084 \times 0,9^2 = -0,12544 \end{cases}$$

$$\begin{cases} K_{PJ1}(p, j) = 0,98 \cdot 15^{0,07914} = 1,2142327375603 \\ K_{PJ2}(p, j) = 0,000596364 \cdot 15^{-0,12386} = 0,000426423132 \\ K_{PJ3}(p, j) = 0,00259131 \cdot 15^{0,07992} = 0,0032174557627 \\ K_{PJ4}(p, j) = 0,0000015713 \cdot 15^{-0,12544} = 0,0000011187427 \end{cases}$$

$$\begin{cases} K_{TPJ1}(T, p, j) = 1,21423273756 + 0,000426423132 \cdot 833 = 1,569443206516 \\ K_{TPJ2}(T, p, j) = 0,0032174557627 + 0,0000011187427 \cdot 833 = 0,0041493684318 \end{cases}$$

$$\bar{V}_{eM}(U, T, p, j) = (1,569443206516 + 0,004193648 \cdot 800) \cdot 10^6 = 4,92 \times 10^6 \text{ м/с.}$$

$$\begin{cases} K_{zP1}(p) = 13,648 - 19,871 \cdot 0,9 + 11,766 \cdot 0,9^2 = 5,29456 \\ K_{zP2}(p) = 0,167 + 0,144 \cdot 0,9 - 0,153 \cdot 0,9^2 = 0,17267 \\ K_{zP3}(p) = 0,021 - 0,026 \cdot 0,9 + 0,014 \cdot 0,9^2 = 0,00894 \\ K_{zP4}(p) = -0,079 + 0,193 \cdot 0,9 - 0,131 \cdot 0,9^2 = -0,01141 \end{cases}$$

$$\begin{cases} K_{zPJ1}(p, j) = 5,29456 \cdot 15^{0,17267} = 8,451 \\ K_{zPJ2}(p, j) = 0,0085415 \cdot 15^{(-0,01141)} = 0,00867 \end{cases}$$

$$z_M(T, p, j) = 8,451 + 0,00867 \cdot 833 = 15,671.$$

Заокруглено до цілого значення номера прошарку, в якому швидкість електронів максимальна, $z_M = 16$.

$$\begin{cases} K_{a1}(z_M) = 1900 \cdot 16^{-4,5} - 0,002241 = 0,00328 \\ K_{a2}(z_M) = 9,581 \cdot 16^{-1,652} = 0,00889 \\ a_V(z_M, \bar{V}_{eM}) = 0,00328 + 0,00889 \cdot 4,924 \cdot 10^{-6} = 0,441 \end{cases},$$

$$w = \ln \left(\frac{4,924 - 0,5931}{0,441 \cdot 16 \cdot 10^6} \right) = -0,549,$$

$$v = \ln\left(\frac{0,004918}{0,441}\right) = -4,496 ,$$

$$c_v = \frac{\ln(-0,549) - \ln(-4,496)}{\ln(16) - 3,912} = 1,9493 ,$$

$$b_v = -\frac{(-4,496)}{50^{1,9493}} = -\frac{(-0,549)}{17^{1,9493}} = 0,00219 .$$

Номер прошарку, який відповідає катодній межі першого від аноду прошарку вільного пробігу (враховуючи, що в ОКП 16 таких прошарків) $z_I = 50(1 - 1/16) = 46,875$, прийнято $z_I = 47$. Тоді швидкість електронів на вході зі сторони катода в останній прошарок вільного пробігу згідно з рівнянням (4.22) становить:

$$\overline{V}_e(47) = 0,5931 \cdot 10^6 + 0,441 \cdot 47 z \cdot e^{-0,00219 \cdot 47^{1,9493}} \cdot 10^6 = 0,9822 \cdot 10^6 \text{ м/с.}$$

Оскільки отримане значення швидкості суттєво менше від швидкості електронів V_I , яка відповідає потенціалу іонізації, котра становить для молекулярного азоту $V_I = 2,343 \cdot 10^6$ м/с, для аргону $V_I = 2,358 \cdot 10^6$ м/с, для молекулярного водню $V_I = 2,327 \cdot 10^6$ м/с, для атомарного азоту $V_I = 2,259 \cdot 10^6$ м/с, для атомарного водню $V_I = 2,187 \cdot 10^6$ м/с [1], то для ударної іонізації компонентів газового середовища в першому від анода прошарку вільного пробігу немає ніяких умов. Аналогічно через низьку швидкість електронів відсутні умови і для ступінчатої іонізації. Таким чином, в першому від анода прошарку вільного пробігу енергетика електронів – головного ініціатора субпроцесів іонізації не дозволяє отримати іони молекулярного азоту, що також робить неможливим утворення атомарних іонів азоту та нейтралів азоту [87].

Необхідно також проаналізувати процеси, пов'язані з можливістю дрейфу поза зону ОКП іонів, утворених в прошарках, що розташовані ближче до катода, ніж перший прошарок. Цей дрейф можливий тільки як наслідок сутичок іонів з іншими частками газу (зазвичай – нейтральними з огляду на дуже малий ступінь іонізації, що унеможливорює сутички іонів один з одним) [87]. Схему для дослідження показано на рис. 4.6.

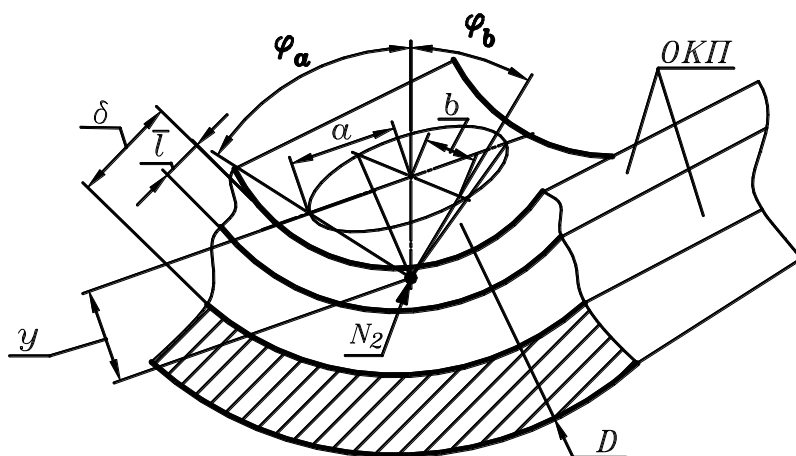


Рис. 4.6 – Схема процесів в першому від анода прошарку вільного пробігу

Частка молекулярного азоту, яка ввійшла в ОКП, в результаті сутички з іншими компонентами газу згідно із законом сферичної симетрії може бути відбита в будь-якому напрямку. З позиції дослідження ефекту накачування внутрішнього простору отворів навіть, якщо допустити, що з тих чи інших умов у першому прошарку з'явилися іони азоту, котрі перемістились в нього з прошарків, ближчих до катода, то вихід з першого прошарку у внутрішню ділянку отвору поза зону ОКП можливий тільки, якщо частка буде відбита в межах сегмента у формі еліптичного коноїда з еліпсом в основі (півосі його a і b , а кути бокових твірних відповідно φ_a та φ_b). Враховуючи відносно незначні розміри ширини прошарків вільного пробігу, замінимо еліптичний коноїд круговим, тобто півосі основи та кути твірної будуть однакові. Розміри півосей (радіуси кола основи) залежать від координати y положення частки в момент сутички, яка може змінюватись від нуля до розміру ширини прошарку вільного пробігу. Тоді геометричні параметри конуса визначаються [87] за формулами:

$$\varphi_a = \varphi_b = \arccos(y/\bar{l}), \quad (4.36)$$

$$a = b = \sqrt{(\bar{l})^2 - y^2}. \quad (4.37)$$

Очевидно, що і кути, і розміри півосей будуть змінюватись залежно від координати точки сутички y в межах відповідно $(90^\circ - 0)$, $(\bar{l} - 0)$. Площа круга

основи теж буде змінюватись від $\pi (\bar{l})^2$ до нуля. Ймовірність виходу частки з першого прошарку вільного пробігу (подія A) є, таким чином, відношенням площі круга основи конічного сегмента до площі кулі, радіус якої $\bar{l}$:

$$P_A(A) = \pi a^2 / 4\pi (\bar{l})^2, \quad (4.38)$$

тобто залежно від координати точки сутички ймовірність змінюється від нуля до 0,25. Проте найбільше значення ймовірності відповідає сутичці на анодній межі першого прошарку вільного пробігу, де виключено навіть теоретичну можливість іонізації азоту. При відбитті частки азоту, в тому числі і його іонів, з наступних, ближчих до катода, прошарків (подія B), то ймовірність цього процесу дорівнює добуткові ймовірностей події A :

$$P_B(B) = P_A(A)^Z, \quad (4.39)$$

де Z – порядковий номер прошарку вільного пробігу, який відраховується послідовно від анодної межі ОКП до катода [87].

Очевидно, що чим ближче точка старту частки азоту (в тому числі і його іонів) до катода, тим катастрофічніше зменшується ймовірність виходу її за межі ОКП у внутрішній об'єм отвору. Крім того, слід врахувати ще одну суттєву обставину, яка не сприяє дрейфові іонізованих часток азоту в отвір: на іон діє сила від поля, причому вона тим більша, чим ближче точка старту до катода (відстань від катода у вимірюється в напрямку від катода до анода):

$$F(y) = m_+ \frac{d^2 y}{dt^2} = q_+ E(y), \quad (4.40)$$

де q_+ – елементарний заряд іона, який номінально дорівнює заряду електрона (всі іони – однозарядні); $E(y)$ – закон зміни напруженості поля по нормалі до поверхні в напрямку від катода до анода,

$$E(y) = -\frac{d\varphi}{dx} = E_K \left(1 - \frac{y}{\delta}\right), \quad (4.41)$$

де y – координата в напрямку нормалі до поверхні з початком системи

координат на поверхні в сторону анода.

Враховуючи значення напруженості поля біля катода, визначене вище (по порядку величин – 10^5 В/м), сила, яка притягує іон, досягає великих значень, іон різко змінює траєкторію свого руху в сторону катода, причому чим ближче сутичка проходить до катода, тим у меншій мірі іон може рухатись в напрямку виходу з ОКП, що ще раз вказує на повну неможливість при стаціонарному живленні розряду дрейфу іонів з ОКП у внутрішню зону отвору [87].

Суттєва відмінність азотування з переривчастим живленням розряду порівняно із стаціонарним полягає в тому, що послідовно за певною частиною періоду, в якій розряд отримує живлення, слідує проміжок часу, коли живлення відсутнє. При відсутності живлення рух іонів в ОКП продовжується за інерцією, проте на іон вже не діє сила $F(y)$ від поля, яка цей момент відсутня [87]. За цих обставин енергія іонів визначається через різницю потенціалів поля в точках передостанньої φ_0 та останньої φ_y сутичок:

$$\varepsilon_0 = q_e (\varphi_0 - \varphi_y). \quad (4.42)$$

При лінійному законі зміни напруженості поля потенціал в точці з координатою y визначається:

$$\varphi_y = 2U \left(\frac{y}{\delta} - \frac{y^2}{2\delta^2} \right), \quad (4.43)$$

Враховуючи, що потенціал поля в точці передостанньої сутички знаходиться аналогічно:

$$\varphi_0 = U \left(\frac{2\delta(y + y_0) - (y + y_0)^2}{\delta^2} \right), \quad (4.44)$$

де $y_0 = \bar{l} \cdot \cos \beta_0$; β_0 – середній кут між напрямками руху іона перед сутичкою та нормаллю до поверхні (див. вище), то енергія входу в останню сутичку дорівнює:

$$\varepsilon_0 = q_e U \frac{2\delta \cdot y_0 - 2yy_0 - y_0^2}{\delta^2}. \quad (4.45)$$

Представлена залежність надто ускладнить подальші викладки без нагальної в тому потреби. Останнє обґрунтовується тим, що в першому від катоду ПВП, ширина якого приблизно становить в околі 10% ширини ОКП, падіння потенціалу сягає від 20 до 40%, тобто потенціал поля змінюється дуже різко. Ця обставина дозволяє прийняти в межах першого від катоду ПВП лінійний закон зміни потенціалу поля, який тоді набуде вигляду:

$$\varphi(y) = \frac{y}{l} \varphi_Y, \quad (4.46)$$

де φ_Y – потенціал поля на анодній межі першого від катоду ПВП, котрий визначається за формулою:

$$\varphi_Y = 2U \left(\frac{\bar{l}}{\delta} - \frac{(\bar{l})^2}{2\delta^2} \right). \quad (4.47)$$

З цим допущенням втрата енергії іоном під час сутички значно спрощується:

$$\Delta\varepsilon = \frac{2m_1m_2}{(m_1 + m_2)^2} \varepsilon_0. \quad (4.48)$$

При приблизній рівності мас учасників сутички коефіцієнт втрати енергії становить 0,5. Таке допущення абсолютно правомірне за умови, що в газовому середовищі, яке дійсно використовується в технологічних процесах, переважає один компонент – азот. Тоді енергія частки азоту після виходу з чергової сутички становить 50% від енергії на момент входу в неї. Середня швидкість іона певного сорту розраховується через його середню енергію, якщо взяти до уваги, що оперуємо поняттям опосередкованої частки:

$$\overline{V}_+ = K_{VE} \sqrt{\varepsilon_0}, \quad (4.49)$$

де K_{VE} – числовий коефіцієнт в м/с, для аргону – $2,195 \cdot 10^3$, для молекулярного азоту – $2,622 \cdot 10^3$, для атомарного азоту – $3,708 \cdot 10^3$, для молекулярного водню – $9,78 \cdot 10^3$ та для атомарного водню – $13,83 \cdot 10^3$, одиниці виміру енергії – еВ,

швидкості – м/с.

Час, необхідний для проходження іоном зони ОКП в сторону внутрішнього простору отвору ($t = \delta/\sqrt{V_+}$), не повинен бути більшим від тривалості перерви в подачі живлення розрядом. Враховуючи, що тривалість подачі напруги на електроди розрядної камери $t_0 = T/S = 1/\nu S$, тривалість паузи $t_i = T - t_0$ (ν – частота коливань напруги на електродах камери, S – шпаруватість сигналу). Параметри коливань (частота, шпаруватість) повинні встановлюватись також з огляду на ту обставину, що тривалість подачі напруги має бути достатньою, щоб іон при певній швидкості, якої він досяг, проходив відстань, що відповідає довжині вільного пробігу [87].

Наведена результати вказують на принципову можливість азотування внутрішньої поверхні отворів з відносно малим діаметром при переривчастому живленні розряду за рахунок ефекту накачування іонів азоту з області катодного падіння. Тільки в цьому випадку утворюються умови для дрейфу іонів поза межі області катодного падіння в результаті сутичок з частками газу.

При азотуванні з безперервним живленням розряду подібні явища неможливі, і якщо спостерігаються в певних умовах процеси часткової модифікації внутрішніх поверхонь отворів з відносно малим діаметром, то азотування в цьому випадку ймовірно проходить за схемою пічного з відповідними недоліками, характерними для нього [87].

4.4 Дослідження зносостійкості внутрішніх поверхонь довгомірних отворів при БАТР

Режими і сталі для БАТР наведено в табл. 4.2. Установку для проведення досліджень розглянуто в розділі 2.

Таблиця 4.2

Технологічні параметри азотування

Номер режиму	Температура, °С	Напруга, В	Тиск в камері, тор	Тривалість, години	Особливості режиму
1	560	730	1,2	6	Циклічно-комутований розряд
2	560	730	1,2	6	Живленням постійним струмом (наскрізний отвір)
3	560	730	1,2	6	Живленням постійним струмом (глухий отвір)

На рис. 4.7 подано результати дослідження зносостійкості внутрішніх поверхонь отворів із сталі 38Х2МЮА залежно від висоти їх розміщення по довжині труби при азотуванні в ЦКР.

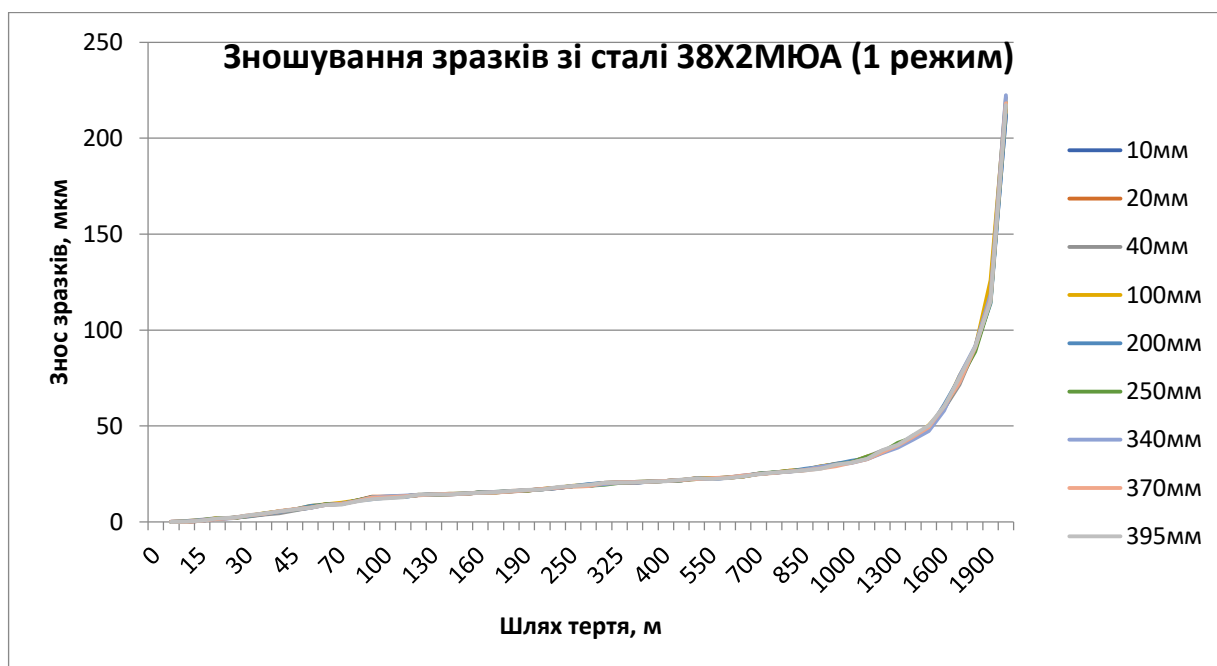


Рис. 4.7 – Зносостійкість зразків із сталі 38Х2МЮА залежно від висоти їх розміщення від торця труби при азотуванні в ЦКР (режим 1 в табл. 4.2)

При шляху тертя до 30 м знос для усіх зразків із сталі 38Х2МЮА практично відсутній, а далі до 1100 – 1200 м зношування йде з постійною

швидкістю по всій довжині циліндра. Після 1300 м шляху тертя проходить катастрофічний знос поверхонь зразків.

При БАТР із живленням постійним струмом результати зміцнення поверхонь зразків із сталі 38Х2МЮА значно гірші (рис. 4.8 і 4.9), особливо для режиму 3 («глухий» отвір). Для цих зразків з наближенням до центра труби катастрофічний знос настає вже після 1000 м шляху тертя. Зношування проходить із значною швидкістю, а величина швидкості зношування збільшується по мірі віддалення зразка від відкритого торця труби.

Отримані результати підвищення зносостійкості пояснюються даними розподілу мікротвердості по товщині азотованого в ЦКР внутрішнього шару зразків (рис. 4.10), так і відповідними рентгенограмами (рис. 4.11 – 4.14).

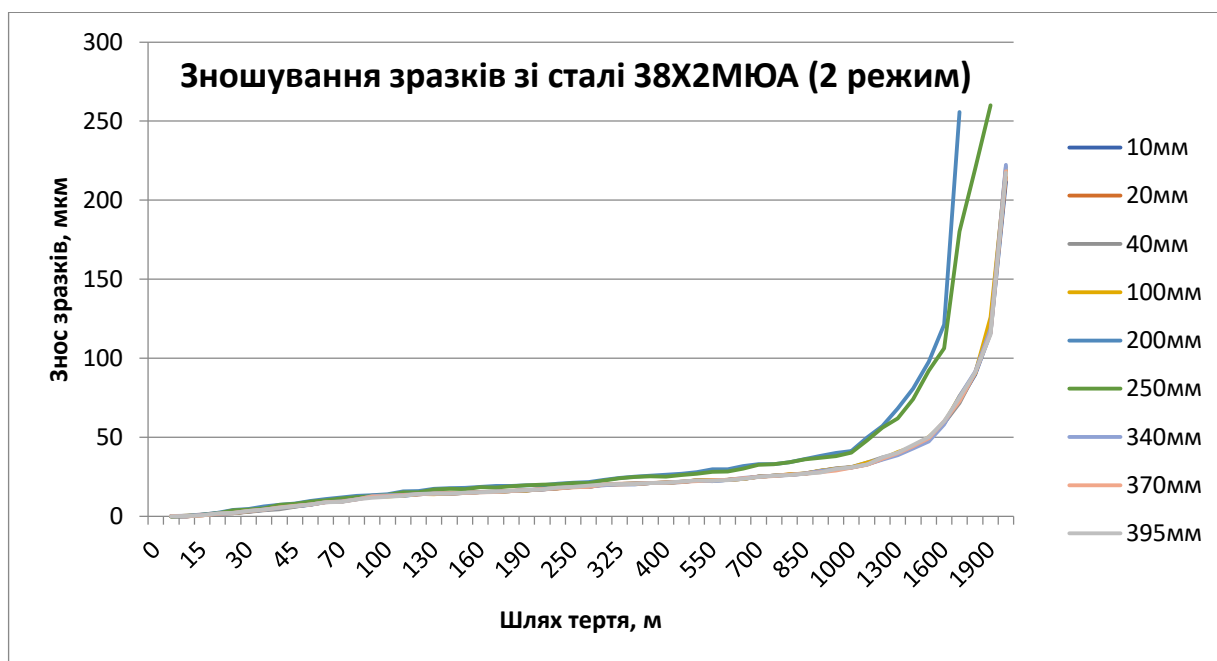


Рис. 4.8 – Зносостійкість зразків із сталі 38Х2МЮА залежно від їх розміщення від торця труби при азотуванні з постійним живленням (режим 2 в табл. 4.2)

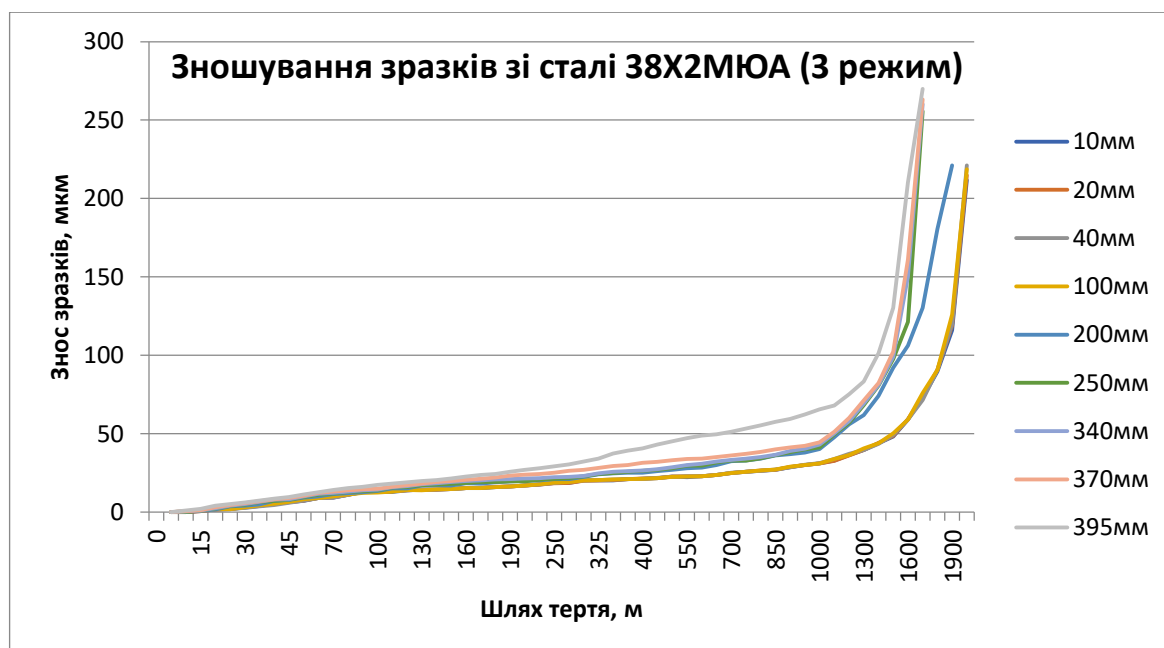


Рис. 4.9 – Зносостійкість зразків із сталі 38Х2МЮА залежно від їх розміщення від торця труби при азотуванні з постійним живленням (режим 3 в табл. 4.2)

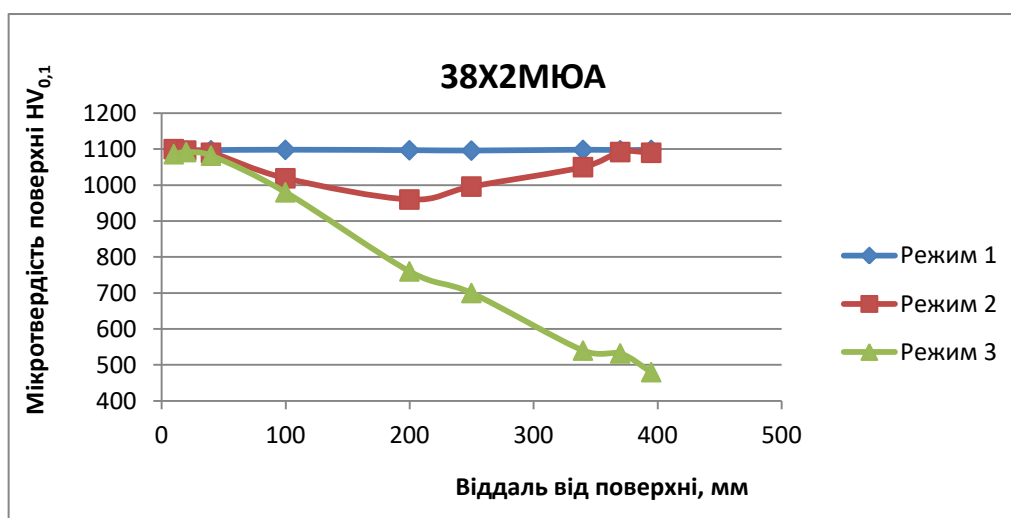


Рис. 4.10 – Зміна мікротвердості азотованого шару сталі 38Х2МЮА залежно від режиму азотування

В роботах [32, 43, 44] стверджується, що для відкритих пар тертя слід застосовувати деталі з високою твердістю взаємодіючих пар. Аналіз фізико-механічних властивостей нітридів показує, що нітриди тугоплавких металів мають високу твердість, що і пояснює високу зносостійкість поверхонь сталі 38ХМЮА при сухому терті.

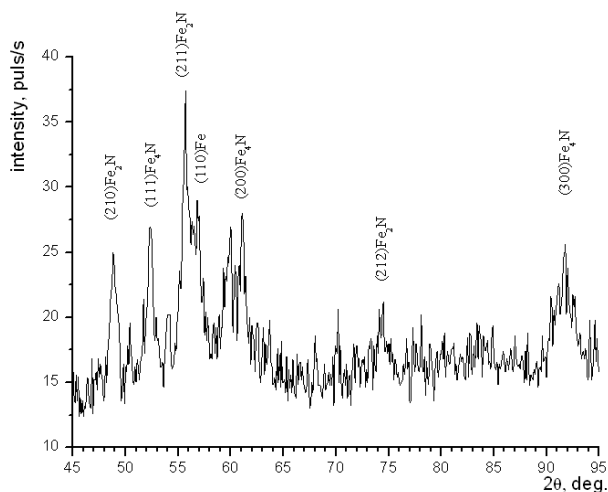


Рис. 4.11 – Ділянка дифрактограми зразка сталі 38X2МЮА, азотованої в ЦКР (режим 1, 100 мм від торця).

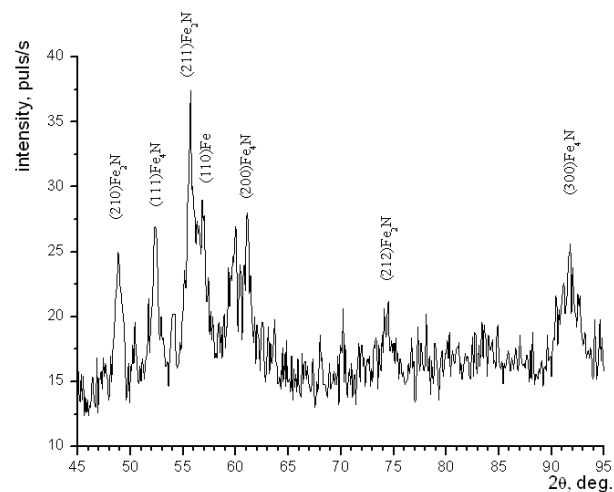


Рис. 4.12 – Ділянка дифрактограми зразка сталі 38X2МЮА (режим 3, 10 мм від торця)

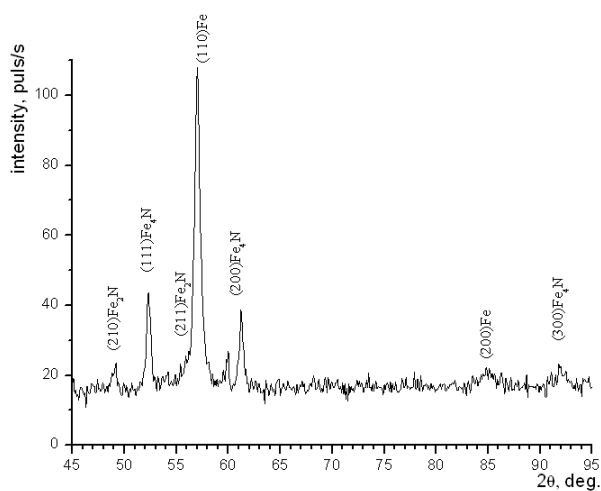


Рис. 4.13 – Ділянка дифрактограми зразка сталі 38X2МЮА, азотованої в ЦКР (режим 13, 200 мм від торця).

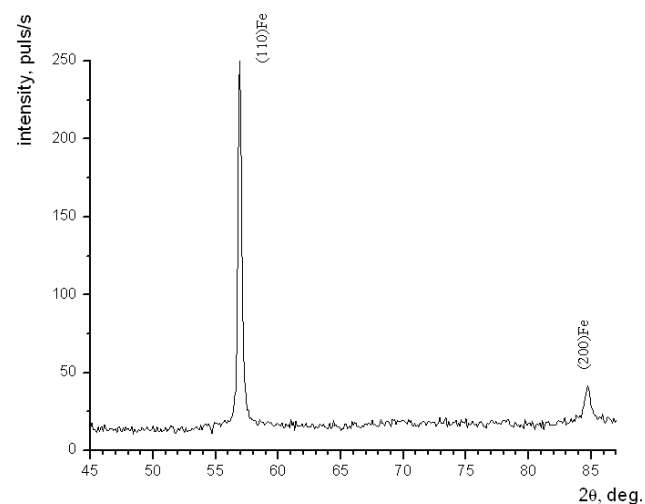


Рис. 4.14 – Ділянка дифрактограми зразка сталі 38X2МЮА (режим 3, 395 мм від торця)

Рентгенограма (рис. 4.11) показує, що нітридний шар на сталі 38ХМЮА складається із ϵ , γ' і α -фази. Ідентифікація за мікротвердістю свідчить про наявність на поверхні нітриду CrN (рис. 4.11).

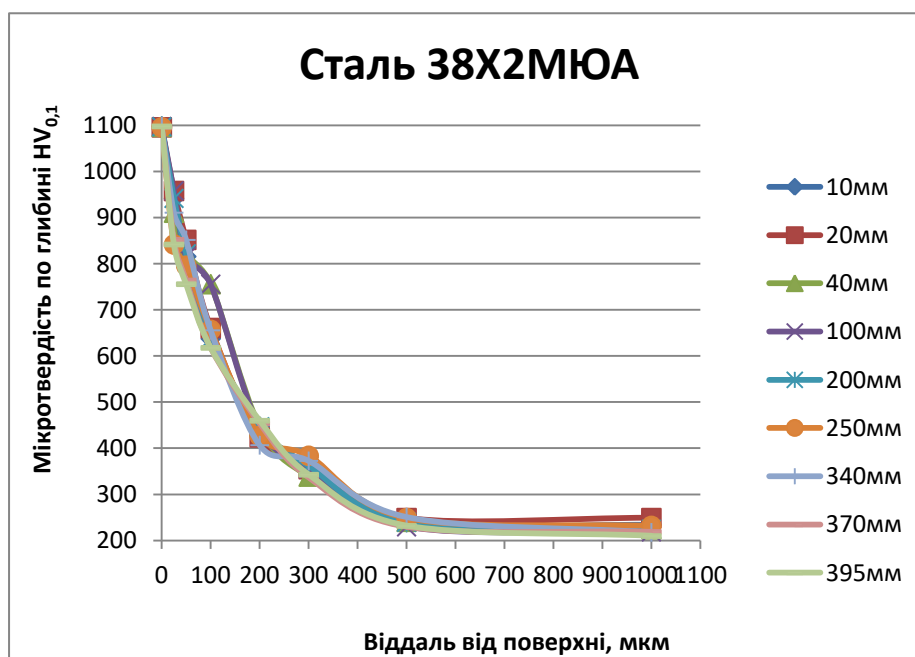


Рис. 4.15 – Розподіл мікротвердості по глибині взірців для сталі 38Х2МЮА азотованих в ЦКР для внутрішньої поверхні циліндра

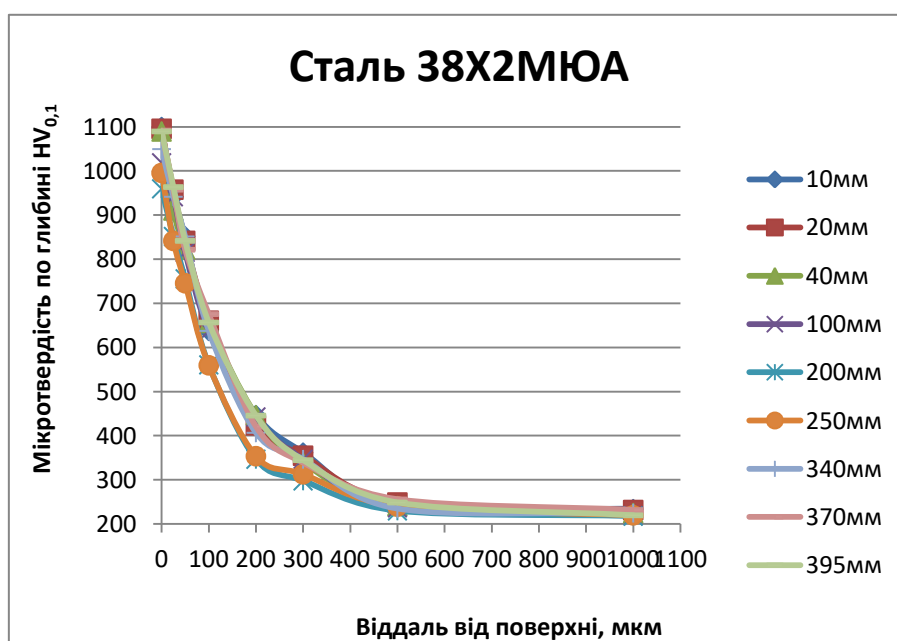


Рис. 4.16 – Розподіл мікротвердості по глибині взірців для сталі 38Х2МЮА азотованих в тліючому розряді з постійним живленням (циліндр відкритий з двох сторін)

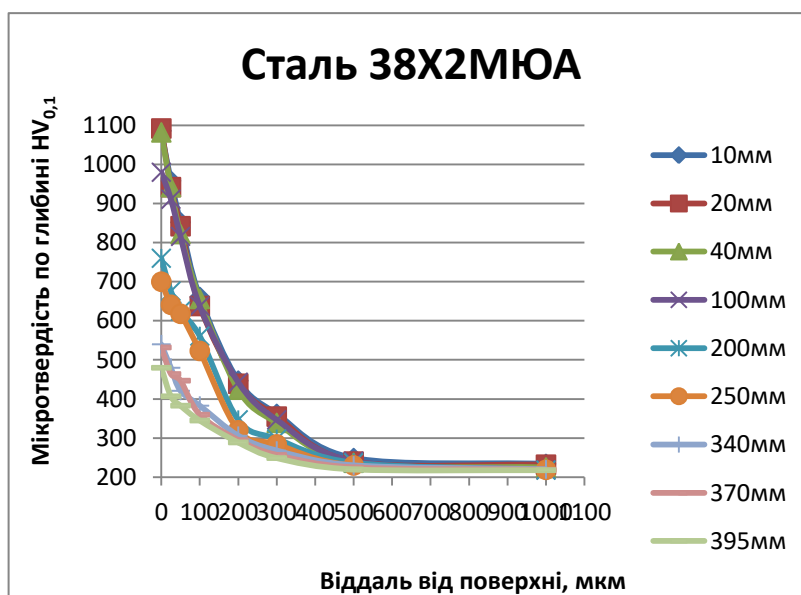


Рис. 4.17 – Розподіл мікротвердості по глибині взірців для сталі 38Х2МЮА азотованих в тліючому розряді з постійним живленням (циліндр закритий з одної сторони)

Таким чином, азотування в ЦКР є ефективним способом підвищення зносостійкості конструкційних сталей. Крім того, БАТР в ЦКР дозволяє шляхом зміни параметрів азотування (форми циклу, частоти сигналу, шпаруватості) варіювати характеристиками міцності і зносостійкості металевих поверхонь.

Графіки дослідження зносостійкості внутрішніх поверхонь отворів, змін мікротвердості азотованого шару і дифрактограми зразків із сталі 40Х і сталі 45 наведено в додатку В.

Висновки до розділу 4

1. Проведені дослідження показують, що існують певні обмеження щодо азотування довгомірних отворів при використанні традиційних методів 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 ймовірне 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 довгомірних отворів. Проаналізовано можливість основних процесів азотування таких отворів при різних типах існування газового розряду. Запропоновано рекомендації стосовно параметрів електричного розряду в газі для забезпечення ефективності процесу модифікації внутрішніх поверхонь довгомірних отворів. Наведено основні закономірності, які характеризують технологічні особливості азотування внутрішньої поверхні отворів. Встановлено умови та обмеження існування розряду, при яких можливий ефект накачування іонів в отвір.

3. Отримано результати впливу на характер процесів, які мають місце при азотуванні довгомірних отворів, співвідношень розмірів отворів та геометричних характеристик області катодного падіння. Сформовано концептуальні підходи до аналітичного вирішення задач, котрі описують умови якісної модифікації деталей з робочими поверхнями у вигляді отворів невеликого діаметра та відносно значної довжини.

4. Проведений аналіз зміцнення поверхонь азотуванням в ЦКР внутрішніх довгомірних отворів показав їх ефективність в підвищенні зносостійкості отворів в результаті підвищення фізико-механічних характеристик азотованого шару по усій довжині отвору порівняно з азотуванням із постійним струмом.

РОЗДІЛ 5

ЗНОСОСТІЙКІСТЬ КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ ПІСЛЯ БАТР З
ЦИКЛІЧНО-КОМУТОВАНИМ РОЗРЯДОМ5.1 Алгоритм визначення класифікаційних критеріїв при утворенні
нітридів в АТР з нестаціонарним живленням

Для макрофазового процесу енергетичний параметр технологічного режиму може змінюватись декілька разів, тобто процес може включати певну кількість фаз з різними значеннями цих параметрів, тривалість кожної з яких $\tau_{\phi i}$ одного порядку із загальною тривалістю процесу обробки τ_n . В мультифазових процесах окремі фази періодично повторюються, але тривалість кожного з цих циклів τ_{ϕ} на багато менша загальної тривалості обробки [48, 49]. Якщо процес за характером – циклічно-комутований, то цикл включає як фази, коли енергія потоку складає певну величину, так і проміжки часу, коли енергетичне збудження процесу відсутнє (Рис. 5.1).

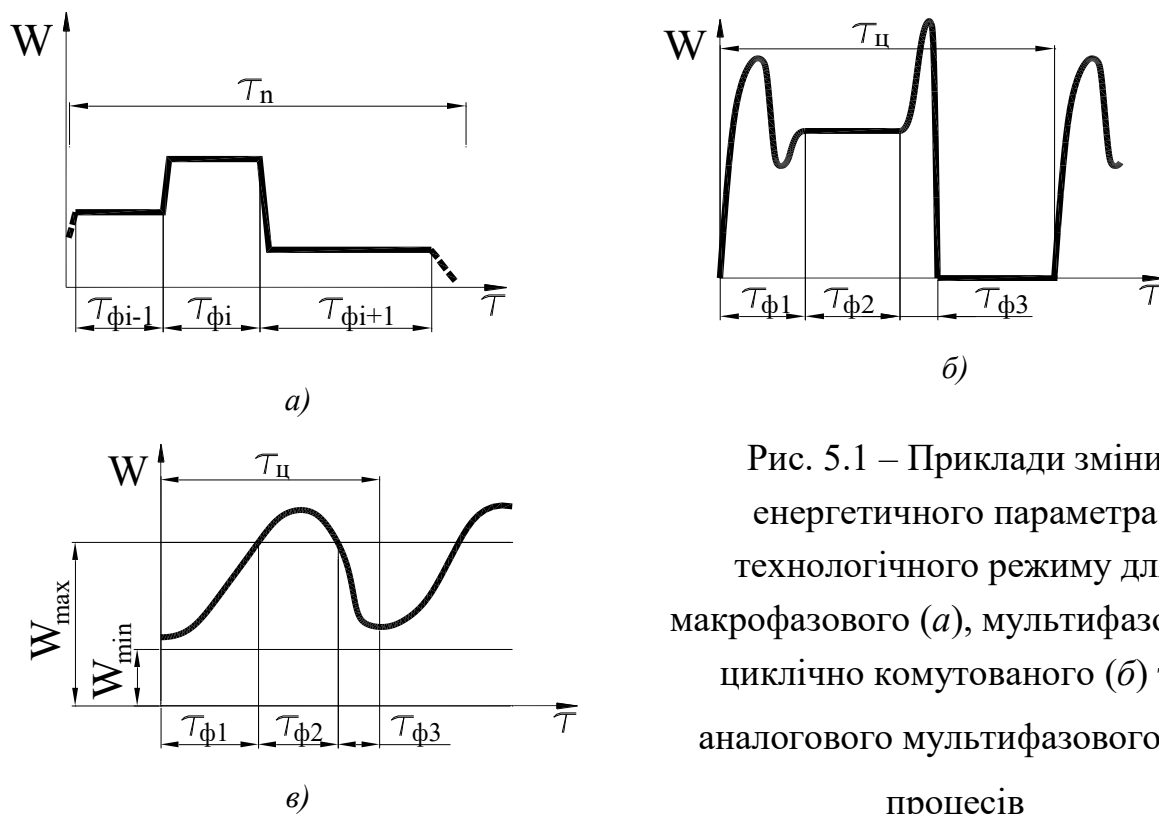


Рис. 5.1 – Приклади зміни енергетичного параметра технологічного режиму для макрофазового (а), мультифазового циклічно комутованого (б) та аналогового мультифазового (в) процесів

Залежно від характеру та принципу комутації частина циклу, коли подається напруга на електроди камери, може складатися з декількох фаз тривалістю $\tau_{\phi 1}$, $\tau_{\phi 2}$ і т. п. Форма зміни енергетичного параметра та тривалість окремих фаз залежить від електричних характеристик розрядних камер, величини номінального значення енергетичного параметра тощо, а також від установок комутації (частота, шпаруватість сигналу і т. п.).

На останні величини впливають в першу чергу необхідність забезпечення співвідношень тривалості сигналу і паузи з часом переходів від тліючого до дугового розряду та гасіння дугового розряду. Ці ж фактори, а також межі енергетичного впливу, враховуються у випадку, коли характер процесу мультифазовий аналоговий. Як згадані межі, зазвичай, приймають мінімальні енергетичні рівні утворення нітридів та розпорошення часток поверхні певного сорту [72].

Енергетичний рівень розпорошення поверхні, величина якого, як зазначалось вище, в основному дорівнює енергії сублімації, одночасно є максимальним рівнем енергетичного параметра утворення нітридів.

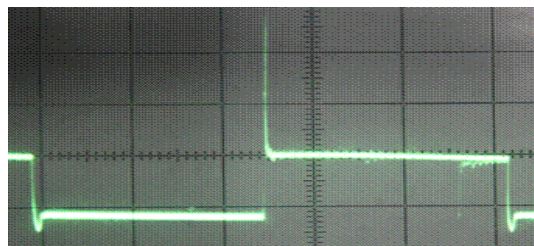
Принципова відмінність мультифазового аналогового від мультифазового циклічно-комутованого полягає насамперед в тому, що енергетичний параметр технологічного процесу практично ніколи не дорівнює нулю, а в основному коливається в межах зони утворення нітридів і частини зони розпорошення, хоча в принциповому плані не заперчується можливість застосування комбінованих процесів [72].

Відсутність пауз сприяє тому, що перехідні процеси включення та виключення напруги суттєво менш впливові.

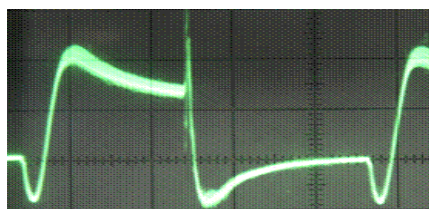
На рис. 5.2 представлено реальні осцилограми зміни напруги та струму в розрядній камері для найбільш складного в процедурі щодо визначення ДЕФ утворення нітридів циклічно-комутованого процесу.



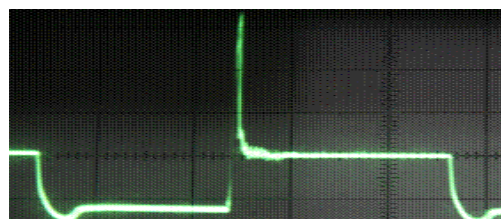
a – струм в камері, частота 1 кГц



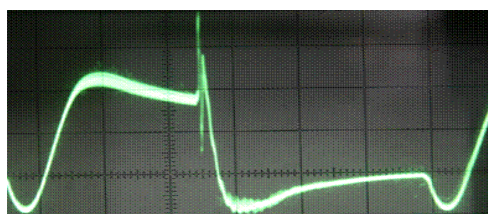
б – напруга на електродах камери,
частота 1 кГц



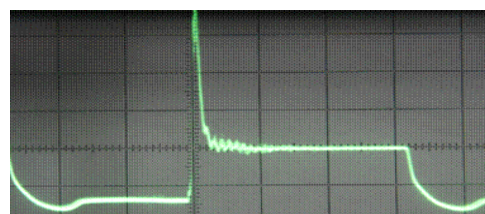
в – струм в камері, частота 5 кГц



г – напруга на електродах камери, частота
5 кГц



д – струм в камері,
частота 8 кГц



е – напруга на електродах камери,
частота 8 кГц

Рис. 5.2 – Осцилограми зміни енергетичних параметрів
в режимі мультипроцесного циклічно-комутованого розряду

Рисунок 5.2 підтверджує теоретичні висновки, які подано в роботах [71, 72, 76, 78], стосовно закономірностей зміни в часі напруги на електродах розрядної камери та густини струму в ній, а також щойно викладені стосовно складності аналітичного оперування цими залежностями при розрахунку динамічного енергетичного фактора утворення нітридів. Насамперед рисунок 5.2 підтверджує тезу про складність форми електричних характеристик розряду: струму в розрядній камері та напруги на електродах. Крім ділянок з відносно стабільними значеннями цих параметрів (стаціонарні фази), мають місце ділянки з перехідними процесами: фази включення та виключення розряду. З наведених рисунків також можна зробити висновок, що тривалість

перехідних процесів не залежить від частоти, оскільки постійна часу [71, 72, 76, 78] формується тільки параметрами самої розрядної камери (її опором, ємністю та індуктивністю). Отже, при збільшенні частоти вплив нестационарної частини циклу на процес формування поверхневого шару більш суттєвий, оскільки тривалість цієї фази відносно тривалості циклу зростає. Для оцінки значущості врахування перехідних процесів додамо, що розмір великої клітки по вертикалі відповідає 1A на осцилограмах струму або 500В на осцилограмах напруги. Загальні принципи алгоритмів розрахунку динамічного енергетичного фактора утворення нітридів на металевій поверхні зводяться до наступного. В першу чергу ідентифікується тип розряду згідно з розглянутою вище класифікацією. Далі формується його структура (типи фаз, їх число та тривалість). Послідовно для всіх фаз проводиться розбивка на певну кількість шарів (інтервалів часу).

Згідно з законом зміни енергетичних параметрів для цього ж проміжку часу спочатку як вихідні характеристики розраховуються значення цих енергетичних параметрів, потім в ядрі алгоритму визначається ВЕФ як для окремих компонентів, так і для всього газового середовища в цілому.

Таким чином поступово формується ДЕФ для певної фази, причому з враховується її вагомості в загальному циклі обробки. Аналогічно визначається ДЕФ для кожної фази і для всього циклу обробки. Оскільки структура циклу обробки для кожного окремого типу розряду різна, то необхідно встановити принцип формування ДЕФ таким, щоб результати розрахунку для різних типів процесів можливо було б порівнювати не тільки якісно (кращі чи гірші умови для утворення нітридів), але певною мірою кількісно. Ця передумова частково може виконуватись, якщо кожна з фаз буде враховуватись з огляду на співвідношення тривалості окремих фаз до загальної тривалості типового структурного елемента обробки, яким є цикл зміни енергетичних факторів розряду. В цьому сенсі певну складність може становити аналоговий мультифазовий процес, але здебільшого у тому випадку, коли окремі фази або їх блоки не повторюються більш-менш однотипово. Ця умова в принципі автоматично може забезпечуватись, якщо врахувати, що в основу закону зміни

енергетичного параметра буде покладено певну закономірність, тобто аналоговий мультифазовий процес завжди є сукупністю типових блоків фаз [72]. Загальний алгоритм розрахунку динамічного енергетичного фактора утворення нітридів показано на рисунку 5.3.

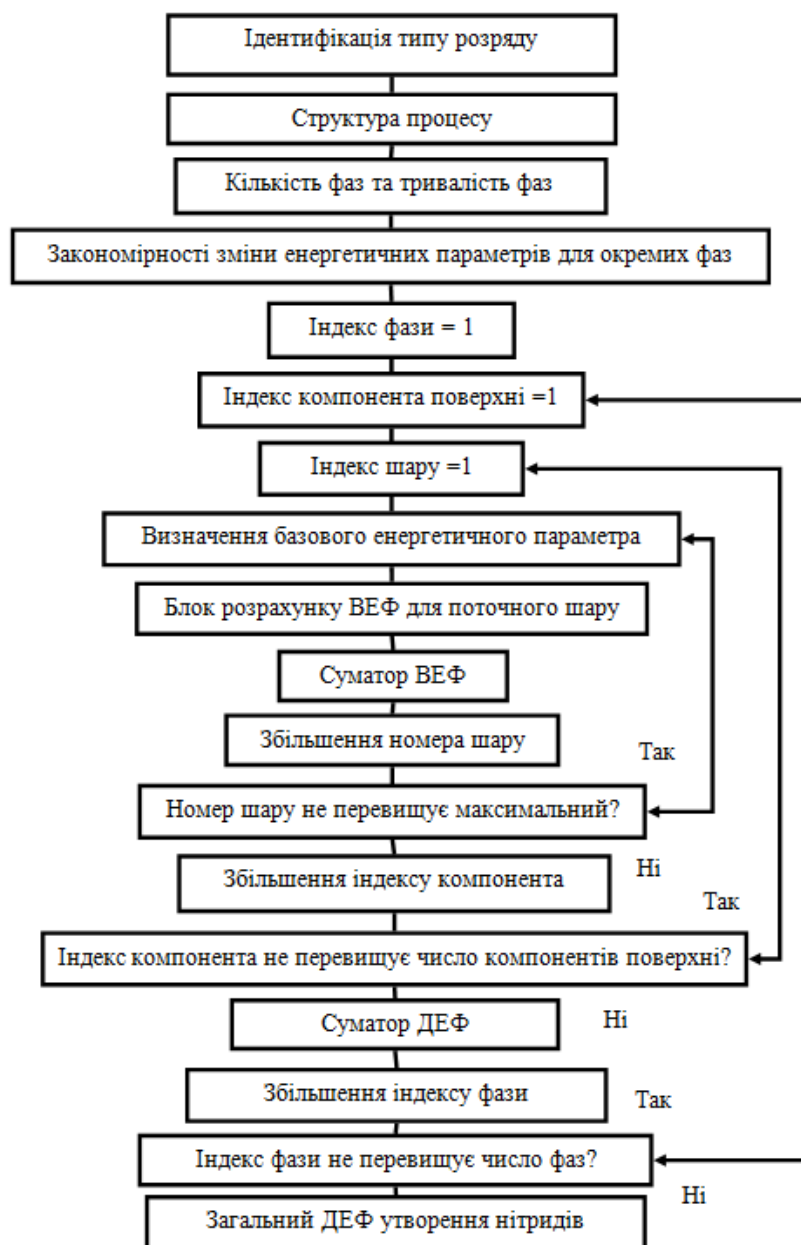


Рис. 5.3 – Алгоритм розрахунку динамічного енергетичного фактора утворення нітридів

Викладений матеріал є основою для розробки програмного продукту щодо розрахунку аналітичних показників, що характеризують процес утворення нітридів при довільному характері зміни енергетичних параметрів технологічного режиму (додаток Д). Основу розрахунку динамічного

енергетичного фактора утворення нітридів становить блок розрахунку відносного енергетичного фактора для поточного шару, алгоритм якого показано на рисунку 5.4.

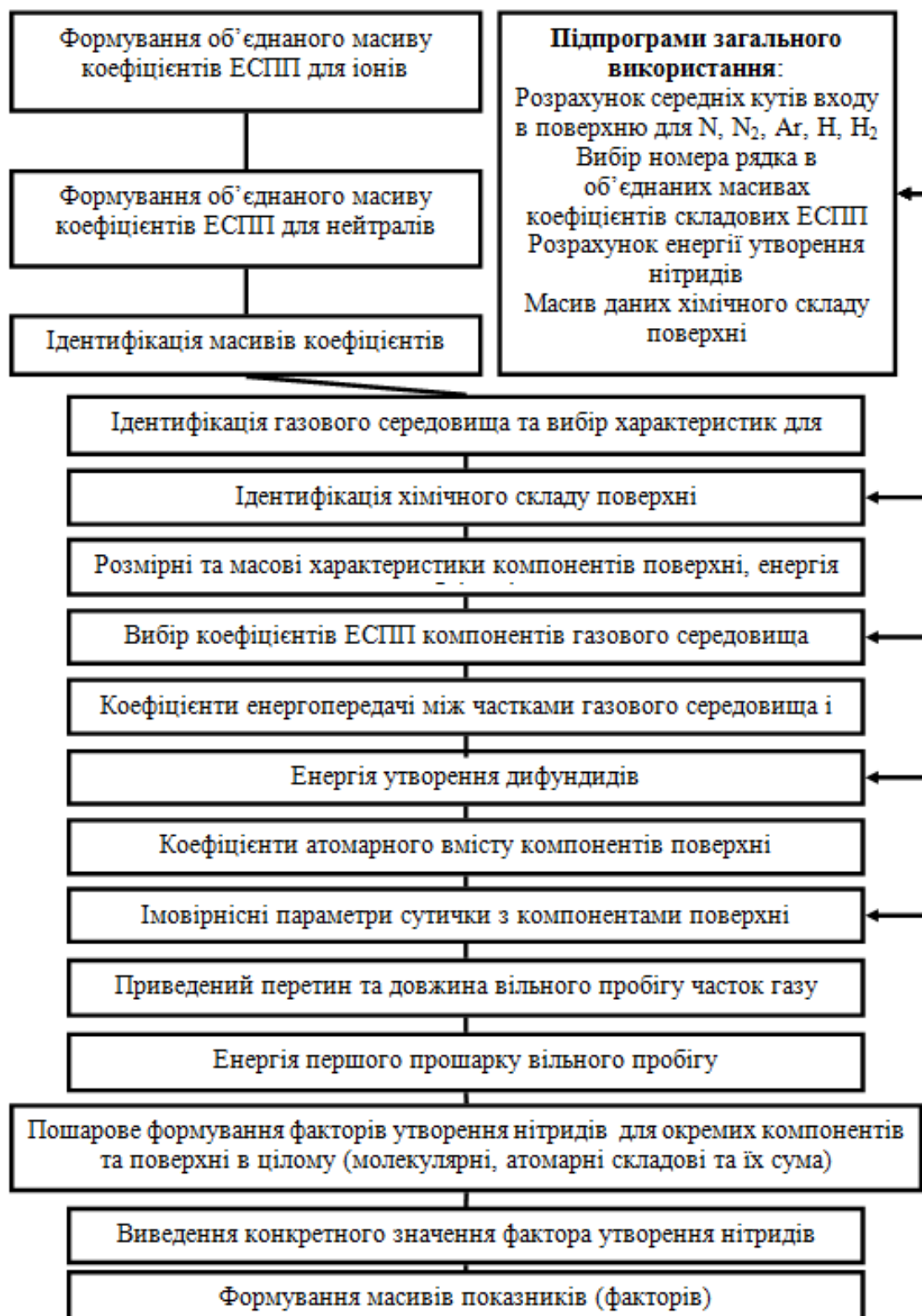


Рис. 5.4 – Алгоритм розрахунку ВЕФ для поточного шару

5.2 Середня швидкість електронів в області катодного падіння при азотуванні в тліючому розряді

Розглянута раніше модель БАТР [1] базується на врахуванні особливо важливих субпроцесів [2], частота яких зазвичай залежить від середньої відносної швидкості руху ініціатора і контрчастинок процесу. Для переважної більшості субпроцесів, реально присутніх в моделі, ініціатором виступають електрони. Їх швидкість набагато більша за швидкість контрчастинок зіткнення, що дозволяє вважати останні умовно нерухомими, тому задача про середню швидкість відносного руху електронів і частинок зводиться до визначення середньої швидкості електронів [113].

Прийнято вважати, що ймовірність швидкості електронів v_x в будь-якому шарі одномірної області катодного падіння з координатою x підлягає розподілу Максвелла $M(V)$, яке в незначній мірі може деформуватися ефектами другого порядку [3]

$$P(V, x) = M(V) dV = C_M \cdot \frac{V^2}{c^3} \cdot e^{-\frac{V^2}{c^2}} dV \quad (5.1)$$

де $P(V, x)$ – вірогідність наявності в шарі на віддалі від катода x електронів зі швидкістю в діапазоні $v + dv$; c – найбільш вірогідна швидкість електронів в шарі ОКП з координатою x ; $C_M = 4/\sqrt{\pi}$ – константа нормування розподілу, $C_M = 4/\sqrt{\pi}$.

Одномірна модель допустима, якщо врахувати особливості конструктивної схеми взаємоохоплюваної системи анод-катод, характерної для процесів ВДГРТ.

Теоретичні положення визначення середньої швидкості електронів. Запропонована методика базується на застосуванні для кожного шару з координатою x поняття базової швидкості v_x . Базовою вважається швидкість, яку має електрон, що пройшов весь шлях від катода до шару x без сутичок. При лінійному законі зміни напруженості поля в ОКП базова швидкість визначається за формулою:

$$V_x = \sqrt{\frac{2\varepsilon_x}{m_e}} = \sqrt{\frac{2\varphi_x q_e}{m_e}} = \sqrt{\frac{4U_K(x - x^2/2\delta)q_e}{\delta m_e}}, \quad (5.2)$$

де ε_x – енергія електрона, який рухається без зіткнення від катода до шару x ; m_e – маса електрона; φ_x – потенціал поля в шарі з координатою x .

Оскільки за визначенням базова швидкість повинна знаходитися в зоні найбільших з можливих, тоді з формули (5.1), маємо:

$$P_{Vx} = M_x \Delta V = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{V_x^2}{c^3} \cdot e^{-\frac{V_x^2}{c^2}} \Delta V. \quad (5.3)$$

Найбільш вірогідна швидкість електронів визначається за виразом:

$$c^3 e^{\frac{V_x^2}{c^2}} = \frac{4V_x^2 \cdot \Delta V}{P_{Vx} \sqrt{\pi}} = \frac{4K_V V_x^3}{P_{Vx} \sqrt{\pi}} = \frac{2,257 \cdot K_V V_x^3}{P_{Vx}}. \quad (5.4)$$

Після перетворень для подальшого дослідження, отримаємо:

$$3 \ln(c) + \frac{V_x^2}{c^2} - \ln \frac{4 \cdot V_x^2}{M_x \sqrt{\pi}} = 0,$$

звідси маємо

$$c = \frac{1}{3} \cdot \left[-6V_x^2 / W \left(\frac{-V_x^2}{24} \cdot \sqrt[3]{\frac{16^2 \cdot \pi}{V_x^4 / M_x^2}} \right) \right]^{0,5},$$

яке після спрощення набуває такого кінцевого вигляду:

$$c = 0,816 \cdot \left[-V_x^2 / W \left(-0,387 \cdot \sqrt[3]{M_x^2 / V_x^4} \right) \right]^{0,5}, \quad (5.5)$$

де W – спеціальна функція Ламберта, що базується на рішенні рівняння типу $x = ye^y$ відносно y .

Середнє значення швидкості електронів відповідає [113] і $\bar{V} = 1,128 \cdot c$, тому в кінцевому результаті маємо формулу:

$$c = 0,921 \cdot \left[-V_x^2 / W \left(-0,387 \cdot \sqrt[3]{M_x^2 / V_x^4} \right) \right]^{0,5}. \quad (5.6)$$

Експериментальна перевірка достовірності запропонованої методики проводилась шляхом порівняння розрахункових значень електричних параметрів розряду з дослідними, отриманими на промисловій установці для азотування в тліючому розряді, подано в додатку Е.

5.3 Дослідження зносостійкості азотованих в циклічно-комутованому розряді конструкційних сталей при граничному терті

Одним з перспективних напрямків розвитку трибології є розробка наукових основ керованого формування модифікованих поверхневих шарів на металах та металевих сплавах, в першу чергу, в залежності від вимог подальшої експлуатації об'єктів модифікації. В цей напрямок комплексно входять завдання теоретичного плану, проектування технологій та виробничого забезпечення реалізації процесів модифікації. При цьому окремою важливою складовою проблеми виступає розробка методик об'єктивних досліджень постмодифікаційних характеристик поверхні, які відображають результат обробки в аспекті зносостійкості [114]. Детально особливості методик експериментальних досліджень зносостійкості та їх всебічний аналіз викладено раніше в п. 2.4 і п. 2.5.

Для об'єктивності дослідження зносостійкості модифікованих поверхонь слід акцентувати увагу на тому, що постмодифікаційні характеристики повинні порівнюватись з аналогічними параметрами геометрично подібних поверхонь, які не модифікувались, причому і для одних, і для других вони повинні визначатись за однотипною методикою. Тільки при дотриманні цих вимог результати модифікації можуть оцінюватись як такі, що мають реальний сенс та практичне значення. Справді, в разі неможливості дотримання вказаних вимог виникне завдання винайти перехідної функції між результатами експериментів, що вже становить певну проблему як теоретичного, так і практичного плану. Порівняння параметрів, отриманих при різномірних умовах їх констатації, може призвести до висновків, котрі на практиці з високою ймовірністю не підтверджуються. Ще одним суттєвим моментом встановлення експериментальних результатів є забезпечення по можливості умов дослідження, які б максимально відповідали аналогічним характеристикам реальної експлуатації. Дійсно, практично завжди спостерігається певна невідповідність висновків, сформованих на основі експериментів, в разі, якщо

умови випробувань суттєво відрізнялись від таких, котрі спостерігаються в реальній експлуатації. Вагомим також є фактор часу, оскільки можна застосувати такі параметри роботи експериментальної установки для дослідження зносостійкості, при яких процес зносу за часом наближався би до значень, зафіксованих в експлуатаційному режимі. Тоді тривалість експериментів, враховуючи необхідність забезпечення потрібної достовірності їх результатів, буде такою, що потреба самих досліджень для практики відпаде [114].

Таким чином, метою цієї частини роботи є експериментальні дослідження зносостійкості зразків після їх поверхневої модифікації азотуванням в тліючому розряді з огляду на подальше використання методики експериментів для проведення більш широких досліджень процесів керованого формування трибосистем. При цьому критерії оцінки результатів повинні враховувати зазначені вище вимоги.

Дослідження проводились на універсальній машині для випробування матеріалів на тертя моделі 2168УМТ з деякою модернізацією вузла тертя, про що детально описано в п. 2.5. Відпрацьовування режимів експериментів проводилось на взірцях, методику підготовки котрих представлено тому ж пункті, причому для перевірки можливості подальшого співставлення процесів зношування вибрано об'єкти з суттєво відмінними характеристиками поверхні: м'які поверхні представлено взірцями із сталі 20 без модифікації, модифіковані – зі сталі 45 після їх азотування в тліючому розряді. Останні до азотування мали поверхневу твердість $HV_{0,1}$ 215, після модифікації – $HV_{0,1}$ 700...730. Оскільки в зону тертя під час всіх експериментів здійснювалась подача рідкого мастила, то коефіцієнт тертя фіксувався в діапазоні 0,05...0,12, що відповідає межевому режиму тертя [114 – 116].

Початкову серію експериментів проведено на взірцях зі сталі 20 без їх модифікації. Твердість контртіла із загартованої сталі становила HRC 60. Швидкість та тиск вибрано в таких межах, щоб температура поверхні зразків в зоні тертя не перевищувала 40°C, а в комплексі з величиною тиску

забезпечувалась би постійна наявність мастила на площі тертя. При швидкості відносного руху зразка стосовно контртіла $V=1,8$ м/с та тиску 10 МПа (це значення виявилось оптимальним, оскільки при ньому спостерігається більш-менш значне зношування та відсутні явища схоплювання) спостерігається рівномірне зношування, величина лінійного зносу в середньому складає 15,4 мкм/км шляху. Коефіцієнт тертя коливався в межах від 0,05 до 0,11, що в умовах експерименту відповідало силі тертя в межах від 29,4 до 64,7 Н [114]. Залежність від шляху усередненого по декількох взірцях лінійного зносу на один кілометр шляху показано на рис. 5.5.

На рис. 5.5 на горизонтальній вісі показано шлях тертя від 0 до 30 км, на вертикальній осі – величина зносу в мкм, основною лінією – величину лінійного зносу усереднену по всіх взірцях, тонкими лініями – усереднений лінійний знос по групах зразків. Рис. 5.5 переконливо доводить, що процес зношування має змінний характер. На перших кілометрах шляху зносу практично немає, це можна пояснити тим, що зразки попередньо навантажувались в процесі припрацювання тиском близько 8 МПа.

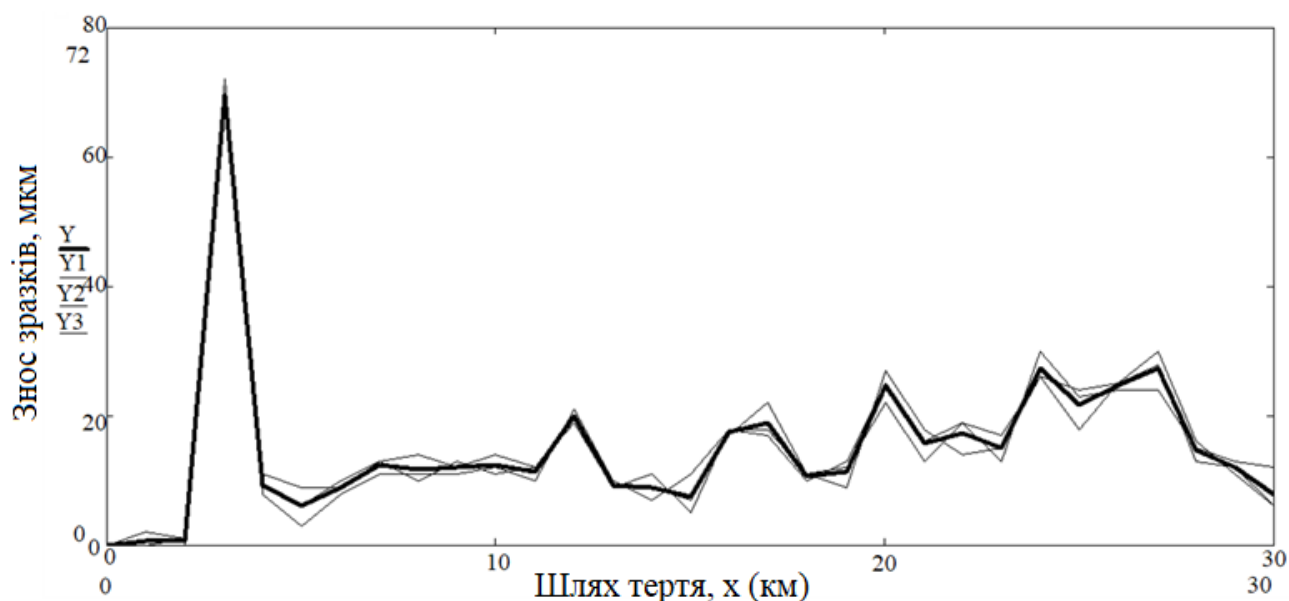


Рис. 5.5 – Залежність від шляху тертя лінійного зносу на один кілометр шляху зразків зі сталі 20 не азотованих при тиску 10 МПа, швидкості 1,8 м/с

При цьому на майбутній поверхні тертя утворювався шар ущільненого металу, своєрідний наклеп, тобто вона поверхнево зміцнювалась. В міру зняття

цього початкового поверхневого шару починався процес інтенсивного зношування. Далі зношування відбувалось за схемою періодичного поверхневого ущільнення та руйнування цього ущільненого шару. Цим і пояснюються періодичні коливання як коефіцієнта тертя, так і сили тертя. Таким чином, зі сказаного можемо зробити висновок щодо нерівномірного характеру зношування немодифікованих зразків, спричиненого постійними структурними перетвореннями на поверхні тертя та руйнуванням структур, характеристики котрих перевищують показники поверхневої твердості основи зразків. Вказаний результат підтверджується на рис. 5.6 графіком абсолютного зносу зразків залежно від пройденого шляху тертя (позначення ліній – аналогічне рис. 5.5). Ефект поверхневого ущільнення – наклепу при збільшенні величини тиску описано раніше (п. 5.3), при цьому поверхнева мікротвердість зростала в декілька разів. Наприклад, навіть для чавунної поверхні після того, як вона оброблялась тиском 1,2 МПа, поверхнева мікротвердість досягала значень $HV_{0,1}$ 1000. Не виключено, що постійна наявність в зоні контакту зразка та контртіла мастила може сприяти утворенню метало-мінеральних структур, процеси появи та руйнування яких теж провокують нерівномірність зношування [114, 117, 118].

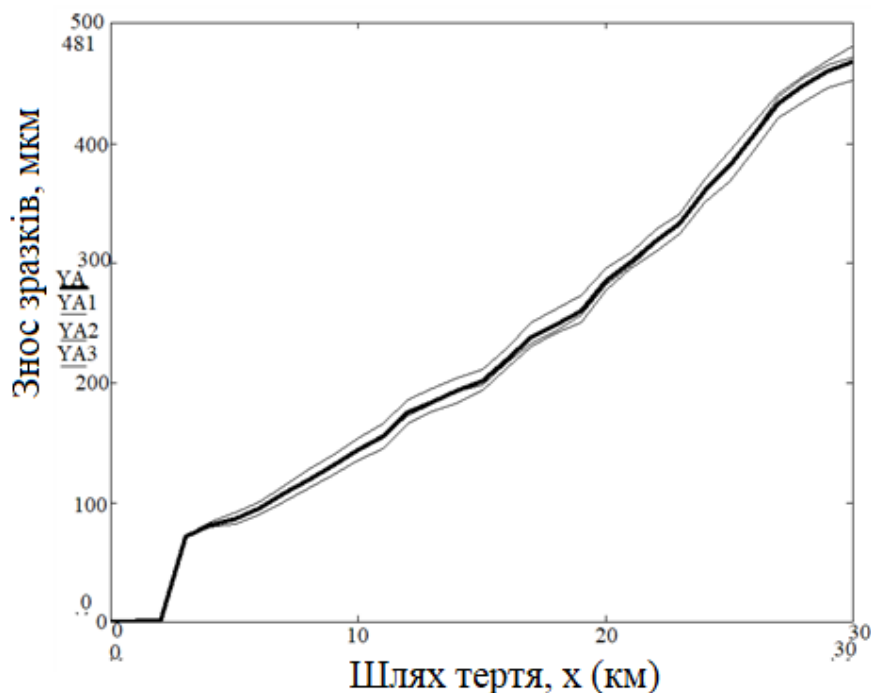


Рис. 5.6 – Графік абсолютного значення лінійного зносу зразків зі сталі 20

Характер прикладення, а особливо – схема зміни величини тиску на поверхні тертя, теж суттєво впливає на процес зношування. Насамперед це проявляється здебільшого до ефекту поверхневого зміцнення.

Вплив характеру зміни тиску на поверхні контакту підтверджується дослідami зі зразками з немодифікованої сталі 45. При початковому тиску 10 МПа та швидкості взаємного руху зразка та контртіла 1,8 м/с (тобто параметри режиму випробувань повністю співпадали з прийнятими для зразків зі сталі 20) при досягненні значень шляху 10 км лінійний знос практично не фіксувався.

Ступінчасте збільшення після кожного кілометра шляху тиску на 2 МПа і аж до 16 МПа теж не змінило характер зношування. При тиску 18 МПа на наступному кілометрі спостерігався лінійний знос 15-17 мкм, але далі зношування знову припинилось. Після цього (18 км пройденого шляху) тиск було збільшено до 20 МПа, проте зношування не спостерігалось. Отже, можемо зробити висновок, що поверхня зразка періодично ущільнюючись зміцнюється, для її руйнування потрібно або значний шлях тертя, або підвищення тиску до певних меж, що викликає силу тертя, достатню для чергової зміни структури поверхні. До цього слід додати, що при початковій поверхневій мікротвердості $HV_{0,1}$ 215 після 20 км шляху та досягнення тиску на поверхні 20 МПа поверхнева мікротвердість зросла до значень $HV_{0,1}$ 414 ($HV_{0,05}$ 616). В подальшому продовжували збільшувати тиск на 2 МПа на кожний новий кілометр шляху, проте лінійний знос знову не спостерігався аж до 26 МПа. При такому тискові спочатку інтенсивно виріс знос до значень 131-167 мкм, а потім почались явища схоплювання. Після того, як процес став реалізовуватись при тиску 26 МПа, поверхнева мікротвердість виросла до значень $HV_{0,1}$ 856 ($HV_{0,05}$ 962), тобто фактично поверхня перетерпіла механічну модифікацію [114, 119]. Щодо характеру зміни тиску на поверхні, то в описаному експерименті тиск збільшувався за певною схемою (наприклад по 2 МПа на кілометр шляху), а її структурні зміни проходили поступово. У наступному експерименті з участю аналогічних нових зразків та контртіла з самого початку тиск в зоні контакту було встановлено на рівні 24 МПа (при такому значенні тиску, досягнутого

шляхом ступінчастого збільшення в попередньому експерименті, лінійний знос практично не фіксувався). Вже на першому кілометрі коефіцієнти тертя стрімко зросли до значень, характерних для захоплювання, поверхнева мікротвердість становила $HV_{0,1} 892$ ($HV_{0,05} 962$).

По суті при такому великому тиску поверхня різко структурно змінилась, не виключено, що ці структурні перетворення спричинили витискання масляної плівки з зони контакту, характер процесу тертя став наближатись до режиму сухого тертя, що й призвело до захоплювання.

Про значення фактора характеру зміни тиску говорить наступний експеримент. На взірцях зі сталі 45 тиск з самого початку змінювався за схемою 2МПа/км шляху, знос практично був відсутній, але вже після 5 км тиск різко збільшили до 20 МПа, що відразу ж спричинило появу явищ захоплювання, причому поверхнева мікротвердість в кінці експерименту становила $HV_{0,1} 838$ ($HV_{0,05} 905$).

Паралельно проведений контроль температури в зоні контакту встановив, що її значення відразу після зупинки не перевищують 42°C , а вже через 5-10 с після розмикання контакту температура поверхні не перевищує 22°C . Отже, вирішальним чинником, який впливав в цих експериментах на характер тертя, був тиск, оскільки при зафіксованих значеннях температури характеристики в'язкості мастила суттєво не змінювались.

Наявність на поверхні ущільненого шару як головного фактора, котрий визначає параметри зношування, підтвердилася наступним. Не знімаючи взірець зі стенда, тобто умови базування залишились незмінними, дрібною шліфувальною шкуркою послідовно номер 150 та номер 500 був знятий шар 15-24 мкм. До того при тиску 18 МПа на шляху 13 км практично не спостерігався лінійний знос (всього ж до підшліфовування при різних значеннях тиску загальний шлях склав 25 км). На першому ж кілометрі після підшліфовування лінійний знос реєструвався в межах від 17 до 22 мкм, на наступних двох кілометрах він знову припинився, далі після аналогічної пішліфовки знову склав близько 11 мкм з поступовим припиненням. Це ще раз доводить

викладену вище версію впливу на характер зношування процесу утворення ущільнених мікроструктур. Цікаво, що поверхнева мікротвердість після підшліфовки практично не відрізняється від початкових значень [114, 120].

Стан поверхні контртіла теж суттєво впливає на характер протікання процесу зношування. В описаних вище експериментах, використовувалось контртіло із загартованої сталі з гладкою поверхнею (параметр шорсткості R_a 0,27). Вказані вище дослідження насамперед вимагали значних витрат часу. Наприклад, для однієї серії взірців зі сталі 20 потрібно було, з врахуванням часу на стабілізацію температури, вимірювання тощо, два повних робочих дні (15 годин). Очевидно, що отримання результатів, які в першу чергу відповідають вимозі достовірності висновків, вимагало б часу, який не можна вважати реальним. Особливо це стосується тих питань, де отримання оперативних даних щодо ефективності того чи іншого методу модифікації, технологічних параметрів його реалізації вкрай необхідне, наприклад, у виробничих умовах. Тому наступною фазою експериментів були досліди, в яких було суттєво підвищено роль механічної складової зношування.

З цією метою використовувались контртіла, шорсткість поверхні яких штучно збільшено за допомогою шліфування шкуркою, кругом, нанесенням титану та твердого сплаву на електроіскровій установці, нанесенням рисок радіального напрямку тощо. За допомогою різних методів шліфування поверхні параметр шорсткості R_a зі значення 0,2...0,3 мкм збільшився до 0,5 мкм при шліфуванні шкуркою вручну, до 0,37 мкм при шліфуванні кругом на шліфувальному верстаті та 1,15 мкм при шліфуванні кругом на шліфувальній машинці. Після нанесення титану та твердого сплаву електроіскровим методом параметр шорсткості перевищував 8 мкм. Твердість поверхні після нанесення покриття електроіскровим методом залежно від полярності електрода, марки імплантованого матеріалу та місця замірів (шліфувана в наступному чи оплавлена поверхні) складала $HV_{0,1}$ 450...800, причому більші значення зазвичай відповідали ділянкам з наступним після імплантації шліфуванням, що підтверджує зазначений вище ефект поверхневого ущільнення після

шліфування.

Графік зміни лінійного зносу зразків з немодифікованої сталі 45 (контртіло – модифіковане електроіскровою імплантацією, тиск 4 МПа, швидкість – 1,8 м/с) з дотриманням системи позначень кривих, прийнятою на попередніх рисунках, показано на рис. 5.7. Як видно з цього рисунку, на початку процесу зношування складова механічного зношування забезпечує інтенсивність порівняно більшу, ніж в попередніх експериментах, причому тиск на поверхні застосовувався суттєво менший. Ріжуча здатність контртіла призводить до руйнування поверхневих структур, не допускаючи при цьому їх ущільнення, проте з часом в міру притуплення мікровиступів на поверхні контртіла процес зношування стає все менш інтенсивним, аж до повного призупинення [114, 121 – 123].

Аналогічні за змістом результати отримано при використанні контртіл, одне з яких проточене на токарному верстаті різцем ВОК60 при радіальній подачі 0,11 мм/об, що забезпечило параметр шорсткості R_a 2...3 мкм. Інтенсивність зношування на першому кілометрі шляху при тиску 2 МПа складала 8-10 мкм на кожних 100 м шляху, проте вже на початку другого кілометра цей показник знизився до рівня 1-2 мкм на 100 м, а далі – до 1-2 мкм/км.

Характер зношування азотованих зразків в порівнянні з неазотованими продемонстровано на рис. 5.8. Азотовані зразки (сталь 45, поверхнева мікротвердість $HV_{0,1}$ 466) зношувались в тих же умовах, які подано вище з використанням проточеного різцем контртіла, проте тиск складав 4 МПа. Як видно на рисунку, процес зношування для неазотованих зразків – традиційний з утворенням ущільнених поверхневих структур та практично припиненням зношування вже після п'яти кілометрів шляху. Азотовані зразки на першому кілометрі практично не зношуються, оскільки в роботу вступає найбільш міцний прошарок ϵ -фази.

Проте його товщина незначна, буквально декілька мікрометрів, тому вже на наступних кілометрах шляху починається процес зношування практично зі

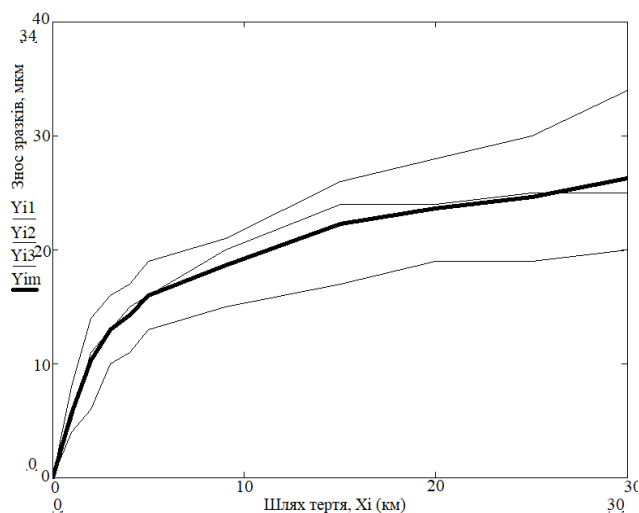


Рис. 5.7 – Графік зміни лінійного зносу для пари «зразок з немодифікованої сталі 45 – контртіло імплантоване електроіскровим методом»

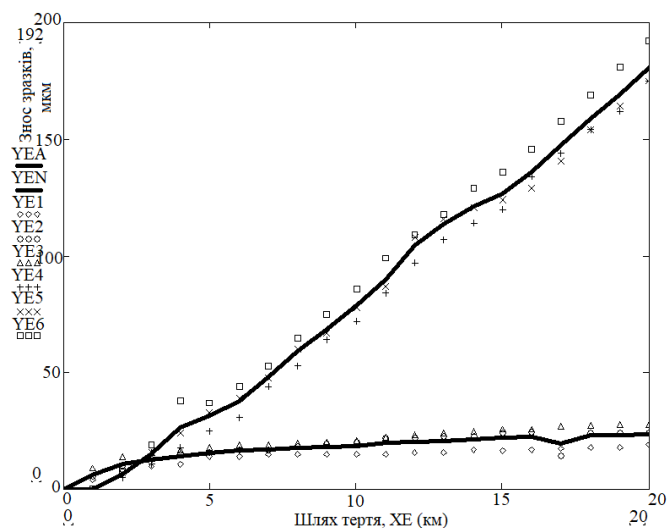


Рис. 5.8 – Зношування азотованих (верхня область) та неазотованих зразків (нижня) за рахунок дії механічної складової тертя (тиск 4 МПа, контртіло – імплантований електроіскровим методом твердий сплав ВК8)

сталою інтенсивністю. Пов'язано це з тим, що реально однорідний прошарок γ' -фази та α -твердого розчину з достатньо значними показниками твердості не піддається ущільненню і знімається за рахунок в основному впливу на достатньо крихку структуру механічної складової процесу зношування. Крім того, в експериментах, результати яких відображено на рис. 5.8, застосовувався відносно невеликий тиск.

Наступні дослідження розвивались по шляху виявлення впливу тиску на процес зношування аж до великих його значень. Результати цієї серії експериментів відображено на рис. 5.9.

З рис. 5.9 можна зробити висновок, що практично при будь-якому тиску настає момент, коли процес зношування практично припиняється, проте ресурсний шлях, при якому спостерігається подібна стабілізація, відмінний для різних значень тиску. Гіпотезу про те, що процес зношування в умовах, коли превалює механічна складова цього процесу, фактично становить сукупність двох конкуруючих процесів: зміцнення поверхні та руйнування цього

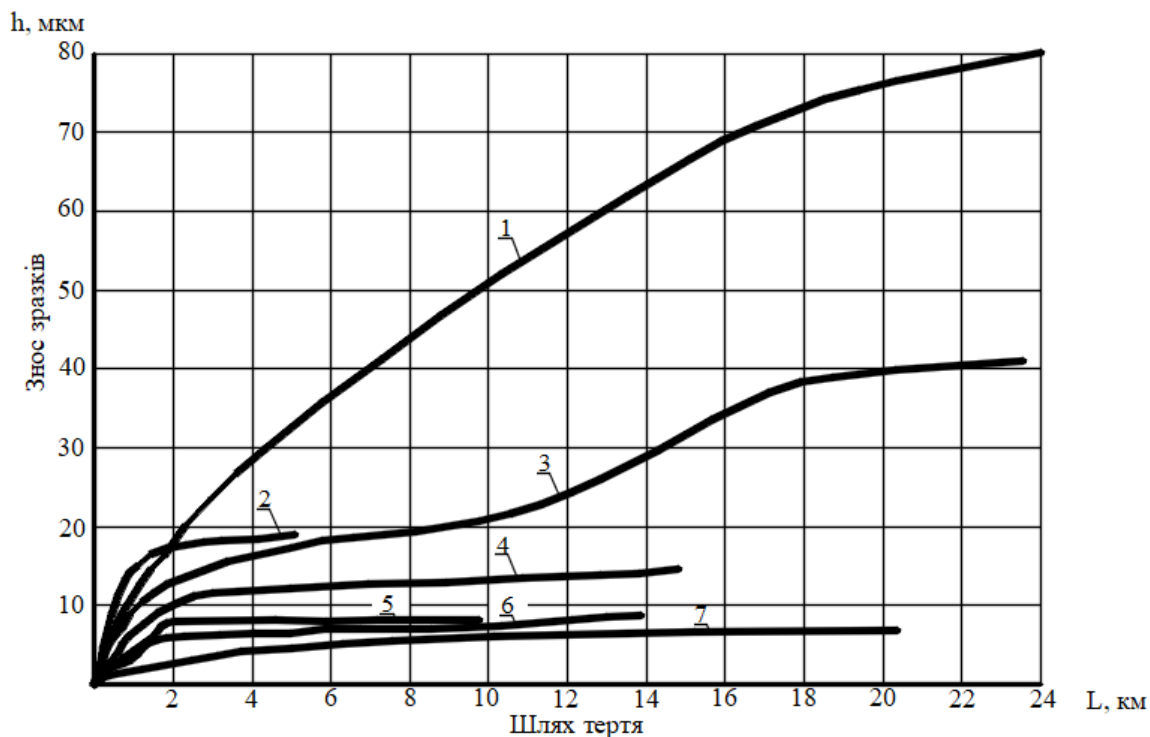


Рис. 5.9 – Знос зразків зі сталі 45 азотованої залежно від шляху при тиску в зоні контакту та швидкості ковзання: 1 – 65 МПа, 0,1 м/с; 2 – 50 МПа, 0,1 м/с; 3 – 120 МПа, 0,1 м/с; 4 – 80 МПа, 0,1 м/с; 5 – 40 МПа, 0,3 м/с; 6 – 65 МПа, 0,2 м/с; 7 – 20 МПа, 0,2 м/с

зміцненого шару – підтверджує рис. 5.9. Чим твердіша поверхня контакту, тим більше порогове значення тиску, при якому відбувається фаза руйнування ущільненого шару. Проте вплив тиску при його великих значеннях має екстремальний характер: в демонстрованій серії експериментів найбільш динамічно процес зношування відбувався при тиску 65 МПа, а якщо його значеннях було менше чи більше цієї величини (при рівності швидкості ковзання), інтенсивність зношування зменшувалась. Збільшення швидкості ковзання призводить до зниження інтенсивності зношування та прискорення початку фази стабілізації, що може пояснюватись зменшенням часу на релаксацію процесів ущільнення поверхневого шару [114, 124].

У результаті досліджень встановлено, що процес зношування при граничному терті фактично включає два конкуруючих процеси: ущільнення поверхневого шару зі збільшенням його мікротвердості та руйнування

поверхневого шару з локальним схопленням поверхонь.

На співвідношення цих фаз в часі суттєво впливають початковий стан поверхні та її фізико-механічні характеристики, тиск на поверхні контакту, швидкість ковзання. Крім того, всі ці параметри для граничного режиму тертя знаходяться в тісному взаємозв'язку.

При БАТР з автономними і взаємозалежними режимами з різними джерелами живлення (постійним струмом, змінним струмом промислової частоти, ЦКР) в широких межах міняються структура і фазовий склад азотованих шарів [115-117], корозійна стійкість [118], міцність і пластичність [119], залишкові напруження стиску [120], втомна витривалість при мало- і багатоциклового навантаженні [121].

Із зазначених вище обставин проведення випробувань на зносостійкість зразків, виготовлених з різних матеріалів та з суттєво відмінними характеристиками поверхневого шару при однакових параметрах режиму випробувань, здебільшого неможливе, оскільки отримані результати проблемно порівнювати.

Перспективним слід вважати ті умови випробувань, які можна застосовувати для поверхонь з різними характеристиками та забезпечують результати, котрі прийнятні з точки зору достовірності, взаємного порівнювання та часу їх проведення.

5.4 Зносостійкість азотованих конструкційних сталей в циклічно-комутованому розряді в умовах сухого тертя

Металева поверхня виробів, як макрооб'єкту, існує лише як математичне поняття. Вона є певним геометричним місцем крапок, яка наближається до деякої уявної множини матеріальних часток, що є субстанцією поверхневого шару. Поверхню слід розглядати як особливий різновид дефектів, оскільки вона руйнує періодичність твердого тіла. Цю тезу певною мірою підтверджує відомий з теорії і практики хімічних процесів факт значного прискорення

реакції при наявності на поверхні твердих каталізаторів.

Власне граничний шар, структура якого відрізняється від основи твердого тіла, може більш активно взаємодіяти із зовнішніми впливами, які стимулюють модифікацію поверхні. В той же час саме наявність реальної поверхні з певною для кожного конкретного її типу впорядкованістю, є тим чинником, що визначає більшість фізичних або хімічних процесів взаємодії твердого тіла з навколишнім середовищем. Оскільки поверхня як математичне поняття не має структури, то її слід розглядати як сукупність дефектів кристалічної ґратки, апроксимованої вибраним типом математичної моделі, проте в ній продовжує зберігатись двомірна впорядкованість [80], а під її структурою слід розуміти структуру твердого тіла в межах поверхні. Цю частину математичної поверхні (приповерхневий шар) допустимо розглядати як тримірну структуру, яка відрізняється від самого твердого тіла, оскільки може включати атомні вузли відмінні від атомних вузлів основного об'єму. При цьому відстань між шарами у напрямку по нормалі до поверхні не лише дещо відрізняється від параметрів решітки основного об'єму, але й має змінний характер, зазвичай, в сторону збільшення в міру наближення до математичної поверхні. Проте приповерхневий шар є кристалічною структурою, для якої зберігається двомірна періодичність в площинах, паралельних математичній поверхні.

Враховуючи сказане вище, можна зробити висновок, що порушення вказаної природної періодичності приповерхневих шарів неминуче впливає на всі характеристики поверхні як суцільності, в тому числі й на її здатність чинити опір зношуванню.

Цю обставину більшою чи меншою мірою описано в класичних роботах з трибології, проте належного висвітлення результатів досліджень, розробки методики експериментів визначення характеристик зносостійкості металевих поверхонь не має до цього часу.

Окрім впливу структури поверхневих шарів безпосередньо на процес зношування поверхні, необхідно відмітити суттєве значення цього чинника для інших супутніх процесів та видів руйнування поверхні. Відомо, що при

адсорбції газів утворюється мономолекулярний адсорбційний моношар. Заповнення поверхні при малих значення тиску пропорційне тиску адсорбату в газовому середовищі. Якщо молекули газу не мають можливості переміщуватись по поверхні, то маємо локалізовану адсорбцію з утворенням адсорбційного комплексу. При цьому адсорбат і поверхневий шар утворюють свою власну двомірну структуру. Швидкість адсорбції залежить від показника суцільності моношару. При наближенні до стану суцільного заповнення поверхні адсорбційним шаром вона поступово зменшується до нуля, а швидкість десорбційних явищ зростає. Хемосорбовані та фізично сорбовані частки газу на поверхні відрізняються типом електронного зв'язку з основою. Якщо електронний стан адсорбованої молекули утворює хімічні зв'язки з поверхнею, то маємо хемосорбцію. Коли молекула утримується на поверхні силами Ван-дер-Ваальса, то такий вид адсорбції відноситься до фізичної адсорбції, верхня межа якої становить всього 0,6 еВ. Енергія хемосорбції, зазвичай, знаходиться в межах 1...8 еВ [82]. Якщо енергія молекули зовнішнього середовища становить декілька електрон-вольт, то вона вже зможе перебороти потенціальний бар'єр поверхневого шару, проникнути в її глибину, при цьому обмін електронами між атомами створює умови для хімічної сорбції чи хімічної реакції [81]. Очевидно, що механічний вплив на поверхню значною мірою змінює параметри адсорбційних явищ.

Суттєвий вплив на зношування поверхні має значення роботи виходу. Поняття «роботи виходу» умовне з погляду на умовність терміну «поза поверхнею», оскільки саме від відстані до поверхні як математичної категорії залежить потенціальна енергія. Крім того, реальна поверхня структурно неоднорідна, з різною кристалічною орієнтацією окремих фрагментів. Щільно запаковані кристалічні ґратки характеризуються високими значеннями роботи виходу, а нещільно запаковані – малими. При наявності адсорбційного шару виникає додатковий поверхневий шар, який суттєво впливає на величину роботи виходу.

Із зазначеного вище слід зробити висновок стосовно важливості

врахування параметрів процесу зношування, які характеризують цей процес на об'єктивність результатів досліджень.

Вище було проаналізовано результати досліджень зносостійкості, які одержано в умовах граничного тертя. Основні висновки з аналізу зводились до того, що будь-який процес зношування є сукупністю послідовного ущільнення поверхневих шарів та їх видалення. При цьому вирішальне значення мають характеристики випробувань, що мають враховувати матеріал зразків, та вид попередньої обробки поверхні. Результати експериментів свідчать про те, що в умовах граничного тертя надзвичайно важко, а в деяких випадках неможливо, використовувати такі значення питомого тиску на поверхню тертя, при яких реальним було б співставлення результатів, одержаних для різних взірців, виготовлених з різних марок матеріалів та оброблених за допомогою різних технологічних процесів [76, 123].

Оскільки в ході експериментів було постійне змащування зони тертя, то це призводило до надзвичайно малих показників лінійного зношування. Проте, залежно від фізико-механічних характеристик зміцненої поверхні, було критичне значення тиску, при якому шар мастила витискувався із зони тертя, що приводило до миттєвого схоплювання поверхонь. Про наявність ущільнення і структурних перетворень поверхні свідчить той факт, що при поступовому збільшенні тиску вдавалось досягати відносно великих значень критичного тиску [77, 123]. Спроба зразу ж проводити на нових зразках експериментів при тиску, при цих критичних значеннях, неминуче приводила до схоплювання поверхонь. Причиною схоплювання поверхонь могло бути лише поетапне її ущільнення та зміцнення, відповідно із зміною структури поверхневого шару.

Все зазначене разом з неможливістю об'єктивного порівняння результатів випробувань, отриманих при різних тисках, призвело до переходу проведення випробувань за схемою експериментів при сухому терті. Деякі результати попередніх випробувань показано на рис. 5.10.

Рисунок 5.10 дозволяє зробити висновок, що в режимі сухого тертя суттєво зростає інтенсивність процесу зношування. Це сприяє значному

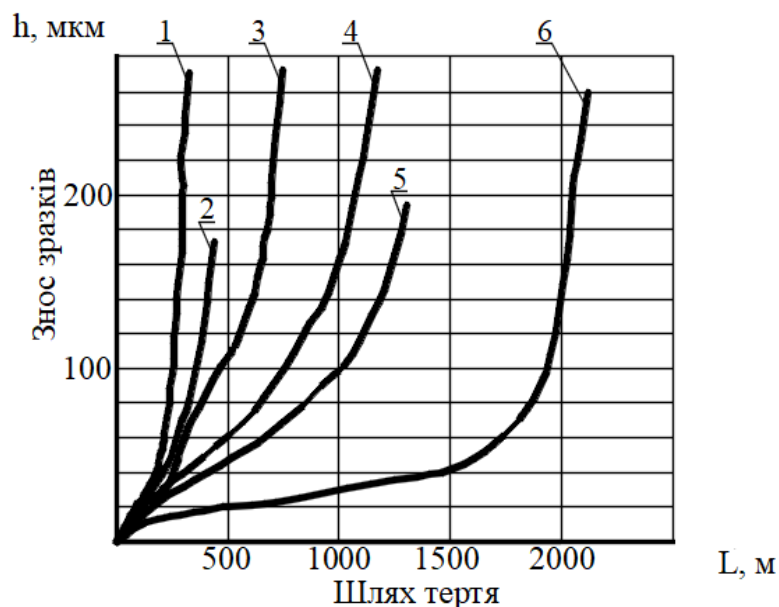


Рис. 5.10 – Залежність лінійного зносу сталей від шляху тертя та тиску:

1 – сталь 20, $p=16$ МПа; 2 – сталь 45, $p=16$ МПа; 3 – сталь 20, $p=10$ МПа; 4 – сталь 40X, $p=16$ МПа; 5 – сталь 45, $p=10$ МПа; 6 – сталь 30X2МЮА, азотована $p=16$ МПа

підвищенню продуктивності експериментальних випробувань. Одне дослідження в режимі граничного тертя тривало тижнями, а в режимі сухого тертя випробування вдавалось виконати за декілька змін. Крім того, підтвердився висновок відносно вирішального впливу на інтенсивність зношування тиску на поверхні тертя, оскільки одні і ті ж показники лінійного зносу h досягались зі збільшенням тиску при суттєво меншому шляхові тертя L . Марка матеріалу (початкові значення фізико-механічних показників) і наявність зміцнення поверхні також суттєво впливали на інтенсивність зношування. Наприклад, для азотованої в тліючому розряді сталі 38X2МЮА інтенсивність зношування практично на порядок менша порівняно із сталлю 20.

На відміну від методики експериментальних досліджень за схемою застосування граничного тертя, в режимі сухого тертя результатів можливо досягти при однакових значеннях тиску практично для всіх азотованих сталей.

Останнє виключає при аналізі результатів випробувань питання їх порівняльності. Про важливість цього положення свідчить співставлення кривих зношування для одних і тих же сталей при різних значеннях тиску (рис. 5.10).

Внаслідок того, що однакового значення лінійного зносу для одного матеріалу, але при різних тисках, можна досягнути при суттєво різних значеннях шляху тертя, то встановлення взаємозв'язку між перерахованими факторами не спричиняє жодних проблем [77].

Графіки на рис. 5.10 також підтверджують вплив на інтенсивність зношування фізико-механічних характеристик поверхні та її модифікації, при цьому міцніші сталі, а також сталі, котрі пройшли певну зміцнюючу обробку, зношуються при однакових умовах (тиск та швидкість відносного руху) з меншою інтенсивністю, що на графіках характеризується кутом їх нахилу до вісі абсцис.

Ефект структурних перетворень поверхні підтверджується рисунком 5.11, на якому представлено результати фіксації лінійного зносу на початку зношування зразків. Графік зношування в цьому випадку явл— ступінчаста крива, де є чергування періодів утворення зміцнених структур на поверхні і зношування практично відсутнє, та періодів руйнування цих поверхневих структур.

Для модифікованих поверхонь подібне явище особливо характерне в початковий період, коли зношується зона нітридів та внутрішнього азотування.

Встановлено ще одне важливе для аналізу впливу результатів зміцнення азотуванням на параметри зносостійкості поверхні явище — ефект релаксаційних процесів в поверхневих шарах, котрі вже набули деяких структурних перетворень під дією тиску в зоні тертя.

Крапками на кривих 2, 4, 6 зафіксовано точки, коли випробування на зносостійкість призупинялись і відновлювались наступної доби. Для всіх сталей відмічається деяке сповільнення процесу зношування після перерви з поступовим поверненням до інтенсивності, характерної для певної марки сталі (рис. 5.12). Причиною зазначеного явища можуть бути лише релаксація напружень, вирівнювання характеристик структури в поверхневих шарах. Наслідком цього може стати зміцнення поверхні, що і пояснює зниження інтенсивності процесу зношування. З часом, в міру руйнування зміцненого

пошарку показники стану поверхні дорівнюють тим, що були до перерви, і інтенсивність зношування відновлюється.

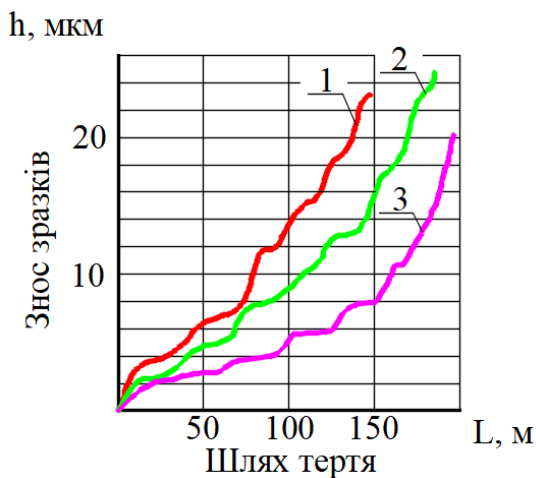


Рисунок 5.11 – Характер зношування поверхні в початковий період

1 – сталь 20, 2 – сталь 40Х, 3 – сталь 30Х2МЮА

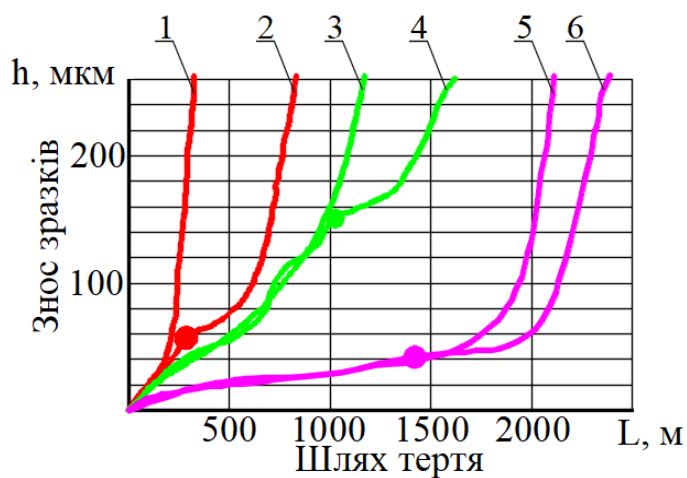


Рисунок 5.12 – Ефект релаксаційних структурних перетворень поверхні

1, 2 – сталь 20; 3, 4 – сталь 40Х, 5, 6 – сталь 38Х2МЮА, крапками відмічено моменти зупинки випробувань

Подальші експерименти показали, що випробування на зносостійкість азотованих поверхонь конструкційних сталей в режимі сухого тертя (додаток Ж) можуть також служити для оцінки відносної корозійно-механічної їх стійкості в кислих середовищах [124], а також для оцінки ступеня зміцнення азотованих в ЦКР внутрішніх поверхонь довгомірних отворів [125].

Висновки до розділу 5

1. Практично у всіх субпроцесах в області катодного падіння тліючого розряду ініціатором виступають електрони. Вірогідність будь-якого з субпроцесів, що визначається перерізом, суттєвим чином залежить від швидкості електронів в момент зіткнення з частинками газу.

2. Запропоновано аналітичну залежність знаходження середньої швидкості електронів на основі моделі базової швидкості, як швидкості, яку має електрон, що пролетів без зіткнень від катода до певної точки області катодного падіння.

3. Виконано експериментальну перевірку методики визначення середньої швидкості електронів на основі співставлення розрахункових і дослідних значень електричних параметрів розряду.

4. Оброблено результати розрахунків і на їх основі запропоновано методику практичного розрахунку енергетичних характеристик руху електронів.

5. Процес зношування при граничному терті фактично включає два конкуруючих процеси: ущільнення поверхневого шару зі збільшенням його мікротвердості та руйнування поверхневого шару з локальним схопленням поверхонь.

6. Дослідження зносостійкості при сухому режимі тертя забезпечує суттєво більшу продуктивність експериментів. На відміну від експериментів при граничному терті сухе тертя може застосовуватись для різних сталей при однаковому значенні тиску, що виключає проблему порівняння результатів та сприяє об'єктивності висновків стосовно ефективності різних процесів модифікації. За результатами попередніх експериментів таким компромісним значенням тиску може бути 16 МПа. Встановлено ефект релаксаційних перетворень поверхневих структур, на основі чого рекомендується проводити дослідження зносостійкості протягом однієї безперервної зміни.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-технічну задачу, яка має важливе народногосподарське значення, що полягає у подальшому розвитку теоретичних і практичних положень енергетичної теорії БАТР І. М. Пастуха та визначенню режимів азотування в циклічно-комутованому розряді для деталей, в тому числі з довгомірними отворами і винятками, з метою підвищення зносостійкості їх робочих поверхонь.

Основні результати і висновки:

1. Встановлено, що залежно від енергетичних умов при модифікації поверхні шляхом АТР мають місце основні конкуруючі, взаємодоповнюючі і

взаємозаперечуючі субпроцеси: утворення нітридів, дифузійне насичення поверхневого шару азотом і розпорошення поверхні. Енергетичні умови перебігу головних субпроцесів суттєво відрізняються. Так, утворення нітридів відбувається при низьких енергіях, натомість процес розпорошення поверхні активізується при високих значеннях напруги, а процес дифузії азоту в глибину шару проходить при високих значеннях струму. Таким чином, енергетична теорія БАТР І. М. Пастуха адекватно пояснює результати підвищення зносостійкості зміною співвідношення структурних складових фазового складу поверхневого модифікованого шару.

2. Виявлено вплив змінного струму на хід та результати азотування, оскільки циклічна зміна полярності електродів камери сприяє процесу очищення поверхні від адсорбційного шару, позитивно впливає на характер насичення поверхні азотом (градієнт зміни мікротвердості по глибині азотованого шару знижується в 1,7-3,5 рази), сприяє суттєвій зміні фазового складу поверхневого модифікованого шару (патент України № 113569) що, в свою чергу, в 1,35-1,75 разів підвищує зносостійкість деталей.

Враховуючи багатогалузевий характер можливого використання означеної технології модифікації поверхонь деталей та інноваційного обладнання, теоретичні дослідження процесу особливо актуальні для багатьох галузей промисловості України. Наявність напрацювань у вибраному напрямку направлено на подальше зростання виробництва в Україні високотехнологічного устаткування та продукції.

3. Визначено критерій концентрації поля і вирішено аналітичну задачу взаємозв'язків геометрії поверхні та параметрів електричного поля. Досліджено вплив розмірів зовнішніх і внутрішніх локальних винятків на концентрацію електричного поля. Результати досліджень і розроблений аналітичний апарат дозволяють досягати більш рівномірних трибологічних характеристик усіх поверхонь деталей.

4. Встановлено основні закономірності та умови азотування в тліючому розряді довгомірних отворів. Запропоновано рекомендації стосовно параметрів

електричного розряду в газі для забезпечення ефективності процесу модифікації внутрішніх поверхонь довгомірних отворів. Встановлено умови та обмеження існування розряду, при яких можливий ефект накачування іонів в отвір.

Проведений аналіз зміцнення поверхонь азотуванням в циклічно-комутованому розряді внутрішніх довгомірних отворів показав їх ефективність в збільшенні зносостійкості отворів від 1,35 до 1,85 рази в результаті підвищення фізико-механічних характеристик азотованого шару по усій довжині отвору, порівняно з азотуванням в постійному струмі.

5. Запропоновано аналітичні залежності знаходження середньої швидкості електронів на основі моделі базової швидкості як такої, що має електрон, який пролетів без зіткнень від катода до певної точки області катодного падіння. Виконано експериментальну перевірку методики визначення середньої швидкості електронів, що дозволяє впливати на інтенсивність протікання субпроцесів азотування, фазовий склад і зносостійкість зміцненого шару.

6. Процес зношування в режимі граничного тертя фактично включає два конкуруючих процеси: ущільнення поверхневого шару та підвищення його мікротвердості і руйнування поверхневого шару з локальним захопленням поверхонь тертя. Дослідження зносостійкості в режимі сухого тертя забезпечує суттєво більшу продуктивність проведення експериментів. На відміну від експериментів з граничним тертям, сухе тертя може застосовуватись для різних сталей при однаковому значенні тиску, що виключає проблему порівнянності результатів та сприяє об'єктивності висновків стосовно ефективності різних процесів модифікації. За результатами проведених експериментів таким компромісним значенням тиску може бути 16 МПа. Встановлений ефект релаксаційних перетворень поверхонь тертя, які були азотовані в циклічно-комутованому розряді, вимагає рекомендувати для забезпечення адекватності та співставлення результатів проводити дослідження зносостійкості таких поверхонь протягом однієї безперервної зміни.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Пастух И. М. Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде. Харьков: Нац. научный центр «Харьковский физико-технический институт», 2006. 364 с.
2. Пастух І. М. Фізико-технічна обробка поверхні металів безводневим азотуванням в тліючому розряді: дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.07 / Хмельницький, 2008. 520 с.
3. Пастух І. М., Лук'янюк М. В., Курская В. О. Класифікаційні критерії процесів азотування в тліючому розряді з нестаціонарним живленням. Вісник ХНУ. Технічні науки. 2011. № 5. С. 10–13
4. Шевеля В. В., Олександренко В. П. Трибохимия и реология износостойкости: Монография / В. В. Шевеля, В. П. Олександренко. – Хмельницький: ХНУ, 2006. 278 с.
5. Каплун В. Г., Каплун В. Г. Ионное азотирование в безводородных средах: монография. Хмельницький: ХНУ, 2015. 315 с.
6. Безводневе азотування у тліючому розряді як метод підвищення зносостійкості конструкційних сталей / М. Є. Скиба, Н. М. Стечишина, В. В. Люховець та ін. Вісник ХНУ. Технічні науки, 2019. № 5. С. 7–12.
7. Спосіб азотування в тліючому розряді з періодичною очисткою поверхні / І. М. Пастух, Г. М. Соколова, В. В. Люховець, О. С. Здибель: пат. на корисну модель №112984 Україна: МПК С 23 С 8/36, С 23 С 8/24. № у 2016 05934; заявл. 01.06.2016 ; опубл. 10.01.2017, Бюл. №1.
8. Спосіб азотування азотоактивних металів в тліючому розряді з періодичною очисткою поверхні / І. М. Пастух, Г. М. Соколова, В. В. Люховець, О. С. Здибель, Н. С. Машовець: пат. на корисну модель №113576 Україна: МПК С 23 С 8/36, С 23 С 8/48. № у 2016 06403; заявл. 13.06.2016; опубл. 10.02.2017, Бюл. №3.
9. Спосіб підвищення корозійної стійкості металевих поверхонь / І. М. Пастух, Г. М. Соколова, В. В. Люховець, О. С. Здибель: пат. на корисну модель

№111949 Україна: МПК С 23 С 8/00, С 23 С 8/48, С 23 С 8/68. № u 2016 06058; заявл. 03.06.2016 ; опубл. 25.11.2016, Бюл. № 22.

10. Пастух И. М., Соколова Г. Н., В. В. Люховец В. В., Здыбель А. С. Теоретические основы процесса безводородного азотирования в тлеющем разряде. Перспективные тренды развития науки: техника и технологии: коллективная монография / под ред. С. В. Куприенко. Одесса, 2016. С. 123–135.

11. Пастух І. М., Лук'янюк М. В., Курская В. О. Вихідні положення визначення електричних характеристик при азотуванні в тліючому розряді з нестационарним живленням. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. 2012. № 1. С. 7–10.

12. Каплун П. В., Люховець В. В., Глушак Г. С. Дослідження трибологічних характеристик та довговічності конструктивних елементів з дифузійними і комбінованими покриттями. Вісник Технологічного університету Поділля. ТУП: Хмельницький, 2000. Ч. 1. №5. С. 85–87.

13. Пастух І. М., Соколова Г. М., Люховець В. В. Обґрунтування азотування в тліючому розряді з живленням змінним струмом. Вісник ХНУ: Технічні науки. 2017. № 1. С. 7–9.

14. Стечишина Н. М., Люховець В. В., Стечишин М. С. Вплив технологічних параметрів карбоазотування на зносостійкість сталі 45 / Проблеми тертя та зношування. К.: НАУ, 2019, №3(84). С.76–82.

15. Спосіб азотування в тліючому розряді з живленням змінним струмом / І. М. Пастух, Г. М. Соколова, В. В. Люховець, О. С. Здибель: пат. на корисну модель №112983 Україна: МПК С 23 С 8/36, С 23 С 8/48. № u 2016 05929; заявл. 01.06.2016; опубл. 10.01.2017, Бюл. №1.

16. Люховець В. В. Азотування в тліючому розряді деталей з малими отворами із застосуванням змінного живлення. Ольвійський форум - 2014: стратегії країн Причорноморського регіону в геополітичному просторі: тези. Миколаїв: Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2014. С.52–53.

17. Keller K. Schichtaufbau glimmitrierten Eisen Werkstoffe / Harterei - Technische Mitteilungen. 1971. Bd. 26, № 2. pp. 120–128.

18. Keller K. Jonnitiren steuerbare Oberflächenverfestigung durch Jonnitiren / Technische Rundschau. 1971. Bd. 63, № 37. S. 33–39.

19. Keller K. Jonnitiren von Schenken aus Nitrierstählen und anhlischen Werkstoffen für Extruder und Spritzgiessmaschinen / Plastverarbeiter. 1971, № 6. pp. 3–11.

20. Edenhofer B. Physikalische und metallkundliche Vorgänge beim Nitriten in Plasma einer Glimmentladung / Harterei - Technische Mitteilungen. 1974. Bd. 29, № 2. pp. 105–112.

21. Лахтин Ю. М., Коган Я. Д. Азотирование стали. М.: Машиностроение. 1976. 256 с.

22. Костржицький А.І., Калінков О.Ю., Тіщенко В.М., Берегова О.М. Ф 50 Фізична та колоїдна хімія. Навч. пос. К.: Центр учбової літератури, 2008. 496 с.

23. Крейндель Ю. Е., Пономарева Л. П., Пономарев В. П., Слосман А. И. Об азотировании анода в тлеющем разряде / Электронная обработка материалов. 1984, № 4. С. 32–34.

24. Пастух И. М., Андреев А. А., Шулаев В. М. Вакуумно - диффузионная обработка поверхности металлов с применением тлеющего и дугового разрядов в газах / Новые процессы термической обработки. Библиотека ОТТОМ. Харьков, ННЦ ХФТИ. 2004. С. 5–57.

25. Пастух И. М. Модификация металлов с применением азотирования в тлеющем разряде: состояние и перспективы / Проблемы трибологии. Хмельницький, 2004. № 3. С. 42–55.

26. Андреев А. А., Саблев Л. П., Шулаев В. М. О роли атомарного азота при химико-термической обработке сталей в газовом вакуумно-дуговом разряде / Сб. докл. Междунар. конф. «Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов в машиностроении (ОТТОМ - 6)». Ч. 1. Харьков: Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт». 2005. С. 246–250.

27. Пастух І. М. Енергетичний аналіз моделей азотування в тліючому розряді. Вісник ХНУ. Технічні науки. 2006. № 5. С. 7–14.
28. Пастух І. М., Лук'янюк М. В. Азотування в циклічно-комутованому розряді: початкові положення. Вісник Хмельницького національного університету, № 6, 2008, Технічні науки. С. 38–41.
29. 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. pp. 77–81.
30. Grun R. Industrial advances for plasma nitriding. 2nd International conference on ion nitriding. Cincinnati, Ohio. 1989. pp. 157–163.
31. Босяков М. Н., Жук Д. В., Матусевич П. А. Оборудование для упрочняющей обработки деталей машин и инструмента методом ионного азотирования в плазме пульсирующего тока / Сб. докл. Междунар. конф. «Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов в машиностроении (ОТТОМ - 4)». Ч. 2. Харьков: Национальный научный центр «Харьковский физико - технический институт». 2003. С. 271–276.
32. Теория и технология азотирования / [Ю. М. Лахтин, Я. Д. Коган (СССР), Г.-И. Шпис, З. Бемер (ФРГ)]. [Совмест. изд.]. Москва : Металлургия ; Лейпциг : Deutscher Verl. fur Grundstoffindustrie, 1991. 318 с. : ил.; 21
33. Kolbel J. Die Nitridschichtbildung beider Glimmnitrierung. Forschungsberichte des Landes Nordrhein. Westfalen. 1995, № 1555. pp. 1–19.
34. Keller K. Schichtaufbau glimmnitrieren Eisen Werkstoffe. Harterei. Technische Mitteilungen. 1998. Bd. 26, № 2. pp. 120–128.
35. Keller K. Jonnitrieren steuerbare Oberflächenverfestigung durch Jonnitrieren. Technische Rundschau. 1997. Bd. 63, № 37. pp. 33–39.
36. Keller K. Jonnitrieren von Schenken aus Nitrierstählen und anähnlichen Werkstoffen für Extruder und Spritzgießmaschinen. Plastverarbeiter. 1990, № 6. pp. 3–11.
37. Edenhofer B. Physikalische und metallkundliche Vorgänge beim Nitrieren in Plasma einer Glimmentladung. Harterei. Technische Mitteilungen. 1994. Bd. 29, №

2. pp. 105–112.

38. Панайоти Т. А. Создание максимальной насыщающей способности газовой среды при ионном азотировании сплавов. Физика и химия обработки материалов. 2003. № 4. С. 70–78.

39. Ионно-плазменные диффузионные алюминидные покрытия для лопаток газовых турбин (строение и свойства) / С. А. Мубояджян, С. А. Будиновский, В. В. Терехова. Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallor. 2003. № 1. С. 14 –21.

40. Влияние ионного азотирования на структуру и свойства хромированной углеродистой стали / Т. А. Панайоти, Г. В. Соловьев, А. Н. Володин, В. Р. Васильев. Metallovedenie. Termicheskaya i khimiko-termicheskaya obrabotka splovov: sb. nauch. tr. M.: Iz - tvo. MGTU im. N. Э. Bauman. 2003. С. 116–126.

41. Исследование состава катодной области тлеющего разряда при ионном азотировании / Б. Н. Арзамасов, Н. М. Рыжов, А. Е. Смирнов. Vestnik MGTU. Ser. Mashinostroenie. 1997. № 4. С. 99–105.

42. Edenhofer B. Moglichkeiten und Grenzen der Plasmaaufkohlung. Harterei - Technische Mitteilungen. 1990. Bd. 45, № 3. pp. 154–162.

43. Арзамасов Б. Н. Химико-термическая обработка сплавов в активизированных газовых средах. Vestnik mashinostroenia. 1996. № 9. С. 49–53.

44. Skyba Mykola. Physico-chemical properties and wear resistance of nitrided steel 38KhMUA. / Skyba M., Stechyshyn M., Lukianiuk M., Kurskoi V., Mashovets N., Lyukhovets' V. // Scientific Journal of TNTU. – Tern. : TNTU, 2021. – Vol 103. – No 3. – P. 63–69.

45. Keller K. Kugelgraphitguss hoher Festigkeit fur Nitirteile. Maschinenmarkt. 1970. Bd. 76. № 106. P. 1–6.

46. Mikhailov I. F., Baturin A. A., Mikhailov A. I., Fomina L. P. Perspectives of Development of X-ray Analysis for Material Compositions. Functional Materials. 2016. № 1 (23). pp. 5–14.

47. Mikhailov I. F., Baturin A. A., Mikhailov A. I., Fomina L. P. Determination of Light Elements Content by Combining of X-ray Fluorescence and Diffraction Spectrum. Problems of Atomic Science and Technology. 2013. № 2. pp. 172–176.

48. 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.

49. Давидов А. М., Лук'янюк М. В., Пастух І. М. Апаратна реалізація режиму азотування в циклічно комутованому тліючому розряді. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. 2010. № 1. С. 50–53.

50. Dressler S. Plasma parameter control for industrial situations. 2nd International conference on ion nitriding. Cincinnati, Ohio. 1989. pp. 183–193.

51. Пристрій для азотування в тліючому розряді з живленням змінним струмом / І. М. Пастух, Г. М. Соколова, В. В. Люховець, О. С. Здибель: пат. на корисну модель №118327 Україна: МПК С 23 С 8/36, С 23 С 8/48. № у 2016 06460; заявл. 13.06.2016; опубл. 10.08.2017, Бюл. № 15.

52. Спосіб азотування в тліючому розряді з періодичною очисткою поверхні / І. М. Пастух, Г. М. Соколова, В. В. Люховець, О. С. Здибель: пат. на корисну модель №112984 Україна: МПК С 23 С 8/36, С 23 С 8/24. № у 2016 05934; заявл. 01.06.2016; опубл. 10.01.2017, Бюл. №1.

53. Спосіб азотування в тліючому розряді з оберненою полярністю / І. М. Пастух, Г. М. Соколова, В. В. Люховець, О. С. Здибель: пат. на корисну модель №113569 Україна: МПК С 23 С 8/36, С 23 С 8/48. № у 2016 06036; заявл. 03.06.2016; опубл. 10.02.2017, Бюл. № 3.

54. Русаков А. А. Рентгенография металлов: учебник для вузов. М.: Атомиздат, 1977. 480 с.

55. Шпанченко Р. В., Розова М. Г. Рентгенофазовый анализ: методическая разработка для спецпрактикума к курсу лекций “Практические аспекты рентгеновской дифрактометрии”. М.: МГУ, 1998. 25 с.

56. Занин И. Е., Чернышов В. В. Рентгенография металлов : методические указания к лабораторному практикуму. Воронеж: ВГУ, 2008. 20 с.

57. Здибель О. С., Лук'янюк М. В., Пастух І. М. Особливості методики випробування на зносостійкість металів, азотованих в тліючому розряді. Вісник ХНУ. Технічні науки. 2009. № 3. С. 7–11.

58. Технологія азотування в тліючому розряді сталей різального комплекту м'ясоподрібнювальних машин. / Стечишин М.С., Олександренко В.П., Лук'янюк М.В., Люховець В.В., Лук'янюк М.М. Проблеми трибології. Хмельницький, 2017. № 2. С. 50–54.

59. Спосіб азотування в тліючому розряді з оптимізацією технологічного режиму / І. М. Пастух, Г. М. Соколова, В. В. Люховець, Т. А. Надопта: пат. на корисну модель №115969 Україна: МПК С 23 С 8/36, С 23 С 8/48. № и 2016 06133; заявл. 06.06.2016; опубл. 10.05.2017, Бюл. №9.

60. Закалов О. В., Закалов І. О. Основи тертя і зношування у машинах: навчальний посібник. Тернопіль: вид-во ТНТУ ім. І. Пулюя, 2011. 322 с.

61. Сафонов Б. П., Бегова А. В. Инженерная трибология: оценка износостойкости и ресурса трибоспращений: учеб. пособие. Новомосковск: РХТУ, 2004. 65 с.

62. Сорокин Г. М. Трибология сталей и сплавов: учебник для вузов. М.: Недра, 2000. 317 с.

63. Крагельский И. В., Щедров В. С. Развитие науки о трении. М.: Изд-во академии наук СССР, 1956. 236 с.

64. Основы трибологии (трение, износ, смазка): учебник для технических вузов / А. В. Чичинадзе, Э. Д. Браун, Н. А. Буше и др.: под общ. ред. А. В. Чичинадзе. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2001. 664 с.

65. Костецкий Б. И. Трение, смазка и износ в машинах. Киев: Техника, 1970. 396 с.

66. Скиба М. Є. Безводневе азотування у тліючому розряді як метод підвищення зносостійкості конструкційних сталей. / М. Є. Скиба, Н. М. Стечишина, Н. К. Медведчук, М. С. Стечишин В. В. Люховець, // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2019. – № 5. – С. 7–12.

67. Каплун П. В. Енергозберігаючі технології підвищення довговічності та надійності деталей машин. / П. В. Каплун, В. А. Гончар, В. В. Люховець. // Підвищення надійності машин і обладнання. 1-а Міжнародна науково-практична конференція. Матеріали конференції. – Кропивницький. 2019. – С. 113-114.

68. Пастух І. М., Люховець В. В., Курской В. С. Особливості азотування в тліючому розряді з нестаціонарним живленням отворів з відносно малим діаметром. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. 2013. № 3. С. 195–198.

69. Пастух І. М., Лук'янюк М. В., Курская В. О. Перехідні процеси вмикання струму в установці для азотування в тліючому розряді з нестаціонарним живленням. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. 2012. № 3. С. 11–15.

70. Токарев А.В. Ионное азотирование стали в импульсном тлеющем разряд. Вестник Кыргызско-Российского славянского университета. 2009. Т. 9. №11. С. 51–57.

71. Пастух І. М., Лук'янюк М. В., Курская В. О. Класифікаційні критерії процесів азотування в тліючому розряді з нестаціонарним живленням. Вісник ХНУ. Технічні науки. 2011. № 5. С. 10–13

72. Пастух І. М., Лук'янюк М. В., Курская В. О. Алгоритми визначення критеріїв утворення нітридів при азотуванні в тліючому розряді з нестаціонарним живленням. Вісник ХНУ. Технічні науки. 2013. № 1. С. 7–12.

73. Nicolai, U. u.a. Application Manual Power Modules; 2000 ISBN 3-932633-46-6.
74. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1987. 592 с.
75. Дослідження процесів без водневого азотування в тліючому розряді. / Скиба М. Є., Стечишин М. С., Олександренко В. П., Курской В. С., Мартинюк А. В. Проблеми трибології. Хмельницький, 2018. № 2. С. 6–16.
76. Пастух І. М., Лук'янюк М. В., Здибель О. С. Эффект структурних перетворень поверхні тертя. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. 2010. № 3. С. 15–19.
77. Stechyshyn N. M. Influence of the parameters of hydrogen nitrogen in a glow discharge on tribological and physic-chemical properties of steel 40 X. / N. M. Stechyshyna, M. S. Stechyshyn, A. V. Martynyuk, N. V. Lukianyuk, V. V. Lyukhovets, Yu. M. Bilyk. // Problems of Tribology. – Khmelnytskyi: KHNU, 2021. – V. 26. - №3/101. – P.31-41.
78. Ионное азотирование с источником переменного тока: пер. с англ. Electric heating Inc., Metals Progress. Реф. журн. «Технология машиностроения». 1983. Вып. 124, № 6. С. 12-17.
79. Пастух І. М. Зовнішні локальні винятки металевих поверхонь та їх вплив на параметри режиму модифікації. Вісник ТУП: Хмельницький, 2001, №3, ч. 1, Технічні науки. С. 43–47.
80. Пастух І. М., Люховець В. В. Внутрішні локальні винятки поверхні, азотованої в тліючому розряді. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. 2015. № 6. С. 12–15.
81. Виноградов А. В. Технологические особенности ионного азотирования конструкционных сталей. Изв. вузов. Машиностроение. 1978. № 1. С. 118–121.
82. Теория и практика плазменного азотирования: пер. с англ. Material science and engineering. Реф. журн. «Технология машиностроения». 1984. Вып. 5, № 3. С. 139 - 148.
83. Москалев Б. И. Разряд с полым катодом. М.: Энергия, 1969. 184 с.

84. Сенчило И. А. Теоретические и технологические основы направленного улучшения свойств поверхностных слоев изделий из инструментальных материалов посредством их ионно-вакуумной модификации: автореф. дис. на соискание уч. степени д - ра техн. наук: 05.03.01; 05.02.08 / И. А. Санкт - Петербург. гос. техн. ун - т. СПб., 1995. 33 с.

85. Юхимчук С. А. О граничных условиях ионно-плазменного нанесения диффузионных покрытий. Электронная обработка материалов. 1982. № 6. С. 24–27.

86. Пастух І. М., Люховець В. В., Лук'янюк М. В. Аналіз процесів азотування в тліючому розряді отворів з відносно малим діаметром. Вісник ХНУ. Технічні науки. 2014. № 5. С. 6–9.

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

88. Люховець В. В. Процеси азотування в тліючому розряді отворів з відносно малим діаметром. 12-й Міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові: тези доповідей. Л.: КІНПАТРИ ЛТД, 2015. С. 90–91.

89. Люховець В. В. Азотування в тліючому розряді отворів малого діаметра. Збірка тез доповідей восьмої міжнародної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених перспективні технології на основі новітніх фізико-матеріалознавчих досліджень та комп'ютерного конструювання матеріалів. К., 2015 С. 45.

90. Пастух І. М., Соколова Г. М. Кінетика входження іонів у зіткнення з поверхнею в розширеному енергетичному діапазоні. Вісник ХНУ, №4, 2015, Технічні науки. С. 6–10.

91. 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.: collection of scientific work. Cleveland, Ohio, 1986. pp. 77–81.

92. Пастух І. М., Давидов А. М., Здибель О. С. Електричні параметри вакуумно-дифузійних газорозрядних технологій модифікації поверхні металів. Вісник ТУП. Хмельницький, 2002. № 5. С. 170–175.

93. Grun R. Pulse plasma treatment the innovation for ion nitriding. 1st International conference of ion nitriding.: collection of scientific work. Cleveland, Ohio. 1986.pp. 143–168.

94. Юргенсон А. А. Азотирование в энергомашиностроении. М.: Машиностроение, 1962. 132 с.

95. Ионное азотирование феррито-перлитной и аустенитной сталей в газовых разрядах низкого давления / А. Д. Коротаев, С. В. Овчинников, А. Н. Тюменцев. ФХОМ. 2004. № 1. С. 22–27.

96. Пастух І. М. Практична апробація положень теорії азотування в тліючому розряді / І. М. Пастух, О. С. Здибель. Вісник Хмельницького національного університету. 2007. № 1. С. 7–25.

97. Лук'янюк М. В., Пастух І. М. Modification steel surfaces in cyclic switched gischarge. Scientific basis of modern technologies: experience and prospects. Хмельницький; Яремче, 2011. С. 269–281.

98. Похмурский В. И. Влияние диффузионных покрытий на эксплуатационные свойства материалов и сплавов. Физико-химическая механика материалов. 1976. № 3. С. 10–16.

99. Семенов М. Ю. Разработка метода расчета режимов ионной нитроцементации, обеспечивающих заданный химический и фазовый состав диффузионного слоя легированных сталей : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук : 05.16.01. М., 1999. 15 с.

100. Ильинский И. И. Влияние упрочняющих покрытий на микротекущность сталей и бронз. Физико-химическая механика материалов. 1985. № 4. С. 83–86.

101. Влияние ионного азотирования на размеры и качество поверхности обработанных изделий: пер. с франц. Bull. techn. institute polithn. Реф. журн. «Технология машиностроения». 1985. Вып. 30, № 1 - 2. С. 75–80.

102. Аналітичні критерії утворення нітридів при азотуванні в тліючому

розряді з нестационарним живленням / І. М. Пастух, М. В. Лук'янюк, В. О. Курская. Вісник ХНУ. Технічні науки. 2012. № 2. С. 25–33.

103. Моделирование процесса ионного азотирования / С. А. Герасимов, та ін. Наука и образование. 2013. № 1. С. 313–332.

104. Пастух І. М., Лук'янюк М. В., Курская В. О. Зміна напруги при вмиканні струму в установці для азотування в тліючому розряді з нестационарним живленням. Вісник ХНУ. Технічні науки. 2012. № 4. С. 7–12.

105. Пастух І. М., Лук'янюк М. В., Курская В. О. Процес розмикання струму в установці для азотування в тліючому розряді з нестационарним живленням. Вісник ХНУ. Технічні науки. 2012. № 5. С. 221–225.

106. Стечишин М. С. Зносостійкість азотованих отворів з відносно малим діаметром / М. С. Стечишин, О. В. Диха, А. В. Мартинюк, Н. М. Стечишина, В. В. Люховець. // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Процеси, машини та обладнання агропромислового виробництва: проблеми теорії та практики». – Тернопіль. 2022. – С. 126-127.

107. Плешивцев Н. В. Катодное распыление. М.: Атомиздат, 1968. 343 с.

108. Коротаев А. Д., Овчинников С. В., Тюменцев А. Н. Ионное азотирование феррито-перлитной и аустенитной сталей в газовых разрядах низкого давления. ФХОМ. 2004. № 1. С. 22–27.

109. Зносостійкість азотованої в тліючому розряді аустенітної нержавіючої сталі 08X18H10. / Стечишин М. С., Скиба М. Є., Стечишина Н. М., Машовець Н. С., Медведчук Н. К. ФХММ: Львів. 2023. Т.59. №2. С. 123–129.

110. Никонорова А. И., Флоренсова Ф. Р. Азотирование аустенитных сталей. МиТОМ. 1965. № 10. С. 16–18.

111. Anichkina, N.L., Bogolyubov, V.S., Boiko, V.V. et al. Comparison of methods of gas, ionic, and vacuum nitriding. Met Sci Heat Treat 31, pp. 170–174 (1989). <https://doi.org/10.1007/BF00715819>

112. Крукович М. Г. Моделирование процесса азотирования / Металловедение и термическая обработка металлов. 2004. № 1. С. 24–31.

113. Pastukh I. M. Average Velocity of Electrons in the Cathode Fall Region

during Glow-Discharge Nitriding. / I. M. Pastukh, V. V. Lyukhovets' //Technical Physics, 2017, Vol. 62, No. 4, pp. 527–536. ISSN 1063-7842.

114. Пастух І. М., Здибель О. С., Лук'янюк М. В. Дослідження зносостійкості при граничному терті азотованих металевих поверхонь. Вісник ХНУ. Технічні науки. 2010. № 3. С. 15–19.

115. Вплив енергетичних і режимних параметрів на фазову структуру і мікротвердість іонно-азотованих конструкційних сталей / М. С. Стечишин та ін. Проблеми тертя та зношування. К.:НАУ, 2017. , №2 С.56–64.

116. Influence of the Ionic Nitriding of Steels in Glow Discharge on the Structure and Properties of the Coatings / Stechyshyn, M. S. ,Martynyuk A. V., Bilyk, Y. M., Oleksandrenko, V. P., Stechyshyna, N. M. Materials Science. 2017. 53 (3). pp. 343 – 349.

117. Вплив енергетичних параметрів безводневого азотування у тліючому розряді на фізико-хімічні властивості сталі 40х / Н. М. Стечишина та ін. ФХММ: Львів. 2021. т.55. №6. С.104–109.

118. M. S. Stechyshyn, N. M. Stechyshyna, V. S. Kurskoi. Corrosion and Electrochemical Characteristics of the Metal Surfaces (Nitrided in Glow Discharge) in Model Acid Media March 2018, Volume 53, Issue 5, pp 724–731.

119. Stechyshyn M. S., Stechyshyna, N. M., Martynyuk, A. V., Luk'yanyuk, M. M. Strength and Plasticity of the Surface Layers of Metals Nitrided in Glow Discharge. Materials Science: Springer (USA). 2018. 54 (5). pp. 55 – 60.

120. Stechyshyn, M. S., Skyba, M. E., Student, M. M., Oleksandrenko, V. P., Luk'yanyuk, M. V. Residual Stresses in Layers of Structural Steels Nitrided in Glow Discharge. 2018. Materials Science 54(3), pp. 395–399.

121. M. S. Stechyshyn, M. E. Skyba, Yu. G. Sukhenko, M. I. Tsepenyuk Fatigue Strength of Nitrided Steels in Corrosion-Active Media of the Food Enterprises. Materials Science. July 2019. Volume 55, Issue 1, pp. 136–141.

122. Physico-chemical and tribological properties of nitrogened layers of structural steel / M. Skyba, M. Stechyshyn, N. Stechyshyna, A. Martynyuk, V.

Lyukhovets // Actual problems of modern science. Monograph: Bydgoszcz, Poland 2021. pp. 488–499.

123. M.S. Stechyshyn, V.V. Lyukhovets, N.M. Stechyshyna, M.I. Tsepenyuk. Wear resistance of structural steels nitroded in cyclic-commuted discharge at limit modes of friction. // Problems of Tribology. Khmelnytskyi: KHNU, 2022. V. 27. №3/105. pp. 27–33.

124. Stechyshyn M.S., Corrosion-mechanical wear of nitrided steels in acidic medium UDC 620.194. / M.S. Stechyshyn, N. M. Stechyshyna, O. V. Dykha, A. V. Martynyuk, V. V. Liukhovets, and M. V. Lukyanyuk. Materials Science, Vol. 58, No. 5, March, 2023. pp. 597–601.

125. Мирослав Стечишин. Азотування довгомірних отворів / Мирослав Стечишин, Володимир Люховець, Денис Здоренко, Володимир Курской // 16-й Міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові: Матеріали симпозіуму. – Львів: КІНПАТРІ ЛТД, 2023. С. 68–69.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографії

1. Пастух И. М., Соколова Г. Н., Люховец В. В., Здыбель А. С. Теоретические основы процесса безводородного азотирования в тлеющем разряде. *Перспективные тренды развития науки: техника и технологии* : коллективная монография. Одесса: Купrienko С. В., 2016. С. 123–135. *Проаналізовані переваги і недоліки процесів азотування з ЦКР.*

2. Skyba M., Stechyshyn M., Stechyshyna N., Martynyuk A., Lyukhovets V. Physico-chemical and tribological properties of nitrogenated layers of structural steel. *Actual problems of modern science: Collective monograph*. Bydgoszcz, Poland, 2021. P. 488–499. *(Досліджено зносостійкість азотованих шарів на сталях 45 і 38Х2МЮА).*

У виданнях, що внесені до переліку міжнародних наукометричних баз

3. Pastukh I. M., Lyukhovets' V. V. Average Velocity of Electrons in the Cathode Fall Region during Glow-Discharge Nitriding. *Technical Physics*. 2017, Vol. 62, №4, pp. 527–536. ISSN 1063-7842. Scopus. *Проведена експериментальна перевірка розрахункових значень середньої швидкості електронів.*

4. Stechyshyn M.S., Stechyshyna N. M., Dykha O. V., Martynyuk A. V., Liukhovets V. V., Lukyanyuk M. V. Corrosion-mechanical wear of nitrided steels in acidic medium UDC 620.194. *Materials Science: Springer*. USA, 2023. № 58 (5). P. 597–601. *(Проаналізовано вплив режимів БАТР на КМЗ конструкційних сталей).*

У фахових виданнях

5. Каплун П. В., Люховець В. В., Глушак Г. С. Дослідження трибологічних характеристик та довговічності конструктивних елементів з дифузійними і комбінованими покриттями. *Вісник Технологічного університету*

Поділля: Технічні науки. Хмельницький, 2000. Ч. 1. №5. С. 85–87. (Знаходження і аналіз трибологічних характеристик отриманих покриттів)

6. Пастух І. М., Люховець В. В., Лук'янюк М. В. Аналіз процесів азотування в тліючому розряді отворів з відносно малим діаметром. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. Хмельницький, 2014. № 5. С. 6–9. (Для аналізу запропоновано лінійний закон розподілу напруженості електричного поля).*

7. Пастух І. М., Люховець В. В. Внутрішні локальні винятки поверхні, азотованої в тліючому розряді. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. Хмельницький, 2015. № 6. С. 12–15. (Запропонована схема внутрішнього локального винятку та лінійного розподілу поперечних та повздовжніх полів розподілу напруження і параболічний закон падіння напруги).*

8. Пастух І. М., Люховець В. В. Ефект накачування іонів азоту в отвори відносно малого діаметра. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. Хмельницький, 2016. № 3. С. 138–146. (Експериментально перевірені параметри технологічного режиму з ЦКР для азотування отворів).*

9. Пастух І. М., Соколова Г. М., Люховець В. В. Обґрунтування азотування в тліючому розряді з живленням змінним струмом. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. Хмельницький, 2017. № 1. С. 7–9. (Проведено аналіз переваг і недоліків АТР з живленням змінним струмом).*

10. Курской В. С., Люховець В. В., Здибель О. С. Апаратна реалізація живлення циклічно-комутованого розряду в установках азотування. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. Хмельницький, 2017. № 3. С. 27–31. (Запропонована схема послідовного з'єднання ключових елементів для комутування).*

11. Стечишин М. С., Олександренко В. П., Лук'янюк М. В., Люховець В. В., Лук'янюк М. М. Технологія азотування в тліючому розряді сталей різального комплексу м'ясоподрібнювальних машин. *Проблеми трибології.*

Хмельницький, 2017. № 2. С. 50–54. (*Визначені трибологічні характеристики азотованих сталей*).

12. Скиба М. Є., Стечишина Н. М., Медведчук Н. К., Стечишин М. С., Люховець В. В. Безводневе азотування у тліючому розряді як метод підвищення зносостійкості конструкційних сталей. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. Хмельницький, 2019. № 5. С. 7–12. (*Дослідження та аналіз впливу процесів БАТР на зносостійкість металів*).

13. Стечишина Н. М., Люховець В. В., Стечишин М. С. Вплив технологічних параметрів карбоазотування на зносостійкість сталі 45. *Проблеми тертя та зношування*. Київ: НАУ, 2019, №3(84). С.76-82. (*Досліджена зносостійкість карбоазотованої сталі 45*).

14. Stechyshyn M.S., Lyukhovets V. V., Stechyshyna N. M., Tsepenyuk M. I. Wear resistance of structural steels nitroded in cyclic-commuted discharge at limit modes of friction. *Problems of Tribology*. Khmelnytskyi: KHNU, 2022. V. 27. №3/105. P. 27-33. (*Проведення експериментальних випробувань при граничних режимах тертя*).

Патенти на винаходи

15. Спосіб підвищення корозійної стійкості металевих поверхонь: пат. 111949 Україна: МПК С 23 С 8/00, С 23 С 8/48, С 23 С 8/68. № и 2016 06058 ; заявл. 03.06.2016; опубл. 25.11.2016, Бюл. № 22. 3 с. (*Запропоновано проведення карбонітрування*).

16. Спосіб азотування в тліючому розряді оберненої полярності з періодичною очисткою поверхні : пат. 112613 Україна : МПК С 23 С 8/36, С 23 С 8/48. № и 2016 06139 ; заявл. 06.06.2016 ; опубл. 26.12.2016, Бюл. № 24. 3 с. (*Запропонована періодична очистка поверхні*).

17. Спосіб азотування в тліючому розряді з періодичною очисткою поверхні: пат. 112984 Україна: МПК С 23 С 8/36, С 23 С 8/24. № и 2016 05934 ; заявл. 01.06.2016 ; опубл. 10.01.2017, Бюл. №1. 3 с. (*Знайдено період тривалості очистки*).

18. Спосіб азотування в тліючому розряді з живленням змінним струмом: пат. 112983 Україна: МПК С 23 С 8/36, С 23 С 8/48. № у 2016 05929; заявл. 01.06.2016; опубл. 10.01.2017, Бюл. №1. 3 с. *(Проведена експериментальна перевірка).*

19. Спосіб азотування азотоактивних металів в тліючому розряді з періодичною очисткою поверхні : пат. 113576 Україна: МПК С 23 С 8/36, С 23 С 8/48. № у 2016 06403; заявл. 13.06.2016 ; опубл. 10.02.2017, Бюл. №3. 3 с. *(Запропоновано подачу короткочасного імпульсу напруги та визначено її величину).*

20. Спосіб азотування в тліючому розряді з оберненою полярністю: пат. 113569 Україна: МПК С 23 С 8/36, С 23 С 8/48. № у 2016 06036; заявл. 03.06.2016; опубл. 10.02.2017, Бюл. № 3. 3 с. *(Проведені експериментальні дослідження).*

21. Спосіб азотування в тліючому розряді з оптимізацією технологічного режиму: пат. 115969 Україна: МПК С 23 С 8/36, С 23 С 8/48. № у 2016 06133; заявл. 06.06.2016; опубл. 10.05.2017, Бюл. №9. 3 с. *(Проаналізовано вплив фазових структурних складових азотованого шару на трибологічні характеристики сталей).*

22. Пристрій для азотування в тліючому розряді з живленням змінним струмом : пат. 118327 Україна: МПК С 23 С 8/36, С 23 С 8/48. № у 2016 06460; заявл. 13.06.2016; опубл. 10.08.2017, Бюл. № 15. 3 с. *(Запропоновано включити в пристрій блок автоматичного відключення напруги).*

Апробація матеріалів дисертації

23. Люховець В. В. Перспективи азотування малих отворів у тліючому розряді з нестаціонарним живленням. 11-й Міжнародний симпозиум українських інженерів-механіків у Львові: тези доповідей. Львів: КІНПАТРИ ЛТД, 2013. С. 195.

24. Люховець В. В. Азотування в тліючому розряді деталей з малими отворами із застосуванням змінного живлення. *Ольвійський форум - 2014:*

стратегії країн Причорноморського регіону в геополітичному просторі: тези. Миколаїв: Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2014. С. 52–53.

25. Люховець В. В. Процеси азотування в тліючому розряді отворів з відносно малим діаметром. *12-й Міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові: тези доповідей.* Львів: КІНПАТРИ ЛТД, 2015. С. 90–91.

26. Люховець В. В. Азотування в тліючому розряді отворів малого діаметра. *Збірка тез доповідей восьмої міжнародної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Перспективні технології на основі новітніх фізико-матеріалознавчих досліджень та комп'ютерного конструювання матеріалів».* Київ, 2015. С. 45.

27. Курской В. С., Курская В. О., Люховець В. В. Зміцнення робочих поверхонь сільськогосподарського знаряддя методом азотування в тліючому розряді. *Наукові здобутки у вирішенні актуальних проблем виробництва та переробки сировини, стандартизації і безпеки продовольства : Збірник праць за підсумками VIII Міжнародної науково-практичної конференції вчених, аспірантів і студентів (м. Київ, 17 квітня 2019 р. – 18 квітня 2019 р.).* Київ: РВВ НУБіП України, 2019. С. 189–191. *(Проведення експериментальних та експлуатаційних випробувань).*

28. Стечишин М. С., Люховець В. В., Здоренко Д. В., Курской В. В. Азотування довгомірних отворів. *16-й Міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові : Матеріали симпозіуму.* Львів: КІНПАТРИ ЛТД, 2023. С. 68-69. *(Теоретичні і експериментальні дослідження азотування отворів).*

Патенти



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **118327** (13) **U**
 (51) МПК
C23C 8/36 (2006.01)
C23C 8/48 (2006.01)

МІНІСТЕРСТВО
 ЕКОНОМІЧНОГО
 РОЗВИТКУ І ТОРГІВЛІ
 УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2016 06460	(72) Винахідник(и): Пастух Ігор Маркович (UA), Соколова Галина Миколаївна (UA), Люховець Володимир Васильович (UA), Здібель Олександр Станіславович (UA)
(22) Дата подання заявки: 13.06.2016	
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 10.08.2017	
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 10.08.2017, Бюл.№ 15	(73) Власник(и): ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ, вул. Інститутська, 11, м. Хмельницький, 29016 (UA)

(54) ПРИСТРІЙ ДЛЯ АЗОТУВАННЯ В ТЛІЮЧОМУ РОЗРЯДІ З ЖИВЛЕННЯМ ЗМІННИМ СТРУМОМ**(57) Реферат:**

Пристрій для азотування в тліючому розряді з живленням змінним струмом включає блок живлення камери, що містить тиристорний регулятор напруги, трансформатор, баластний реостат, датчики струму та напруги, блок автоматичного відключення. Додатково в пристрій введено джерело з нестаціонарним живленням зі змінним струмом заданої частоти.

U
118327
UA



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **115969** (13) **U**

(51) МПК

C23C 8/36 (2006.01)**C23C 8/48** (2006.01)

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ(21) Номер заявки: **u 2016 06133**(22) Дата подання заявки: **06.06.2016**(24) Дата, з якої є чинними
права на корисну
модель: **10.05.2017**(46) Публікація відомостей
про видачу патенту: **10.05.2017, Бюл.№ 9**

(72) Винахідник(и):

**Пастух Ігор Маркович (UA),
Соколова Галина Миколаївна (UA),
Люховець Володимир Васильович (UA),
Надопта Тетяна Анатоліївна (UA)**

(73) Власник(и):

**ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ,
вул. Інститутська, 11, м. Хмельницький,
29016 (UA)**

(54) СПОСІБ АЗОТУВАННЯ В ТЛІЮЧОМУ РОЗРЯДІ З ОПТИМІЗАЦІЄЮ ТЕХНОЛОГІЧНОГО РЕЖИМУ**(57) Реферат:**

Спосіб азотування в тліючому розряді з оптимізацією технологічного режиму проводять в дві стадії. На першій вибирають параметри технологічного режиму на основі аналізу комплексного показника, котрий враховує не тільки інтенсивність кожного із субпроцесів, але і їх взаємний вплив. На другій стадії проводять власне азотування в тліючому розряді по режиму, параметри якого встановлені на першій стадії.

UA 115969 U



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **112613** (13) **U**

(51) МПК

C23C 8/36 (2006.01)**C23C 8/48** (2006.01)

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ(21) Номер заявки: **u 2016 06139**(22) Дата подання заявки: **06.06.2016**(24) Дата, з якої є чинними
права на корисну
модель: **26.12.2016**(46) Публікація відомостей
про видачу патенту: **26.12.2016, Бюл.№ 24**

(72) Винахідник(и):

**Пастух Ігор Маркович (UA),
Соколова Галина Миколаївна (UA),
Люховець Володимир Васильович (UA),
Здибель Олександр Станіславович (UA)**

(73) Власник(и):

**ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ,
вул. Інститутська, 11, м. Хмельницький,
29016 (UA)**

(54) СПОСІБ АЗОТУВАННЯ В ТЛІЮЧОМУ РОЗРЯДІ ОБЕРНЕНОЇ ПОЛЯРНОСТІ З ПЕРІОДИЧНОЮ ОЧИСТКОЮ ПОВЕРХНІ**(57) Реферат:**

Спосіб азотування в тліючому розряді оберненої полярності з періодичною очисткою поверхні, при якому процес проходить по схемі деталь-анод, корпус камери-катод при незмінних параметрах електричного розряду між електродами. В ході процесу з періодом не менше тривалості формування адсорбційного шару з компонентів газового середовища розрядна камера автоматично переключається на схему деталь-катод, корпус камери-анод. На електроди камери подається короткочасний імпульс напруги порядку 1200 вольт, тривалість якого менша тривалості формування адсорбційного шару з компонентів газового середовища.

UA 112613 U



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **113569** (13) **U**

(51) МПК

C23C 8/36 (2006.01)**C23C 8/48** (2006.01)

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2016 06036	(72) Винахідник(и):
(22) Дата подання заявки: 03.06.2016	Пастух Ігор Маркович (UA),
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 10.02.2017	Соколова Галина Миколаївна (UA),
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 10.02.2017, Бюл.№ 3	Люховець Володимир Васильович (UA),
	Здибель Олександр Станіславович (UA)
	(73) Власник(и): ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ, вул. Інститутська, 11, м. Хмельницький, 29016 (UA)

(54) СПОСІБ АЗОТУВАННЯ В ТЛІЮЧОМУ РОЗРЯДІ З ОБЕРНЕНОЮ ПОЛЯРНІСТЮ**(57) Реферат:**

Спосіб азотування в тліючому розряді з оберненою полярністю, при якому тліючий розряд виникає між деталлю та корпусом камери. Корпус камери або окрема деталь, які служать одним з електродів, є катодом, а деталь служить анодом, який додатково підігрівають терморадіаційним, конвекційним, резистивним методами, струмом високої частоти.

UA 113569 U



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **112984** (13) **U**

(51) МПК

C23C 8/36 (2006.01)**C23C 8/24** (2006.01)

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2016 05934	(72) Винахідник(и): Пастух Ігор Маркович (UA),
(22) Дата подання заявки: 01.06.2016	Соколова Галина Миколаївна (UA),
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 10.01.2017	Люховець Володимир Васильович (UA), Здибель Олександр Станіславович (UA)
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 10.01.2017, Бюл.№ 1	(73) Власник(и): ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ, вул. Інститутська, 11, м. Хмельницький, 29016 (UA)

(54) СПОСІБ АЗОТУВАННЯ В ТЛІЮЧОМУ РОЗРЯДІ З ПЕРІОДИЧНОЮ ОЧИСТКОЮ ПОВЕРХНІ**(57) Реферат:**

Спосіб азотування в тліючому розряді з періодичною очисткою поверхні проходить при незмінних параметрах електричного розряду між деталлю, яка служить катодом, та корпусом камери або окремою деталлю, які виконують роль анода. В ході процесу з періодом не менше тривалості формування адсорбційного шару з компонентів газового середовища додатково на електроди камери подають короткочасний імпульс напруги порядку 1200 вольт, тривалість якого менша тривалості формування адсорбційного шару з компонентів газового середовища.

UA 112984 U



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **112983** (13) **U**

(51) МПК

C23C 8/36 (2006.01)**C23C 8/48** (2006.01)

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: **u 2016 05929**
 (22) Дата подання заявки: **01.06.2016**
 (24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: **10.01.2017**
 (46) Публікація відомостей про видачу патенту: **10.01.2017, Бюл.№ 1**

(72) Винахідник(и):
Пастух Ігор Маркович (UA),
Соколова Галина Миколаївна (UA),
Люховець Володимир Васильович (UA),
Здибель Олександр Станіславович (UA)
 (73) Власник(и):
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ,
 вул. Інститутська, 11, м. Хмельницький,
 29016 (UA)

(54) СПОСІБ АЗОТУВАННЯ В ТЛІЮЧОМУ РОЗРЯДІ З ЖИВЛЕННЯМ ЗМІННИМ СТРУМОМ**(57) Реферат:**

Спосіб азотування в тліючому розряді з живленням змінним струмом, в якому деталь та корпус камери або її спеціальна оболонка, які служать електродами, отримують живлення різної полярності, причому деталі садки та корпус камери або його спеціальна деталь, які виконують роль електродів, отримують живлення від джерела змінного струму промислової частоти або кратної їй, а напруга змінюється залежно від параметрів технологічного режиму модифікації поверхні деталей.

UA 112983 U



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **113576** (13) **U**

(51) МПК

C23C 8/36 (2006.01)**C23C 8/48** (2006.01)

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

- (21) Номер заявки: **u 2016 06403**
 (22) Дата подання заявки: **13.06.2016**
 (24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: **10.02.2017**
 (46) Публікація відомостей про видачу патенту: **10.02.2017, Бюл.№ 3**

- (72) Винахідник(и):
Пастух Ігор Маркович (UA),
Соколова Галина Миколаївна (UA),
Люховець Володимир Васильович (UA),
Здібель Олександр Станіславович (UA),
Машовець Наталія Сергіївна (UA)
 (73) Власник(и):
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ,
 вул. Інститутська, 11, м. Хмельницький,
 29016 (UA)

(54) СПОСІБ АЗОТУВАННЯ АЗОТОАКТИВНИХ МЕТАЛІВ В ТІЛЮЧОМУ РОЗРЯДІ З ПЕРІОДИЧНОЮ ОЧИСТКОЮ ПОВЕРХНІ**(57) Реферат:**

Спосіб азотування азотоактивних металів в тліючому розряді з періодичною очисткою поверхні, при якому процес проходить при незмінних параметрах електричного розряду між деталлю, яка слугує катодом, та корпусом камери або окремою деталлю, які виконують роль анода. В ході процесу з періодом не менше тривалості формування адсорбційного шару з компонентів газового середовища додатково на електроди камери подається короткочасний імпульс напруги порядку 1200 вольт, тривалість якого менша тривалостей формування адсорбційного шару з компонентів газового середовища та утворення моношару нітридів.

U
UA 113576



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **111949** (13) **U**

(51) МПК (2016.01)

C23C 8/00**C23C 8/48** (2006.01)**C23C 8/68** (2006.01)

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: **u 2016 06058**(22) Дата подання заявки: **03.06.2016**(24) Дата, з якої є чинними
права на корисну
модель: **25.11.2016**(46) Публікація відомостей
про видачу патенту: **25.11.2016, Бюл.№ 22**

(72) Винахідник(и):

**Пастух Ігор Маркович (UA),
Соколова Галина Миколаївна (UA),
Люховець Володимир Васильович (UA),
Здибель Олександр Станіславович (UA)**

(73) Власник(и):

**ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ,
вул. Інститутська, 11, м. Хмельницький,
29016 (UA)**

(54) СПОСІБ ПІДВИЩЕННЯ КОРОЗІЙНОЇ СТІЙКОСТІ МЕТАЛЕВИХ ПОВЕРХОНЬ

(57) Реферат:

Спосіб підвищення корозійної стійкості металевих поверхонь шляхом утворення корозійностійкого поверхневого шару, яке вирішується шляхом утворення на поверхні корозійностійкого шару за рахунок використання модифікації поверхні металевих деталей із застосуванням вакуумно-дифузійних газорозрядних технологій поверхневої обробки деталей, зокрема азотування, карбонітрування, борування в тліючому розряді.

UA 111949 U

ДОДАТОК В

**Графіки дослідження зносостійкості внутрішніх поверхонь отворів,
змін мікротвердості азотованого шару і дифрактограми зразків із сталі 40Х
і сталі 45.**

Таблиця В1

Розподіл мікротвердості по глибині циліндра

№ режиму	Матеріал	Мікротвердість поверхні $HV_{0,1}$ на глибині циліндра								
		10 мм	20 мм	40 мм	100 мм	200 мм	250 мм	340 мм	370 мм	395 мм
Режим 1	Сталь45	594	592	593	590	591	592	591	590	592
	Сталь40Х	796	798	797	796	798	796	796	798	795
Режим 2	Сталь45	592	593	595	563	495	512	592	589	590
	Сталь40Х	794	789	792	756	688	750	789	792	790
Режим 3	Сталь45	589	592	588	560	482	440	320	302	306
	Сталь40Х	790	792	788	738	560	480	430	380	362

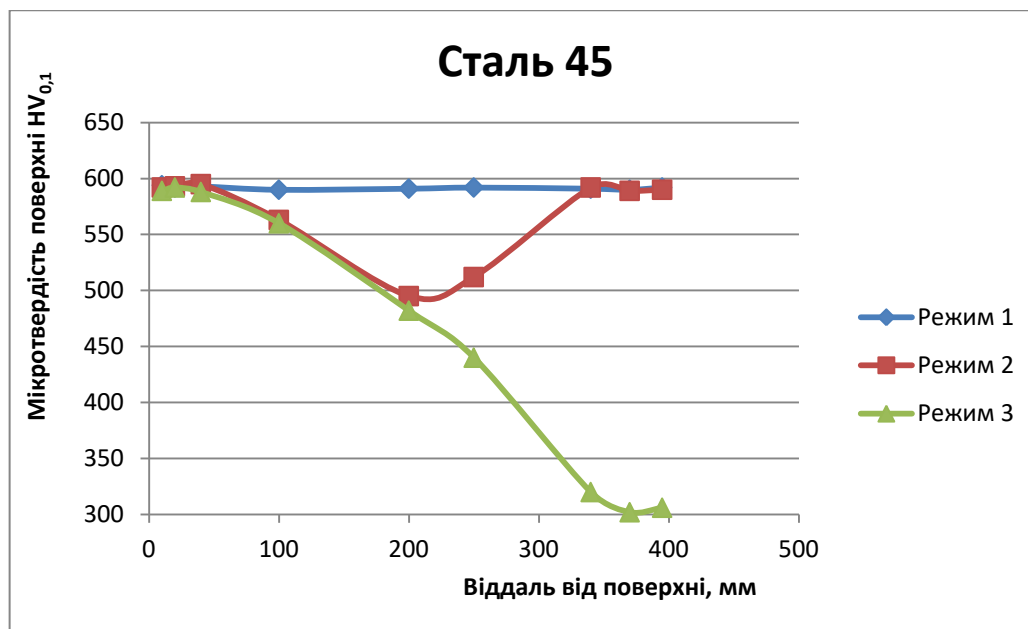


Рис. В1 – Зміна мікротвердості азотованого шару сталі 45 залежно від
режиму азотування

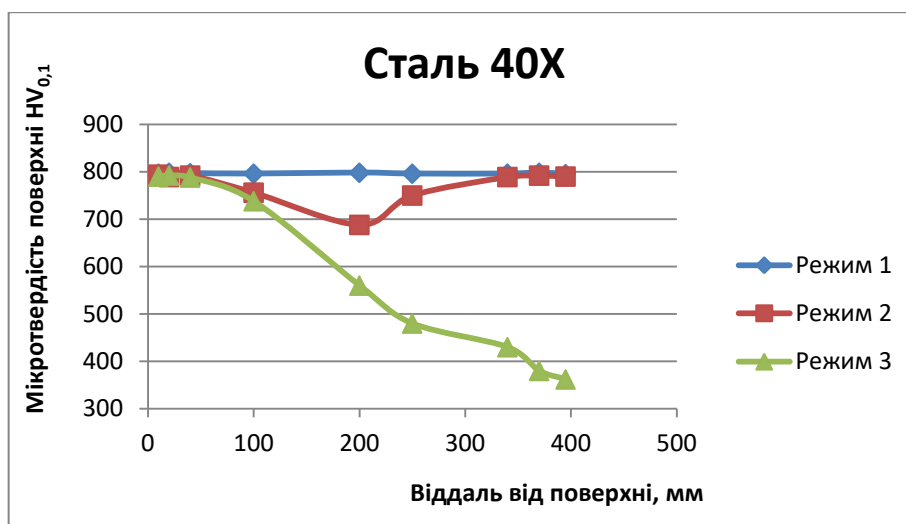


Рис. В2 – Зміна мікротвердості азотованого шару сталі 40X залежно від режиму азотування

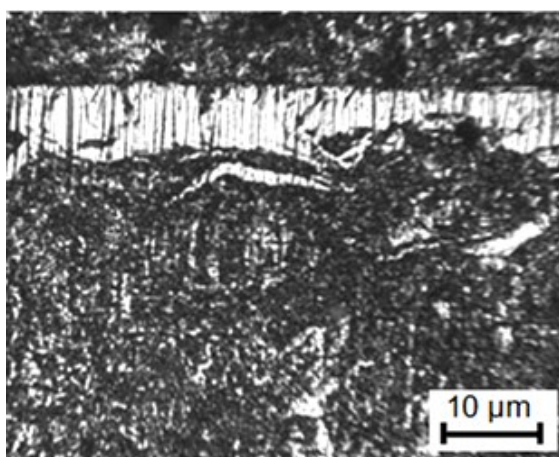


Рис. В3 – Нітридна зона зразка сталі 40X (режим 3, 10 мм від торця)

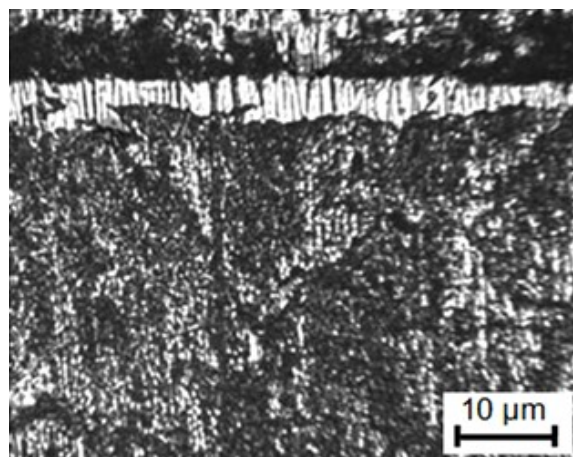


Рис. В4 – Нітридна зона зразка сталі 40X (режим 3, 200 мм від торця)

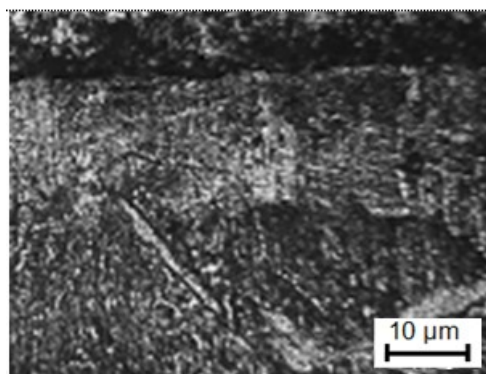
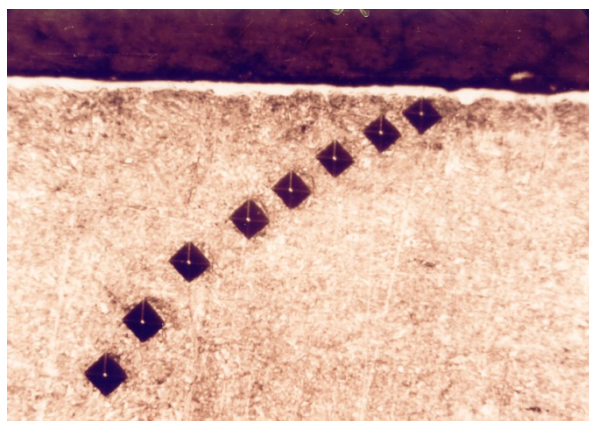
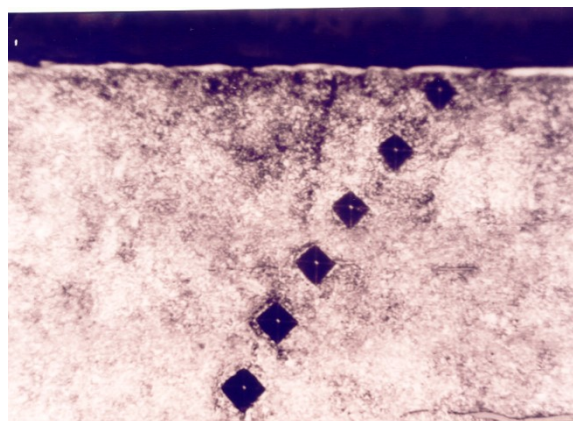


Рис. В5 – Нітридна зона зразка сталі 40X (режим 3, 395 мм від торця)



а



б

Рис. В6 – Вимірювання мікротвердості по глибині модифікованого шару сталі 40Х (режим 3, 10 мм від торця (а) та 200мм (б))

Таблиця В2

Розподіл мікротвердості по глибині модифікованого шару сталей, азотованих в тліючому циклічно комутованому розряді

Номер режиму		Відстань від поверхні, мкм							
		0	25	50	100	200	300	500	1000
Сталь 45									
Режим 1	10мм	594	464	374	324	297	273	261	221
	20мм	592	480	380	330	306	280	262	218
	40мм	593	476	374	328	302	290	250	216
	100мм	590	482	370	320	290	272	260	210
	200мм	591	464	374	328	288	270	260	220
	250мм	592	484	374	328	306	290	250	220
	340мм	591	470	370	320	290	270	260	218
	370мм	590	466	372	318	286	268	252	216
	395мм	592	462	370	316	290	272	248	218
Сталь 40Х									
Режим 1	10мм	796	633	581	450	366	313	273	274
	20мм	798	624	580	421	310	263	251	252
	40мм	797	669	548	439	344	306	269	258
	100мм	796	633	580	421	366	306	251	240
	200мм	798	624	580	421	310	263	251	252
	250мм	796	633	581	450	366	313	273	274
	340мм	796	592	564	446	360	296	249	243
	370мм	798	669	548	439	344	306	269	258
	395мм	795	647	547	407	345	284	249	254

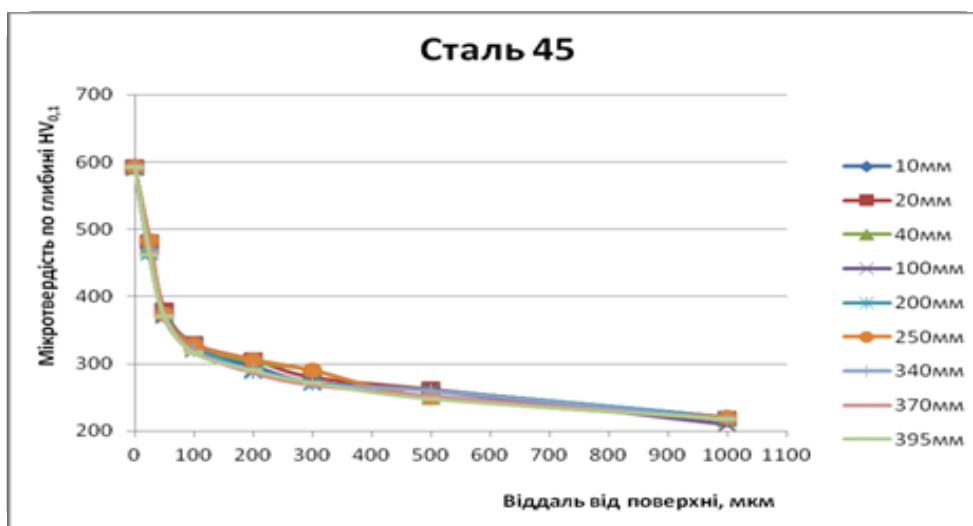


Рис. В7 – Розподіл мікротвердості, по глибині зразків, для сталі 45 азотованої в ЦКР для внутрішньої поверхні циліндра.

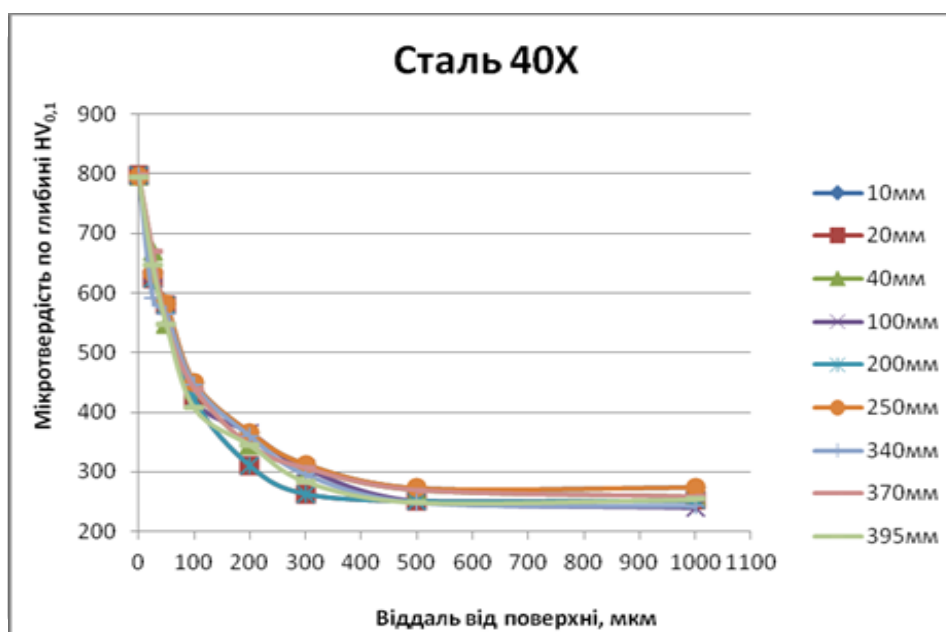


Рис. В8 – Розподіл мікротвердості, по глибині зразків, для сталі 40X азотованої в ЦКР для внутрішньої поверхні циліндра.

Таблиця ВЗ

Розподіл мікротвердості по глибині модифікованого шару сталей, азотованих в тліючому розряді з постійним живленням. Циліндр відкритий з двох сторін.

Номер режиму		Відстань від поверхні, мкм							
		0	25	50	100	200	300	500	1000
Сталь 45									
Режим 2	10мм	592	480	380	330	306	280	262	218
	20мм	593	476	374	328	302	290	250	216
	40мм	595	464	374	324	297	273	261	221
	100мм	563	433	315	310	294	269	234	212
	200мм	495	406	306	297	273	261	237	212
	250мм	512	412	310	283	261	249	221	209
	340мм	592	464	360	310	296	256	237	220
	370мм	589	480	407	321	310	261	249	218
	395мм	590	481	383	324	312	291	234	221
Сталь 40X									
Режим 2	10мм	794	624	580	421	310	263	251	252
	20мм	789	647	548	439	344	306	269	258
	40мм	792	669	533	448	360	310	256	243
	100мм	756	647	524	439	365	296	253	240
	200мм	688	563	492	383	295	264	243	237
	250мм	750	561	509	412	296	256	240	239
	340мм	789	624	563	421	344	310	249	240
	370мм	792	647	580	439	360	310	256	243
	395мм	790	669	548	448	365	306	269	240

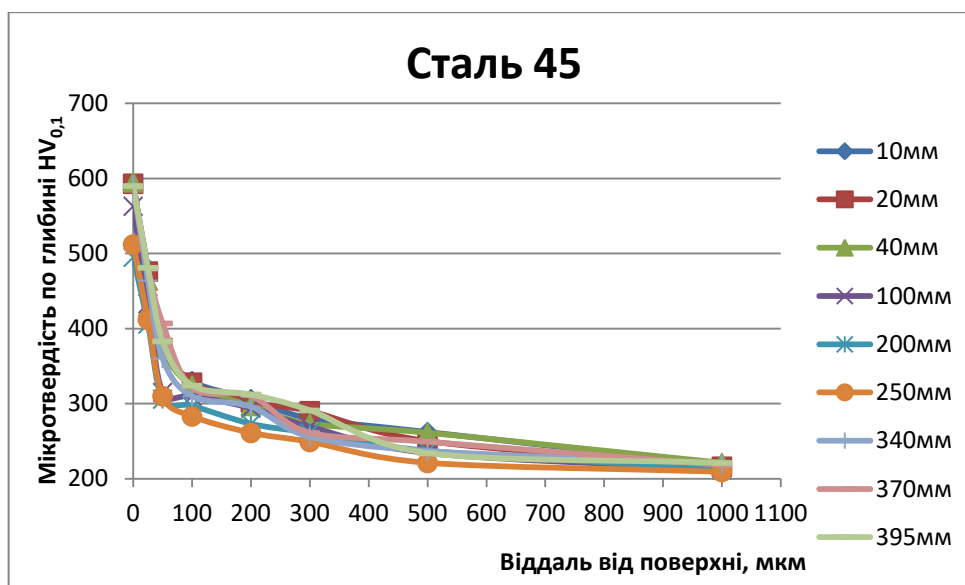


Рис. В9 – Розподіл мікротвердості, по глибині взірців, для сталі 45 азотованих в тліючому розряді з постійним живленням.

Циліндр відкритий з двох сторін

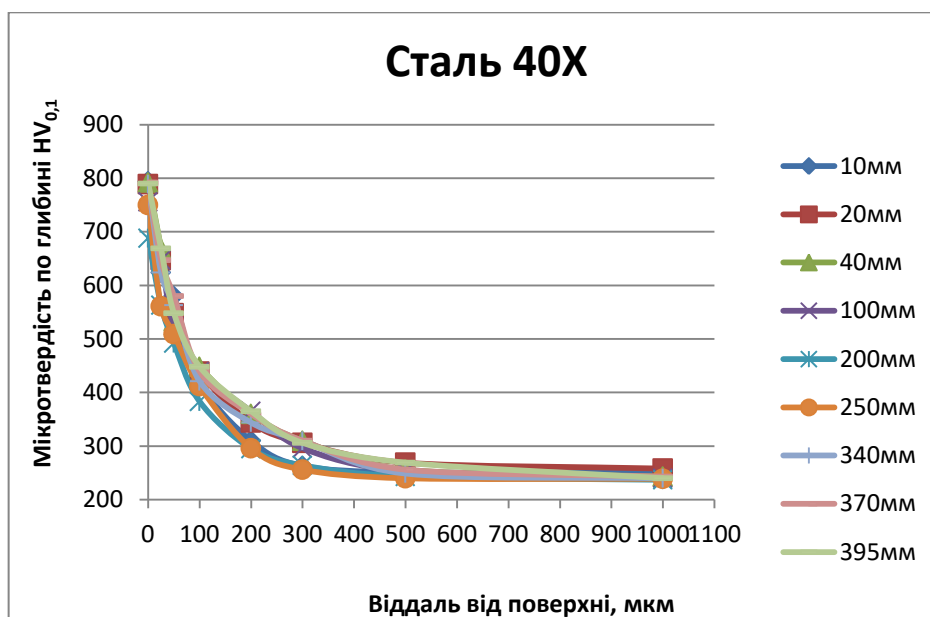


Рис. В10 – Розподіл мікротвердості, по глибині взірців, для сталі 40X азотованих в тліючому розряді з постійним живленням.

Циліндр відкритий з двох сторін

Таблиця В4

Розподіл мікротвердості по глибині модифікованого шару сталей, азотованих в тліючому розряді з постійним живленням. Циліндр закритий з одної сторони.

Номер режиму		Відстань від поверхні, мкм							
		0	25	50	100	200	300	500	1000
Сталь 45									
Режим 3	10мм	589	481	383	330	310	296	262	221
	20мм	592	476	380	328	306	290	256	216
	40мм	588	464	374	324	297	273	261	218
	100мм	560	433	324	310	294	269	234	212
	200мм	482	406	306	297	273	261	237	209
	250мм	440	310	297	273	262	237	220	206
	340мм	320	300	283	268	249	234	225	209
	370мм	302	285	268	249	237	230	220	208
	395мм	306	273	256	234	225	220	216	210
Сталь 40X									
Режим 3	10мм	790	647	580	421	360	310	251	252
	20мм	792	669	548	439	344	306	269	249
	40мм	788	663	533	448	324	296	256	243
	100мм	738	647	524	439	306	256	239	240
	200мм	560	548	492	383	295	254	243	237
	250мм	480	412	383	365	289	237	230	230
	340мм	430	367	321	310	269	230	232	230
	370мм	380	345	321	308	256	234	230	230
	395мм	362	310	289	269	243	230	234	230

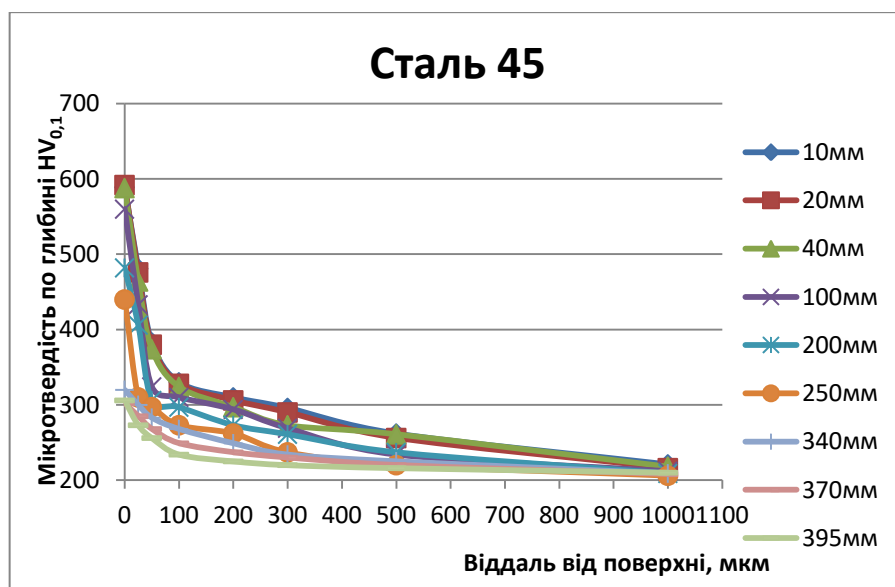


Рис. В11 – Розподіл мікротвердості, по глибині зразків, для сталі 45 азотованих в тліючому розряді з постійним живленням.
Циліндр закритий з одної сторони.

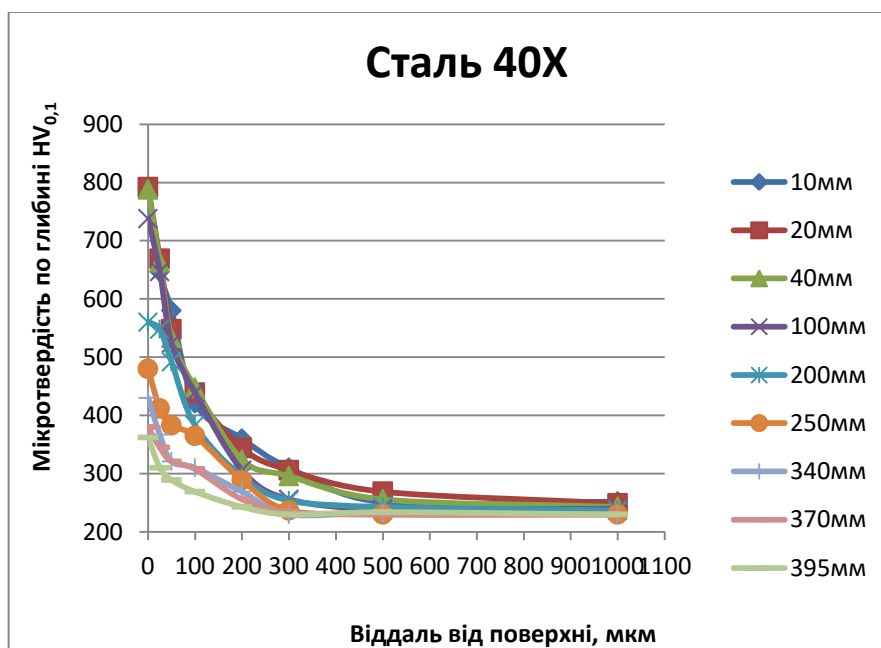


Рис. В12 – Розподіл мікротвердості, по глибині зразків, для сталі 40X азотованих в тліючому розряді з постійним живленням.
Циліндр закритий з одної сторони.

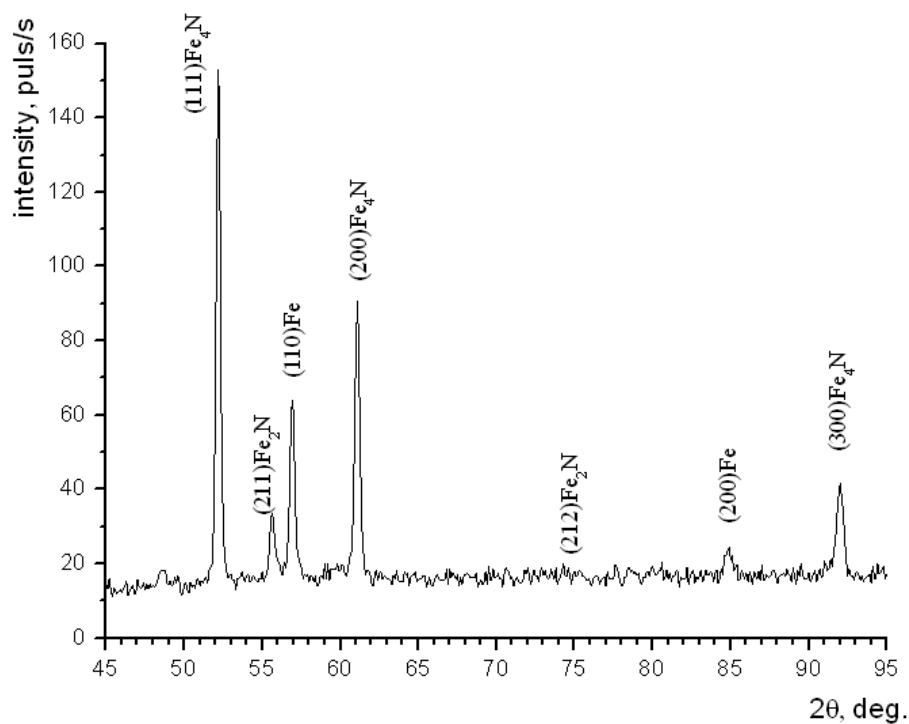


Рис. В13 – Ділянка дифрактограми зразка сталі 45
(режим 3, 10 мм від торця)

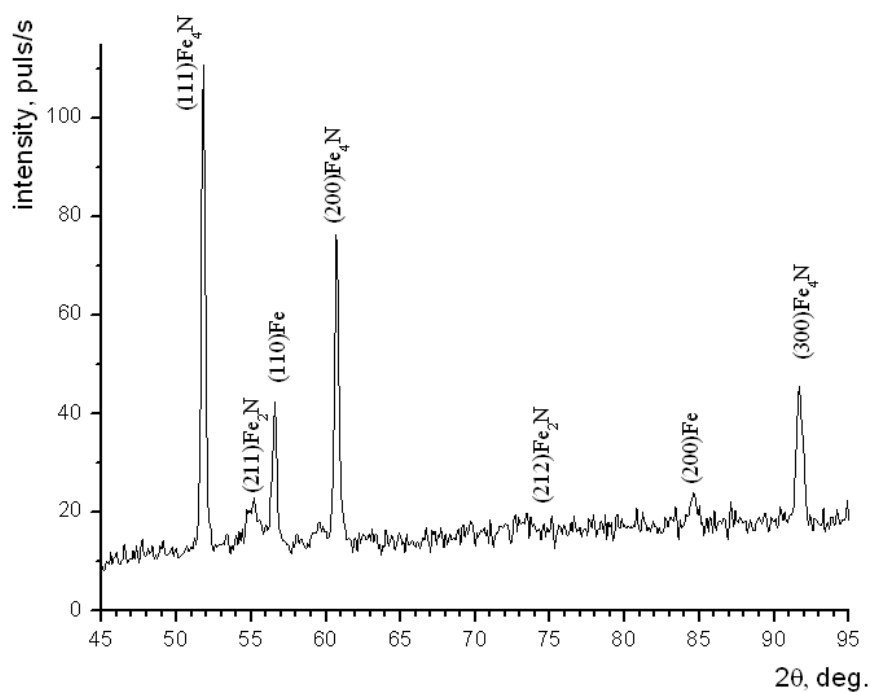


Рис. В14 – Ділянка дифрактограми зразка сталі 45
(режим 3, 200 мм від торця)

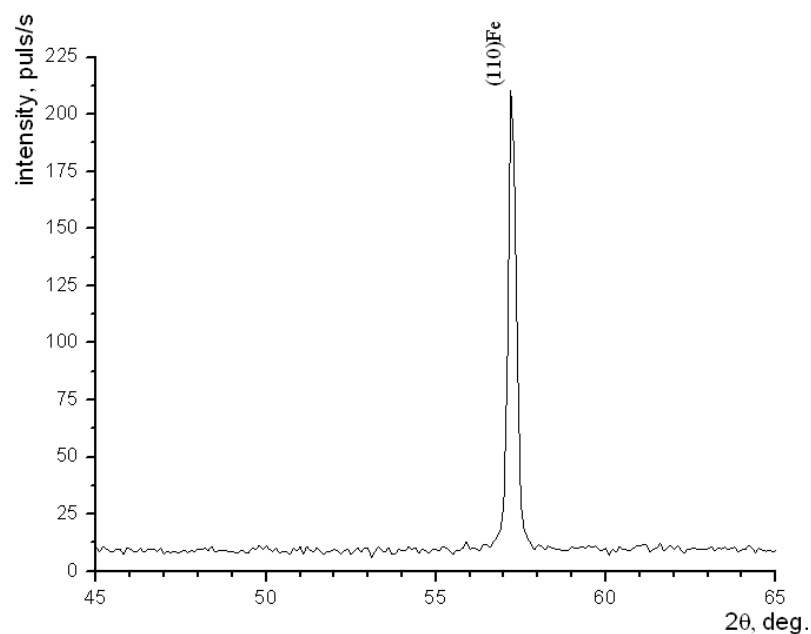


Рис. В15 – Ділянка дифрактограми зразка сталі 45
(режим 3, 395 мм від торця)

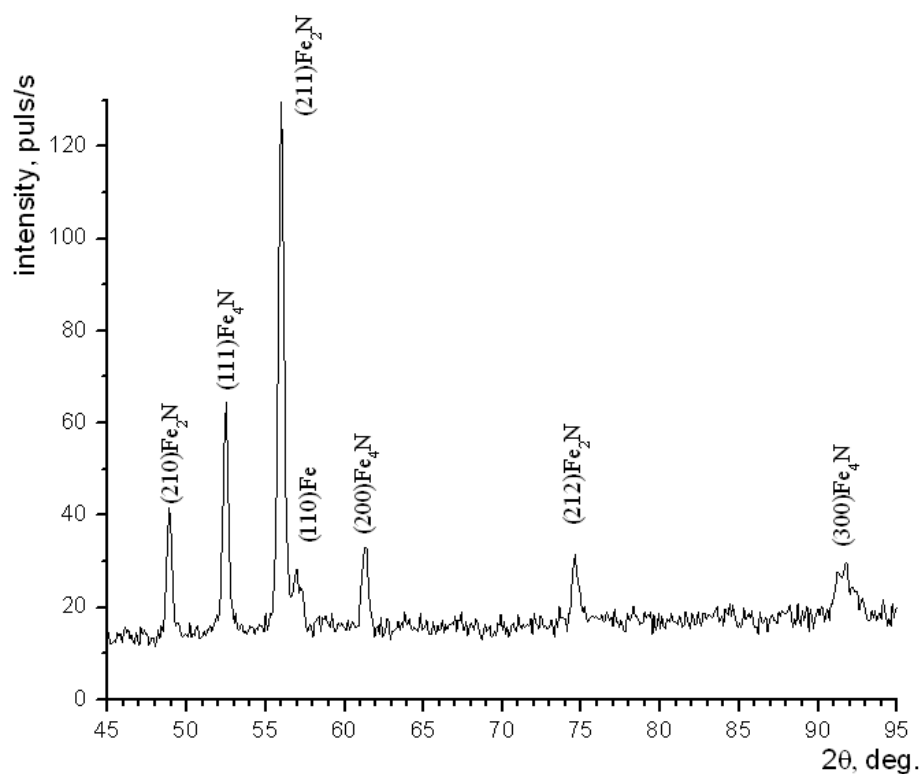


Рис. В16 – Ділянка дифрактограми зразка сталі 40Х
(режим 3, 10 мм від торця)

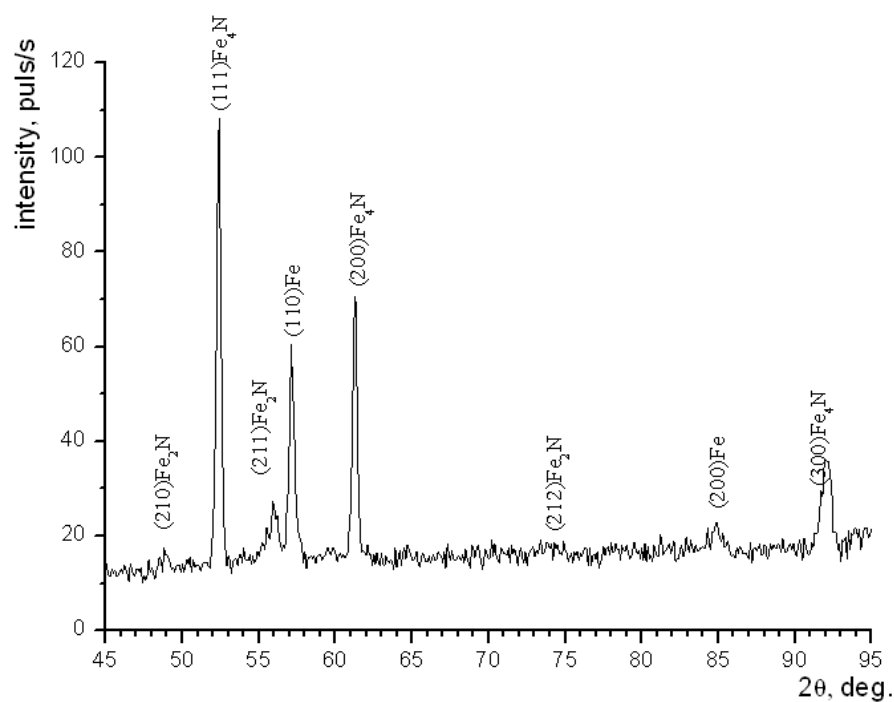


Рис. В17 – Ділянка дифрактограми зразка сталі 40Х
(режим 3, 200 мм від торця)

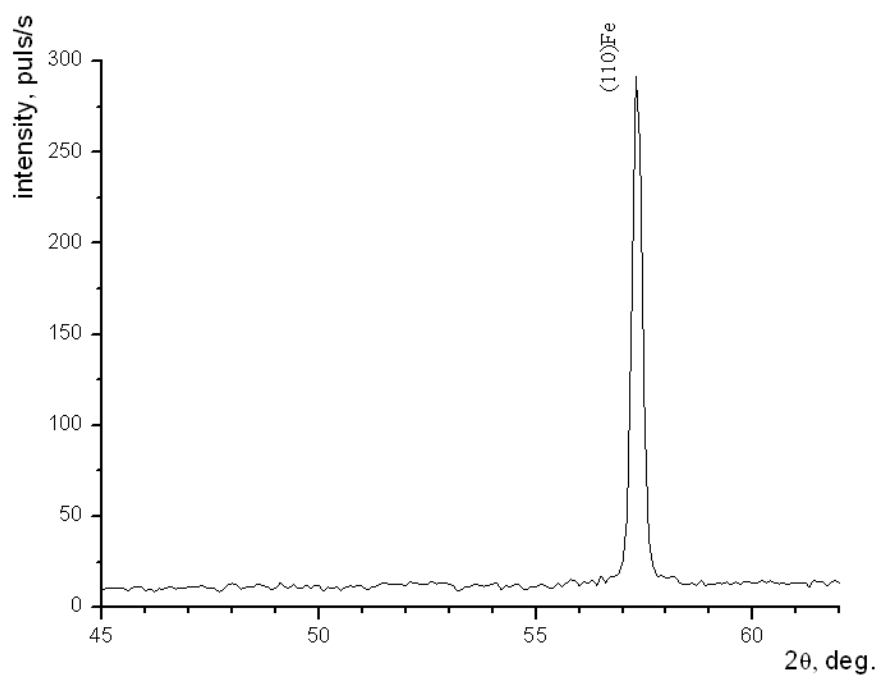


Рис. В18 – Ділянка дифрактограми зразка сталі 40Х
(режим 3, 395 мм від торця)

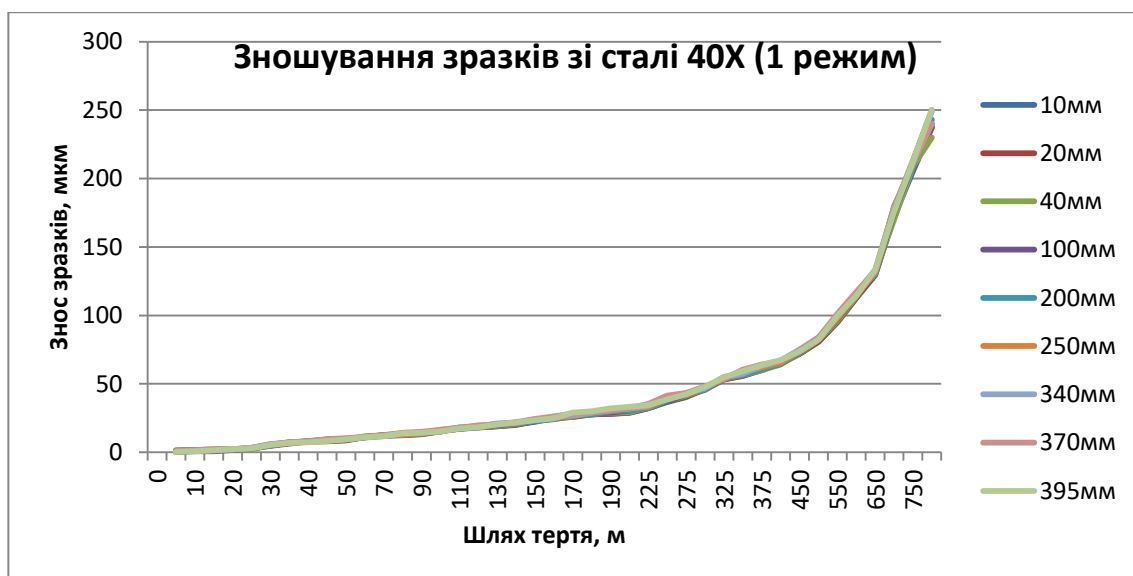


Рис. В19 – Зносостійкість зразків із сталі 40Х залежно від висоти їх розміщення від торця труби при азотуванні в ЦКР

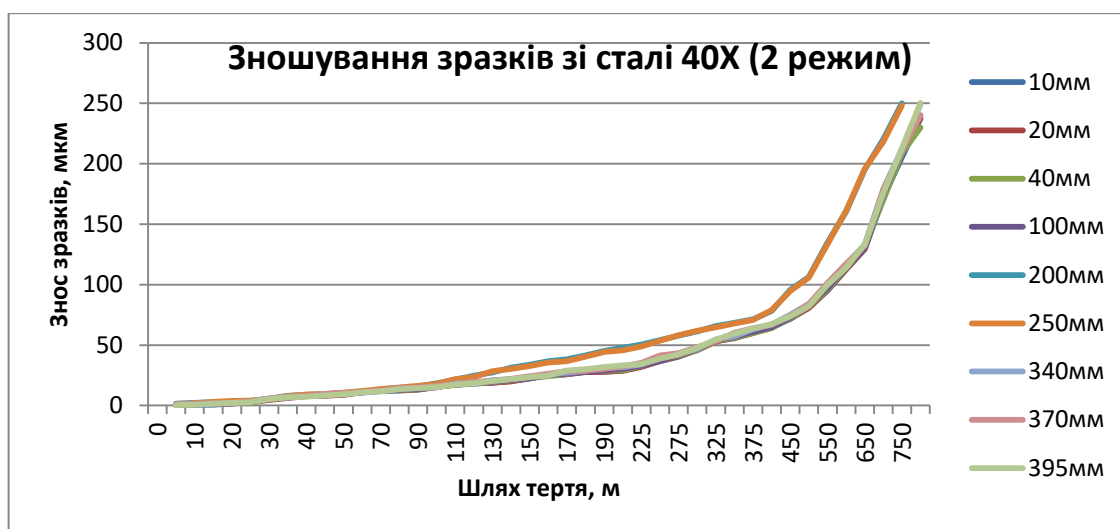


Рис. В20 – Зносостійкість зразків із сталі 40Х залежно від їх розміщення від торця труби при азотуванні з постійним живленням

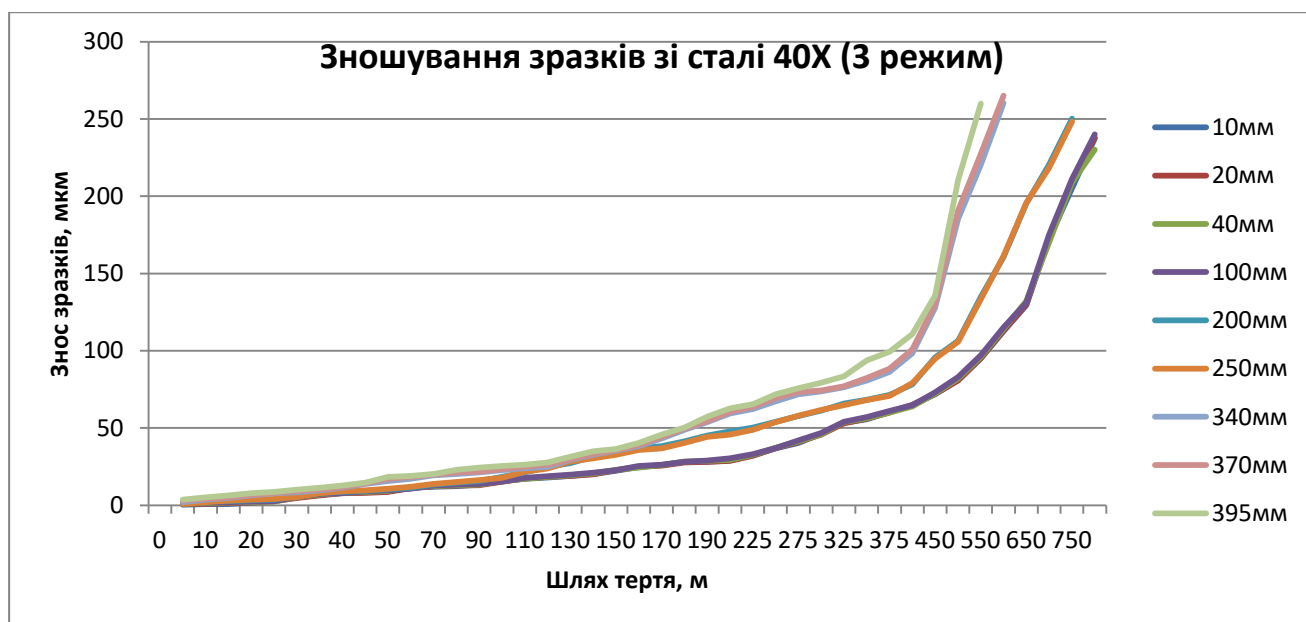


Рис. В21 – Зносостійкість зразків із сталі 40Х залежно від їх розміщення від торця труби при азотуванні з постійним живленням (закритий торець)

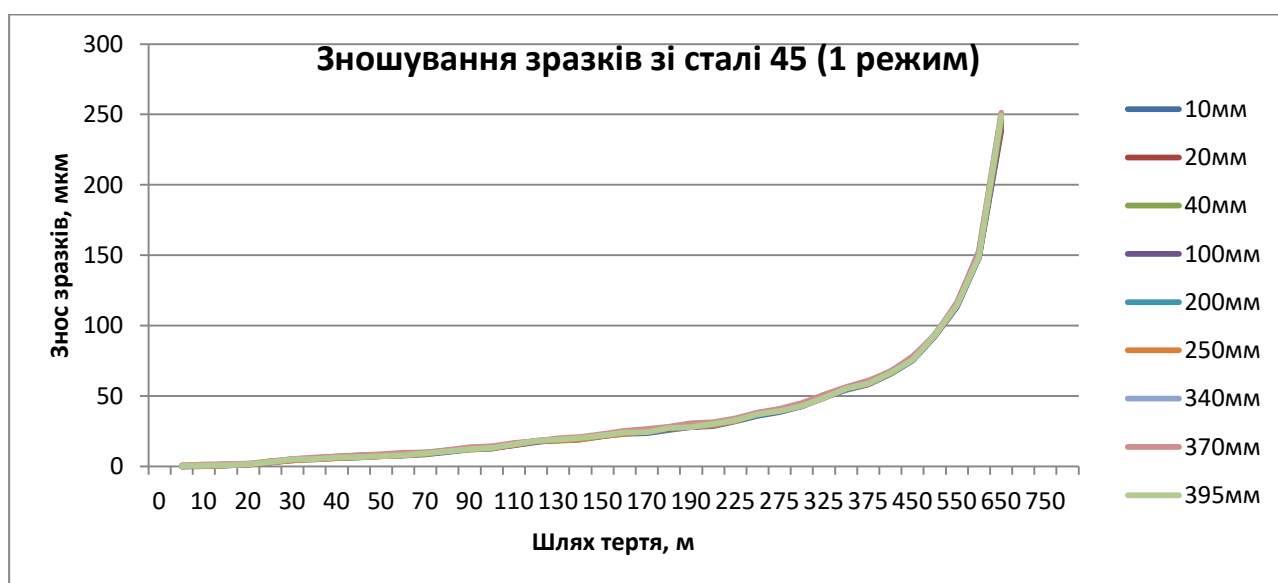


Рис. В22 – Зносостійкість зразків із сталі 45 залежно від висоти їх розміщення від торця труби при азотуванні в ЦКР

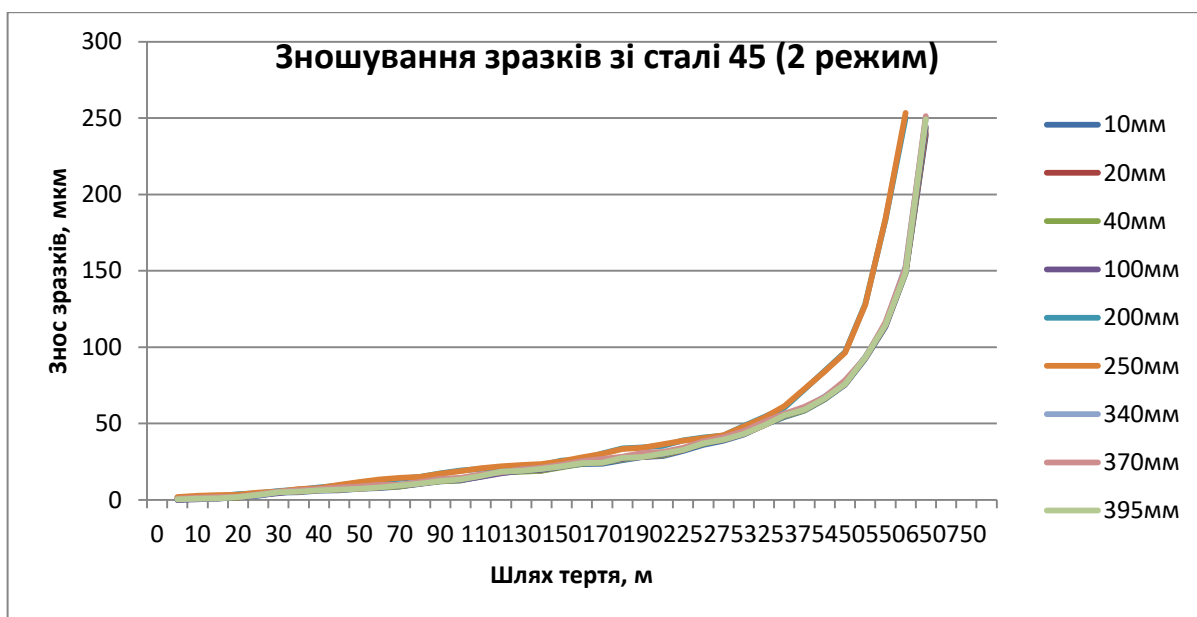


Рис. В23 – Зносостійкість зразків із сталі 45 залежно від їх розміщення від торця труби при азотуванні з постійним живленням

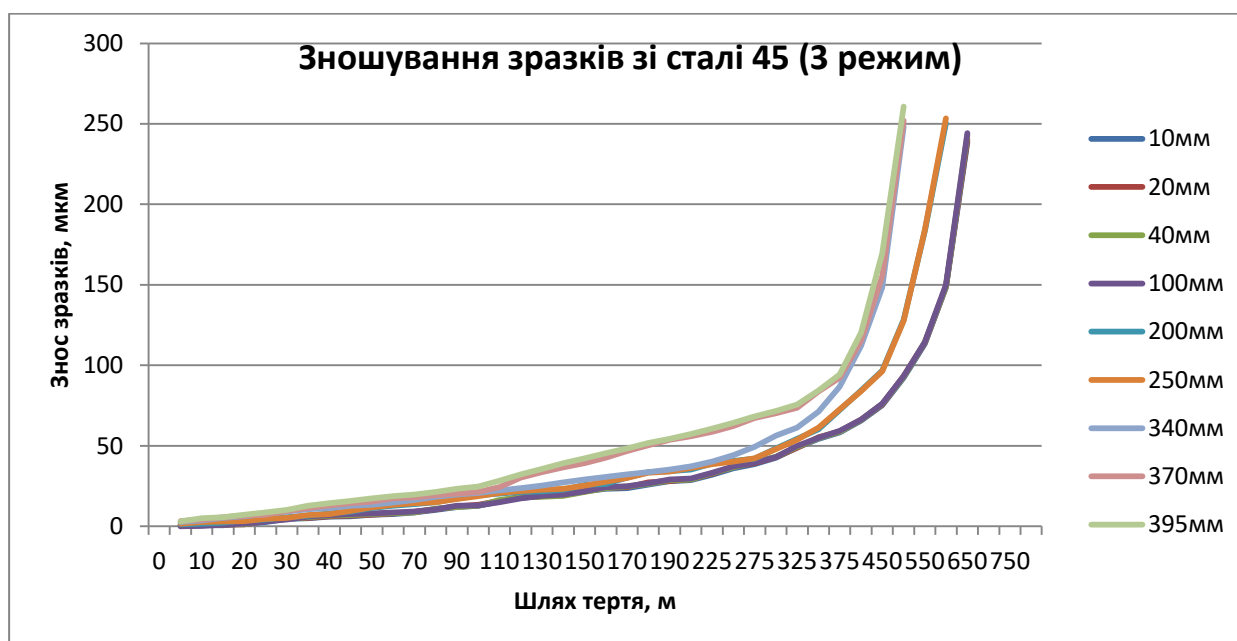


Рис. В24 – Зносостійкість зразків із сталі 45 залежно від їх розміщення від торця труби при азотуванні з постійним живленням (закритий торець)

Визначення параметрів режиму азотування за комбінацією відносних енергетичних факторів

Режими азотування (колонка 0 - номер режиму; 1 - тиск 2 - напруга; 3 - густина струму);
твердість поверхні (4 - сталь 45; 5 - 40X; 6 - 38X2MЮА); 7 - ВЕФ розпорошувальної дії;
8 - ВЕФ дифузійної дії; 9, 10, 11 - ВЕФі нітридоутворення сталей 45, 40X, 38X2MЮА відповідно

$$KM1 := \begin{pmatrix} 1 & 0.4 & 1100 & 11 & 563 & 796 & 1041 & 34.73191 & 104.97881 & 0.01027 & 0.01048 & 0.01087 \\ 2 & 0.4 & 820 & 7.2 & 509 & 676 & 1058 & 26.37017 & 73.83184 & 0.01849 & 0.01905 & 0.02006 \\ 3 & 0.4 & 515 & 3.2 & 269 & 412 & 282 & 12.97231 & 37.4839 & 0.04689 & 0.04902 & 0.05268 \\ 4 & 0.8 & 840 & 13.2 & 523 & 647 & 1019 & 20.57869 & 59.74901 & 0.02448 & 0.02532 & 0.02683 \\ 5 & 0.8 & 515 & 7.2 & 383 & 444 & 360 & 9.75368 & 27.2615 & 0.0702 & 0.07366 & 0.07958 \\ 6 & 0.8 & 300 & 2.8 & 442 & 230 & 331 & 5.2983 & 14.12675 & 0.25016 & 0.25525 & 0.27448 \\ 7 & 1.2 & 700 & 15.8 & 594 & 842 & 1098 & 17.96776 & 48.91995 & 0.02849 & 0.02947 & 0.03114 \\ 8 & 1.2 & 515 & 12.8 & 563 & 625 & 641 & 10.92007 & 29.91542 & 0.06238 & 0.06473 & 0.06929 \\ 9 & 1.2 & 300 & 7.2 & 239 & 238 & 263 & 5.21246 & 12.91481 & 0.34025 & 0.34699 & 0.36925 \end{pmatrix}$$

1. Залежність напруги від ВЕФ нітридоутворення та тиску

1.1 Залежність напруги від ВЕФ нітридоутворення

Присвоєння номера робочому елементу: $irs := 6 \quad ics := 11 \quad ics1 := 2 \quad int := 1$

Координати інтерполяції:

$$X_0 := KM1_{irs,ics} \quad X_1 := KM1_{irs+int,ics} \quad X_2 := KM1_{irs+2int,ics}$$

$$Y_0 := KM1_{irs,ics1} \quad Y_1 := KM1_{irs+int,ics1} \quad Y_2 := KM1_{irs+2int,ics1}$$

$$n := \text{rows}(X) \quad k := 2 \quad z := \text{regress}(X, Y, k) \quad \text{fit}(x) := \text{interp}(z, X, Y, x) \quad q := X_0, X_0 + 0.0001 \dots X_2$$

$$n - k - 1 = 0 \quad \text{coeffs} := \text{submatrix}(z, 3, \text{length}(z) - 1, 0, 0)$$

$$F1(q) := \text{coeffs}_0 + \text{coeffs}_1 \cdot q + \text{coeffs}_2 \cdot q^2 \quad \text{coeffs}^T = \begin{pmatrix} 877.37872 & -6.07678 \times 10^3 & 1.22224 \times 10^4 \end{pmatrix}$$

Масив коефіцієнтів a:

$$a := \begin{pmatrix} 1.54132 \times 10^3 & -4.60903 \times 10^4 & 5.0509 \times 10^5 \\ 1.04891 \times 10^3 & -8.33446 \times 10^3 & 2.0424 \times 10^4 \\ 877.37872 & -6.07678 \times 10^3 & 1.22224 \times 10^4 \end{pmatrix}$$

1.2. Залежність коефіцієнтів a від тиску

$nk := 2$ Координати інтерполяції:

$$X_0 := 0.4 \quad X_1 := 0.8 \quad X_2 := 1.2 \quad Y_0 := a_{0,nk} \quad Y_1 := a_{1,nk} \quad Y_2 := a_{2,nk}$$

$$\underline{n} := \text{rows}(X) \quad \underline{k} := 2 \quad \underline{z} := \text{regress}(X, Y, k) \quad \underline{\text{fit}}(x) := \text{interp}(\underline{z}, X, Y, x) \quad q := X_0, X_0 + 0.01 \dots X_2$$

$$n - k - 1 = 0 \quad \text{coeffs} := \text{submatrix}(\underline{z}, 3, \text{length}(\underline{z}) - 1, 0, 0)$$

$$F2(q) := \text{coeffs}_0 + \text{coeffs}_1 \cdot q + \text{coeffs}_2 \cdot q^2 \quad \text{coeffs}^T = \begin{pmatrix} 1.46622 \times 10^6 & -2.99841 \times 10^6 & 1.48895 \times 10^6 \end{pmatrix}$$

Масив коефіцієнтів b :

$$b := \begin{pmatrix} 2.35461 \times 10^3 & -2.43432 \times 10^3 & 1.00275 \times 10^3 \\ -1.19344 \times 10^5 & 2.27508 \times 10^5 & -1.10932 \times 10^5 \\ 1.46622 \times 10^6 & -2.99841 \times 10^6 & 1.48895 \times 10^6 \end{pmatrix}$$

Присвоєння значень коефіцієнтам:

$$k1 := b_{0,0} \quad k2 := b_{0,1} \quad k3 := b_{0,2} \quad k4 := b_{1,0} \quad k5 := b_{1,1} \quad k6 := b_{1,2} \quad k7 := b_{2,0} \quad k8 := b_{2,1} \quad k9 := b_{2,2}$$

2. Залежність ВЕФ дифузійної дії від напруги та тиску

2.1. Залежність ВЕФ дифузійної дії від напруги

$$ir := 0 \quad ic := 2 \quad ic1 := 8$$

$$\text{Координати інтерполяції:} \quad X_0 := KM1_{ir+2int,ic} \quad X_1 := KM1_{ir+int,ic} \quad X_2 := KM1_{ir,ic}$$

$$Y_0 := KM1_{ir+2int,ic1} \quad Y_1 := KM1_{ir+int,ic1} \quad Y_2 := KM1_{ir,ic1}$$

$$n := \text{rows}(X) \quad k := 2 \quad z := \text{regress}(X, Y, k) \quad \text{fit}(x) := \text{interp}(z, X, Y, x) \quad q := X_0, X_0 + 0.01 \dots X_2$$

$$n - k - 1 = 0 \quad \text{coeffs} := \text{submatrix}(z, 3, \text{length}(z) - 1, 0, 0)$$

$$F3(q) := \text{coeffs}_0 + \text{coeffs}_1 \cdot q + \text{coeffs}_2 \cdot q^2 \quad \text{coeffs}^T = \begin{pmatrix} -29.61817 & 0.13728 & -1.35631 \times 10^{-5} \end{pmatrix}$$

Масив коефіцієнтів am :

$$am := \begin{pmatrix} -29.61817 & 0.13728 & -1.35631 \times 10^{-5} \\ 6.92025 & 2.42739 \times 10^{-3} & 7.19809 \times 10^{-5} \\ -1.67039 & 0.03088 & 5.91365 \times 10^{-5} \end{pmatrix}$$

2.2. Залежність коефіцієнтів am від тиску

$$mk := 2$$

$$\text{Координати інтерполяції:} \quad X_0 := 0.4 \quad X_1 := 0.8 \quad X_2 := 1.2 \quad Y_0 := am_{0,mk} \quad Y_1 := am_{1,mk} \quad Y_2 := am_{2,mk}$$

$$n := \text{rows}(X) \quad k := 2 \quad z := \text{regress}(X, Y, k) \quad \text{fit}(x) := \text{interp}(z, X, Y, x) \quad q := X_0, X_0 + 0.01 \dots X_2$$

$$n - k - 1 = 0 \quad \text{coeffs} := \text{submatrix}(z, 3, \text{length}(z) - 1, 0, 0)$$

$$F4(q) := \text{coeffs}_0 + \text{coeffs}_1 \cdot q + \text{coeffs}_2 \cdot q^2 \quad \text{coeffs}^T = \begin{pmatrix} -1.97496 \times 10^{-4} & 5.82817 \times 10^{-4} & -3.07464 \times 10^{-4} \end{pmatrix}$$

Масив коефіцієнтів bm :

$$bm := \begin{pmatrix} -111.28565 & 260.58003 & -141.02831 \\ 0.43544 & -0.94953 & 0.51033 \\ -1.97496 \times 10^{-4} & 5.82817 \times 10^{-4} & -3.07464 \times 10^{-4} \end{pmatrix}$$

Присвоєння значень коефіцієнтам:

$$m1 := bm_{0,0} \quad m2 := bm_{0,1} \quad m3 := bm_{0,2} \quad m4 := bm_{1,0}$$

$$m5 := bm_{1,1} \quad m6 := bm_{1,2} \quad m7 := bm_{2,0} \quad m8 := bm_{2,1} \quad m9 := bm_{2,2}$$

Вихідні дані: ВЕФ нітридоутворення $FN := 0.013$
 ВЕФ дифузійної дії $FDx := 60$

3. Визначення координат інтерполяції

$p1 := 0.4 \quad p2 := 0.8 \quad p3 := 1.2$

$$U1 := (k1 + k2 \cdot p1 + k3 \cdot p1^2) + (k4 + k5 \cdot p1 + k6 \cdot p1^2) \cdot FN + (k7 + k8 \cdot p1 + k9 \cdot p1^2) \cdot FN^2$$

$$U2 := (k1 + k2 \cdot p2 + k3 \cdot p2^2) + (k4 + k5 \cdot p2 + k6 \cdot p2^2) \cdot FN + (k7 + k8 \cdot p2 + k9 \cdot p2^2) \cdot FN^2$$

$$U3 := (k1 + k2 \cdot p3 + k3 \cdot p3^2) + (k4 + k5 \cdot p3 + k6 \cdot p3^2) \cdot FN + (k7 + k8 \cdot p3 + k9 \cdot p3^2) \cdot FN^2$$

$$FD1 := (m1 + m2 \cdot p1 + m3 \cdot p1^2) + (m4 + m5 \cdot p1 + m6 \cdot p1^2) \cdot U1 + (m7 + m8 \cdot p1 + m9 \cdot p1^2) \cdot U1^2$$

$$FD2 := (m1 + m2 \cdot p2 + m3 \cdot p2^2) + (m4 + m5 \cdot p2 + m6 \cdot p2^2) \cdot U2 + (m7 + m8 \cdot p2 + m9 \cdot p2^2) \cdot U2^2$$

$$FD3 := (m1 + m2 \cdot p3 + m3 \cdot p3^2) + (m4 + m5 \cdot p3 + m6 \cdot p3^2) \cdot U3 + (m7 + m8 \cdot p3 + m9 \cdot p3^2) \cdot U3^2$$

$U1 = 1.028 \times 10^3 \quad U2 = 944.022 \quad U3 = 800.456 \quad FD1 = 97.12 \quad FD2 = 73.359 \quad FD3 = 60.937$

$X_0 := FD3 \quad X_1 := FD2 \quad X_2 := FD1 \quad Y_0 := U3 \quad Y_1 := U2 \quad Y_2 := U1$

4. Визначення напруги:

$n := \text{rows}(X) \quad k := 2 \quad z := \text{regress}(X, Y, k) \quad \text{fit}(x) := \text{interp}(z, X, Y, x) \quad q := X_0, X_0 + 0.001 \dots X_2$
 $n - k - 1 = 0 \text{ coeffs} := \text{submatrix}(z, 3, \text{length}(z) - 1, 0, 0)$

$$F5(q) := \text{coeffs}_0 + \text{coeffs}_1 \cdot q + \text{coeffs}_2 \cdot q^2 \quad \text{coeffs}^T = (-897.65757 \quad 41.41381 \quad -0.22231)$$

$kp1 := \text{coeffs}_{0,0} \quad kp2 := \text{coeffs}_{1,0} \quad kp3 := \text{coeffs}_{2,0}$

Рівняння кривої: $Ux := kp1 + kp2 \cdot FDx + kp3 \cdot FDx^2$

Напруга: $Ux = 786.837$

5. Визначення тиску

$X_0 := U3 \quad X_1 := U2 \quad X_2 := U1 \quad Y_0 := p3 \quad Y_1 := p2 \quad Y_2 := p1$

$n := \text{rows}(X) \quad k := 2 \quad z := \text{regress}(X, Y, k) \quad \text{fit}(x) := \text{interp}(z, X, Y, x) \quad q := X_0, X_0 + 0.001 \dots X_2$
 $n - k - 1 = 0 \text{ coeffs} := \text{submatrix}(z, 3, \text{length}(z) - 1, 0, 0)$

$$F6(q) := \text{coeffs}_0 + \text{coeffs}_1 \cdot q + \text{coeffs}_2 \cdot q^2 \quad \text{coeffs}^T = (-3.24164 \quad 0.01262 \quad -8.82932 \times 10^{-6})$$

$km1 := \text{coeffs}_{0,0} \quad km2 := \text{coeffs}_{1,0} \quad km3 := \text{coeffs}_{2,0}$

Рівняння кривої: $px := km1 + km2 \cdot Ux + km3 \cdot Ux^2$

Тиск: $px = 1.219$

5.1 Визначення коефіцієнтів ak залежності густини струму від напруги

$irk := 6$ $ick := 2$ $ick1 := 3$

Координати інтерполяції: $X_0 := KM1_{irk+2int,ick}$ $X_1 := KM1_{irk+int,ick}$ $X_2 := KM1_{irk,ick}$

$Y_0 := KM1_{irk+2int,ick1}$ $Y_1 := KM1_{irk+int,ick1}$ $Y_2 := KM1_{irk,ick1}$

$n := \text{rows}(X)$ $k := 2$ $z := \text{regress}(X, Y, k)$ $\text{fit}(x) := \text{interp}(z, X, Y, x)$ $q := X_0, X_0 + 0.01 \dots X_2$

$n - k - 1 = 0$ $\text{coeffs} := \text{submatrix}(z, 3, \text{length}(z) - 1, 0, 0)$

$F7(q) := \text{coeffs}_0 + \text{coeffs}_1 \cdot q + \text{coeffs}_2 \cdot q^2$ $\text{coeffs}^T = \begin{pmatrix} -4.41091 & 0.04608 & -2.45757 \times 10^{-5} \end{pmatrix}$

Масив коефіцієнтів ak :

$$ak := \begin{pmatrix} -3.22443 & 0.01207 & 7.8064 \times 10^{-7} \\ -3.91278 & 0.02349 & -3.71033 \times 10^{-6} \\ -4.41091 & 0.04608 & -2.45757 \times 10^{-5} \end{pmatrix}$$

5.2 Визначення коефіцієнтів bk залежності коефіцієнтів ak від тиску

$kn := 2$

Координати інтерполяції:

$X_0 := 0.4$ $X_1 := 0.8$ $X_2 := 1.2$ $Y_0 := ak_{0,kn}$ $Y_1 := ak_{1,kn}$ $Y_2 := ak_{2,kn}$

$n := \text{rows}(X)$ $k := 2$ $z := \text{regress}(X, Y, k)$ $\text{fit}(x) := \text{interp}(z, X, Y, x)$ $q := X_0, X_0 + 0.01 \dots X_2$

$n - k - 1 = 0$ $\text{coeffs} := \text{submatrix}(z, 3, \text{length}(z) - 1, 0, 0)$

$F8(q) := \text{coeffs}_0 + \text{coeffs}_1 \cdot q + \text{coeffs}_2 \cdot q^2$ $\text{coeffs}^T = \begin{pmatrix} -1.11028 \times 10^{-5} & 5.01766 \times 10^{-5} & -5.117 \times 10^{-5} \end{pmatrix}$

Масив коефіцієнтів bk :

$$bk := \begin{pmatrix} -2.34586 & -2.4342 & 0.59444 \\ 0.01182 & -0.01334 & 0.03491 \\ -1.11028 \times 10^{-5} & 5.01766 \times 10^{-5} & -5.117 \times 10^{-5} \end{pmatrix}$$

Присвоєння значень коефіцієнтам:

$r1 := bk_{0,0}$ $r2 := bk_{0,1}$ $r3 := bk_{0,2}$ $r4 := bk_{1,0}$ $r5 := bk_{1,1}$ $r6 := bk_{1,2}$ $r7 := bk_{2,0}$ $r8 := bk_{2,1}$ $r9 := bk_{2,2}$

Вираз для визначення густини струму:

$$jx := (r1 + r2 \cdot px + r3 \cdot px^2) + (r4 + r5 \cdot px + r6 \cdot px^2) \cdot Ux + (r7 + r8 \cdot px + r9 \cdot px^2) \cdot Ux^2$$

Густина струму: $jx = 16.812$

Підсумкове виведення результатів

Вихідні дані: ВЕФ нітридоутворення $FN = 0.013$ ВЕФ дифузійної дії $FDx = 60$

Напруга: $Ux = 786.837$ **Тиск:** $px = 1.219$ **Густина струму:** $jx = 16.812$

Програма розрахунку середньої швидкості електронів

$V_m(U_k, T, p_{tor}, j, z_c) =$

```

typgs ← "N100"
KpN2 ← if(typgs = "N100", 1, if(typgs = "A100", 0, if(typgs = "N25A75", 0.25, if(typgs = "N40A75", 0.5)))
KpAr ← if(typgs = "N100", 0, if(typgs = "A100", 1, if(typgs = "N25A75", 0.75, if(typgs = "N40A75", 0.25)))
KpH2 ← if(typgs = "N100", 0, if(typgs = "A100", 0, if(typgs = "N25A75", 0, if(typgs = "N40A75", 0.25)))
p ← 133.322 · ptor
ks ← if(typgs = "N100", 1, if(typgs = "A100", 1.362, if(typgs = "N25A75", 1.272, if(typgs = "N40A75", 1.172)))
dN2 ←  $\left(2.275 + 7.586 \cdot j^{-0.867}\right) - \left(1.075 + 5.355 \cdot j^{-0.863}\right) \cdot p_{tor}$ 
Ks ← 1.38 - 0.38 · ks
KTN2 ←  $\left(0.302 + 0.514 \cdot j^{-0.419}\right) + \left(0.002013 - 0.001663 \cdot j^{-0.749}\right) \cdot T$ 
KTs ← 0.285 + 0.715 · ks
dW ← dN2 · Ks · KTN2 · KTs
d ← 0.001 · dW
zc ← 50
dz ←  $\frac{d}{z_c}$ 
dAr ←  $2.86 \cdot 10^{-10}$ 
dN2 ←  $3.2 \cdot 10^{-10}$ 
dH2 ←  $2.42 \cdot 10^{-10}$ 
mAr ←  $66.5 \cdot 10^{-27}$ 
mN2 ←  $46.6 \cdot 10^{-27}$ 
mH2 ←  $3.35 \cdot 10^{-27}$ 
q ←  $1.6022 \cdot 10^{-19}$ 
m ←  $9.109 \cdot 10^{-31}$ 
kB ←  $1.381 \cdot 10^{-23}$ 
x ← dz · zci
V ←  $\left[ \frac{\left[ 4 \cdot U_k \cdot \left[ x - \left( \frac{x^2}{2 \cdot d} \right) \right] \cdot q \right]}{d \cdot m} \right]^{0.5}$ 
fix ←  $2 \cdot U_k \cdot \left[ \left( \frac{x}{d} \right) - \left( \frac{x^2}{2 \cdot d^2} \right) \right]$ 
sAr ←  $3.14 \cdot \frac{dAr^2}{4}$ 
sN2 ←  $3.14 \cdot \frac{dN2^2}{4}$ 

```

$$\begin{aligned}
sH2 &\leftarrow 3.14 \cdot \frac{dH2^2}{4} \\
se &\leftarrow KpAr \cdot sAr + KpN2 \cdot sN2 + KpH2 \cdot sH2 \\
Cp &\leftarrow \frac{1}{kB \cdot T} \\
Cn &\leftarrow 7.244 \cdot 10^{22} \\
Pc &\leftarrow x \cdot Cn \cdot p \cdot \frac{se}{T} \\
Po &\leftarrow 1 - Pc \\
Po &\leftarrow \begin{cases} 0 & \text{if } Po < 0 \\ Po & \text{otherwise} \end{cases} \\
D &\leftarrow \left(\frac{4}{\pi} \right)^{0.5} \\
R &\leftarrow 0.5 \cdot D \\
mv &\leftarrow KpAr \cdot mAr + KpN2 \cdot mN2 + KpH2 \cdot mH2 \\
De &\leftarrow m^2 \cdot \frac{V^2}{mv} \\
DV &\leftarrow V - \left[V^2 - \left(2 \cdot \frac{De}{m} \right) \right]^{0.5} \\
Dfi &\leftarrow \frac{De}{q} \\
Dlt &\leftarrow \left[(d-x)^2 + Dfi \frac{d^2}{Uk} \right]^{0.5} - (d-x) \\
Kv &\leftarrow \frac{DV}{V} \\
l &\leftarrow \frac{1}{Cp \cdot p \cdot se} \\
r &\leftarrow 1 \\
Po1 &\leftarrow 1 - (x - 0.5 \cdot Dlt) \cdot Cp \cdot p \cdot se \\
Po1 &\leftarrow \begin{cases} 0 & \text{if } Po1 < 0 \\ Po1 & \text{otherwise} \end{cases} \\
Po2 &\leftarrow 1 - (x + 0.424 \cdot r) \cdot Cp \cdot p \cdot se \\
Po2 &\leftarrow \begin{cases} 0 & \text{if } Po2 < 0 \\ Po2 & \text{otherwise} \end{cases} \\
Po3 &\leftarrow 1 - (x + 0.5 \cdot r) \cdot Cp \cdot p \cdot se \\
Po3 &\leftarrow \begin{cases} 0 & \text{if } Po3 < 0 \\ Po3 & \text{otherwise} \end{cases} \\
s1 &\leftarrow 4 \cdot \pi \cdot (R \cdot r + r^2) \\
s2 &\leftarrow s1 \\
s3 &\leftarrow \pi \cdot R^2 \\
sc1 &\leftarrow p \cdot Cp \cdot s1 \cdot Dlt \cdot se \\
sc2 &\leftarrow p \cdot Cp \cdot s2 \cdot \pi \cdot \frac{r}{4} \cdot se
\end{aligned}$$

$$sc3 \leftarrow p \cdot Cp \cdot s3 \cdot r \cdot se$$

$$Pc1 \leftarrow \frac{sc1}{s1}$$

$$Pc2 \leftarrow \frac{sc2}{s2}$$

$$Pc3 \leftarrow \frac{sc3}{s3}$$

$$y1 \leftarrow \left[R^2 - \frac{[R^2 + (R + 0.5 \cdot r)^2 - r^2]^2}{4 \cdot (R + 0.5 \cdot r)^2} \right]^{0.5}$$

$$Fb \leftarrow 2 \cdot \text{atan} \left(\frac{Dlt}{r} \right)$$

$$FB \leftarrow 2 \cdot \text{asin} \left(\frac{y1}{r} \right)$$

$$Fbb \leftarrow 0.5 \cdot Fb$$

$$Fab \leftarrow 0.5 \cdot FB$$

$$Fv1 \leftarrow \text{atan} \left[\tan(Fbb) \cdot \left(\frac{\tan(Fab)}{\tan(Fbb)} \right)^{0.5} \right]$$

$$TP1 \leftarrow 0.5 \cdot (\pi - Fv1)$$

$$TK1 \leftarrow 0.5 \cdot (\pi + Fv1)$$

$$KT1 \leftarrow 2 \cdot \frac{\left(\cos \left(\frac{TP1}{2} \right) - \cos \left(\frac{TK1}{2} \right) \right)}{TK1 - TP1}$$

$$PBf1 \leftarrow \left(\sin \left(\frac{Fv1}{4} \right) \right)^2$$

$$Fpb \leftarrow \text{acos}(0.424) - \text{atan} \left[\frac{(0.424 \cdot r)}{(Dlt + 0.424 \cdot r)} \right]$$

$$Fe \leftarrow \text{atan} \left[\frac{(0.424 \cdot r)}{(Dlt + 0.424 \cdot r)} \right] + 0.5 \cdot Fpb$$

$$FPB \leftarrow 2 \cdot \text{asin} \left[\frac{\left[R^2 - \frac{[R^2 + (R + 0.424 \cdot r)^2 - r^2 \cdot (\sin(Fe))^2]^2}{2 \cdot (R + 0.424 \cdot r)} \right]^{0.5}}{r} \right]$$

$$Fbpb \leftarrow 0.5 \cdot Fpb$$

$$Fapb \leftarrow 0.5 \cdot FPB$$

$$Fv2 \leftarrow \text{atan} \left[\tan(Fbpb) \cdot \left(\frac{\tan(Fapb)}{\tan(Fbpb)} \right)^{0.5} \right]$$

$$TP2 \leftarrow Fe - 0.5 \cdot Fv2$$

$$TK2 \leftarrow Fe + 0.5 \cdot Fv2$$

$$KT2 \leftarrow 2 \cdot \frac{\left(\cos \left(\frac{TP2}{2} \right) - \cos \left(\frac{TK2}{2} \right) \right)}{TK2 - TP2}$$

$$PBf2 \leftarrow \left(\sin \left(\frac{Fv2}{4} \right) \right)^2$$

```

PB1 ← KT1·PBf1
PB2 ← KT2·PBf2
PB3 ← KT3·PBf3
PV1 ← Po1·Pc1·PB1
PV2 ← Po2·Pc2·PB2
PV3 ← Po3·Pc3·PB3
PB ← 1 − (1 − PV1)·(1 − PV2)·(1 − PV3)
PVx ← 1 − (1 − Po)·(1 − PB)
M ←  $\frac{PV_x}{DV}$ 
v ←  $\frac{V}{10^6}$ 
y ←  $\frac{-1}{24} \cdot v^2 \cdot \frac{\sqrt[3]{16^2}}{\left(\frac{1}{3}\right) \left(\frac{1}{\pi} \cdot \frac{v^4}{M^2}\right)}$ 
a ← −39
b ← −1
W ← root( $x \cdot e^x - y, x, a, b$ )
c ←  $\frac{1}{3} \cdot \left(-6 \cdot \frac{v^2}{W}\right)^{\left(\frac{1}{2}\right)} \cdot 10^6$ 
cm ← 1.128 · c
cm

```

Перша колонка-номер слоя, далі середня швидкість при $p=0,4$ тора і послідовно $j=5,10,15,20$ А/м:2, потім послідовно при тиску погрупно $p=0.8, 1.2$ тора

VN100T873U550 :=

0	0.5931	0.5931	0.5931	0.5931	0.5931	0.5931	0.5931	0.5931	0.5931	0.5931	0.5931	0.5931
1	1.208	1.209	1.209	1.209	1.207	1.207	1.207	1.208	1.207	1.207	1.208	1.208
2	1.693	1.695	1.695	1.696	1.689	1.688	1.69	1.691	1.689	1.69	1.691	1.692
3	2.054	2.058	2.058	2.059	2.047	2.044	2.048	2.05	2.047	2.049	2.051	2.051
4	2.348	2.354	2.355	2.356	2.338	2.336	2.341	2.342	2.34	2.341	2.343	2.334
5	2.599	2.608	2.612	2.614	2.584	2.581	3.588	2.59	2.587	2.588	2.592	2.593
6	2.818	2.83	2.835	2.838	2.796	2.793	3.803	2.806	2.801	2.806	2.808	2.81
7	3.011	3.027	3.034	3.037	2.983	2.978	2.991	2.996	2.989	2.996	2.999	3
8	3.183	3.204	3.212	3.216	3.147	3.141	3.158	3.164	3.155	3.164	3.168	3.17
9	3.338	3.364	3.374	3.379	3.292	3.284	3.306	3.313	3.302	3.314	3.318	3.321
10	3.477	3.509	3.521	3.527	3.421	3.41	3.437	3.446	3.432	3.447	3.453	3.456
11	3.602	3.64	3.655	3.662	3.533	3.52	3.554	3.565	3.548	3.565	3.573	3.577
12	3.714	3.76	3.777	3.786	3.631	3.615	3.656	3.67	3.649	3.67	3.679	3.684
13	3.815	3.868	3.888	3.899	3.713	3.692	3.745	3.761	3.735	3.761	3.772	3.778
14	3.904	3.966	3.99	4.002	3.778	3.752	3.818	3.839	3.807	3.839	3.853	3.86
15	3.982	4.055	4.082	4.096	3.825	3.791	3.877	3.902	3.862	3.903	3.919	3.929
16	4.048	4.135	4.166	4.182	3.849	3.8	3.918	3.95	3.898	3.951	3.972	3.983
17	4.103	4.206	4.241	4.26	3.839	3.761	3.936	3.98	3.909	3.981	4.008	4.022
18	4.144	4.267	4.309	4.33	3.76	3.573	3.922	3.985	3.882	3.986	4.022	4.042
19	4.171	4.32	4.368	4.392	0	0	3.845	3.95	3.762	3.952	4.007	4.034
20	4.178	4.362	4.418	4.447	0	0	3.281	3.823	0	3.827	3.935	3.981
21	4.158	4.394	4.461	4.493	0	0	0	0	0	0	3.615	3.795
22	4.09	4.415	4.494	4.532	0	0	0	0	0	0	0	0
23	3.869	4.421	4.517	4.561	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	4.408	4.528	4.582	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0	4.368	4.526	4.591	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0	4.276	4.505	4.587	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	3.998	4.457	4.567	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	4.356	4.522	0	0	0	0	0	0	0	0
29	0	0	4.058	4.432	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	4.214	0	0	0	0	0	0	0	0
50	0.839	0.839	0.839	0.839	0.839	0.839	0.839	0.839	0.839	0.839	0.839	0.839

З прикладу розрахунку, наведеного в таблиці, чітко відслідковується наявність екстремальної залежності між положенням максимального значення швидкості електронів та його величиною від тиску газового середовища. Нульові значення швидкості відповідають тій зоні, де розрахунок за концепцією базової швидкості неможливий, оскільки електрони до цієї координати поля без сутічок долетіти не можуть. В такому випадку швидкість електронів для подібних координат розраховується екстраполяцією розподілу, встановленого для конкретних умов розряду стосовно значень швидкості в попередніх точках, де це можливо.

Примітка. Для зручності друку швидкість зменшена 10^6 раз.

ДОДАТОК Ж

Оптимізація процесу азотування у тліючому розряді за критерієм зносостійкості (сталь 38Х2МЮА)

Вихідні дані

Перший рядок - довжина ділянки шляху x , на якій фіксувався знос h

другий - порядковий номер цього значення

$$h := \begin{pmatrix} 0 & 5 & 10 & 15 & 20 & 25 & 30 & 35 & 40 & 45 & 50 & 60 & 70 & 80 & 90 & 100 & 110 & 120 & 130 & 140 & 150 & 160 \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 & 15 & 16 & 17 & 18 & 19 & 20 & 21 \end{pmatrix}$$

Результати вимірювань: рядок 1 - середня величина лінійного зносу для трьох азотованих при одному режимі зразків h ; рядок 2 - ділянка шляху x , на якій він фіксувався

$$R1 := \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 2.3 & 4 & 4.7 & 6.3 & 7.3 & 8 & 9.7 & 11 & 11 & 13 & 13.3 & 14 & 15.7 & 16 & 17.3 & 17.7 & 18 \\ 0 & 5 & 10 & 15 & 20 & 25 & 30 & 35 & 40 & 45 & 50 & 60 & 70 & 80 & 90 & 100 & 110 & 120 & 130 & 140 & 15 \end{pmatrix}$$

$$R2 := \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.7 & 1.3 & 2 & 3.7 & 3.7 & 4.1 & 7 & 7.3 & 8 & 9 & 12 & 12.3 & 14 & 14.7 & 15.3 & 16 & 16 & 17 \\ 0 & 5 & 10 & 15 & 20 & 25 & 30 & 35 & 40 & 45 & 50 & 60 & 70 & 80 & 90 & 100 & 110 & 120 & 130 & 140 & 15 \end{pmatrix}$$

$$R3 := \begin{pmatrix} 0 & 13.3 & 24.7 & 30.3 & 37 & 39 & 42 & 43.3 & 43.3 & 43.7 & 44.7 & 46 & 47.3 & 50 & 51.7 & 54 & 55.7 & 57 & 58 \\ 0 & 5 & 10 & 15 & 20 & 25 & 30 & 35 & 40 & 45 & 50 & 60 & 70 & 80 & 90 & 100 & 110 & 120 & 1 \end{pmatrix}$$

$$R4 := \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.7 & 1.7 & 2 & 3 & 4 & 5.3 & 6.3 & 7.3 & 9 & 9.3 & 11 & 13 & 13 & 13 & 14 & 14.3 & 14.3 & 14.7 \\ 0 & 5 & 10 & 15 & 20 & 25 & 30 & 35 & 40 & 45 & 50 & 60 & 70 & 80 & 90 & 100 & 110 & 120 & 130 & 140 & 150 \end{pmatrix}$$

$$R5 := \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0.7 & 3.3 & 4 & 6.7 & 10 & 10.7 & 12 & 13 & 13.3 & 14.7 & 15 & 16.3 & 18 & 18.7 & 19.3 & 20 & 20.3 & 21 \\ 0 & 5 & 10 & 15 & 20 & 25 & 30 & 35 & 40 & 45 & 50 & 60 & 70 & 80 & 90 & 100 & 110 & 120 & 130 & 140 \end{pmatrix}$$

$$R6 := \begin{pmatrix} 0 & 5 & 13.3 & 19.3 & 21 & 21.7 & 22.3 & 24 & 24.3 & 24.3 & 25 & 26 & 28 & 28.7 & 29 & 30 & 30.7 & 32.3 & 35 & 36 \\ 0 & 5 & 10 & 15 & 20 & 25 & 30 & 35 & 40 & 45 & 50 & 60 & 70 & 80 & 90 & 100 & 110 & 120 & 130 \end{pmatrix}$$

$$R7 := \begin{pmatrix} 0 & 4.3 & 27.7 & 39.7 & 43 & 44.7 & 45.3 & 46.3 & 48 & 48.7 & 50 & 51 & 52.3 & 55 & 57.3 & 61 & 62.7 & 65.3 & 65 \\ 0 & 5 & 10 & 15 & 20 & 25 & 30 & 35 & 40 & 45 & 50 & 60 & 70 & 80 & 90 & 100 & 110 & 120 & 13 \end{pmatrix}$$

$$R8 := \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0.3 & 2.3 & 3.3 & 4 & 4.3 & 5 & 5.3 & 5.3 & 5.7 & 5.7 & 6 & 6.3 & 7 & 7.3 & 7.3 & 7.7 & 8 & 8 & 8.7 \\ 0 & 5 & 10 & 15 & 20 & 25 & 30 & 35 & 40 & 45 & 50 & 60 & 70 & 80 & 90 & 100 & 110 & 120 & 130 & 140 & 150 \end{pmatrix}$$

$$R9 := \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0.7 & 2.7 & 3.3 & 4.7 & 6.7 & 10 & 10.7 & 12 & 13 & 13.3 & 13.7 & 14.7 & 16.3 & 16.3 & 18 & 18.3 & 18.7 & 19 \\ 0 & 5 & 10 & 15 & 20 & 25 & 30 & 35 & 40 & 45 & 50 & 60 & 70 & 80 & 90 & 100 & 110 & 120 & 130 \end{pmatrix}$$

$$R10 := \begin{pmatrix} 0 & 4.7 & 25.3 & 32.7 & 39 & 41.3 & 44.7 & 46 & 47 & 48.3 & 49 & 52.3 & 57 & 60.7 & 64 & 68 & 73.3 & 76.3 & 79 \\ 0 & 5 & 10 & 15 & 20 & 25 & 30 & 35 & 40 & 45 & 50 & 60 & 70 & 80 & 90 & 100 & 110 & 120 & 130 \end{pmatrix}$$

Підбір апроксимуючої функції

Вихідне рівняння апроксимуючої функції $h = a \cdot (b \cdot x - c)^3 + d$

Спрощений вигляд апроксимуючої функції і часткові похідні за її змінними параметрами в послідовності зліва направо

$$\begin{array}{ll} a \cdot (x - b)^3 + c & u_0 \cdot (z - u_1)^3 + u_2 \\ -(b - x)^3 & -(u_1 - z)^3 \\ -3 \cdot a \cdot (b - x)^2 & -3 \cdot u_0 \cdot (u_1 - z)^2 \\ 1 & \end{array}$$

Кількість значень зносу для кожного режиму, тобто кількість стовпців у вихідних масивах

$$st := \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 \\ 52 & 49 & 31 & 55 & 51 & 36 & 31 & 52 & 50 & 27 \end{pmatrix}$$

k - номер режиму

$$k := 4 \quad n := st_{1,k-1} \quad i := 0..n-1 \quad x_i := h_{0,i} \quad y_i := R_{40,i}$$

Вихідна функція та її часткові похідні

$$F(z,u) := \begin{bmatrix} u_0 \cdot (z - u_1)^3 + u_2 \\ -(u_1 - z)^3 \\ -3 \cdot u_0 \cdot (u_1 - z)^2 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{Область розв'язків} \quad vg := \begin{pmatrix} 3.5 \cdot 10^{-7} \\ 750 \\ 27 \end{pmatrix}$$

Кореляційне співвідношення вихідних даних

$$\text{corr}(x,y) = 0.917$$

Коефіцієнти рівняння

$$P := \text{genfit}(x,y,vg,F)$$

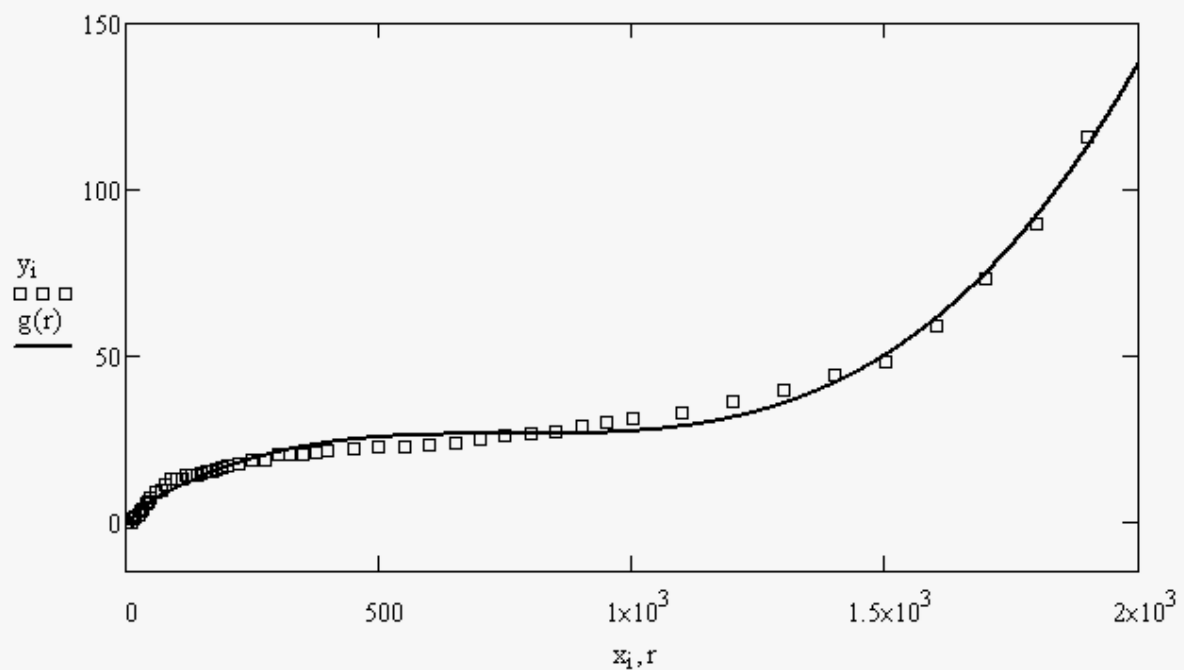
Графік апроксимуючої функції

$$r := 0.00001, 0.1..2200 \quad g(r) := F(r,P)_0$$

$$P = \begin{pmatrix} 5.759 \times 10^{-8} \\ 754.279 \\ 26.377 \end{pmatrix}$$

Відображення всіх точок

$$i := 0..rows(x) - 1$$



Масив коефіцієнтів рівняння апроксимуючої функції (колонка 0 - коефіцієнт а, 1 - b, 2 -c)

$$KM1 := \begin{pmatrix} 1.114 \times 10^{-7} & 652.69 & 31.935 \\ 1.747 \times 10^{-7} & 562.75 & 29.819 \\ 1.016 \times 10^{-7} & 1.027 \times 10^3 & 134.02 \\ 5.759 \times 10^{-8} & 754.279 & 26.377 \\ 1.54 \times 10^{-7} & 591.84 & 35.003 \\ 1.703 \times 10^{-7} & -396.746 & 6.89 \\ 2.085 \times 10^{-9} & 7.086 \times 10^3 & 769.444 \\ 9.945 \times 10^{-8} & 528.352 & 15.249 \\ 1.319 \times 10^{-7} & 622.524 & 33.956 \\ 8.678 \times 10^{-7} & 502.163 & 127.361 \end{pmatrix}$$

Присвоєння значення ресурсу вузла тертя
(довжина ділянки шляху тертя, мкм):

$$dl := 1000$$

Визначення зносу у вказаній точці шляху тертя:

$$mn := 0..9 \quad ax_{mn} := KM1_{mn,0} \quad bx_{mn} := KM1_{mn,1} \quad cx_{mn} := KM1_{mn,2}$$

$$hx_{mn} := ax_{mn} \cdot (dl - bx_{mn})^3 + cx_{mn}$$

	0
0	36.602
1	44.423
2	134.018
3	27.231
4	45.475
5	470.942
6	299.44
7	25.683
8	41.05
9	234.434

$hx_{mn} =$

Спрощена матриця вихідних даних:
(стовпчик 0 - ВЕФ дифузійної дії, 1 - ВЕФ утворення нітрідів,
2 - знос у заданій точці шляху тертя;
рядки 0-5 відповідають режимам 1, 2, 4, 5, 8, 9)

$$KM2 := \begin{pmatrix} 104.97881 & 0.01048 & 37 \\ 73.83184 & 0.01905 & 44 \\ 59.74901 & 0.02532 & 27 \\ 44.75965 & 0.03751 & 45 \\ 48.91995 & 0.02947 & 26 \\ 29.91542 & 0.06473 & 41 \end{pmatrix}$$

Залежність ВЕФ утворення нітрідів від ВЕФ дифузійної дії

Масиви коефіцієнтів:

для p1: $\left(0.11102 \quad -1.89092 \times 10^{-3} \quad 8.92489 \times 10^{-6} \right)$

для p2: $\left(0.59565 \quad -0.02583 \quad 2.89657 \times 10^{-4} \right)$

для p3: $\left(0.76491 \quad -0.03624 \quad 4.3429 \times 10^{-4} \right)$

Залежність ВЕФ дифузійної дії від зносу у заданій точці шляху тертя

Присвоєння номера робочому елементу:

$ir := 0$ $ic := 2$ $ic1 := 0$ $int := 1$

Координати інтерполяції:

$X_0 := KM2_{ir,ic}$ $X_1 := KM2_{ir+int,ic}$

$Y_0 := KM2_{ir,ic1}$ $Y_1 := KM2_{ir+int,ic1}$

$n := \text{rows}(X)$ $k := 1$ $z := \text{regress}(X, Y, k)$ $\text{fit}(x) := \text{interp}(z, X, Y, x)$

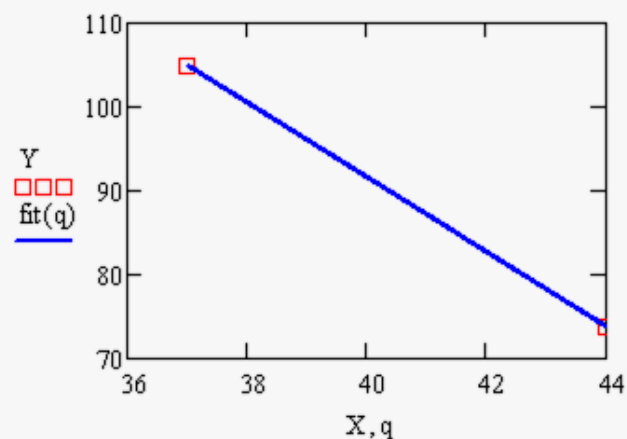
$n - k - 1 = 0$ $\text{coeffs} := \text{submatrix}(z, 3, \text{length}(z) - 1, 0, 0)$ $q := X_0, X_0 + 0.01 \dots X_1$

$F2(q) := \text{coeffs}_0 + \text{coeffs}_1 \cdot q$

$\text{coeffs}^T = (269.61279 \quad -4.44957)$

$$R := \frac{\left[\sum (\text{fit}(X) - \text{mean}(Y))^2 \right]^{0.5}}{\left[\sum (Y - \text{mean}(Y))^2 \right]^{0.5}}$$

$R = 1$



Масиви коефіцієнтів:

для p1: (269.61279 -4.44957)

для p2: (82.23305 -0.83274)

для p3: (81.86114 -1.26697)

Присвоєння значення гранично допустимій величині зносу: $hx := 40$ мкм

Визначення координат інтерполяції для встановлення залежності $VEFn = f(VEFd)$ при заданих значеннях d та hx

$VEFd1 := 269.61279 - 4.44957 \cdot hx$ $VEFd1 = 91.63$

$VEFd2 := 82.23305 - 0.83274 \cdot hx$ $VEFd2 = 48.923$

$VEFd3 := 81.86114 - 1.26697 \cdot hx$ $VEFd3 = 31.182$

$VEFn1 := 0.11102 - 1.89092 \times 10^{-3} \cdot VEFd1 + 8.92489 \times 10^{-6} \cdot VEFd1^2$ $VEFn1 = 0.013$

$VEFn2 := 0.59565 - 0.02583 \cdot VEFd2 + 2.89657 \times 10^{-4} \cdot VEFd2^2$ $VEFn2 = 0.025$

$VEFn3 := 0.76491 - 0.03624 \cdot VEFd3 + 4.3429 \times 10^{-4} \cdot VEFd3^2$ $VEFn3 = 0.057$

$X_0 := VEFd3$ $X_1 := VEFd2$ $X_2 := VEFd1$ $Y_0 := VEFn3$ $Y_1 := VEFn2$ $Y_2 := VEFn1$

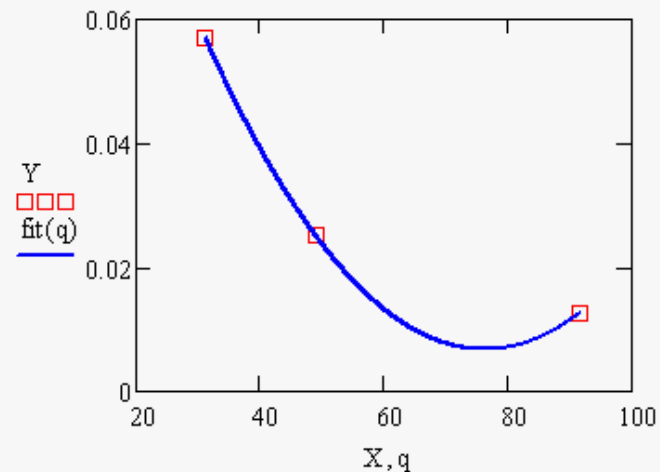
Залежність ВЕФ утворення нітридів від ВЕФ дифузійної дії при заданих значеннях ресурсу та гранично допустимого зносу

```
n := rows(X)  k := 2  z := regress(X, Y, k)  fit(x) := interp(z, X, Y, x)  q := X0, X0 + 0.01 .. X2
n - k - 1 = 0  coeffs := submatrix(z, 3, length(z) - 1, 0, 0)  F2(q) := coeffs0 + coeffs1 · q + coeffs2 · q2
```

$$\text{coeffs}^T = \begin{pmatrix} 0.15112 & -3.78928 \times 10^{-3} & 2.48666 \times 10^{-5} \end{pmatrix}$$

$$R := \left[\frac{\sum (\text{fit}(X) - \text{mean}(Y))^2}{\sum (Y - \text{mean}(Y))^2} \right]^{0.5}$$

$$R = 1$$



```
kp1 := coeffs0,0  kp2 := coeffs1,0  kp3 := coeffs2,0
```

Присвоєння значення ВЕФ дифузійної дії $\text{VEFd} := 60$

```
 $\text{VEFn} := \text{kp1} + \text{kp2} \cdot \text{VEFd} + \text{kp3} \cdot \text{VEFd}^2$ 
```

Виведення результату: $\text{VEFn} = 0.013$

За знайденою комбінацією ВЕФ визначаються параметри режиму АТР, для чого може бути використаний математичний апарат, наведений у додатку Б.

Так, наприклад, для ВЕФ дифузійної дії $\text{VEFd} = 60$ ВЕФ утворення нітридів становить $\text{VEFn} = 0.013$. Вказаній комбінації ВЕФ відповідає наступна комбінація режимів:

температура: $T = 560$ С; склад газової суміші: N80Ar20; напруга: $U = 787$ В;

тиск: $p = 1,22$ торр, густина струму $j = 16,8$ А/м².

Отже, для зразка, азотованого за цими параметрами режиму, величина зносу наприкінці шляху тертя довжиною $l = 1000$ м становитиме $h = 40$ мкм

(за умов тертя, що відповідають умовам проведення експериментів, покладених в основу формування моделі)

Акти впровадження

Затверджую

Директор

ПрАТ «Хмельницька маслосирбаза»

Сакін С.О.

26.09.2019

АКТ

Про промислове випробовування корпусів кришок і робочих коліс на насосах Г2-ОПД, Я9-ОНЦ-1 і Я9-ОНЦ-5, що зміцнювались азотуванням за технологіями розробленими на кафедрі машинознавства ХНУ.

Ми, що нижче підписались, представники Хмельницького національного університету: професор Стечишин М.С., викладач В.В. Люховець, здобувач кафедри ГМА Стечишина Н.М. та ПрАТ «Хмельницька маслосирбаза» : головний інженер Гусев Є.М. склали даний акт в тому, що з березня 2018 року по вересень 2019 року на ПрАТ «Хмельницька маслосирбаза» виконувались роботи по дослідженню зносостійкості, надійності, довговічності роботи корпусів, кришок і робочих коліс насосів.

Результати виробничих випробувань робочих коліс і кришок насосів зміцнених азотуванням в без водневому тліючому розряді (БАТР) та композиційними електролітичними покриттями на основі нікелевої матриці зміцненої частинками карбиду кремнію (SiCнано і SiC5) при перекачці соляних розчинів, сироватки показали, що термін їх служби збільшується приблизно в 4 рази, а при перекачці води в 6 разів.

Представники ПрАТ

«Хмельницька маслосирбаза»

Гл. Інженер Гусев Є.М.

Гл. Механік Захаревич І.В.

Представники університету

д.т.н. проф. Стечишин М.С.

викладач Люховець В.В.

здобувач Стечишина Н.М.

**ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ НАУКОВО-
ВИРОБНИЧЕ ПІДПРИЄМСТВО
"ЗАВОД БУРОВОГО ОБЛАДНАННЯ"**

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор ТОВ НВП

«Завод бурового обладнання»

_____ А.В. Новікова

«4» «_____» 2019р.

АКТ



**проведення промислових випробувань адаптерів плаваючого патрона для
бурової установки зміцненого азотуванням в тліючому розряді з
нестационарним живленням**

Даний акт складено в тому, що у період з 02.05.2019 р по 30.08.2019 р на ТОВ НВП "Завод бурового обладнання" за участю: інженера з механізації і автоматизації виробничих процесів Місяка А. В., конструктора Васильєва В. С. і представників Хмельницького національного університету: д.т.н., проф. Стечишина М. С, завідуючого Подільським науковим фізико-технологічним центром к.т.н., доц. Лук'янюка М. В., зав. лаб. ПНФТЦ Люховець В. В. було проведено випродування адаптерів плаваючого патрона для бурової установки, зміцненого азотуванням в тліючому розряді з нестационарним живленням.

Промислові випробування показали, що зміцнення вказаного обладнання безводневим азотуванням в циклічно-комутованому розряді дозволяє підвищити його зносостійкість у 1,5 - 1,7 разів (особливо внутрішню поверхню різьби адаптерів) порівняно з адаптерами, зміцненими азотуванням в тліючому розряді при звичайних умовах (постійному струмі).

Враховуючи, що розроблена в дисертаційній роботі Люховця В. В. технологія дозволяє отримати значний економічний ефект, доцільно розглянути питання про необхідність її впровадження з метою підвищення зносостійкості робочих органів бурового обладнання.

Представники Хмельницького
національного університету

_____ Стечишин М. С.
_____ Лук'янюк М. В.
_____ Люховець В. В.

Представники ТОВ НВП

"Завод бурового обладнання"

_____ Місяк А. В.
_____ Васильєв В.С.

«Затверджую»
Директор ПрАТ «Хмельпиво»

24 12 О. О. Лисюк
2019 р.

АКТ

впровадження процесу модифікації втулок азотуванням в
тілючому розряді

Комісія, у складі: представники ПрАТ «Хмельпиво» – головний інженер Рак Ігор Анатолійович, начальник цеху розливу Лужняк Микола Петрович та представники Подільського НФТЦ ХНУ – д.т.н., проф. Стечишин Мирослав Степанович, здобувач Стечишина Надія Мирославівна, зав. лаб. Люховець Володимир Васильович, інженер Здибель Олександр Станіславович склали даний акт в тім, що в період з 1-го лютого по 20-те грудня 2019 р. на фірмі ПрАТ «Хмельпиво» виконувалися роботи по впровадженню у виробництво втулок модифікованих азотуванням в тілючому розряді лінії розливу пива в пляшки, а саме для пляшко-мийної машини LV20/95. Режими та технологія азотування змінним та циклічно комутованим струмами розроблені в лабораторії Подільського НФТЦ ХНУ.

В результаті проведених випробувань довговічність втулок пляшко-мийної машини LV20/95 на підприємстві ПрАТ «Хмельпиво» збільшилась 1,6...1,8 раз.

Головний інженер

Рак І. А.

Начальник цеха

Лужняк М. П.

Д.т.н., проф.

Стечишин М. С.

Здобувач

Стечишина Н. М.

Зав. лаб.

Люховець В. В.

Інженер

Здибель О. С.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор ПП «Юркон»

 Ю. Ю. Носко

« 2 » « 09 » 2020р

АКТ

промислового випробування розробленого способу азотування з оберненою полярністю при якій деталь служить анодом (патент України № 113569).

Даний акт складено в тому, що у період з 02.05.2020 р по 30.08.2020 р на ПП "Юркон" за участю: директора Носко Ю. Ю. і представників Хмельницького національного університету: д.т.н., проф. Стечишина М. С, завідуючого кафедри галузевого машинобудування та агроінженерії к.т.н. Мартинюка А. В. та зав. лаб. ПНФТЦ Люховця В. В. були проведені випробування шнеків термопластавтоматів зміцнених розробленим способом азотування в тліючому розряді струмом з оберненою полярністю.

Модифікований шар має більш плавну по глибині структуру нітридної зони та зони твердого розчину азоту в металі. Кінцевим результатом процесу є структура поверхневого модифікованого шару з меншим градієнтом твердості, що спричиняє більш тривалу фазу опору зношуванню, оскільки зона металу з ефективною твердістю розповсюджується на більшу глибину.

Отримано на поверхні оброблюваних деталей модифікований шар, глибина якого не відрізняється від аналогічного показника при традиційному азотуванні з полярністю деталь-катод, корпус камери-анод. Проте твердість по глибині модифікованого шару розподіляється більш плавно (градієнт твердості в середньому в 1,5 разу менший порівняно з аналогічним показником при звичайному азотуванні). В результаті зносостійкість шнеків при переробці полімерних матеріалів збільшилася в 2...2,5 рази.

Представники Хмельницького національного університету

 Стечишин М. С.
 Мартинюк А. В.
 Люховець В. В.

Представники ПП

"Юркон"
 Носко Ю. Ю.



«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Начальник відділу

Зовнішньої кооперації

ТОВ «МАГМА»

Г.А. Патенко

«25» «серпня» 2020 р.

АКТ

впровадження розробленої технології зміцнення азотуванням струмом промислової частоти зубчастих обойм, зубчастих втулок, вал-шестерень, коліс зубчастих на ТОВ «МАГМА», м. Маріупіль.

Даний акт складено в тому, що у період з 02.05.2020 р по 30.08.2020 р на ТОВ "МАГМА" за участю: головного інженера Рядченка Петра Володимировича та начальника цеху Хоменко Олександра Миколайовича і представників Хмельницького національного університету: д.т.н., проф. Стечишина М. С., завідуючого кафедри галузевого машинобудування та агроінженерії к.т.н. Мартинюка А. В. та зав. лаб. ПНФТЦ Люховця В. В. були проведені випробування обойм зубчастих, зубчастих втулок, вал-шестерень та коліс зубчастих портових кранів, зміцнених азотуванням в тліючому розряді струмами промислової частоти.

Промислові випробування показали, що зміцнення вказаних деталей азотуванням в струмах промислової частоти дозволяє підвищити його зносостійкість у 1,35 - 1,85 разів порівняно із зміцненням цих деталей струмами високої частоти.

Представники Хмельницького
національного університету

М.С. Стечишин Стечишин М. С.
А.В. Мартинюк Мартинюк А. В.
В.В. Люховець Люховець В. В.

Представники ТОВ
"МАГМА"

П.В. Рядченко Рядченко П.В.
О.М. Хоменко Хоменко О.М.