

ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ НАФТИ І ГАЗУ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ШОВКОПЛЯС Максим Володимирович

УДК 621.9.01

**ДИСЕРТАЦІЯ
ПІДВИЩЕННЯ РЕСУРСУ РОБОТИ
ЦИЛІНДРО-ПОРШНЕВОЇ ПАРИ БУРОВИХ НАСОСІВ**

Спеціальність 131 – Прикладна механіка

Галузь знань 13 – Механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

_____ М.В. ШОВКОПЛЯС

Наукові керівники:

Роп'як Любомир Ярославович

доктор технічних наук, професор

Величкович Андрій Семенович

кандидат технічних наук, доцент

АНОТАЦІЯ

Шовкопляс М.В. Підвищення ресурсу роботи циліндро-поршневої пари бурових насосів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 131 – Прикладна механіка (13 – Механічна інженерія) – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, 2025.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної науково-технічної задачі – підвищення експлуатаційних характеристик деталей поршневих насосів двосторонньої дії шляхом формування на їхніх робочих поверхнях зносостійких покриттів.

Дисертаційна робота виконана на кафедрі комп'ютеризованого машинобудування Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

Мета дисертаційної роботи – розробити технологію комбінованого зміцнення, забезпечення точності та якості виготовлення або відновлення робочих поверхонь змінних деталей поршневих насосів двосторонньої дії задля підвищення ресурсу їх роботи.

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету і задачі досліджень, відображено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, приведено відомості про апробацію, публікації, структуру і обсяг дисертації.

У першому розділі проведено аналіз умов роботи змінних деталей поршневих насосів двосторонньої дії, зокрема насоса УНБ-600. Обґрунтовано вибір технологічного методу підвищення довговічності деталей, який базується на ідеях підвищення твердості поверхні, створення сприятливого напруженого стану і регулярного мікрорельєфу поверхні, забезпечення точності виготовлення та шорсткості з урахування принципів

технологічної спадковості, вирівнювання електрохімічних неоднорідностей між шарами композицій.

У *другому розділі* побудовано узагальнену інженерну модель штока бурового насоса двосторонньої дії, що працює в умовах нештатного кінематичного навантаження, спричиненого зносом або похибками виготовлення чи спрацювання вузла "крейцкопф – напрямні станини". Розглянуто вплив зміщення на силові та кінематичні параметри насоса. Визначено додаткові зусилля і напруження, проаналізовано їх залежність від ступеня зношування та положення штока в циклі ходу. Запропоновано аналітичну модель ділянки штока з функціональним покриттям як істотно неоднорідного стрижня з двозв'язною геометрією поперечного перерізу із змінними по товщині властивостями. Проведено оцінку міцності такої ділянки штока з урахуванням додаткових навантажень, отримано розподіл еквівалентних напружень і показано, що модель придатна до узагальнення на випадок багат шарових покриттів. Аналітичні результати було верифіковано засобами скінченно-елементного моделювання, що підтвердило їхню достовірність і практичну значущість.

Результати, одержані у розділі 2, були використані:

- для раціонального вибору режимів навантаження та швидкості руху під час проведення випробовувань зміцнених зразків на зношування під час зворотно-поступового руху;

- для оцінки напруженого стану штока та визначення допустимих рівнів напружень у хромових покриттях, нанесених у протічному електроліті, для перевірки роботоздатності вкритих деталей.

У *третьому розділі* вибрано матеріали, металорізальне обладнання, різальні інструменти та вимірювальні прилади, а також розроблено технологічний процес комбінованого зміцнення сталевих деталей, який включає: поверхневе гартуванням, формування «білого шару», нанесення шару електрохімічного хромового покриття у проточному електроліті.

Для реалізації запропонованого технологічного процесу комбінованого зміцнення модернізовано установку для нанесення електрохімічних хромових покриттів у проточному електроліті, яка оснащена автоматизованою системою керування технологічними параметрами процесу та удосконалено конструкцію електрохімічних комірок для нанесення хромового покриття в проточному електроліті на внутрішню поверхню втулки циліндрової і на зовнішню поверхню штока поршня.

Також у цьому розділі описано методики дослідження властивостей хромових покриттів: визначення шорсткості, мікротвердості, міцності зчеплення покриття з основою, визначення рівня залишкових напружень в покриттях, проникнення водню через зміцнені шари, мікроструктури покриттів з використанням електронного мікроскопа та електрохімічних досліджень. Запропоновано використати методику електрохімічних вимірювань для визначення рівня допустимих напружень у хромових покриттях за стрибком електродного потенціалу.

У четвертому розділі досліджено вплив технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування (співвідношення концентрацій компонентів, швидкості потоку, густини струму та температури) на величину шорсткості, мікротвердості та зносу поверхні покриття, нанесеного у проточному електроліті.

Проведено електрохімічні дослідження захисної дії хромового покриття. На поляризаційній кривій для хромового покриття відображається область пасивності, що свідчить про високу корозивну стійкість хромового покриття.

Досліджено вплив режимів алмазного шліфування на шорсткість хромового покриття, а також проведено дослідження його тонкої структури з використанням скануючого електронного мікроскопа.

Результатами дослідження напружено деформованого стану ділянки штока з хромовим покриттям в умовах позаштатного навантаження

підтверджено роботоздатність розробленого хромового покриття, що забезпечується запасом міцності штока з хромовим покриттям.

У *п'ятому розділі* наведено приклади практичного застосування результатів досліджень. Розроблено інженерну методику розрахунку припусків на механічну обробку деталей з хромовими покриттями під час алмазного шліфування. Встановлено, що товщина дефектного шару залежить від способу нанесення електрохімічного хромового покриття. Хромування сталевих деталей у проточному електроліті забезпечує меншу товщину дефектного шару порівняно з хромовим покриттям нанесеним у спокійному електроліті.

Встановлено, що мінімальний припуск на отримання поверхонь з мінімальною шорсткістю після алмазного шліфування електрохімічного хромового покриття залежить від загальної товщини покриття та збільшується з її зростанням.

Розвинуто аналітичну модель нарізного з'єднання трубчастих деталей, що враховує жорсткість муфти вкритої хромовим покриттям. Розроблено пристрої для контролю деталей різьбових з'єднань. Запропоновано автоматизовану систему очищення відпрацьованого електроліту хромування, яка включає комплекс технічних засобів та програмне забезпечення. Удосконалено конструкцію вузла фільтрування шляхом застосування запатентованого циклон-фільтра.

Результати стендових випробувань циліндрових втулок та штоків показали підвищення ресурсу роботи в 1,6 рази порівняно із серійними.

Економічний ефект від впровадження розробленої технології комбінованого зміцнення (поверхневе гартування, фрикційна обробка, нанесення електрохімічного хромового покриття в проточному електроліті та алмазне шліфування) деталей поршневих насосів досягається за рахунок підвищення ресурсу роботи цих деталей і зниження експлуатаційних витрат на виконання ремонтних робіт під час обслуговування поршневих насосів.

У *висновках* наведено основні результати дисертаційної роботи при розв'язанні поставлених завдань.

У дисертації для досягнення поставленої мети вирішено ряд задач, які дозволили отримати нові результати, і на підставі яких сформульовано наукову новизну роботи, яка полягає в подальшому розвитку науково-прикладних основ вдосконалення технологічного процесу зміцнення деталей поршневого насоса двосторонньої дії. При цьому:

1. Застосовано системний підхід до вивчення процесів зношування змінних деталей поршневого насоса двосторонньої дії та розробки технології зміцнення робочих поверхонь.

2. Вперше розроблено спосіб комбінованого зміцнення сталі, шляхом послідовного формування шарів: нижнього – поверхневим гартуванням струмами високої частоти, середнього – фрикційною обробкою, та верхнього – електрохімічним хромуванням у проточному електроліті, що дозволяє забезпечити зниження різниці електродних потенціалів між хромовим покриттям і сталеву основою деталі.

3. Розвинуто багатофакторні математичні моделі для визначення мікротвердості, зношування, шорсткості та конусоподібності з метою оптимізації технологічних параметрів процесу нанесення електрохімічного хромового покриття в проточному електроліті на робочу поверхню циліндричних деталей.

4. Вперше встановлено, що під час алмазного шліфування електрохімічних хромових покриттів нанесених у проточному електроліті за певної величини знятого припуску отримується робоча поверхня з мінімальною шорсткістю, розташування якої залежить від загальної товщини покриття.

5. Вперше встановлено, що зі збільшенням величин складових режимів різання (глибини різання, швидкості обертання деталі та повздовжньої подачі стола) шорсткість зростає. Параметри режимів різання мають не однаковий вплив на величину шорсткості обробленої поверхні хромового покриття

алмазним шліфуванням, і при цьому по впливу вони розташовуються в порядку зростання таким чином: глибина різання, повздовжня подача стола верстата та швидкість обертання деталі.

6. Досліджено напружено-деформований стан штока поршня, вкритого електролітичним хромовим покриттям, з урахуванням кінематичних відхилень пари “крейцкопф—напрямні”, зумовлених похибками виготовлення чи зношуванням. Встановлено, що ділянка штока з покриттям забезпечує роботоздатність у штатних і нештатних режимах експлуатації насоса двосторонньої дії.

Практичне значення отриманих результатів: для машинобудівної галузі розроблено технологію комбінованого зміцнення сталевих деталей (поверхнєве гартування струмами високої частоти, фрикційно-зміцнююча обробка та електрохімічне хромування у проточному електроліті) та формування показників якості і точності поверхонь деталей механічною обробкою алмазним шліфуванням. Отримані результати досліджень впроваджені у виробництво у навчальний процес при підготовці інженерів-механіків в Інституті інженерної механіки та робототехніки ІФНТУНГ.

Ключові слова: поршневий насос двосторонньої дії, комбіноване зміцнення деталей, хромування, покриття, проточний електроліт, поверхнєве гартування, «білий шар», технологічний процес, шорсткість поверхні, мікротвердість, залишкові напруження, електрохімічні дослідження, алмазне шліфування, дефектний шар, корозійна стійкість, зносостійкість, режими різання, автоматизована система керування, очищення електроліту, циклон-фільтр.

Список публікацій здобувача

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Розділ колективної монографії

1. Роп'як Л. Я., Величкович А. С., Витвицький В. С., Шовкопляс М. В.
Розділ 8. Дослідження впливу похибок виготовлення, складання та

зношування на кінематико-силові параметри насоса для визначення режимів випробовування зміцнених деталей. *Проблеми безпечної експлуатації компресорного та насосного обладнання в сучасній промисловості: колективна монографія* / за ред. В. Б. Тарельника, Є. В. Коноплянченка. Суми: ФОП Литовчено Є. Б., 2020. 410 с. ISBN 978-966-97721-8-30.

Наукові праці у наукових фахових виданнях України та у наукових виданнях, проіндексованих у базах Scopus i Web of Science:

2. Ropyak L. Ya., Shovkoplias M. V., Vytvytskyi V. S. Determination of machinig allowance for parts with chrome coatings. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2021. № 2. С. 117–127. DOI: <https://doi.org/10.24025/2306-4412.2.2021.242339>.

3. Роп'як Л. Я., Шовкопляс М. В., Витвицький В. С., Стрілецький Ю. Й. Вплив технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування на експлуатаційні властивості покриттів. *Вісник Сумського національного аграрного університету*. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів. 2021. № 3 (45). С. 48–56. DOI: <https://doi.org/10.32845/msnau.2021.3.7>.

4. Посувайло В. М., Шовкопляс М. В., Малінін В. Ю., Романів М. М. Порівняння методів поверхневого зміцнення деталей машин покриттями. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2021. Вип. 4. С. 83–97. DOI: <https://doi.org/10.24025/2306-4412.4.2021.253298>.

5. Bazaluk O., Dubei O., Ropyak L., Shovkoplias M., Pryhorovska T., Lozynskyi V. Strategy of compatible use of jet and plunger pump with chrome parts in oil well. *Energies*. 2022. Vol. 15, no. 1. Art. 83. (Scopus, WoS, Q1). DOI: <https://doi.org/10.3390/en15010083>.

6. Dubei O. Ya., Tutko T. F., Ropyak L. Ya., Shovkoplias M. V. Development of Analytical Model of Threaded Connection of Tubular Parts of Chrome-Plated Metal Structures. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. 2022. Vol.

44, no. 2. P. 251–272. (Scopus, Q3). DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.44.02.0251>.

7. Роп'як Л. Я., Николайчук М. Я., Шовкопляс М. В., Витвицький В. С., Романів М. М., Білінський В. М. Автоматизована установка для очищення гальванічних відходів. *Вісник Сумського національного аграрного університету*. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів. 2022. № 2 (44). С. 70–80. DOI: <https://doi.org/10.32845/msnau.2021.2.15>.

8. Величкович А. С., Шовкопляс М. В., Витвицький В. С., Роп'як Л. Я. Аналіз напруженого стану штока поршневого насоса із функціональним покриттям при геометричних дефектах системи «крейцкопф – напрямні». *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2025. № 1 (58). С. 15–24. DOI: [https://doi.org/10.31471/1993-9965-2024-1\(57\)-44-51](https://doi.org/10.31471/1993-9965-2024-1(57)-44-51)

Патенти на винаходи і корисні моделі та свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір

9. Пат. на корисну модель № 106084. Україна, МПК (2016.01) G01B 5/14. Пристрій для контролю биття бурового долота / Т.О. Пригоровська, Л.Я. Роп'як, О.В. Рогаль, М.В. Шовкопляс. – № u201804522 ; заявл. 24.04.2018 ; опубл. 27.08.2018, Бюл. № 16. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/670928/>

10. Пат. на корисну модель № 129444. Україна, МПК (2016.01) E21B 10/00, E21B 12/00, G01B 5/14. Пристрій для контролю бурового долота / Т.О. Пригоровська, Л.Я. Роп'як, О.В. Рогаль, М.В. Шовкопляс. – № u201805867; заявл. 25.05.2018; опубл. 25.10.2018, Бюл. № 20. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/240424/>

11. Пат. на винахід № 123124. Україна, МПК (2021.02) B01D50/00; B04C9/00; B01D24/46; B01D29/62. Циклон-фільтр для очищення газів або рідин / Л.Я. Роп'як, О.С. Малишевська, М.В. Маковійчук, Т.О. Пригоровська, А.С. Величкович, М.В. Шовкопляс. – № a201909830; заявл. 16.09.2019; опубл. 17.02.2021, Бюл. № 7. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1477700/>

12. Патент на винахід № 126018 Україна, МПК (2006.01) G01N 3/56. Спосіб дослідження процесів трибокрекінгу під час фрикційної взаємодії в металополімерних парах тертя та пристрій для його здійснення / О.І. Вольченко; Д.О. Вольченко, М. Й. Бурда, Л.Я. Роп'як, Д.Ю. Журавльов, В.С. Витвицький, М.В. Шовкопляс; заявник і власник Івано-Франківський націонал. техн. ун-т нафти і газу. – № а201809783; заявл. 01.10.2018; опубл. 03.08.2022, Бюл. № 31. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1700648/>

13. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 111299. Комп'ютерна програма «Визначення еквівалентних напружень у вкритій хромовим покриттям ділянці штока бурового насоса в умовах нештатного кінематичного навантаження» Роп'як Л. Я., Величкович А. С., Витвицький В. С., Шовкопляс М. В., Дубей О. Я., Тутко Т. Ф. Дата реєстрації: 25.01.2022. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1695294/>

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

14. Кустов В. В., Витвицький В. С., Шовкопляс М. В. Оптимізація режимів різання під час токарної обробки деталей з покриттям. *Графічна освіта у закладах вищої освіти: стан та перспективи* : зб. тез доп. наук.-практ. семінару, Івано-Франківськ, 19–21 верес. 2018 р. Івано-Франківськ, 2018. С. 104–105.

15. Ropyak L. Y., Velychkovych A. S., Vytvytskyi V. S., Shovkopliash M. V. Analytical study of “crosshead – slide rail” wear effect on pump rod stress state. *16th International Scientific and Engineering Conference “Hermetic Sealing, Vibration Reliability and Ecological Safety of Pump and Compressor Machinery” (HERVICON+PUMPS 2020)*, 8–11 верес. 2020 р., Суми, Україна. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Т. 1741, № 1. № 012039. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1741/1/012039>

16. Ropyak L. Y., Vytvytskyi V. S., Velychkovych A. S., Pryhorovska T. O., Shovkopliash M. V. Study on grinding mode effect on external conical thread quality. *11th International Conference on Advanced Manufacturing Technologies*

(ICAMaT 2020), 29–30 жовт. 2020 р. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Т. 1018, № 1. № 012014. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1018/1/012014>

17. Барц К., Роп'як Л. Я., Стрілецький Ю. Й., Шовкопляс М. В. Автоматизована система контролю технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування. *Датчики, прилади та системи – 2021*: зб. тез IX Міжнар. наук.-техн. конф., с. Лазурне, Херсон. обл., 20–24 верес. 2021 р. Черкаси, 2021. С. 22–23.

URL:<https://er.chdtu.edu.ua/bitstream/ChSTU/3355/1/Збірник%20матеріалів%20МНТК%20ДПС-2021.pdf>

18. Роп'як Л. Я., Романів М. М., Шовкопляс М. В., Малінін В. Ю., Здерко О. Р. Моделювання потоку електроліту в електрохімічній комірці для нанесення покриттів. *Прогресивні технології у машинобудуванні* (РТМЕ–2022): зб. наук. пр. X Міжнар. наук.-техн. конф., Івано-Франківськ – Яремче, 1–5 лют. 2022 р. Івано-Франківськ – Яремче, 2022. С. 127–129.

URL:https://drive.google.com/file/d/1Fw5epmBruamKZjUg-1KvhlOSOugU_6Vj/view

19. Роп'як Л. Я., Шовкопляс М. В. Дослідження процесу алмазного шліфування хромових покриттів. *Процеси механічної обробки, верстати та інструмент*: зб. наук. пр. XII Всеукр. наук.-техн. конф. з міжнар. участю, Житомир, 9–10 листоп. 2023 р. Житомир, 2023. С.131–132. URL: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/12/povnyj-tekst-1.pdf>

20. Шовкопляс М. В., Роп'як Л. Я. Дослідження трибологічних властивостей хромових покриттів. *Молодь в авіації: нові рішення та перспективні технології*: тези доп. Всеукр. наук.-техн. конф. студентів, аспірантів і молодих учених з міжнар. участю, присвяченої 125-річчю Нац. ун-ту «Запоріж. політехніка», 21–22 листоп. 2024 р., Запоріжжя / Нац. ун-т «Запоріж. політехніка». Запоріжжя, 2024. С. 103–105.

ABSTRACT

Shovkoplias M. V. Increasing the Service Life of the Cylinder–Piston Pair of Drilling Pumps. – Qualification Research Work in Manuscript Form.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 131 – Applied Mechanics (13 – Mechanical Engineering) – Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, 2025.

The dissertation is devoted to solving an urgent scientific and technical problem – improving the operational characteristics of double-acting reciprocating pump parts by forming wear-resistant coatings on their working surfaces.

The dissertation was carried out at the Department of Computerized Mechanical Engineering of Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas.

The aim of the dissertation is to develop a technology of combined strengthening, ensuring the accuracy and quality of manufacturing or restoring the working surfaces of replaceable parts of double-acting reciprocating pumps in order to extend their service life.

The introduction substantiates the relevance of the research, formulates the aim and objectives, presents scientific novelty and practical significance, as well as information on approbation, publications, structure and scope of the dissertation.

In *Chapter 1*, the operating conditions of replaceable parts of double-acting reciprocating pumps, in particular the UNB-600 pump, were analyzed. The choice of a technological method for increasing the durability of parts was substantiated, based on the concepts of increasing surface hardness, creating a favorable stress state and regular microrelief, ensuring manufacturing accuracy and roughness, considering the principles of technological heredity, and leveling electrochemical inhomogeneities between composite layers.

In *Chapter 2*, a generalized engineering model of a double-acting drilling pump rod operating under abnormal kinematic loading caused by wear or manufacturing/assembly errors of the “crosshead–guide” unit was developed. The

influence of misalignment on force and kinematic parameters was considered. Additional forces and stresses were determined, and their dependence on wear degree and rod position during the stroke cycle was analyzed. An analytical model of the rod section with a functional coating was proposed, considered as a substantially non-uniform rod with double-connected cross-section geometry and thickness-dependent properties. The strength of such a rod section was evaluated, the distribution of equivalent stresses was obtained, and it was shown that the model can be generalized to multilayer coatings. Analytical results were verified using finite element modeling, which confirmed their reliability and practical significance.

The results of Chapter 2 were applied to:

- rational selection of loading modes and speeds during wear testing of strengthened samples under reciprocating motion;
- evaluation of the stress state of the rod and determination of permissible stress levels in chromium coatings deposited in a flow electrolyte to verify the performance of coated parts.

In *Chapter 3*, materials, machining equipment, cutting tools, and measuring instruments were selected. A technological process of combined strengthening of steel parts was developed, including surface hardening, formation of a “white layer,” and deposition of an electrochemical chromium coating in a flow electrolyte.

To implement this process, the installation for chromium plating in a flow electrolyte was modernized, equipped with an automated control system for process parameters, and the design of electrochemical cells was improved for applying chromium coatings on the inner surface of the cylinder liner and the outer surface of the piston rod.

The chapter also describes methods for studying coating properties: determining roughness, microhardness, adhesion strength, residual stresses, hydrogen penetration, and microstructure using electron microscopy and electrochemical tests. An electrochemical method for determining permissible

stresses in chromium coatings by monitoring electrode potential jumps was proposed.

In *Chapter 4*, the influence of technological parameters of the electrochemical chromium plating process (component concentration ratio, flow rate, current density, and temperature) on roughness, microhardness, and wear resistance of coatings was investigated. Electrochemical studies confirmed the protective effect of chromium coatings: the polarization curve exhibited a passive region, indicating high corrosion resistance. The influence of diamond grinding regimes on surface roughness and fine structure was also studied using scanning electron microscopy. Stress-strain analysis confirmed the operability of chromium coatings under abnormal loading due to sufficient strength reserve.

In *Chapter 5*, practical applications of the research were presented. An engineering method for calculating machining allowances for diamond grinding of chromium-coated parts was developed. It was found that the thickness of the defective layer depends on the plating method: coatings deposited in flow electrolyte have a thinner defective layer than those deposited in still electrolyte. The minimum allowance for achieving the required surface quality depends on total coating thickness and increases with its growth.

An analytical model of threaded joints of tubular parts accounting for stiffness of chromium-coated couplings was developed. Devices for controlling threaded joint parts were designed. An automated system for cleaning used chromium electrolyte, including technical equipment and software, was proposed. The filtration unit was improved through the patented cyclone-filter.

Bench tests of cylinder liners and piston rods demonstrated a 1.6-fold increase in service life compared to serial parts.

The economic effect of implementing the developed combined strengthening technology (surface hardening, friction treatment, electrochemical chromium plating in flow electrolyte, and diamond grinding) is achieved by extending part service life and reducing maintenance costs of reciprocating pumps.

The *conclusions* summarize the main results obtained.

The dissertation achieved its aim by solving a number of tasks that yielded new results, forming the basis for the scientific novelty of the work, which consists in further developing the scientific and applied foundations of improving the strengthening technology of double-acting pump parts:

1. A systematic approach was applied to studying the wear processes of replaceable parts of a double-acting piston pump and to developing a technology for strengthening their working surfaces.

2. A new combined strengthening method for steel was proposed, involving sequential formation of layers: lower – surface hardening by high-frequency currents; intermediate – friction strengthening; upper – electrochemical chromium plating in flow electrolyte. This reduces electrode potential differences between chromium coating and steel substrate.

3. Multifactor mathematical models were developed to determine microhardness, wear, roughness, and taper in order to optimize chromium plating parameters in flow electrolyte.

4. It was established that during diamond grinding of coatings deposited in flow electrolyte, a surface with minimum roughness is obtained at a certain allowance, depending on coating thickness.

5. For the first time, it has been established that with an increase in the cutting regime parameters (depth of cut, workpiece rotation speed, and table feed rate), the surface roughness also increases. The cutting parameters have different levels of influence on the roughness of the chromium-coated surface during diamond grinding, and their impact can be ranked in ascending order as follows: depth of cut, longitudinal feed rate of the machine table, and workpiece rotation speed.

6. The stress–strain state of the piston rod coated with electrolytic chromium plating was studied, taking into account the kinematic deviations of the "crosshead–guide" pair caused by manufacturing errors or wear. It was found that the coated section of the rod ensures operability under both normal and abnormal operating conditions of the double-acting pump.

Practical significance: for mechanical engineering, a combined strengthening technology was developed (surface hardening by high-frequency currents, friction strengthening, electrochemical chromium plating in flow electrolyte), with surface quality and accuracy ensured by diamond grinding. The results were introduced into production and into the educational process for training mechanical engineers at the Institute of Mechanical Engineering and Robotics of IFNTUOG.

Keywords: double-acting reciprocating pump, combined strengthening of parts, chromium plating, coatings, flow electrolyte, surface hardening, “white layer,” technological process, surface roughness, microhardness, residual stresses, electrochemical studies, diamond grinding, defective layer, corrosion resistance, wear resistance, cutting regimes, automated control system, electrolyte cleaning, cyclone filter.

List of publications of the applicant

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

Section of the collective monograph

1. Ropyak L. Ya., Velychkovych A. S., Vytvytskyi V. S., Shovkoplias M. V. Rozdil 8. Doslidzhennia vplyvu pokhybok vyhotovlennia, skladannia ta znoshuvannia na kinematyko-sylovi parametry nasosa dlia vyznachennia rezhymiv vyprobovuvannia zmitsnennykh detalei. *Problemy bezpechnoi ekspluatatsii kompresornoho ta nasosnoho obladnannia v suchasnii promyslovosti*: kolektyvna monohrafiia / za red. V. B. Tarel'nyka, Ye. V. Konoplianchenka. Sumy: FOP Lytovcheno Ye. B., 2020. 410 s. ISBN 978-966-97721-8-30.

Scientific papers in scientific professional publications of Ukraine and in scientific publications indexed in the Scopus and Web of Science databases:

2. Ropyak L. Ya., Shovkoplias M. V., Vytvytskyi V. S. Determination of machinig allowance for parts with chrome coatings. *Вісник Черкаського*

державного технологічного університету. 2021. № 2. С. 117–127. DOI: <https://doi.org/10.24025/2306-4412.2.2021.242339>.

3. Ropiak L. Ya., Shovkoplias M. V., Vytvytskyi V. S., Striletskyi Yu. Y. Vplyv tekhnolohichnykh parametriv protsesu elektrokhimichnoho khromuvannia na ekspluatatsiini vlastyvoli pokryttiv. *Visnyk Sumskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu*. Serii: Mekhanizatsiia ta avtomatyzatsiia vyrobnychkykh protsesiv. 2021. № 3 (45). S. 48–56. DOI: <https://doi.org/10.32845/msnau.2021.3.7>.

4. Posuvailo V. M., Shovkoplias M. V., Malinin V. Yu., Romaniv M. M. Porivniannia metodiv poverkhnevoho zmitsnennia detalei mashyn pokryttiamy. *Visnyk Cherkaskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu*. 2021. Vyp. 4. S. 83–97. DOI: <https://doi.org/10.24025/2306-4412.4.2021.253298>.

5. Bazaluk O., Dubei O., Ropyak L., Shovkoplias M., Pryhorovska T., Lozynskyi V. Strategy of compatible use of jet and plunger pump with chrome parts in oil well. *Energies*. 2022. Vol. 15, no. 1. Art. 83. (Scopus, WoS, Q1). DOI: <https://doi.org/10.3390/en15010083>.

6. Dubei O. Ya., Tutko T. F., Ropyak L. Ya., Shovkoplias M. V. Development of Analytical Model of Threaded Connection of Tubular Parts of Chrome-Plated Metal Structures. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. 2022. Vol. 44, no. 2. P. 251–272. (Scopus, Q3). DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.44.02.0251>.

7. Ropiak L. Ya., Nykolaichuk M. Ya., Shovkoplias M. V., Vytvytskyi V. S., Romaniv M. M., Bilinskyi V. M. Avtomatyzovana ustanovka dlia ochyshchennia halvanichnykh vidkhodiv. *Visnyk Sumskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu*. Serii: Mekhanizatsiia ta avtomatyzatsiia vyrobnychkykh protsesiv. 2022. № 2 (44). S. 70–80. DOI: <https://doi.org/10.32845/msnau.2021.2.15>.

8. Velychkovych A. S., Shovkoplias M. V., Vytvytskyi V. S., Ropiak L. Ya. Analiz napruzhenoho stanu shtoka porshnevoho nasosa iz funktsionalnym pokryttiam pry heometrychnykh defektakh systemy «kreitskopf – napriamni». *Naukovyi visnyk Ivano-Frankivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*

nafty i hazu. 2025. № 1 (58). S. 15–24. DOI: [https://doi.org/10.31471/1993-9965-2024-1\(57\)-44-51](https://doi.org/10.31471/1993-9965-2024-1(57)-44-51)

Patents for inventions and utility models and a certificate of registration of copyright for a work

9. Pat. na korysnu model № 106084. Ukraina, MPK (2016.01) G01B 5/14. Prystrii dlia kontroliu byttia burovoho dolota / T.O. Pryhorovska, L.Ia. Ropiak, O.V. Rohal, M.V. Shovkopliias. – № u201804522 ; zaiavl. 24.04.2018 ; opubl. 27.08.2018, Biul. № 16. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/670928/>

10. Pat. na korysnu model № 129444. Ukraina, MPK (2016.01) E21B 10/00, E21B 12/00, G01B 5/14. Prystrii dlia kontroliu burovoho dolota / T.O. Pryhorovska, L.Ia. Ropiak, O.V. Rohal, M.V. Shovkopliias. – № u201805867; zaiavl. 25.05.2018; opubl. 25.10.2018, Biul. № 20. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/240424/>

11. Pat. na vynakhid № 123124. Ukraina, MPK (2021.02) B01D50/00; B04C9/00; B01D24/46; B01D29/62. Tsyklon-filtr dlia ochyshchennia haziv abo ridyn / L.Ia. Ropiak, O.S. Malyshevskaya, M.V. Makoviichuk, T.O. Pryhorovska, A.S. Velychkovych, M.V. Shovkopliias. – № a201909830; zaiavl. 16.09.2019; opubl. 17.02.2021, Biul. № 7. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1477700/>

12. Patent na vynakhid № 126018 Ukraina, MPK (2006.01) G01N 3/56. Sposib doslidzhennia protsesiv trybokrekinhu pid chas fryktsiinoi vzaiemodii v metalopolimernykh parakh tertia ta prystrii dlia yoho zdiisnennia / O.I. Volchenko; D.O. Volchenko, M. Y. Burda, L.Ia. Ropiak, D.Iu. Zhuravlov, V.S. Vytvytskyi, M.V. Shovkopliias; zaiavnyk i vlasnyk Ivano-Frankivskiy natsional. tekhn. un-t nafty i hazu. – № a201809783; zaiavl. 01.10.2018; opubl. 03.08.2022, Biul. № 31. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1700648/>

13. Svidotstvo pro reiestratsiiu avtorskoho prava na tvir № 111299. Kompiuterna prohrama «Vyznachennia ekvivalentnykh napruzhen u vkrytii khromovym pokryvom diliansi shtoka burovoho nasosa v umovakh neshtatnoho kinematychnoho navantazhennia» Ropiak L. Ya., Velychkovych A. S.,

Vytvytskyi V. S., Shovkoplias M. V., Dubei O. Ya., Tutko T. F. Data reiestratsii: 25.01.2022. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1695294/>

Conference proceedings (Dissertation material approbation)

14. Kustov V. V., Vytvytskyi V. S., Shovkoplias M. V. Optymizatsiia rezhymiv rizannia pid chas tokarnoi obrobky detalei z pokryttiam. *Hrafichna osvita u zakladakh vyshchoi osvity: stan ta perspektyvy* : zb. tez dop. nauk.-prakt. seminaru, Ivano-Frankivsk, 19–21 veres. 2018 r. Ivano-Frankivsk, 2018. S. 104–105.

15. Ropyak L. Y., Velychkovych A. S., Vytvytskyi V. S., Shovkoplias M. V. Analytical study of “crosshead – slide rail” wear effect on pump rod stress state. *16th International Scientific and Engineering Conference “Hermetic Sealing, Vibration Reliability and Ecological Safety of Pump and Compressor Machinery” (HERVICON+PUMPS 2020)*, 8–11 Sep. 2020 p., Sumy, Ukraine. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. T. 1741, № 1. № 012039. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1741/1/012039>

16. Ropyak L. Y., Vytvytskyi V. S., Velychkovych A. S., Pryhorovska T. O., Shovkoplias M. V. Study on grinding mode effect on external conical thread quality. *11th International Conference on Advanced Manufacturing Technologies (ICAMaT 2020)*, 29–30 жовт. 2020 p. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. T. 1018, № 1. № 012014. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1018/1/012014>

17. Barts K., Ropiak L. Ya., Striletskyi Yu. Y., Shovkoplias M. V. Avtomatyzovana systema kontroliu tekhnolohichnykh parametriv protsesu elektrokhimichnoho khromuvannia. *Datchyky, prylady ta systemy – 2021*: zb. tez IKh Mizhnar. nauk.-tekhn. konf., s. Lazurne, Kherson. obl., 20–24 veres. 2021 r. Cherkasy, 2021. S. 22–23.

URL: <https://er.chdtu.edu.ua/bitstream/ChSTU/3355/1/Zbirnyk%20materialiv%20MNTK%20DPS-2021.pdf>

18. Ropiak L. Ya., Romaniv M. M., Shovkoplias M. V., Malinin V. Yu., Zderko O. R. Modeliuvannia potoku elektrolitu v elektrokhimichnii komirtsi dlia nanesennia pokryttiv. *Prohresyvnii tekhnolohii u mashynobuduvanni* (RTME–2022): zb. nauk. pr. Kh Mizhnar. nauk.-tekhn. konf., Ivano-Frankivsk – Yaremche, 1–5 liut. 2022 r. Ivano-Frankivsk – Yaremche, 2022. S. 127–129. URL:https://drive.google.com/file/d/1Fw5epmBruamKZjUg-1KvhlOSOugU_6Vj/view

19. Ropiak L. Ya., Shovkoplias M. V. Doslidzhennia protsesu almaznoho shlifuvannia khromovykh pokryttiv. *Protsesy mekhanichnoi obrobky, verstaty ta instrument*: zb. nauk. pr. KhII Vseukr. nauk.-tekhn. konf. z mizhnar. uchastiu, Zhytomyr, 9–10 lystop. 2023 r. Zhytomyr, 2023. S.131–132. URL: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/12/povnyj-tekst-1.pdf>

20. Shovkoplias M. V., Ropiak L. Ya. Doslidzhennia trybolohichnykh vlastyvostei khromovykh pokryttiv. *Molod v aviatsii: novi rishennia ta perspektyvni tekhnolohii*: tezy dop. Vseukr. nauk.-tekhn. konf. studentiv, aspirantiv i molodykh uchenykh z mizhnar. uchastiu, prysviacheno 125-richchiu Nats. un-tu «Zaporiz. politekhnika», 21–22 lystop. 2024 r., Zaporizhzhia / Nats. un-t «Zaporiz. politekhnika». Zaporizhzhia, 2024. S. 103–105.

ЗМІСТ

ВСТУП	24
РОЗДІЛ 1 СТАН ПИТАННЯ І ЗАДАЧІ ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ	32
1.1 Аналіз умов роботи змінних деталей поршневих насосів двосторонньої дії.....	32
Рисунок 1.1 – Схема бурового поршневого насоса двосторонньої дії УНБ–600 [21]	32
1.2 Технологічні методи підвищення зносостійкості змінних деталей поршневих насосів	38
1.2.1 Загальні положення.....	38
1.2.2 Гартування струмами високої частоти	41
1.2.3 Поверхнєве пластичне деформування	42
1.2.4 Хіміко-термічна обробка.....	44
1.2.5 Електроіскрове легування	45
1.2.6 Напилення покриттів	46
1.2.6.1 Плазмове напилення	47
1.2.6.2 Газополумєнєве напилення	47
1.2.6.3 Електродугове напилення	48
1.2.6.4 Високошвидкісне (надзвукове) напилення	49
1.2.6.5 Детонаційне напилення	49
1.2.7 Нанесення електрохімічних хромових покриттів.....	50
1.3 Механічна обробка покриттів	60
Висновки до розділу 1	62
РОЗДІЛ 2 АНАЛІТИКО-ЧИСЛОВИЙ АНАЛІЗ ЗМІН НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ШТОКА ІЗ ЗАХИСНИМ ПОКРИТТЯМ ВНАСЛІДОК ПОХИБКИ ВИГОТОВЛЕННЯ/ЗНОШУВАННЯ ПАРИ КРЕЙЦКОПФ – НАПРЯМНІ ПОРШНЕВОГО НАСОСА.....	63
2.1 Вплив зміщення деталей у парі тертя “крейцкопф – напрямні станини” на кінематичні та силові параметри насоса.....	63

2.2 Аналітична модель штока при нештатному кінематичному навантаженні.....	70
2.3. Аналіз додаткових напружень і переміщень у штоці.....	76
2.4. Верифікація аналітичної моделі штока методом скінченних елементів	81
2.5 Аналітична модель ділянки штока з функціональним покриттям.....	87
Висновки до розділу 2	92
РОЗДІЛ 3 ВИБІР МАТЕРІАЛІВ, МЕТОДИК ДОСЛІДЖЕНЬ І РОЗРОБЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЗМІЦНЕННЯ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ХРОМУВАННЯ В ПРОТОЧНОМУ ЕЛЕКТРОЛІТІ.....	
3.1. Вибір матеріалів, металорізального обладнання, різальних інструментів і вимірювальних приладів	93
3.2 Методики дослідження властивостей хромових покриттів.....	95
3.2.1 Визначення шорсткості	95
3.2.2 Визначення мікротвердості.....	95
3.2.3 Методика випробовування покриттів на зношування	96
3.2.4 Розроблення методики дослідження процесів деструкції гуми під час фрикційної взаємодії в парі тертя «хромована деталь – гумове ущільнення».....	99
3.2.5 Вимірювання електродного потенціалу та зняття поляризаційних кривих.....	103
3.2.6 Дослідження мікроструктури покриттів.....	103
3.3 Розробка установки та оснащення для комбінованого зміцнення деталей з електрохімічним хромуванням у проточному електроліті	104
3.4 Розроблення технологічного процесу електрохімічного нанесення хромових покриттів у проточному електроліті на внутрішні / зовнішні поверхні деталей.....	109
3.5 Планування експериментів для оптимізації технологічних параметрів процесу хромування в проточному електроліті і методика оброблення результатів технологічних досліджень	113
Висновки до розділу 3	116
РОЗДІЛ 4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ НАНЕСЕННЯ	

ХРОМОВИХ ПОКРИТТІВ НА ПОКАЗНИКИ ТОЧНОСТІ ТА ЯКОСТІ

ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ	118
4.1 Вплив технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування на експлуатаційні властивості деталей	118
4.2 Оптимізація технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування в проточному електроліті для забезпечення показників якості циліндричних деталей.....	125
4.3 Дослідження впливу режимів алмазного шліфування на шорсткість хромового покриття	135
4.4 Дослідження властивостей та будови зміцнених шарів хромованих деталей.....	148
4.5 Аналіз міцності ділянки штока з хромовим покриттям	154
Висновки до розділу 4	160
РОЗДІЛ 5 ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	162
5.1 Інженерна методика розрахунку припусків на шліфування деталей з хромовими покриттями	162
5.2 Розвиток аналітичної моделі нарізкового з'єднання трубчастих деталей хромованих металоконструкцій.....	170
5.3 Пристрій для контролю биття деталей із різьбовими з'єднаннями	175
5.4 Розробка технологічної схеми осадження, нейтралізації та очищення гальванічних відходів електрохімічного хромування	179
5.5 Практичне застосування технології нанесення хромових покриттів у проточному електроліті	184
Висновки до розділу 5	187
ВИСНОВКИ.....	188
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	190
ДОДАТКИ.....	206
Додаток А. Список опублікованих праць за темою дисертації.....	207
Додаток Б. Зміцнювані змінні деталі поршневого насоса двосторонньої дії.....	211
Додаток В. Акт впровадження у навчальний процес	212
Додаток Г. Акт впровадження у виробництво	213

ВСТУП

Актуальність теми. Важливою задачею сучасного машинобудування є підвищення надійності і довговічності деталей машин і механізмів. Для підвищення експлуатаційних характеристик деталей необхідно мати чітке представлення про причини їх зниження, і на основі цієї інформації створювати нові прогресивні технологічні процеси. Розробка нових технологічних процесів поверхневого зміцнення повинна вестися не тільки в напрямку підвищення продуктивності та зниження собівартості, але також у напрямку підвищення всього комплексу експлуатаційних характеристик виробів – підвищення їх якості, надійності та довговічності.

Прогресивним напрямком в машинобудуванні є зміцнення поверхневих шарів деталей, яке дозволяє економити дороговартісні леговані сталі, кольорові метали та інші матеріали, що дозволяє підвищувати ресурс і надійність механізмів і машин, зменшувати енергозатрати виробництва. В сучасному машинобудівному виробництві широко застосовуються технологічні методи поверхневого зміцнення, на особливу увагу серед яких заслуговують методи засновані на їх комбінації. Великі можливості в цьому напрямку відкриває новий технологічний процес комбінованого зміцнення, заснований на формуванні поверхневих зносостійких шарів з хромового покриття нанесеного на підшари, отримані гартуванням струмами високої частоти та фрикційно зміцнюючою обробкою. Зазначений метод дозволяє створювати поверхні з унікальним комплексом фізико-механічних та електрохімічних властивостей: високою твердістю, зносостійкістю, корозійною стійкістю. Тому дослідження присвячені створенню технології з реалізації представленого методу та формування показників якості і точності поверхонь обробкою різанням є актуальними і мають важливе як наукове, так і практичне значення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана у межах НДР «Розробка екологічно чистої

технології хромування у проточному електроліті довгомірних деталей зі складною топологією поверхні», Номер проекту: РК 0121U109591, Термін виконання проекту: 2021–2022 рр., що фінансувався Міністерством освіти і науки України, де здобувач був виконавцем.

Мета і задачі дослідження: розробка комплексної технології, формування точності та якості виготовлення та відновлення робочих поверхонь змінних деталей поршневих насосів двосторонньої дії для підвищення ресурсу їх роботи;

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- проаналізувати вимоги до (точнісних) параметрів робочих поверхонь деталей пар тертя насосів, що виникають в ході їх експлуатації;
- обґрунтувати можливість використання зношених деталей пар тертя як заготовки для відновлення їх робочих поверхонь технологічними методами;
- розробити раціональну технологію зміцнення робочих поверхонь змінних деталей насосів при їх виготовленні або відновленні із підвищенням роботоздатності деталей;
- розробити багатофакторні математичні моделі для визначення залежності мікротвердості, зношування, шорсткості та конусоподібності від технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування в проточному електроліті циліндричних поверхонь деталей;
- розробити інженерну методику визначення припусків на механічну обробку хромових покриттів та розробити рекомендації вибору оптимальних режимів різання при алмазному шліфуванні;
- оцінити напружено-деформований стан робочих поверхонь зміцнених штоків та його вплив на експлуатаційний ресурс насосів;
- розробити конструкцію і виготовити дослідно-промислову установку для нанесення хромових покриттів, провести стендові випробування зміцнених деталей насосів і впровадити результати досліджень у виробництво і навчальний процес.

Об'єкт дослідження. Технологічний процес виготовлення та відновлення змінних деталей поршневих насосів двосторонньої дії із зміцненням їх робочих поверхонь.

Предмет дослідження. Вплив технологічних методів: поверхневого гартування струмами високої частоти, фрикційної обробки, електрохімічного хромування в проточному електроліті та механічної обробки на точність та якість виготовлення та відновлення деталей поршневих насосів.

Методи дослідження. В основу досліджень покладені фундаментальні засади технології машинобудування, теорії різання, механіки, опору матеріалів, електрохімії, а також математичне і комп'ютерне моделювання. Експериментальні дослідження провели на розробленому технологічному обладнанні, для нанесення хромових покриттів, модернізованому обладнанні для електрохімічних досліджень, а також з використанням сучасних методик випробовування на зношування та металографії.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в подальшому розвитку науково-прикладних основ вдосконалення технологічних процесів зміцнення змінних деталей поршневих насосів двосторонньої дії. При цьому:

1. Застосовано системний підхід до вивчення процесів зношування змінних деталей поршневого насоса двосторонньої дії та розробки технології зміцнення робочих поверхонь.

2. Вперше розроблено спосіб комбінованого зміцнення сталі, шляхом послідовного формування шарів: нижнього – поверхневим гартуванням струмами високої частоти, середнього – фрикційною обробкою, та верхнього – електрохімічним хромуванням у проточному електроліті, що дозволяє забезпечити зниження різниці електродних потенціалів між хромовим покриттям і сталеву основою деталі.

3. Розвинуто багатofакторні математичні моделі для визначення мікротвердості, зношування, шорсткості та конусоподібності з метою оптимізації технологічних параметрів процесу нанесення електрохімічного

хромового покриття в проточному електроліті на робочу поверхню циліндричних деталей.

4. Вперше встановлено, що під час алмазного шліфування електрохімічних хромових покриттів нанесених у проточному електроліті за певної величини знятого припуску отримується робоча поверхня з мінімальною шорсткістю, розташування якої залежить від загальної товщини покриття.

5. Вперше встановлено, що зі збільшенням величин складових режимів різання (глибини різання, швидкості обертання деталі та повздовжньої подачі стола) шорсткість зростає. Параметри режимів різання мають не однаковий вплив на величину шорсткості обробленої поверхні хромового покриття алмазним шліфуванням, і при цьому по впливу вони розташовуються в порядку зростання таким чином: глибина різання, повздовжня подача стола верстата та швидкість обертання деталі.

6. Досліджено напружено-деформований стан штока поршня, вкритого електролітичним хромовим покриттям, з урахуванням кінематичних відхилень пари “крейцкопф—напрямні”, зумовлених похибками виготовлення чи зношуванням. Встановлено, що ділянка штока з покриттям забезпечує роботоздатність у штатних і нештатних режимах експлуатації насоса двосторонньої дії.

Практичне значення одержаних результатів. На основі теоретичних та експериментальних досліджень розроблено і впроваджено технологічні процеси виготовлення нових і відновлення зношених змінних деталей поршневих насосів двосторонньої дії комплексним методом, який поєднує поверхневе гартування струмами високої частоти, фрикційне зміцнення та нанесення шару електрохімічного хромового покриттів у проточному електроліті, а також подальшу механічну обробку алмазним шліфуванням, що вирішує питання підвищення якості поверхонь та зниження затрат на зміцнення.

Модернізовано конструкцію установки для нанесення електрохімічних хромових покриттів у проточному електроліті на деталі типу тіл обертання. Розроблені автоматизована систему керування технологічними параметрами нанесення та автоматизована система очищення електроліту зменшують витрати на обслуговування.

Інженерна методика розрахунку припусків на шліфування деталей з хромовими покриттями враховує особливості дефектного шару в залежності від способу хромування, що підвищує якість та довговічність покриття; і дозволяє оптимізувати припуски при алмазному шліфуванні, знижуючи витрати часу й матеріалу на механічну обробку.

Технічну новизну розробок захищено 2-ма патентами України на корисні моделі, 2-ма патентами України на винаходи з експертизою по суті та одним свідоцтвом про реєстрацію авторського права на твір.

Розроблену технологію формування композиційних покриттів комплексним методом на деталях типу тіл обертання передано і впроваджено у виробництво в ТзОВ НТФ «ІНТЕРБУР» ЛТД (м. Івано-Франківськ). Результати промислових випробовувань втулок циліндрових і штоків поршнів бурових насосів показали підвищення ресурсу роботи експлуатації в 1,6 рази порівняно із серійними, що напряду збільшує надійність обладнання.

Теоретичні та практичні результати дисертаційної роботи використовуються у навчальному процесі для підготовки магістрів та аспірантів за спеціальністю 131 – Прикладна механіка під час викладання дисциплін «Технічна творчість і захист інтелектуальних прав» та «Експериментальні дослідження в прикладній механіці» у Інституті інженерної механіки та робототехніки ІФНТУНГ.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові результати, положення, а також висновки теоретичних і експериментальних досліджень, подані до захисту в межах дисертаційної роботи, були отримані автором самостійно.

Результати дисертаційної роботи отримані здобувачем та опубліковані у співавторстві в публікаціях (Додаток А):

[1] – участь у дослідженні впливу похибок виготовлення та зносу на параметри роботи насосів; проведення аналітичних розрахунків і аналіз результатів стендових випробувань;

[2] – участь у розробці інженерної методики визначення припусків; аналіз результатів алмазного шліфування;

[3] – проведення експериментальних досліджень властивостей покриттів та розробка автоматизованої системи керування, обробка та узагальнення даних;

[4] – виконання порівняльного аналізу методів зміцнення та формуванні висновків щодо ефективності хромування;

[5] – вибір деталей для зміцнення хромуванням, дослідження роботи насосних систем із деталями, вкритими хромом; формування технічних рекомендацій;

[6] – участь у створенні аналітичної моделі різьбових з'єднань хромованих деталей; проведення розрахунків напружено-деформованого стану;

[7] – безпосередня участь у розробці конструкції установки гідроциклон-фільтра, технології утилізації відпрацьованого хромового електроліту;

[8] – Аналіз напруженого стану штока з хромовим покриттям поршневого насоса; розробка комп'ютерної моделі для верифікації аналітичної моделі; аналіз впливу геометричних дефектів;

[9] – запропонував конструкцію шпindelного вузла пристрою;

[10] – запропонував конструкцію вузла виштовхування пристрою;

[11] – запропонував загальну ідею створення циклон-фільтра;;

[12] – запропонував схему вимірювання проникнення газів із зони тертя у тіло ромованої деталі;

[13] – програмна реалізація алгоритмів та верифікація результатів.

Здобувач висловлює глибоку подяку:

– за оперативне проведення досліджень хромових покриттів на сталі команді Центру колективного користування науковими приладами «Центр електронної мікроскопії та рентгенівського мікроаналізу» Фізико-механічного інституту ім. Карпенка Національної академії наук України, Львів, , а саме: д.т.н., с.н.с. Сергію Корнію , д.т.н., с.н.с., Василю Винару та к.т.н., с.н.с. Богдану Дацку;

– за надання можливості провести статистичну обробку даних із використанням програмного забезпечення Statistica 14 (TIBCO Software Inc., USA) докт. хаб. інж. Міхалу Бембенеку, кафедри виробничих систем, факультету машинобудування та робототехніки, AGH University of Science and Technology, Краків, Польща.

Апробація результатів досліджень: Основні положення дисертаційної роботи були заслухані, обговорені та отримали схвалення на міжнародних науково-технічних конференціях:

– науково-практичному семінарі *«Графічна освіта у закладах вищої освіти: стан та перспективи»*, Івано-Франківськ, 2018;

– 16th International Scientific and Engineering Conference *“Hermetic Sealing, Vibration Reliability and Ecological Safety of Pump and Compressor Machinery”* (HERVICON+PUMPS 2020), Суми, 2020;

– 11th International Conference on Advanced Manufacturing Technologies (ICAMaT 2020), Бухарест, Румунія,. 2020 р;

– IX Міжнародна науково-технічна конференція *“Датчики, прилади та системи»*, Черкаси, 2021;

Міжнародна науково-технічна конференція *“Прогресивні технології у машинобудуванні”* (PTME–2022), Івано-Франківськ – Яремче, 2022;

– XII Всеукраїнська науково-технічна конференція *“Процеси механічної обробки, верстати та інструмент”*, Житомир, 2023

– Всеукраїнська науково-технічна конференція студентів, аспірантів і молодих учених *“Молодь в авіації: нові рішення та перспективні*

технології“, присвячена 125-річчю Національного університету “Запорізька політехніка“, Запоріжжя, 2024.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 20 наукових публікацій, у тому числі:

- 1 розділ у колективній монографії;
- 5 статей у наукових фахових виданнях України (на момент опублікування) за спеціальністю 131 – Прикладна механіка;
- 2 статті у періодичних наукових фахових виданнях проіндексованих у базах Scopus та/або Web of Science Core Collection (квартиль Q1 та Q3);
- 2 патенти України на винахід з експертизою по суті;
- 2 патенти України на корисну модель;
- 1 авторське право на твір (комп’ютерна програма);
- 7 публікацій тез всеукраїнських та міжнародних науково-технічних конференціях.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, п’яти розділів, загальних висновків, переліку використаних джерел, який налічує 121 найменування, та додатків. Загальний обсяг роботи становить 213 сторінок, в тому числі 86 рисунків, 15 таблиць та 4 додатки.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПИТАННЯ І ЗАДАЧІ ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Аналіз умов роботи змінних деталей поршневих насосів двосторонньої дії

У склад бурової установки входять два поршневих насоси двосторонньої дії, один із них робочий, а інший – резервний, і слугують для неперервної подачі під тиском промивальної рідини через колону бурильних труб для очищення вибою свердловини і долота від частинок зруйнованої гірської породи, охолодження і змащування бурового інструменту та винесення цієї породи на денну поверхню (Михайлюк, В. В. та ін., 2022) [21] (рис. 1.1).

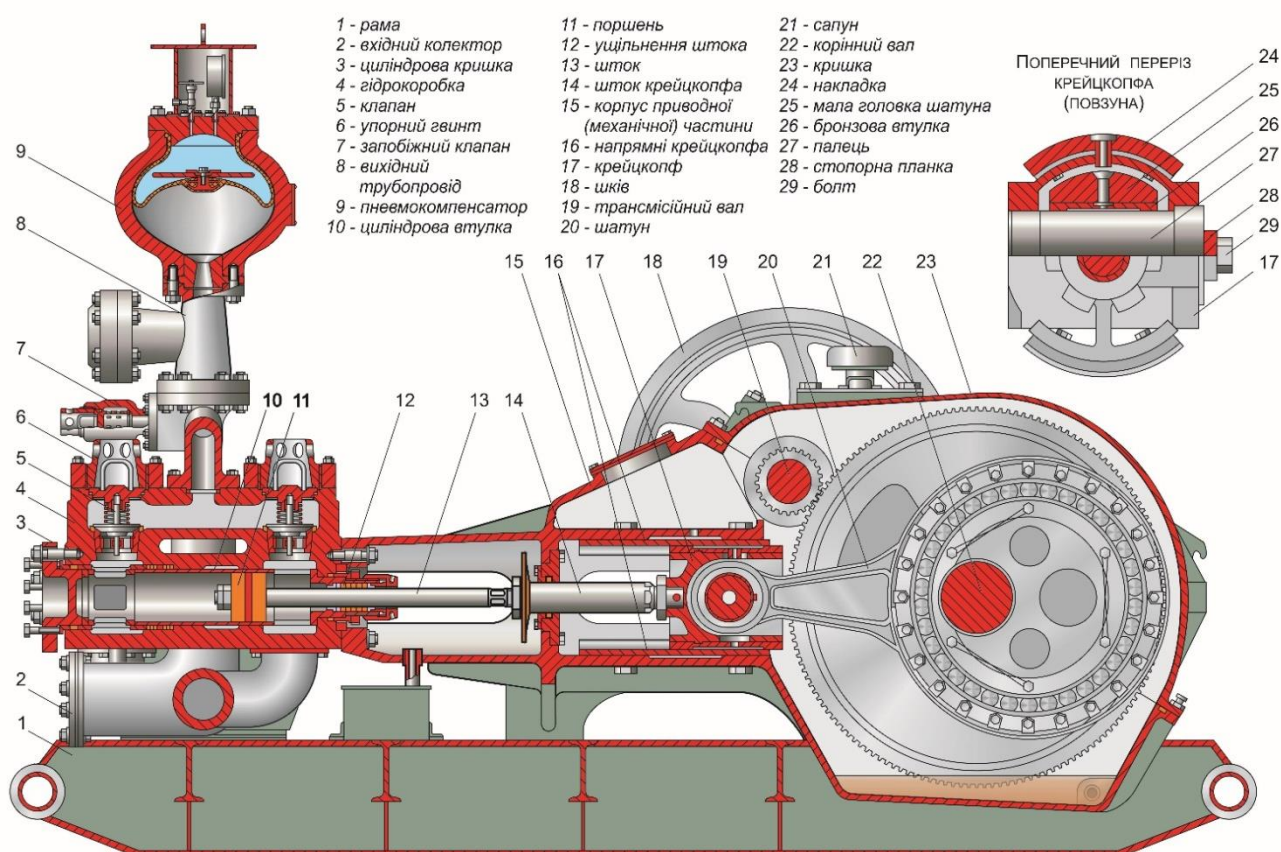


Рисунок 1.1 – Схема бурового поршневого насоса двосторонньої дії УНБ–600 [21]

Ці насоси містять гідравлічну та механічну частин, які з'єднані між собою та змонтовані на рамі. В гідравлічній коробці встановлені змінні циліндрові втулки, в яких рухаються гумово-металеві поршні, закріплені нерухомо на штоках. Центрування цих втулок здійснюється по зовнішньому діаметру. Для герметизації місця виходу штока із гідравлічної частини використовують вузол ущільнення, який містить корпус, що центрується по зовнішньому діаметру в отворі гідравлічної коробки. Гумові манжети встановлюються між пластмасовими кільцями на штоці та монтуються у порожнині корпусу ущільнення. Для стискання гумових манжет і пластмасових кілець використовують натискну гайку. Надставка штока призначена для з'єднання штока поршня із крейцкопфом (повзуном), взаємодіє із своїм гумовим ущільненням, що самовстановлюється на перегородці, для запобігання попадання промивальної рідини у вузол крейцкопфа.

Для ступеневого регулювання продуктивності (подачі) бурові поршневі насоси споряджаються змінними втулками циліндровими (рис. 1.1). За конструкцією втулки циліндрові бувають гладкі або із буртом на зовнішній поверхні. Наприклад, для насоса УНБ-600 втулки мають зовнішню циліндричну поверхню однакового діаметру $\varnothing 230f9$ по якій базуються в корпусі гідравлічної частини по посадці із зазором ($\varnothing 230H11/f9$). Внутрішній діаметр втулки циліндрової виконаний з допуском по H11. Зазвичай насос комплектується набором втулок циліндрових з внутрішнім діаметром: 130, 140, 150, 160, 170, 180, 190, 200 мм. У втулці циліндровій рухається гумово-металевий поршень, який самоущільнюється і забезпечує перекачування промивальної рідини. Для виготовлення втулок циліндрових використовують сталі: 15, 20, 12, 12ХН2, 12ХН3 та інші, які піддають цементації та гартуванню; сталь 45, яку піддають боруванню; сталь 70, яку піддають поверхневому гартуванню струмами високої частоти на глибину 3–6 мм для забезпечення отримання твердості робочої поверхні HRC 60–62. Шорсткість

внутрішньої поверхні втулки циліндрової згідно паспортних даних насоса становити $R_a = 0,32$ мкм.

Шток поршня (рис. 1.1) служить для передачі потужності від крейцкопфа (повзуна) механічної частини поршню гідравлічної частини. За будовою штоки поділяють на суцільні та складені. Перші застосовують в конструкціях малих насосів, а останні – у великих потужних насосах. Штоки виготовляють із таких марок сталей: легованих (12ХН2 або 20ХН3А), які піддають цементації та гартуванню, або із конструкційних сталей (40Х, 40ХН, 38ХМЮН), які гартують струмом високої частоти на глибину 2–5 мм до твердості HRC 52–58. Для забезпечення стійкості проти корозійно-втомного руйнування при циклічному навантаженні твердість основного перерізу (серцевини) штока повинна становити HB 280–320.

Шток – це довгомірна деталь ($L_{\text{шт}}/d_{\text{шт}}=19,2$) із різьбовими кінцями. Точність виготовлення зовнішньої робочої циліндричної частини $\varnothing 70\text{e}8$, шорсткість $R_a = 0,32$ мкм на довжині дещо більшій від суми довжин ходу поршня насоса і довжини його ущільнення. Робоча поверхня штока поршня найбільше зношується в зоні її контактування із гумовими кільцями ущільнення. Це спричинено впливом корозійного середовища, дією високих контактних тисків на поверхню тертя, циклічних навантажень (стиску-розтягу) штока за високої температури, а також присутністю в зоні тертя абразивних частинок гірської породи або обважнювачів промивальної рідини (барит, гематит, тощо).

Змінні деталі гідравлічної частини бурових поршневих насосів двосторонньої дії (втулки циліндрові, штоки поршнів і поршні) експлуатуються в екстремальних умовах: тиск (10 – 25 МПа), знакозмінні навантаження (65 дв. ходів/хв), агресивне середовище з вмістом абразивних частинок (регламентується паспортом, не більше 0,5 %), підвищена температура промивальної рідини (до +80 °С). Все це призводить до швидкого виходу з ладу цих деталей за рахунок інтенсивного зношування, хімічної та електрохімічної корозії, корозійно-механічної втоми, старіння,

термодеструкції тощо. Тому протягом життєвого циклу поршневих насосів двосторонньої дії необхідно здійснювати велику кількість разів заміну втулок циліндрових, штоків поршнів, поршнів і гумових кілець ущільнень, оскільки вони мають низький ресурс роботи (10–250 год), тому потрібна велика кількість запасних частин (змінних деталей) (рис. 1.2, рис. 1.3).

Надійність роботи гідравлічної частини поршневих насосів визначається довговічністю металевих деталей та гумових ущільнень. Порушення герметичності у парі тертя призводить до промивання робочих поверхонь і виходу з ладу за короткий проміжок часу втулки циліндрової, штока поршня, поршня та кілець ущільнення.



а



в



б

а – шток зміцнений поверхневим гартуванням; б – шток зміцнений хромовим покриттям нанесеним у спокійному електроліті; в – гумове кільце ущільнення

Рисунок 1.2 – Характер зношування деталей насоса двосторонньої дії (а) і (б) – штока поршня та гумового кільця ущільнення (в):

У результаті проведених нами промислових досліджень характеру зношування штоків поршнів і циліндрових втулок встановлено, що вони

працюють у режимі реверсивного тертя. Довжина зношеної зони циліндрової втулки складається з суми довжини ходу насоса і довжини гумово-металевого поршня, а довжина зношеної зони штока поршня складається з суми довжини ходу насоса та довжини гумового ущільнення. Ця зона зносу зазвичай має трапецевидну форму.

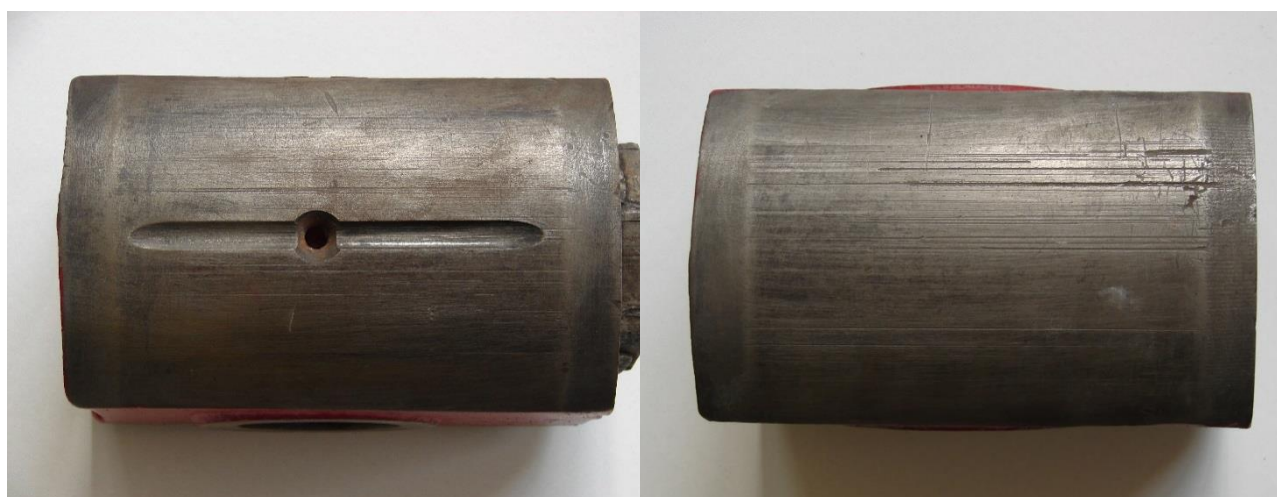
*a**б**в*

Рисунок 1.3 – Характер зношування деталей насоса двосторонньої дії (*a*) – циліндрової втулки і поршнів (*б*) та (*в*)

Найбільш характерними видами зношування та руйнування робочих поверхонь штоків поршнів, втулок циліндрових є: абразивний, гідроабразивний, корозійно-механічний, окислюваний знос, корозія, водневе окрихчення і термічна деструкція гуми.

Крім цього, нами були також проведені промислові дослідження зношування деталей зворотньо-поступальної пари тертя крейцкопф (повзун) – напрямні станини насоса поршневих бурових насосів двосторонньої

дії (рис. 1.4), які дозволили встановити, що робоча поверхня повзуна та напрямних станини зазнають істотного зносу (механічний знос, задири, глибокі повздовжні риски), що у кінцевому результаті призводить до вертикального зміщення центра крейцкопфа та спричиняє істотне зниження терміну служби деталей гідравлічної частини (штоків поршнів та їх ущільнень, циліндрових втулок і поршнів). На основі результатів цих досліджень було висунуто припущення, що підвищене зношування елементів пар тертя спричинене саме виникненням не співвісності між деталями гідравлічної та механічної частини внаслідок похибок виготовлення деталей, складання вузлів, а також зносом пари тертя крейцкопф (повзун) – напрямні станини насоса і створення додаткового навантаження на деталі гідравлічної частини.



а

б

а – вид зверху повзуна; б – вид знизу повзуна

Рисунок 1.4 – Характер зношування повзуна поршневого насоса двосторонньої дії:

Зношені деталі (штоки поршнів і циліндрові втулки) можна використовувати повторно як заготовки під час відновлення у випадку втрати діаметрального розміру на $2\delta = (0,5 \dots 0,6)$ мм. У випадку циліндрових втулок із діаметром 130 мм і більше, їх можна розточувати і використовувати вже як

заготовки деталей із наступним (більшим) типорозміром діаметра, якщо в них є великий знос і промиви робочої частини.

У працях (Богатчук, І. М., та ін., 2007) [22], (Парайко, Ю. І., 2007) [23] та (Остапович, В. В., 2015) [24] вивчили зношування та розглянули різноманітні методи підвищення довговічності деталей гідравлічної частини поршневих насосів: втулок, поршнів, штоків, ущільнень штоків, клапанів, які піддаються різним видам зношування і є змінними деталями, без урахування зносу деталей механічної приводної частини. В працях (Гладкий, С. І. та ін., 2006) [25] та (Воробйов, М. С. та ін., 2010) [26] проведено моделювання кривошипно-повзунного механізму насоса, отримано дані для кінематичного та силового розрахунку, однак автори не враховували вертикальне зміщення спричинене похибками або зносом деталей зворотньо-поступальної пари крейцкопф (повзун) – напрямні станини. У літературі також практично відсутні відомості про напружено-деформований стан штока спричинений зміщенням осі крейцкопфа і напрямних станини насоса.

Тому, дослідження кінематичних, силових показників і напруженого стану та їх урахування під час розроблення заходів, спрямованих на підвищення довговічності (зносостійкості) змінних деталей бурових поршневих насосів двосторонньої дії є актуальним і має важливе як наукове, так і практичне значення.

1.2 Технологічні методи підвищення зносостійкості змінних деталей поршневих насосів

1.2.1 Загальні положення

Змінні деталі гідравлічної частини поршневих насосів двосторонньої дії мають низький ресурс роботи, тому для підвищення їх довговічності використовують такі методи: конструкційні, технологічні та експлуатаційні.

Конструкційні методи ґрунтуються на раціональному виборі розмірів матеріалів (сталей, пластику, гуми), напруженого стану, конфігурації

ущільнень, призначенні раціональних зазорів і натягів у рухомих з'єднаннях, підведенні мастила в зону тертя елементів металево-гумової пари, розвантаженні елементів пари тертя, компенсації зношування ущільнюючих елементів, а також у наданні додаткових рухів деталям пари тертя під час їх переміщення, застосуванні гідрозахисту та біметалевих втулок циліндрових (Концур, І. Ф. та ін., 2013) [27], Конструкційні методи – зазвичай можливо реалізувати на стадії проектування нових насосів або під час їх модернізації.

Експлуатаційні методи в основному включають регулярне мащення рухомих елементів пар тертя, зниження навантажень (тиску), кількості ходів поршня та очищення промивної рідини від твердих частинок гірської породи. Під час очищення промивальної рідини разом із частинками гірської породи від відділяються обважнювачі, що призводить до додаткових витрат на їх закупівлю, а також потребують спеціального обладнання для очищення промивальної рідини тому цей метод не завжди є ефективним, тому, що режими буріння є пріоритетними під час будівництва свердловин.

Оскільки у поршневих бурових насосах застосовують змінні деталі, які працюють в екстремальних умовах, швидко зношуються і мають низький ресурс роботи, то особлива роль належить технологічним методам підвищення їх зносостійкості, які є перспективними, оскільки зміцнені деталі встановлюють на насоси, що вже є на буровій (робочий та резервний).

Технологічні методи підвищення зносостійкості деталей бурових насосів базуються на ідеях підвищення зносостійкості та корозивної тривкості шляхом збільшення твердості поверхні, створення сприятливого напруженого стану в поверхневих шарах, регулярного мікрорельєфу та шорсткості поверхні, точності виготовлення із урахуванням принципів технологічної спадковості. Твердість підвищують за рахунок використання об'ємного гартування і поверхневого гартування, поверхневого пластичного деформування, формування різного роду покриттів на робочих поверхнях деталей для їх захисту як від зносу, так і від корозійно-механічного руйнування.

Більш детально розглянемо технологічні методи зміцнення деталей насосів, звернувши особливу увагу на процеси нанесення різного роду покриттів, які дозволяють здійснювати раціональне використання матеріалів: деталь виготовляючи із конструкційної сталі, а на її робочу поверхню наносити зносостійке та корозійно тривке покриття необхідної товщини. Тому розроблення та оптимізація технологічних процесів зміцнення із формування зносостійких покриттів для підвищення якості робочих поверхонь деталей поршневих насосів є актуальним технічним завданням, яке має важливе як наукове, так і практичне значення.

Модифікування поверхневих шарів деталей насосів здійснюють такими основними способами: поверхневим гартуванням струмами високої частоти, поверхневим пластичним деформуванням і фрикційним зміцненням, хіміко-термічною обробкою, електроіскровим легуванням та покриттями, які наносять напиленням (плазмове, газополуменеве, електродугове, детонаційне тощо), електрохімічним осадженням із електроліту (хромування), а також поєднанням комбінації вище перелічених способів (Ющенко, К. А. та ін., 2007) [28].

Властивості покриттів характеризуються такими показниками: твердість, міцність, зчеплення з основою, пластичність, захисна дія, електрохімічна полярність шару покриття до основи, товщина, шорсткість, пористість, залишкові напруження тощо. Відомі комплексні критерії вибору матеріалів стосовно до умов статичного, тривалого навантаження і механічного зношування, які базуються на механічних властивостях матеріалів зазвичай не придатні для раціонального вибору матеріалів покриттів, які наносять на поверхні сталевих деталей, що працюють під навантаженням в агресивних середовищах електролітів з вмістом абразивних частинок, які є характерними для умов роботи деталей поршневих насосів у нафтовій, газовій та хімічній промисловості.

Відомо, що захисна дія і роботоздатність металевих покриттів в агресивних середовищах визначається їх електрохімічними властивостями,

полярністю відносно металу основи, товщиною, пористістю, міцністю зчеплення з основою, мікротвердістю, наявністю внутрішніх залишкових напружень тощо. У багатьох випадках під час вибору покриттів досліджують їх корозійну тривкість гравіметричним методом, або знімають поляризаційні криві та на їх основі графоаналітичним методом (екстраполяцією) визначають швидкість електрохімічної корозії. За полярністю до основи, металеві покриття поділяють на катодні та анодні. Тому, під час дослідження корозійних процесів у системі електроліт – покриття – сталева основа необхідно враховувати електрохімічні властивості кожного компоненту композиції, оскільки покриття може змінювати свою полярність відносно металу основи залежно від складу електроліту. Крім того, необхідно визначати рівень допустимих напружень, які виникають у деталях з покриттями під час експлуатації машин і механізмів (Остапович, В. В. та Роп'як, Л. Я., 2011) [29]

Кожен з зазначених вище методів зміцнення має низку переваг і недоліків. Головним завданням технолога є раціональний підбір способів або їх комбінацій для зміцнення робочих поверхонь деталей як з точки зору забезпечення отримання оптимальних експлуатаційних властивостей, так і з точки зору економічної доцільності виготовлення виробів.

1.2.2 Гартування струмами високої частоти

Заводські варіанти технологічного процесу передбачають виготовлення штоків поршнів із сталі 40X з наступним поверхневим гартуванням струмами високої частоти (завод «Металіст», м. Стрий, Механічний завод, м. Дрогобич, ТзОВ «Інтербур», м. Івано-Франківськ). Шток розташовують в індукторі, виготовленому з мідної трубки, через яку поступає вода для охолодження. На індуктор від генератора подається струм високої частоти від 8 до 500 кГц, який здійснює поверхнєве нагрівання деталі до температури вищої за критичну A_{C3} з подальшим швидким охолодженням для проведення гартування (3–6 мм) (Бучинський, М. Я. та ін., 2017) [30].

1.2.3 Поверхнєве пластичне деформування

Серед доступних і достатньо продуктивних методів підвищення твердості робочих поверхонь сталевих штоків насосів, їх зносостійкості є методи поверхневого пластичного деформування (ППД). Механізм зміцнення ППД пояснюється зміною структури поверхневих шарів металу та формуванням у них залишкових напружень стиску, які гальмують розвиток поверхневих тріщин. Вибір режимів процесу визначається фізико-механічними властивостями оброблюваного матеріалу, формою та геометричними розмірами робочої частини інструмента, шорсткістю та маркою мастильно охолоджуючої рідини. Найбільш поширеними технологічними способами пластичного поверхневого деформування є обробка дробом/кульками, обкатування роликми, алмазне вигладжування, ультразвукова обробка тощо (Горик, О. В., та ін., 2002) [31].

Обкочування роликми – здійснюється за допомогою спеціальних пристроїв на токарних верстатах. Як матеріал роликів використовують леговані сталі ХВГ, 5ХНМ або інструментальні сталі У10А, У12А (HRC 58–65). У залежності від конфігурації поверхонь, що підлягають зміцненню, роликми можуть мати фасонний робочий профіль. Під час оброблення ролик може обертатись вільно (обкатування) або примусово – фрикційне зміцнення (Бабей, Ю. И., 1988) [32], при цьому тиск роликів на поверхню деталі не повинен перевищувати границю міцності сталі. Результати досліджень показали, що в результаті фрикційного зміцнення сталі формуються специфічні структури – «білі шари», які мають більш позитивний електродний потенціал порівняно з основою і характеризуються підвищеною мікротвердістю та корозійною стійкістю.

Авторами (Белоусов, В. Я. та ін., 1990 [33]) розроблена конструкція інструменту для фрикційного зміцнення деталей, виконаного у вигляді циліндра на поверхні якого під кутом до площини, перпендикулярної до його осі обертання, розміщено кільцевий буртик з плоскою робочою ділянкою. Застосування такого інструменту дозволяє підвищити продуктивність

обробки за рахунок збільшення ширини зміцненої зони на деталі за один оберт інструмента без збільшення ширини його робочої частини. Крім того, виконання кільцевого буртика похилим дозволяє здійснювати фрикційне зміцнення поверхні деталі методом “діагональної подачі” в результаті чого покращується якість поверхневої обробки.

Автори (Кирилів, В. І. та ін., 2009) [34] та (Kusy, J., and Kuk, A., 2015) [35] показали ефективність використання віброзміцнення для підвищення експлуатаційних властивостей деталей машин.

Дослідники (Chenakin, S.P., et al., 2023) [36] провели порівняльне дослідження енергетики процесу ультразвукової обробки для двох схем навантаження – нормального режиму удару з одним штифтом та для багатоштифтового ковзного/зсувного режиму удару. Встановлено вплив амплітуди та частоти зворотно-поступального руху тримача зразка в режимі ковзання на загальну щільність енергії, що наноситься на поверхню металевого зразка.

Алмазне вигладжування – вид викінчувально-зміцнювальної обробки, що є достатньо простим і ефективним способом підвищення експлуатаційних властивостей робочих поверхонь деталей, в тому числі з покриттями, які працюють на знос. Під час алмазного вигладжування виникає пластична деформація оброблюваної поверхні під дією ковзаючого по ній інструменту, який має випуклу криволінійну поверхню. Під дією інструмента-вигладжувача виступи поверхневих нерівностей пластично деформуються, зминаються і витиснутий таким чином метал заповнює западини нерівностей. Це призводить до зміцнення та зменшення шорсткості поверхні. Вигладжуванню піддають поверхні різних форм: зовнішні і внутрішні циліндричні. Інструменти оснащують натуральними або синтетичними алмазами, твердими сплавами, синтетичним корундом. На експлуатаційні показники сталевих деталей з хромовими покриттями впливають залишкові напруження і стан поверхні, тому дослідники приділяють значну увагу вивченню цих факторів. У праці (Bembenek, M. et al., 2023) [37] вивчено

вплив технологічних режимів алмазного вигладжування на напружено-деформований стан електрохімічного хромового покриття, нанесеного на сталеву основу. Розроблено скінченно-елементну модель процесу вигладжування хромовим покриттям алмазним інструментом, нанесеним на циліндричну деталь зі сталі 40ХН. Досліджено вплив глибини алмазного вигладжування на напружено-деформований стан деталі з хромовим покриттям. Встановлено, що при глибині вигладжування $t = 8$ мкм залишкові стискаючі напруження знаходяться на глибині 80–100 мкм для обох досліджуваних товщин покриття, що сприятиме підвищенню втомної міцності деталей.

1.2.4 Хіміко-термічна обробка

Методи хіміко-термічної обробки (ХТО) широко використовують для поверхневого зміцнення деталей машин (Похмурский, В. И. та ін., 1980) [38]. Під час ХТО насичення проводять із твердої фази, рідкої фази, газової фази та парової фази. Процес ХТО включає такі основні стадії: активація, адсорбція атомів елементу, яким здійснюють насичення, дифузія вглиб деталі. Найбільш поширеними видами хіміко-термічної обробки є цементация, азотування, борування і хромування.

Цементацию (проводять в твердому, газоподібному і рідкому карбюризаторах), де відбувається насичення поверхневих шарів сталеві деталі вуглецем за температури 930–950 °С . Процес цементации триває декілька годин у залежності від необхідної товщини зміцненого шару (0,5–2 мм). Після цементации деталі гартують, піддають низькому відпуску та шліфують і використовують для зміцнення деталей бурового інструменту та обладнання (Yakym, R.S. and Petryna, D.Y., 2020) [39].

Під час азотування здійснюють насичення поверхневого шару азотом, що забезпечує утворення нітридів, які мають високу твердість та зносостійкість деталі (Berladir, K. et al., 2023) [40] та (Dolgov, N.A. et al., 2022) [41]. Інколи для зміцнення деталей застосовують поєднання насичення

сталі азотом і вуглецем (нітроцементация). Дослідники (Внуков, Ю. Н. та ін., 1992) [42] запропонували застосування нітриду титана, карбіду титана та інші для зміцнення інструменту.

Для підвищення зносостійкості втулок циліндрових поршневих насосів застосовують перспективним є застосування борування (Лабунець, В. Ф. та ін., 1989) [43].

Авторами (Мап'ко, О.В., and Stets'ko, A.E., 2020) [44] досліджено кінетику формування дифузійного шару після хромування нікель-кобальт-фосфорним покриттям і встановлено, що атомарний хром інтенсивно транспортується вглиб сталі та забезпечує формування регулярної структури зовнішньої композитної зони. Однак дифузійні покриття вимагають проведення додаткової термічної обробки і мають меншу товщину порівняно з електрохімічними хромовими покриттями.

1.2.5 Електроіскрове легування

Електроіскрове легування відбувається під час протікання електричних розрядів між легуючим електродом (анодом) і деталлю (катодом), яка підлягає зміцненню (Верхотуров, А. Д. та ін., 1981) [45]. При цьому здійснюється спрямоване перенесення матеріалу анода на поверхню деталі, з утворенням шарів покриття міцно з'єднаного з основою, в тому числі й «білих». Перевагами методу також є незначне нагрівання деталі, можливість формування покриттів практично з будь-яких струмопровідних матеріалів: металів та їх сплавів, карбідів, нітридів, боридів, силіцидів, твердих сплавів тощо, можливість локального нанесення покриттів, простота обладнання та можливість його механізації та автоматизації, екологічність процесу.

Дослідники (Kryshtopa, S.I., et al., 2017) [46] обґрунтували можливість застосування методу електроіскрового легування поверхневих шарів сталі 40Х електродами з твердих сплавів Т15К6 та ВК8 для зміцнення робочих поверхонь елементів бурового обладнання. Показано, що в результаті локальних електричних розрядів формуються поверхневі шари леговані Со,

W та Ti, які володіють достатньо високою мікротвердістю, що забезпечує роботоздатність деталей у важких умовах експлуатації.

Особлива увага приділяється гібридним технологіям на основі ЕІЛ, включаючи комбінації з лазерною обробкою, пластичною деформацією, осадженням з парової фази та полімер-металевими накладками (Наронова, О. et al., 2025) [47]. Ці гібридні методи значно покращують якість покриття, підвищуючи твердість, адгезію та структурну цілісність, а також зменшуючи шорсткість та дефекти. Однак багатопараметричний характер цих процесів створює проблеми оптимізації.

До недоліків процесу електроіскрового зміцнення належать недостатньо висока продуктивність, застосування тільки струмопровідних матеріалів, незначна товщина покриття, висока шорсткість зміцненої поверхні.

1.2.6 Напилення покриттів

Газотермічні покриття застосовують для захисту поверхонь деталей від зношування, корозії, і дозволяють суттєво економити дороговартісні метали, підвищуючи надійність та довговічність деталей машин. Використовують під час виготовленні нових деталей та відновлення зношених. Суть процесів газотермічного нанесення покриттів полягає у створенні спрямованого струменя розігрітих частинок матеріалу та газу, який транспортує їх до поверхні деталі, де відбувається формування шарів покриття. У залежності від джерела нагрівання матеріалу розрізняють такі основні способи газотермічного напилення: плазмовий (Борисов, Ю. С. та ін., 1986) [48], (Петров, С. В. та Карп, И. Н., 1993) [49], газополуменевий (Борисов, Ю. С. та ін., 1987) [50], електродуговий (Похмурський, В. І. та ін., 2005) [51], високошвидкісний (надзвуковий) (Kuroda, S. et al., 2008) [52], детонаційний (Мажейка, О. Й., 2011) [53].

Технологічний процес газотермічного нанесення покриттів містить такі основні операції: підготовка поверхні деталі (створення шорсткої основи), підготовка матеріалів для покриття, напилення шарів покриття, подальша

обробка сформованого покриття (наповнення, ущільнення, механічна обробка тощо) (Бережний, С. П. та ін., 2006) [54].

1.2.6.1 Плазмове напилення

Здійснюється за допомогою плазмотронів (генераторів високотемпературних газових струменів), в дуговому розряді яких газ (аргон, водень, азот) за рахунок іонізації перетворюються на плазму [26]. Температура останньої може сягати до ($\sim 10^4$ К). Як матеріал покриття використовують тугоплавкі метали, оксиди, карбіди, силіциди, борида тощо). Розпилювальний матеріал (дріт, порошок, стрижень) вводять у плазмовий струмінь, де він топиться (або нагрівається до температури близької до температури топлення), розпилюється і переноситься із швидкістю 100 – 200 м/с на поверхню деталі у вигляді дрібних часток (20–100 мкм) [48, 49].

Автори (Smirnov, I. et al., 2023) [55] провели порівняння хімічного складу та зносу покриттів залізо-алюмінідних і нікель-алюмінідних, нанесених методом плазмового напилення. Показано, що знос нікель-алюмінідних покриттів був у 2–2,5 рази нижчий, ніж у залізо-алюмінідних покриттів. Коефіцієнт тертя залізо-алюмінідних покриттів дещо нижчий, ніж у нікель-алюмінідних покриттів, що робить її перспективними для промислового застосування.

Результати стендових досліджень та промислових випробувань штоків насосів зміцнених плазмовим напиленням покриттів (Гладкий, С. І., 2008) [56] свідчать про роботоздатність пар тертя, що працюють при зворотно-поступовому русі. Однак, наявність пор у такому покритті призводить до зниження ресурсу роботи.

1.2.6.2 Газополуменеве напилення

Ґрунтується на тому, що високотемпературний газовий потік утворюється в спеціальному газополуменевому пальнику, із застосуванням горючих газів (ацетилен, пропан, бутан, метан, водень тощо). Як окислювач

використовують кисень, який змішується з вищеперерахованими горючими газами. При цьому температура газового полум'я сягає 3200 °С, а швидкість утвореного газового потоку становить 100 – 150 м/с. У цей потік подається аксіально порошок або дріт, які топляться і переносяться стисненим повітрям, потік якого розміщений концентрично навколо газополуменового струменя [50].

1.2.6.3 Електродугове напилення

Даний різновид газотермічного нанесення покриттів є найбільш простим і в той же час високопродуктивним. Процес здійснюється за допомогою електродугових апаратів, які містять механізм подачі металевих дротів, під'єднаних до джерела постійного або змінного струму, та сопло. Під час сходження дротів загоряється електрична дуга, що їх топить. Розтоплений матеріал переноситься струменем стисненого повітря на поверхню деталі, утворюючи на ній покриття. Покриття формують з дротів однакових/різних матеріалів або порошкових дротів, (металева оболонка наповнена різними складниками матеріалу покриття [51].

Розширення технологічних можливостей електродугового напилення досягається спорядженням електродугового апарата порошковим живильником. При цьому частинки порошку поступають із живильника в зону електричної дуги, яка горить між дротами-електродами, що забезпечує формування композиційного покриття (Кустов, В.В. та Роп'як, Л.Я., 2003) [57]. Перевага даного способу формування композиційних покриттів порівняно з нанесенням покриттів із порошкових дротів полягає в простоті регулювання відсоткового вмісту порошку в складі напиленого композиційного покритті, в тому числі, й за його товщиною. В порошкових же дротах, як відомо, відсоткове співвідношення його складових є фіксованою величиною.

Автори (Holiyakevych, A.A. et al., 2015) [58] дослідили вплив фазового складу, напилених з порошкових дротів покриттів, на локальну корозію

штоків гідроциліндрів у 3% розчині NaCl. Показано, що шари, напилені з порошкових дротів з вмістом хрому 14–20 мас.%, характеризуються сильною локальною стрічкоподібною корозією, інтенсивність якої залежить від фазового складу шару, а корозивна тривкість вкритих штоків гідроциліндрів низька.

1.2.6.4 Високошвидкісне (надзвукове) напилення

Нова прогресивна технологія газотермічного напилення покриттів, яка забезпечує нанесення покриття із порошкових матеріалів, що рухаються на високій (зазвичай до 3 швидкостей звуку) і наносяться на деталь [52]. Дозволяє наносити покриття практично із металів, сплавів та їх сполук.

1.2.6.5 Детонаційне напилення

Метод напилення покриттів, який ґрунтується на використанні енергії вибуху суміші горючих газів (пропан-бутану) з киснем і дозволяє наносити покриття з металів, оксидів, карбідів, боридів, а також композиційні покриття. Процес здійснюється на спеціальній установці, в камеру якої подається вказана суміш газів. Далі вводять з струменем азоту порошок. Після цього газова суміш підпалюють електричною іскрою, що призводить до утворення високотемпературної вибухової хвилі, яка нагріває частинки порошку до 4000 °С та розганяє їх до високих швидкостей, які досягають 800–1500 м/с [53]. Процес забезпечує формування покриттів з низькою пористістю до 1 % та з високою міцністю зчеплення з основою – до 250 МПа і більше.

Серед технологій, які забезпечують формування зносостійких покриттів, слід виокремити електродугове наплавлення на сталь складних тугоплавких сполук, які володіють високою твердістю та є альтернативою дорого вартісному та дефіцитному карбиду вольфрам (Prysyazhnyuk, P. et al., 2022) [59], для зміцнення деталей бурового обладнання.

Найбільш поширеним застосуванням напилених і наплавлених покриттів є виготовлення нових та ремонт і відновлення зношених деталей машин та обладнання. За допомогою вказаних способів можна відновити зношені поверхні деталей шляхом нанесення покриття товщиною від десятків мікрометрів до декількох міліметрів на сторону. Однак такі покриття потребують механічного оброблення, а для досягнення заданої точності та шорсткості робочих поверхонь деталей необхідно знімати значні припуски твердого матеріалу.

Не дивлячись на те, що деякі методи газотермічного напилення покриттів розглядаються, як альтернатива методам електрохімічного нанесення покриттів (Igartua, A. et al., 2022) [60], останні все ж таки довго займають свою нішу на ринку покриттів (Петров, Ю. Н. та ін., 1976) [61], а хромові покриття є найбільш розповсюдженими серед металевих покриттів (Молчанов, В. Ф. та ін., 1976) [62] та (Молчанов, В. Ф., 1979) [63], тому удосконалення технології хромування може бути ефективним рішенням для обробки поверхонь у сфері зеленої трибології.

1.2.7 Нанесення електрохімічних хромових покриттів

Проведений аналіз технологічних процесів виготовлення деталей машин показав, що серед різноманіття методів нанесення металевих покриттів найбільш розповсюдженим є хромування. При цьому металеві покриття можна розташували в ряд за зменшенням частоти їх нанесення в такому порядку: $Cr > Ni > Zn > Cu > Cd$. Результати рейтингу покриттів показали, що найбільш часто наносять електрохімічними методами металеві хромові та нікелеві покриття. Це важливо не лише для розуміння структури ринку покриттів, але й для визначення пріоритетних напрямків проведення науково-технічних досліджень.

Захисні зносо- та корозивнотривкі покриття на деталях машин повинні задовольняти наступним вимогам: бути суцільними, ізолюючи метал від корозивного середовища; механічно стійкими (зносотривкими) та мати

високу адгезію до металу основи; низька пористість захисного покриття тощо.

Найпоширенішим із вищенаведених способів захисту відповідальних деталей машин є хромування. Тверде хромування використовують на деталях, які повинні працювати за жорстких умов експлуатації – високі температури, навантаження, тертя, абразивне зношування, агресивні середовища. Тверде хромування забезпечує стійкість до зносу та корозії, а також дозволяє відновити зношені деталі до точних розмірів. Хромові покриття завдяки наявності на поверхні досить щільної оксидної плівки, яка під час найменшого пошкодження легко відновлюється, застосовують для захисту від корозії різних металів, а також і для декоративної обробки поверхні виробів. Хромові покриття мають низький коефіцієнт тертя, тверді та термостійкі, мають добру адгезію до основи, забезпечують стійкість до корозії.

Ці покриття використовують як під час виготовлення нових деталей, так і під час ремонту зношених. Основні промислові промислові вироби, на деталі яких наносять тверді хромові покриття: двигуни, шасі літаків, обладнання для нафтових свердловин, колінчасті вали, пневматичні та гідравлічні циліндри, поршневі, плунжерні та відцентрові насоси, обладнання для виготовлення паперу, пресформи, штампи, бурові долота, різальний інструмент та обладнання для енергетичної та гірничої промисловості тощо. Тобто деталі, які зазнають корозійно-абразивного зношування. Ці покриття повинні мати відповідну твердість, зносостійкість, адгезію, втому міцність, корозійну стійкість та шорсткість поверхні. Крім цього є й специфічні характеристики, такі як знос гідравлічного ущільнення, що є актуальним для циліндрів гідроприводів та насосів. Товщини хромових покриттів досить високі тому деталі можуть бути покриті кількома шарами.

Хром, в основному, осаджують з висококонцентрованих розчинів. Типовий склад ванни з шестивалентним хромом: хромово кислота $\text{H}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ від 225 г/л до 300 г/л; сірчана кислота H_2SO_4 від 2,25 г/л до 3,0 г/л.

Температура електроліту від 45 °С до 60 °С. Густина струму від 15,5 А/дм² до 31,0 А/дм². Аноди в основному свинцеві з додатками 7 % олова. Після розчинення хромової та сірчаної кислот робочий розчин містить хромовмісні іони. На катоді у процесі електролізу проходять одночасно декілька процесів (Яворський, В.Т. та ін., 2000) [64]: електрохімічне відновлення Cr^{+6} до Cr^{+3} ; електрохімічне відновлення Cr^{+6} до металевого Cr; електрохімічне відновлення водню; утворення суцільної металевої плівки. Для осадження хрому потрібні сторонні аніони наприклад SO_4^{2-} . Вони адсорбуючись на окисненій катодній поверхні утворюють розчинні комплекси, які переходять в розчин, знімаючи оксидну плівку.

Крім сполук хрому, ванни для твердого хромування також містять каталізатори реакцій осадження. Зазвичай це сульфатні або фторидно-сульфатні каталізатори з низькими концентраціями (~1 % концентрації хромової кислоти). Деталі в процесі хромування наводнюються внаслідок протікання електрохімічних реакцій, що відбуваються на поверхні та в самому покритті. Для покращення функціональних властивостей нанесені хромові покриття потребують відпалу. В праці (Liang, A. et al., 2013) [65] дослідили формування хромових покриттів із різних електролітів і вивчили їх структуру. Встановлено, що трибологічні властивості хромових покриттів, отриманих із електролітів, що містять іони тривалентного хрому, нижчі ніж у покриттів отриманих із електролітів, що містять шестивалентний хром. Показано, що застосування термічної обробки – відпалу за температури 180 °С протягом двох годин забезпечує підвищення зносостійкості хромового покриття.

Більшість сполук шестивалентного хрому розчинні у воді та є сильними окислювачами. Шестивалентні та тривалентні сполуки хрому відрізняються за своїм впливом на здоров'я людей та навколишнє середовище, при цьому шестивалентна форма є набагато небезпечнішою. Короткочасні наслідки впливу шестивалентного хрому (наприклад, крапель хромової кислоти або хроматного пилу) спричиняють подразнення очей, подразнення дихальних

шляхів, чхання або сенсibiliзацію; за високих концентрацій гостре вдихання може викликати виразки в носовій перегородці. У чутливих людей вдихання шестивалентного хрому може викликати напад астми. Відомо, що тривале вдихання шестивалентного хрому викликає рак легенів. Також може призвести до пошкодження слизової оболонки носа, перфорації носової перегородки та астми [66].

Крім санітарних, є ще й певні функціональні недоліки даного методу. Це складна підготовка поверхні деталі перед процесом електрохімічного хромування, низька адгезія покриття, складність видалення домішок з ванни для покриття, проблеми з очищенням розчину для промивання покритих деталей (внаслідок чого утворюється велика кількість шестивалентного хрому), а також перерви або зміни струму час нанесення покриття. Під час шестивалентного хромування стоки промивної води необхідно обробляти діоксидом сірки або бісульфатом натрію, щоб зменшити вміст Cr (VI) та перевести його до Cr (III). Кількість шламу, що утворюється в результаті використання шестивалентного електроліту хромування, приблизно в 30 разів більша, ніж під час тривалентного процесу. Екологічна небезпека процесу шестивалентного хромування спонукала дослідників до пошуку альтернативної заміни. Хоча самі хромові покриття мають високі функціональні властивості. Зокрема високу твердість 1000 HV, товщину – 250 мкм, незначно понижують втомну міцність вихідних металевих деталей, які можуть бути поверхнево оброблені обкочуванням (Korzynski, M. et al., 2009) [67]. Перспективним методом заміни електролітів шестивалентного хромування є тривалентне хромування. Тривалентний хром нетоксичний, нешкідливий та не є окислювачем. Набагато легше дотримуватись вимог щодо якості повітря. Вплив тривалентного хрому на довкілля на порядок нижчий. Під час тривалентного хромування значно зменшуються витрати на утилізацію електроліту. Утворення осаду гідроксиду зменшується в десять-двадцять разів, оскільки тривалентний електроліт хромування зазвичай працює при концентраціях хрому приблизно від 4 г/л до 20 г/л, а у ваннах для

шестивалентного хромування – від 150 г/л до 300 г/л. Воду, що використовується для промивання деталей після хромування необхідно очищати. Крім того, тривалентне хромування має низку технічних переваг. Ванна для тривалентного хромування не чутлива до змін струму. Допускається незначна кількість хлоридів сульфатів на поверхні деталей, яка залишається з попередніх операцій. А внесення хлоридів сульфатів порушує баланс каталізатора в шестивалентному процесі хромування.

Особливості процесу тривалентного хромування міді та сталі викладені відповідно в працях (Sziráki, L. et al., 2012) [68], (Kagajwala, B. et al., 2013) [69]. Для процесу тривалентного хромування сталі [69] використовували імпульси катодної та анодної полярності з періодом релаксації між ними. Для хромування були використані як плоскі зразки, так і труби різних діаметрів та довжин. Процес відбувався в проточному електроліті, який перекачувався насосом із резервуару та через патрубок поступав у кільцевий проміжок, утворений внутрішньою поверхнею труби та електродом. Це дозволило змодельовати та вибрати раціональні технологічні режими процесу тривалентного хромування внутрішніх поверхонь та розробити склад робочої електролітичної ванни для проточного хромування. Покриття з тривалентного хрому наносили на плоскі зразки та внутрішні поверхні сталевих труб. Вибрані оптимальні діапазони густин струмів від 32 А/дм^2 до 35 А/дм^2 і частотні характеристики та тривалість катодних та анодних імпульсів за яких утворюються якісні хромові покриття. Проведено дослідження впливу масштабного фактора зразків на параметри процесів хромування. Проведено аналіз впливу діаметрів та довжини сталевих труб на якість покриттів з тривалентного хрому. Досліджені адгезія, зносостійкості та твердість покриттів. Для зменшення впливу водню після хромування сталеві зразки відпалювали за температури 190°C протягом 24 годин. Отримані покриття методом тривалентного хромування, порівняно з шестивалентними, показали, що у них дещо нижча твердість, але інші

експлуатаційні параметри практично не поступаються шестивалентному хромуванню.

Автори (Каданер, Л. І та Гімельфарб, Р. Ю., 1971) [70] дослідили процес хромування в проточному електроліті та показали його ефективність. У дослідженні (Роруак, L. et al., 2016) [71] побудована математична модель процесу, на основі якої були розраховані оптимальні значення технологічних параметрів процесу хромування сталі в проточному стандартному електроліті для отримання максимальної мікротвердості та мінімального зношування. Встановлено, що для забезпечення високих експлуатаційних показників деталей з хромовим покриттям оптимізацію слід проводити за величиною мінімального зносу. Визначено оптимальні технологічних параметрів процесу: масове співвідношення концентрацій компонентів електроліту $C=79,5$; густина струму $i=133,5$ А/дм²; швидкість потоку електроліту в електрохімічній комірці $v=114,7$ см/с; температура електроліту $T=59,3$ °С.

Аналіз літературних джерел, присвячених електрохімічному хромуванню в проточному електроліті показав, що покриття наносять за більш високих густин струму, і при цьому забезпечуються більш рівномірне нанесення шару покриття з низькою шорсткістю, а також більш висока швидкість нанесення покриття та підвищений вихід хрому за струмом.

Хромування широко застосовується також і для захисту алюмінієвих сплавів (Oduoza, C.F. et al., 2014) [72]. Гальванічне хромування хоча і є екологічно небезпечним все ще посідає вагоме місце, особливо у літако- та ракетобудуванні, оскільки хромові покриття мають високі функціональні властивості. Крім цього активно розробляються також нові, більш екологічно безпечні, методи зміцнення алюмінієвих сплавів, наприклад, анодуванням.

Тобто найбільш часто використовують хромові покриття для підвищення зносостійкості деталей двигунів внутрішнього згорання, компресорів, поршневих і плунжерних насосів, гідро- і пневмоприводів, стволів стрілецької та артилерійської зброї тощо.

Автори (Zhang, N. et al., 2013) [73] провели аналіз причин виходу з ладу гідравлічних циліндрів, які є найважливішим компонентом будівельної техніки. Оскільки від якості робочої поверхні штока залежить експлуатаційна надійність і термін служби гідравлічного циліндра, то для підвищення корозійної стійкості та зносостійкості штока пропонується використовувати гальванічні хромові покриття. Оцінили економічність технології хромування.

Основним конструктивним елементом стрілецької зброї є стволи, в яких внутрішня нарізна поверхня отвору швидко зношується (Ma, J.-S. 2018) [74], тому потребує захисного покриття. Покриття ствола хромом може ефективно покращити ерозійну стійкість ствола та зносостійкість, і таким чином, збільшити термін його експлуатації (Li, X.-L. et al., 2021) [75] та Zou, L. et al., 2024) [76]

У праці (Yusron, R.M. et al., 2020) [77] досліджували хромові покриття, нанесені на середньовуглецеву сталь ASSAB 618S для її захисту від корозії. На основі результатів цього дослідження зробили висновок, що температура електроліту, відстань між електродами впливають на швидкість корозії гальванічного твердого хромового покриття. Дослідження (Jeeva, P.A., 2020) [78] присвячені електрохімічному хромуванню, де розглянуто процеси формування покриття та визначено його механічні властивості. Встановлено, що хромові покриття мають сітку мікротріщин, високу мікротвердість, стійкі до корозії та зносу, а також характеризуються низьким коефіцієнтом тертя.

На тепер гальванічні хромові покриття використовується в промисловості для підвищення корозійної стійкості, стійкості до стирання різних деталей машин (Vinh, P.N. et al., 2018) [79] (Ngon, D.T. et al., 2016) [80]. Хромування широко використовується під час реставрації зношених деталей (Xia, H. et al., 2018) [81]. Однак хромове покриття впливає на втомну міцність деталей машин. Тому гальванічні хромові покриття доцільно використовувати для підвищення зносостійкості та корозійної тривкості деталей машин, але не для підвищення їх втомної міцності.

Серйозною проблемою є те, що у виробничих процесах хромування використовується шестивалентний хром, який є сильним токсикантом. Тому в останні роки інтенсивно ведуться дослідження, спрямовані на заміну електролітів шестивалентного хрому на тривалентний хром (Protsenko, V.S. et al., 2018) [82].

Автор (Katirci, R., 2016) [83] досліджував вплив сахарину на фізико-хімічні властивості хромового покриття, і, встановив, що сахарин робить можливим нанесення покриття за низької концентрації іонів Cr^{3+} у тривалентному хромовому електроліті. У дослідженнях (Liang, A. et al., 2017) [84] та (Hall, T.D. et al., 2017) [85] наведено властивості хромових покриттів, нанесених з електроліту Cr (III). Встановлено, що такі хромові покриття мають достатньо високу зносостійкість та корозійну стійкість. У праці (Qi, J. et al., 2020) [86] вивчали формування хромового покриття на алюмінії з електроліту з вмістом іонів тривалентного хрому.

Електрохімічному хромуванню в спокійному електроліті на постійному струмі присвячена велика кількість досліджень, зокрема (Sherwin, C. et al., 2020) [87]. Досліджували нанесення твердого хрому (Putri, S. et al., 2019) [88] на елементи імплантанта суглоба з нержавіючої сталі 304, використовуючи метод Тагучі для проведення експерименту та отримання оптимальної товщини покриття. Встановлено, що найбільш значущими факторами для товщини гальванічного покриття є концентрація хромової кислоти та напруга, а найменш впливовим фактором – час.

У праці (Bikulčius, G. et al., 2017) [89] досліджено трибологічні властивості хромових покриттів, нанесених на нержавіючу сталь 316Ti з сульфатних ванн Cr (III) з комплексоутворювачами. Дослідження коефіцієнта тертя під час сухого зношування показали, що хромові покриття, нанесені у ванні Cr (III), мають кращі трибологічні властивості порівняно з покриттями Cr , нанесеними із ванни Cr (VI).

Автори (Addach, H. et al., 2007) [90] провели оптимізацію процесу хромування в спокійному електроліті в імпульсному режимі з використанням

центрального композиційного плану. Це дозволило визначити технологічні режими за яких досягається найвища мікротвердість покриття до і після старіння та найменша кількість закупореного водню.

Під час електрохімічного нанесення покриттів у спокійному електроліті не забезпечується рівномірне вкриття хромом, оскільки на катоді (деталь) одночасно осаджується металевий хром і виділяється водень, а також відновлюється шестивалентний хром до тривалентного, а на аноді – виділяється кисень і тривалентний хром відновлюється до шестивалентного. Тому для забезпечення постачання до поверхні деталі «нового» електроліту та інтенсифікації процесу газовідведення формують хромові покриття у проточному електроліті.

У праці (Sonntag, R. et al., 2017) [91] проведено випробовування хромових покриттів, нанесених на металеві деталі шарніра суглоба зі сплаву CoCr, які розробляли для підвищення їх зносостійкості. Як електроліти використовували: (a) промисловий стандартний хромовий електроліт; (b) електроліт шестивалентного хрому Cr (VI) зі зниженим вмістом триоксиду хрому (CrO_3), як без твердих добавок, так і (c) з додаванням наночастинок фулерену C_{60} ; і (d) електроліт тривалентного хрому Cr (III) з додаванням C_{60} . Встановлено, що знос шестивалентних хромових покриттів зменшився на 70 % – 84 % порівняно з еталонним підшипником CoCr–CoCr, тоді як покриття, одержане з тривалентного хрому, навіть збільшило знос більш ніж на 300 %.

Автори (Антропов, Л.И. та Лебидинский, Ю.Н., 1986) [92] показали ефективність застосування композиційних електрохімічних покриттів на основі хрому. Для одержання таких покриттів використовують частинки розміром 0,001–60 мкм за концентрації в електроліті 10–400 г/л, наприклад, карбіди, оксиди, метали тощо. За об'ємного вмісту частинок у кількості 1,5–2,0 % різко змінюються фізико-механічні властивості хромового покриття. Мікротвердість збільшується до 2,3 рази, зносостійкість зростає в 2–15 разів.

У доповіді (Yar-Mukhamedova, G. et al., E., 2013) [93] представлені результати експериментів з введенням нанорозмірних частинок діоксиду кремнію SiO_2 (5–50 нм) та лампової сажі C (11–100 нм) у склад хромових покриттів та дослідження зміни мікротвердості в процесі корозії. Нанокомпозиційні електролітичні покриття були отримані за різних густин струму: 4–5 кА/м^2 , температури 313–333 К та співвідношенні компонентів нанодисперсної фази. Встановлено, що покриття, отримані в електролітах, що містять 18–14 г/дм^3 SiO_2 та 2–6 г/дм^3 C , мають найвищу корозійну стійкість, а мікротвердість не змінювалася в процесі корозії.

У праці (Bikulčius, G. et al., 2018) [94] було досліджено процес отримання композиційних покриттів з металевою матрицею (Cr-ZrO_2) під час електролізу з використанням постійного струму та вивчено захисні властивості цих покриттів. Композиційні покриття Cr-ZrO_2 наносили з електроліту на основі тривалентного сульфату з комплексоутворювачем, що містив різні концентрації частинок ZrO_2 . Результати досліджень показали, що частинки ZrO_2 впливають на мікротвердість, морфологію та корозійну поведінку композиційних покриттів Cr-ZrO_2 , отриманих із електроліту Cr (III) .

Дослідники (Zeng, Z., & Zhang, J., 2008) [95] наносили аморфні хромово-оксидалюмінієві ($\alpha\text{-Cr-Al}_2\text{O}_3$) композиційні електрохімічні покриття товщиною 50 мкм в електролітах Cr (III) , що містили тверді частинки Al_2O_3 та Al^{3+} . Встановлено, що Al^{3+} сприяє рівномірному розподілу частинок Al_2O_3 в хромових покриттях, а введення в склад електроліту 25 г/л частинок $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ значно покращує трибологічні характеристики покриттів $\alpha\text{-Cr}$.

Однак у літературі практично відсутні відомості щодо системного підходу до розроблення технологічних режимів нанесення електрохімічних хромових покриттів в проточному електроліті на довгомірні сталеві деталі, обґрунтування товщин покриттів, механічної обробки покриттів та утилізації відпрацьованих електролітів.

1.3 Механічна обробка покриттів

Механічну обробку покриттів здійснюють, в основному, точінням і шліфуванням. Під час точіння покриттів застосовують різці із твердого сплаву, ельбору та алмазні, а для шліфування – абразивні та алмазні круги. Режими різання потрібно вибирати у залежності від твердості покриттів, їх міцності зчеплення з основою та вимог щодо стану поверхні деталі (шорсткість, точність) та матеріалу інструменту, який використовують. Обробка в обох випадках ведеться за малих глибин різання із застосуванням мастильно-охолоджувальних рідин. Під час обробки твердих покриттів використовують алмазні круги на бакелітовій зв'язці для забезпечення отримання високої чистоти поверхні ($R_a < 0,32$ мкм).

Вивченню процесів механічної обробки покриттів приділяється значна увага багатьма дослідниками (Клименко, С. А. та ін., 2011) [96], (Полонский, Л. Г., 2011) [97], (Пилипенко, М., 2000) [98] і (Кустов, В. В. та ін., 2015) [99].

У працях (Шацький, І. П. та ін., 2023) [100] досліджено силову взаємодію індентора з покриттям для імітації процесу точіння, а в (Роп'як Л. Я. та ін., 2019) [101] досліджено взаємодію абразиву із покриттям для імітації пронесу шліфування.

Авторами [102] запропоновано визначати припуск на обробку деталей з напиленим покриттям залежно від їх товщини та умов міцності. Такий метод визначення припуску потребує видалення шару покриття значної товщини.

Також відомий спосіб визначення припуску на обробку деталей з газотермічними покриттями (Кравченко, М. П. та ін., 2012) [103], який включає пошарову обробку зразка з однаковим кроком та урахуванням наявності дефектного шару, що базується на визначенні мікротвердості.

У дослідженні (Кравченко, М. П. та ін., 2011) [104] запропоновано визначати припуск на механічну обробку напиленого покриття, який базується на встановленні закономірності зміни шорсткості під час

пошарової механічної обробки. Припуск визначається товщиною видаленого шару, за якої досягається мінімальна шорсткість обробленої поверхні.

У дослідженнях (Клименко, С. А. та ін., 2014) [105] представлено результати фінішної алмазно-абразивної обробка еластичними інструментами в ремонтному виробництві. Авторами (Lira, Z. et al., 2010) [106] наведено залежності для визначення шорсткості поверхні від технологічних режимів різання для шліфування напилених керамічних покриттів, а у (Роп'як, Л. Я. та. Остапович, В. В., 2016) [107] – для алмазного шліфування електрохімічних хромових. Однак у цих працях не наведені відомості про припуски на обробку.

Дослідники (Kusyi, Y., et al., 2024) [108] запропонували проводити контроль параметрів поверхневого шару сталевих деталей під час їх обробки за критерієм однорідності матеріалу, що дозволить здійснювати раціональний вибір припусків.

Виготовлення машинобудівної продукції високої якості потребує загалом раціонального вибору інструментів (Onysko, O., 2024) [109] моделювання та оптимізації точності розмірів і шорсткості поверхні (Vukelic, D., 2024) [110] та оптимізаційного синтезу технологічних параметрів обробки під час виготовлення деталей машин (Kusyi, Y., 2022) [111].

Аналіз результатів, представлених у працях [96–111] показав, що вони стосуються процесів різання, призначення припусків для обробки зносостійких напилюваних покриттів, тобто твердий верхній шар покриття видаляється обробкою різанням та перетворенням на стружку. Разом з тим, у нормативній та довідковій літературі практично відсутня інформація щодо вибору або розрахунку припусків на проведення обробки алмазним шліфуванням електрохімічних хромових покриттів.

Висновки до розділу 1

Проведений у даному розділі аналіз умов роботи і зношування деталей бурових поршневих насосів двосторонньої та стан технологічних методів зміцнення, в тому числі з нанесенням електрохімічних хромових покриттів, зумовив вибір теми, формулювання науково-технічної задачі, мети, об'єкту та предмету дисертаційного дослідження, детально описаних у вступі.

Результати розділу опубліковано в праці автора [4].

РОЗДІЛ 2

АНАЛІТИКО-ЧИСЛОВИЙ АНАЛІЗ ЗМІН НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ШТОКА ІЗ ЗАХИСНИМ ПОКРИТТЯМ ВНАСЛІДОК ПОХИБКИ ВИГОТОВЛЕННЯ/ЗНОШУВАННЯ ПАРИ КРЕЙЦКОПФ – НАПРЯМНІ ПОРШНЕВОГО НАСОСА

2.1 Вплив зміщення деталей у парі тертя “крейцкопф – напрямні станини” на кінематичні та силові параметри насоса

Досліджували зміну кінематичних та силових параметрів поршневого насоса двосторонньої дії (рис. 1.1), спричинену похибою виготовлення, складання або зносом деталей зворотно-поступальної пари тертя крейцкопф (повзун) – напрямні станини насоса. Такого роду моделювання дасть змогу уточнити швидкісні та силові параметри під час проведення трибологічних випробовувань матеріалів і покриттів для зміцнення деталей насосів.

У механічній частині поршневих насосів для перетворення обертового руху в зворотно-поступальний рух поршня застосовують кривошипно-повзунний механізм з одним ступенем свободи, в якому кривошипи зміщені один відносно іншого на кут 90° у напрямку обертання (Роп'як, Л. Я. та ін., 2020) [1] та (Остапович, В. В. та ін., 2011) [112] (рис. 2.1).

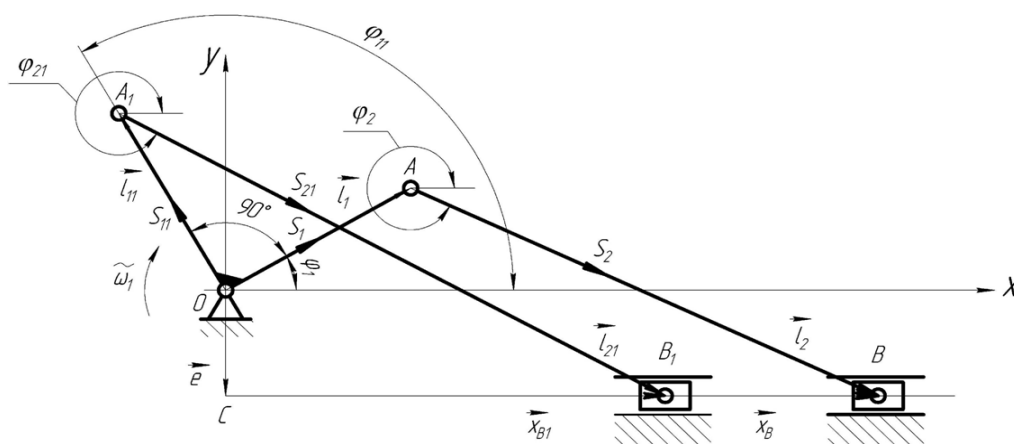


Рисунок 2.1 – Кінематична схема механізму бурового насоса УНБ-600 [1, 112]

Для визначення кінематичних та силових параметрів були складені рівняння замкнутих векторних контурів $OABCO$ і $OA_1B_1C_1O$, при цьому прийняли, що вертикальне зміщення повзуна e не призводить до перекошування повздовжньої осі штока, і розглянувши тільки один контур $OABCO$, одержали векторне рівняння [1, 112]:

$$\vec{l}_1 + \vec{l}_2 = \vec{e} + \vec{x}_B. \quad (2.1)$$

Спроектувавши векторне рівняння (1) на горизонтальну та вертикальну осі координат і провівши перетворення, одержали [1, 112]:

$$x_A = l_1 \cos \varphi_1, \quad (2.2)$$

$$y_A = l_1 \sin \varphi_1, \quad (2.3)$$

$$x_{S_1} = l_{S_1} \cos \varphi_1, \quad (2.4)$$

$$y_{S_1} = l_{S_1} \sin \varphi_1, \quad (2.5)$$

$$x_{S_2} = l_1 \cos \varphi_1 + l_{S_2} \cos \varphi_2, \quad (2.6)$$

$$y_{S_2} = l_1 \sin \varphi_1 + l_{S_2} \sin \varphi_2, \quad (2.7)$$

$$x_B = l_1 \cos \varphi_1 + \sqrt{l_2^2 - (l_1 \sin \varphi_1 + e)^2}, \quad (2.8)$$

$$y_B = e, \quad (2.9)$$

де: $x_A, y_A, x_{S_1}, y_{S_1}, x_{S_2}, y_{S_2}, x_B, y_B$ – координати точки A , центрів мас S_1 кривошипа OA , S_2 шатуна AB і повзуна B ;

l_1, l_2 – довжина кривошипа OA і шатуна AB , відповідно;

φ_1 – кут повороту кривошипа OA ;

φ_2 – кут повороту шатуна AB ;

e – вертикальне зміщення повзуна.

У результаті диференціювання рівнянь (2.1)–(2.9) за узагальненою координатою φ_1 одержали залежності зміни проекцій аналогів швидкостей точки A , центрів мас S_1 кривошипа OA , S_2 шатуна AB і повзуна B від кута повороту кривошипа φ_1 та величини зміщення e повзуна B [1, 112]:

$$x'_A = -l_1 \sin \varphi_1, \quad (2.10)$$

$$y'_A = l_1 \cos \varphi_1, \quad (2.11)$$

$$x'_{S_1} = -l_{S_1} \sin \varphi_1, \quad (2.12)$$

$$y'_{S_1} = l_{S_1} \cos \varphi_1, \quad (2.13)$$

$$x'_{S_2} = -l_1 \sin \varphi_1 - l_{S_2} \sin \varphi_2 \cdot \varphi'_2, \quad (2.14)$$

$$y'_{S_2} = l_1 \cos \varphi_1 + l_{S_2} \cos \varphi_2 \cdot \varphi'_2, \quad (2.15)$$

$$x'_B = l_1 (tg \varphi_2 \cos \varphi_1 - \sin \varphi_1), \quad (2.16)$$

$$y'_B = 0, \quad (2.17)$$

де: $x'_A, y'_A, x'_{S_1}, y'_{S_1}, x'_{S_2}, y'_{S_2}, x'_B, y'_B$ – проекції аналогів швидкостей точки A , центрів мас S_1 кривошипа OA , S_2 шатуна AB і повзуна B від кута повороту кривошипа φ_1 та величини зміщення e повзуна B відповідно;

$$\varphi_2 = \arcsin \left(-\frac{l_1 \sin \varphi_1 + e}{l_2} \right) - \text{кут повороту шатуна } AB.$$

Після диференціювання виразів (2.10)–(2.17), одержали залежності зміни проекцій аналогів прискорень від кута повороту кривошипа φ_1 та величини зміщення e повзуна B [1, 112]:

$$x''_A = -l_1 \cos \varphi_1, \quad (2.18)$$

$$y''_A = -l_1 \sin \varphi_1, \quad (2.19)$$

$$x''_{S_1} = -l_{S_1} \cos \varphi_1, \quad (2.20)$$

$$y''_{S_1} = -l_{S_1} \sin \varphi_1, \quad (2.21)$$

$$x''_{S_2} = l_1 \cos \varphi_1 - l_{S_2} (\cos \varphi_2 (\varphi'_2)^2 + \sin \varphi_2 \cdot \varphi''_2), \quad (2.22)$$

$$y''_{S_2} = -l_1 \sin \varphi_1 - l_{S_2} (\sin \varphi_2 (\varphi'_2)^2 - \cos \varphi_2 \cdot \varphi''_2), \quad (2.23)$$

$$x''_B = l_1 \left(\frac{\cos \varphi_1 \varphi'_2}{\cos^2 \varphi_2} - tg \varphi_2 \sin \varphi_1 - \cos \varphi_1 \right), \quad (2.24)$$

$$y''_B = 0, \quad (2.25)$$

де: $x''_A, y''_A, x''_{S_1}, y''_{S_1}, x''_{S_2}, y''_{S_2}, x''_B, y''_B$ – проекції аналогів прискорень точки A , центрів мас S_1 кривошипа OA , S_2 шатуна AB і повзуна B від кута повороту кривошипа φ_1 та величини зміщення e повзуна B відповідно;

$$\varphi'_2 = -\frac{l_1 \cos \varphi_1}{l_2 \cos \varphi_2} \text{ – аналог кутової швидкості шатуна } AB;$$

$$\varphi''_2 = \frac{l_1 \sin \varphi_1}{l_2 \cos \varphi_1} - \frac{l_1 \cos \varphi_1 \sin \varphi_2 \cdot \varphi'_2}{l_2 \cos^2 \varphi_2} \text{ – аналог кутового прискорення}$$

шатуна AB .

Швидкості та прискорення відповідно [1, 112]:

$$V_{S_1x} = x'_{S_1} \omega_1, \quad (2.26)$$

$$V_{S_1y} = y'_{S_1} \omega_1, \quad (2.27)$$

$$V_{S_2x} = x'_{S_2} \omega_1, \quad (2.28)$$

$$V_{S_2y} = y'_{S_2} \omega_1, \quad (2.29)$$

$$\omega_2 = \varphi'_2 \omega_1, \quad (2.30)$$

$$V_{Bx} = x'_B \omega_1, \quad (2.31)$$

$$a_{S_2x} = x''_{S_2} \omega_1^2 + x'_{S_2} \varepsilon_1, \quad (2.32)$$

$$a_{S_2y} = y''_{S_2} \omega_1^2 + y'_{S_2} \varepsilon_1, \quad (2.33)$$

$$\varepsilon_2 = \varphi''_2 \omega_1^2 + \varphi'_2 \varepsilon_1, \quad (2.34)$$

$$a_{Bx} = x''_B \omega_1^2 + x'_B \varepsilon_1, \quad (2.35)$$

де: $V_{Ax}, V_{Ay}, V_{S_1x}, V_{S_1y}, V_{S_2x}, V_{S_2y}, V_{Bx}$ та $a_{Ax}, a_{Ay}, a_{S_1x}, a_{S_1y}, a_{S_2x}, a_{S_2y}, a_{Bx}$ – відповідно проекції швидкостей прискорень точки A , центрів мас S_1 кривошипа OA , S_2 шатуна AB і повзуна B від кута повороту кривошипа φ_1 та величини зміщення e повзуна B відповідно;

ω_1, ω_2 – кутові швидкості кривошипа OA і шатуна AB відповідно;

ε_2 – кутове прискорення шатуна AB .

Під час виконання розрахунків прийняли, що кривошип OA обертається із постійною кутовою швидкістю, $\omega_1 = \text{const}$ та $\varepsilon_1 = 0$.

За формулами (2.26)–(2.35) розраховували числові значення швидкості та прискорення повзуна B для різних кутів повороту кривошипа φ_1 та різних величин вертикального зміщення e повзуна B , вибравши із каталогу насоса [113] геометричні розміри деталей насоса УНБ–600, хід поршня $S_B = 0,4$ м і величину кутової швидкості кривошипа $\omega_1 = 6,8 \text{ с}^{-1}$. На рис. 2.2 представлені графічні залежності для швидкості та прискорення повзуна B насоса від кута повороту кривошипа φ_1 для $e = 0$.

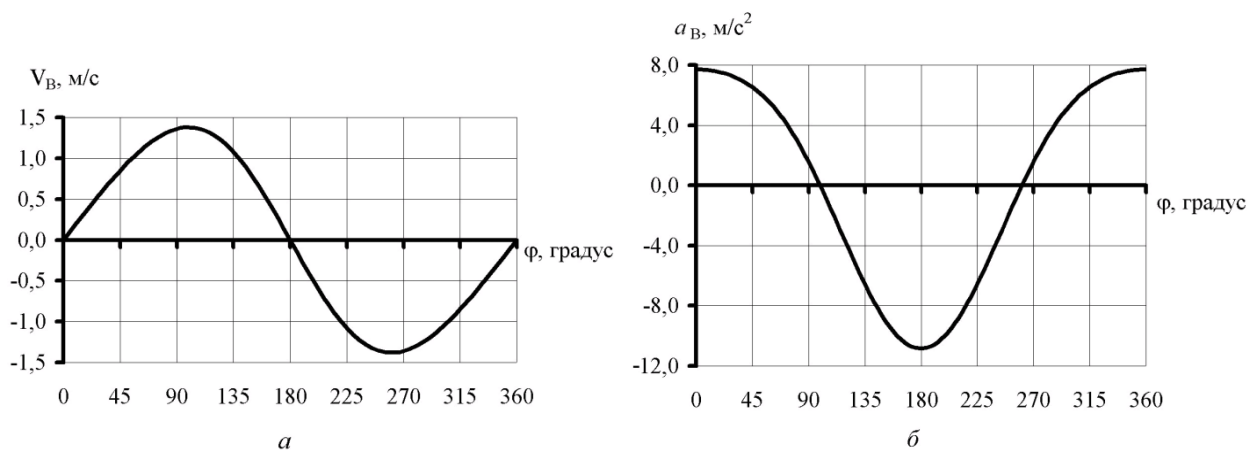


Рисунок 2.2 – Залежність швидкості (а) та прискорення (б) повзуна B від кута повороту кривошипа ($e = 0$ мм) [1, 112]

На підставі результатів розрахунків побудували графічну залежність $V_{B\text{max}} = f(e)$. Максимальна швидкість повзуна B у діапазоні $e = \pm 5$ мм має лінійний характер (рис. 2.3).

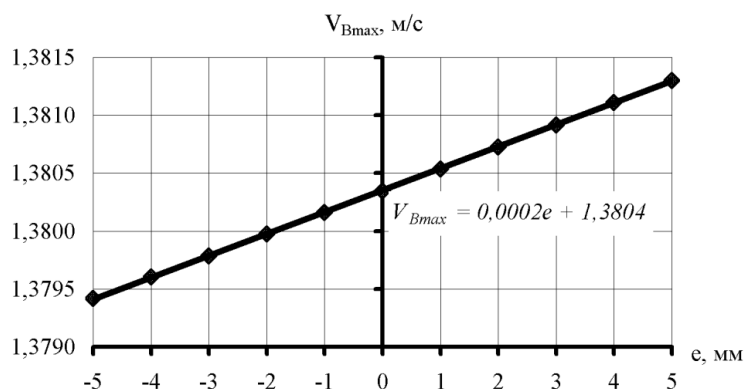
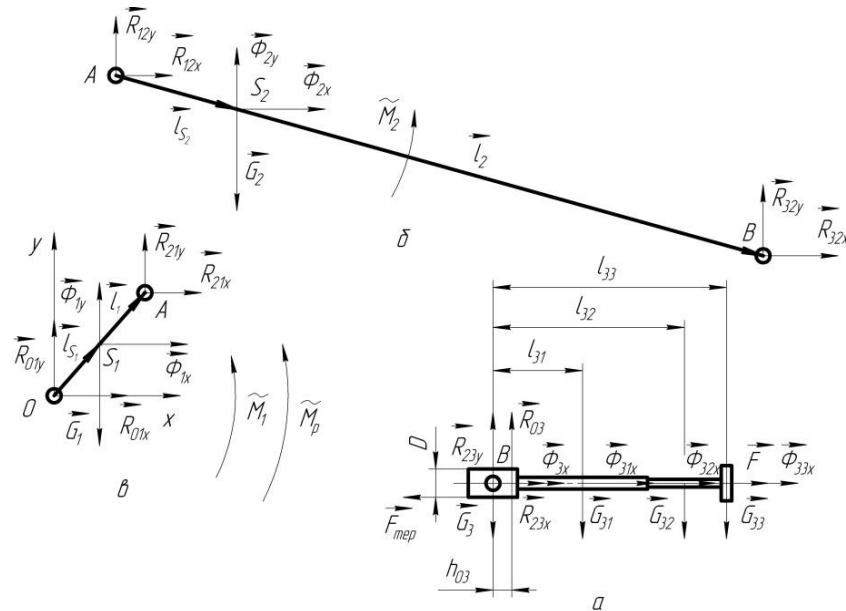


Рисунок 2.3 – Залежність максимальної швидкості повзуна від його вертикального зміщення ($e = \pm 5$ мм) [1, 112]

У подальшому результати кінематичного розрахунку використали для проведення силового аналізу механізму та дослідження впливу зміщення повзуна e на реакції в поступальній кінематичній парі крейцкопф – напрямні станини (рис. 2.4), вибравши маси ланок із каталогу насоса [113].



a – повзун *B*; *б* – шатун *AB*; *в* – кривошип *OA*

Рисунок 2.4 – Силовий аналіз механізму поршневого насоса [1, 112]

Рівняння кінетостатики для кожної ланки механізму насоса [1, 112]:

– для шатуна *AB*

$$\begin{cases} R_{12x} + \Phi_{2x} + R_{32x} = 0, \\ R_{12y} + \Phi_{2y} + R_{32y} - G_2 = 0, \\ M_B(\vec{R}_{12}) + M_B(\vec{\Phi}_2) + M_B(\vec{G}_2) + M_2 = 0, \end{cases} \quad (2.32)$$

– для повзуна *B*

$$\begin{cases} R_{23x} + \Phi_{3x} + \Phi_{31x} + \Phi_{32x} + \Phi_{32x} + F - \mu_1 \text{sign}(V_B) R_{03} = 0; \\ R_{23y} - G_3 - G_{31} - G_{32} - G_{33} + R_{03} = 0 \\ R_{03} h_{03} + \mu_1 \text{sign}(V_B) R_{03} 0,5D - G_{31} l_{31} - G_{32} l_{32} - G_{33} l_{32} = 0, \end{cases} \quad (2.33)$$

– для кривошипа *OA*

$$\begin{cases} R_{01x} + R_{21x} + R_{2'1x} + \Phi_{1x} + \Phi_{11x} = 0 \\ R_{01y} + R_{21y} + R_{2'1y} - G_1 - G_{11} + \Phi_{1y} + \Phi_{11y} = 0 \\ M_O(\vec{R}_{21}) + M_O(\vec{R}_{2'1}) + M_O(\vec{\Phi}_1) + M_O(\vec{\Phi}_{11}) + \\ + M_O(\vec{G}_1) + M_O(\vec{G}_{11}) + M_1 + M_p = 0, \end{cases} \quad (2.34)$$

де R_{ijx}, R_{ijy} – проекції сили (реакції), з якою i -та ланка діє на j -ту;

$\bar{\Phi}_{ix,y} = -\bar{a}_{ix,y} m_i$ – проекції сили інерції i -тої ланки;

F – сила опору, прикладена до повзуна з урахуванням сил тертя в парах:

шток – гумове ущільнення та циліндрова втулка – металогумововий поршень;

G_i – сила земного тяжіння i -тої ланки;

$\bar{M}_i = -\bar{\varepsilon}_i J_i$ – момент сил інерції i -тої ланки;

μ_1 – коефіцієнт тертя в поступальній кінематичній парі крейцкопф – напрямні станини насоса;

D – діаметр повзуна (крейцкопфа).

Момент сили $\vec{F}$ відносно довільної точки K [1, 112]:

$$\vec{M}_K(\vec{F}) = \vec{r} \times \vec{F} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ r_x & r_y & 0 \\ F_x & F_y & 0 \end{vmatrix}.$$

Розв'язки систем рівнянь (2.32)–(2.34) використали для обчислення величин реакцій у кінематичних парах за різних значень кута повороту кривошипа φ_1 та різних величин зміщення e повзуна B , побудови графічної залежності $R_{03\max} = f(e)$ для максимальної реакції в поступальній кінематичній парі крейцкопф (повзун) – напрямні станини насоса від величини зміщення $e = \pm 5$ мм, для прямого і зворотного ходів насоса за максимального тиску 25 МПа, а також підбору аналітичних виразів, відповідно (рис. 2.5).

Як видно із рис. 2.5, залежності зміни максимальної реакції в поступальній парі $R_{03\max}$ як для прямого, так і зворотного ходу насоса мають

лінійний характер. Зношування деталей поступальної кінематичної пари тертя крейцкопф (повзун) – напрямні насоса призводить до несуттєвої зміни швидкості (0,07 %) повзуна B . При цьому величина максимальної реакції в цій кінематичній парі змінюється більш суттєво. Під час прямого ходу поршня $R_{03\max}$ збільшується на 2,5 %, а при зворотному ході поршня – зменшується на 2,4 % [1, 112]. Зміщення повзуна e (вертикально вниз) призводить до збільшення максимальної реакції в поступальній парі, а це, в свою чергу, спричиняє підвищення зносу накладок повзуна і напрямних станини насоса, згинання штока і погіршення умов роботи ущільнення штока у гідравлічній коробці та поршня у циліндровій втулці.

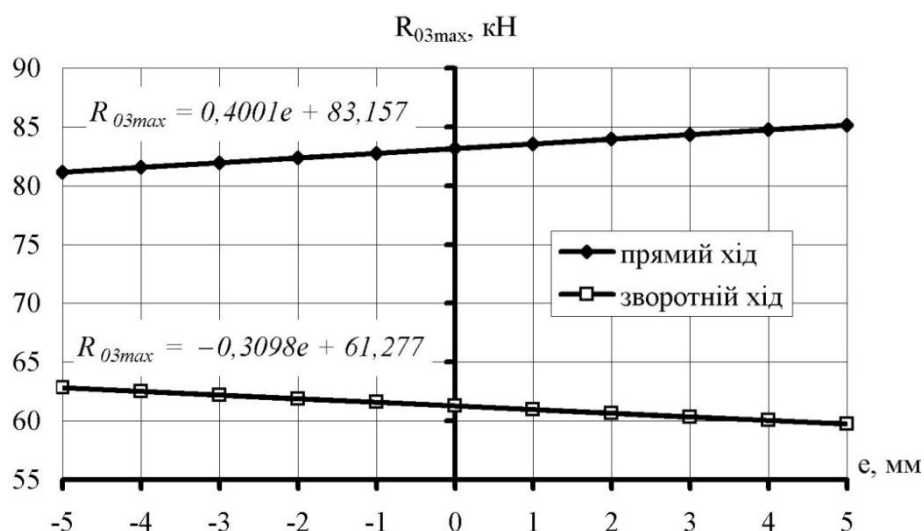
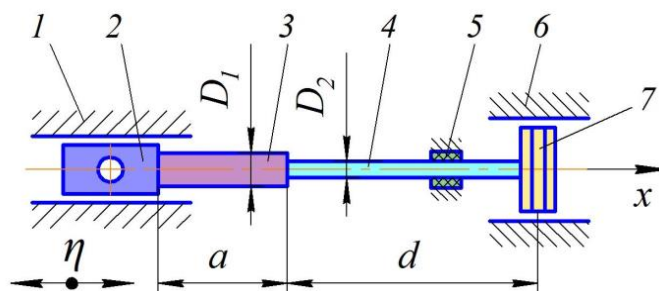


Рисунок 2.5 – Залежність максимальної реакції в поступальній парі крейцкопф (повзун) – напрямні станини від величини зміщення $e = \pm 5$ мм під час прямого і зворотного ходу насоса

2.2 Аналітична модель штока при нештатному кінематичному навантаженні

Під час роботи поршневого насоса двосторонньої дії шток зазнає циклічного знакозмінного осьового навантаження. На хід поршня у напрямку безштокової камери припадає стан стиснення штока, тоді як хід у напрямку штокової камери супроводжується його розтягом. Конструктивно шток 4

сполучає поршень 7 з крейцкопфом 2 через надставку 3, реалізуючи передачу зусиль у системі крейцкопф – напрямні 1 (рис. 2.6). Герметизація штока здійснюється за допомогою ущільнення 5, встановленого співвісно зі змінною втулкою 6, що забезпечує ущільнення в умовах зворотно-поступального руху.



- 1 – напрямні станини; 2 – крейцкопф; 3 – надставка штока діаметром D_1 ;
 4 – шток діаметром D_2 ; 5 – ущільнення штока; 6 – циліндрова втулка;
 7 – поршень

Рисунок 2.6 – Схема встановлення штока в насосі

За нормальних умов експлуатації навантаження прикладається вздовж осі штока, і згинальні зусилля відсутні. Однак через похибки виготовлення вузла, або через зношення напрямних можливе виникнення ексцентриситету, що спричиняє появу додаткових поперечних сил і згинальних моментів. Такі позаштатні зусилля не враховуються типовими методиками, які розглядають шток як елемент, що працює винятково на осьове навантаження. Тому аналіз напруженого стану штока з урахуванням згину, спричиненого геометричними дефектами у системі крейцкопф – напрямні, є важливою передумовою для коректного прогнозування ресурсу.

Для аналізу такої нештатної ситуації побудовано модель штока у вигляді тричі статично невизначуваного двоступінчастого стержня (рис. 2.7). Правий край цього стержня жорстко закріплено, тобто у парі поршень–циліндр кут повороту чи вертикальне лінійне переміщення виключається за рахунок жорсткого натягу ущільнювачів. Вертикальне переміщення на лівому кінці (зовнішнє кінематичне навантаження – w_0) моделює осідання крейцкопфа

Користуючись принципом незалежності дії сил в лінійних системах запишемо систему канонічних рівнянь, які накладають кінематичні обмеження на поведінку стержневої моделі відповідно до реальної експлуатаційної ситуації. Для автоматизації обчислень подамо таку систему канонічних рівнянь в матричній формі

$$\mathbf{A}\vec{\mathbf{X}} + \vec{\mathbf{\Lambda}} = 0, \quad (2.35)$$

де відповідно матриця податливості неоднорідної стержневої моделі $-\mathbf{A}$ та вектори переміщень $\vec{\mathbf{\Lambda}}$ і невідомих реакцій $\vec{\mathbf{X}}$ мають такий вигляд:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} & \delta_{13} \\ \delta_{21} & \delta_{22} & \delta_{23} \\ \delta_{31} & \delta_{32} & \delta_{33} \end{bmatrix}, \quad \vec{\mathbf{\Lambda}} = \begin{bmatrix} 0 \\ -w_0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \vec{\mathbf{X}} = \begin{bmatrix} M_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix}. \quad (2.36)$$

Розв'язуючи цю систему рівнянь $\vec{\mathbf{X}} = -\mathbf{A}^{-1}\vec{\mathbf{\Lambda}}$, отримаємо вектор невідомих $\vec{\mathbf{X}}$ (тобто значення M_1 , P_2 та P_3).

Рівновага стержневої моделі буде забезпечена у разі рівності нулеві головного вектора та головного моменту всіх сил:

$$\sum \mathbf{F}_i = -P_2 + P_3 - P_4 = 0, \quad (2.37)$$

$$\sum \mathbf{m}_0(\mathbf{F}_i) = M_1 - P_2(a+b) + P_4c - M_5 = 0. \quad (2.38)$$

Із виразів (2.37), (2.38) знаходитимемо реакції P_4 та M_5 у крайній правій опорі моделі.

Для заповнення матриці податливості утворимо основну систему методу сил. Оскільки модель тричі статично невизначувана відкинемо три “зайві” в'язі, видаливши крайню ліву і середню опори штока. Для отримання еквівалентної системи методу сил вплив на шток відкинутих в'язей компенсуємо дією відповідних реакцій M_1 , P_2 та P_3 . Для побудови відповідних одиничних станів послідовно прикладатимемо до основної системи одиничний момент і одиничну силу.

Для визначення головних та побічних коефіцієнтів системи рівнянь (2.35) скористаємося теоремою Максвела-Мора. Згадані коефіцієнти це

питомі переміщення δ_{ik} , що спричинені дією одиничної сили, або одиничного моменту. Для запису виразів δ_{ik} використаємо інтегрування в межах ділянок стержневої моделі, на яких функція згинальних моментів є неперервна, а жорсткість стержня стала:

$$\begin{aligned}\delta_{11} &= \int_0^a \frac{1 \cdot 1}{kEJ} dx + \int_a^L \frac{1 \cdot 1}{EJ} dx = \frac{1}{EJ} \left(\frac{a}{k} + L - a \right); \\ \delta_{22} &= \int_0^a \frac{x^2}{kEJ} dx + \int_a^L \frac{x^2}{EJ} dx = \frac{1}{3EJ} \left(\frac{a^3}{k} + L^3 - a^3 \right); \\ \delta_{33} &= \int_{L-c}^L \frac{(x - (L - c))^2}{EJ} dx = \frac{c^3}{3EJ}; \\ \delta_{12} = \delta_{21} &= -\int_0^a \frac{1 \cdot x}{kEJ} dx - \int_a^L \frac{1 \cdot x}{EJ} dx = -\frac{1}{2EJ} \left(\frac{a^2}{k} + L^2 - a^2 \right); \\ \delta_{13} = \delta_{31} &= \int_{L-c}^L \frac{1 \cdot (x - (L - c))}{EJ} dx = \frac{c^2}{2EJ}; \\ \delta_{23} = \delta_{32} &= \int_{L-c}^L \frac{x \cdot (x - (L - c))}{EJ} dx = \frac{1}{2EJ} c^2 \left(L - \frac{c}{3} \right).\end{aligned}$$

Тепер матриця податливості готова до обчислень:

$$\mathbf{A} = \frac{1}{EJ} \cdot \begin{bmatrix} \left(\frac{a}{k} + L - a \right) & -\frac{1}{2} \left(\frac{a^2}{k} + L^2 - a^2 \right) & \left(\frac{c^2}{2} \right) \\ -\frac{1}{2} \left(\frac{a^2}{k} + L^2 - a^2 \right) & \frac{1}{3} \left(\frac{a^3}{k} + L^3 - a^3 \right) & \frac{1}{2} c^2 \left(L - \frac{c}{3} \right) \\ \left(\frac{c^2}{2} \right) & \frac{1}{2} c^2 \left(L - \frac{c}{3} \right) & \left(\frac{c^3}{3} \right) \end{bmatrix}. \quad (2.39)$$

Матриця (2.39) повністю описує поведінку штока в межах лінійної пружної моделі та характеризує його реакцію на силові чи кінематичні навантаження. Її компоненти отримані аналітично і залежать від геометричних параметрів (довжини ділянок, моментів інерції поперечних перерізів), положення в'язей та жорсткості окремих сегментів штока.

Завдяки аналітичному вигляду кожного елемента достатньо лише підставити числові вхідні параметри конструкції (довжини ділянок, діаметри, модуль пружності), щоб отримати повну числову матрицю податливості. При обчисленнях $J = \pi D_2^4 / 64$, $k = (D_1 / D_2)^4$. Це значно спрощує реалізацію

методу сил, оскільки всі обчислення можуть бути автоматизовані для кількох варіантів геометрії. Надалі ця матриця використовується для побудови канонічної системи рівнянь, розв'язання якої дозволяє знайти невідомі реакції у в'язях.

Вектор вільних членів $\bar{\Delta}$ містить лише одну ненульову компоненту – вертикальне зміщення лівого кінця балки (w_0). Після обернення матриці жорсткості і множення на вектор переміщень отримаємо розв'язок поставленої задачі.

Вирази згинальних моментів та поперечних сил для довільного поперечного перерізу штока матимуть вигляд:

$$M(x) = M_1 - P_2 x + P_3(x - \psi) \cdot H(x - \psi); \quad (2.40)$$

$$Q(x) = \frac{dM}{dx} = -P_2 + P_3 \cdot H(x - \psi), \quad (2.41)$$

де $H(x)$ – функція Гевісайда, $\psi = a + b$.

Диференціальне рівняння прогинів штока має вигляд:

$$\frac{d^2 w}{dx^2} = \frac{1}{C_i} M(x), \quad i=1, \dots, 3, \quad x \in (0, l). \quad (2.42)$$

Тут w – прогин; C_i – жорсткість на згин i -ї ділянки штока; i – номер ділянки, $i=1$ при $0 \leq x \leq a$; $i=2$ при $a \leq x \leq \psi$; $i=3$ при $\psi \leq x \leq l$, де $l = a + b + c$. На першій ділянці $C_1 = k \cdot EJ$, на другій та третій ділянках $C_2 = C_3 = EJ$.

Підставивши (2.40) в (2.42), отримали ключове рівняння для знаходження переміщень

$$\frac{d^2 w}{dx^2} = \frac{1}{C_i} [M_1 - P_2 x + P_3(x - s) \cdot H(x - s)], \quad i=1, \dots, 3, \quad x \in (0, l). \quad (2.43)$$

При інтегруванні рівняння (2.43) використовували правило інтегрування одиничної функції Гевісайда:

$$\int_0^x H(x - \psi) \cdot f(x) dx = H(x - \psi) \int_{\psi}^x f(x) dx. \quad (2.44)$$

Для отримання універсального розв'язку пружної лінії балки з ділянками різної жорсткості застосовували спосіб неявного інтегрування, за якого рівняння згину інтегрується у загальному вигляді без попереднього розкриття дужок або конкретизації виразів для згинального моменту. Такий підхід дозволяє зберегти аналітичну структуру розв'язку та легко враховувати зміну жорсткості, реакцій та локалізованих навантажень. Нижче подано вирази для вертикального лінійного переміщення $w(x)$ та кута повороту поперечного перерізу $\theta(x)$, отримані шляхом послідовного інтегрування рівняння згину балки, у якому враховано розділення на ділянки та вплив зосереджених навантажень.

$$w(x) = w_0 + \frac{1}{kJ} \left(\frac{M_1 x^2}{2} - \frac{P_2 x^3}{6} \right) - \frac{1}{EJ} \left[\left(1 - \frac{1}{k} \right) \left[\frac{P_2 (x-a)^3}{6} + \frac{P_2 a (x-a)^2}{2} - \frac{M_1 (x-a)^2}{2} \right] H(x-a) - \frac{P_3 (x-\psi)^3}{6} H(x-\psi) \right]; \quad (2.45)$$

$$\theta(x) = \frac{dw}{dx} = \frac{1}{kJ} \left(M_1 x - \frac{P_2 x^2}{2} \right) - \frac{1}{EJ} \left[\left(1 - \frac{1}{k} \right) \left[\frac{P_2 (x-a)^2}{2} + P_2 a (x-a) - M_1 x \right] H(x-a) - \frac{P_3 (x-\psi)^2}{2} H(x-\psi) \right], \quad (2.46)$$

2.3. Аналіз додаткових напружень і переміщень у штоці

Для демонстрації результатів моделювання розглянуто конструкцію штока поршневого насоса типу УНБ-600, основні геометричні параметри якого (рис. 2.6) наступні: довжини характерних ділянок штока становлять $a = 574 \text{ мм}$, $d = 1130 \text{ мм}$; діаметри цих ділянок $D_1 = 120 \text{ мм}$ та $D_2 = 70 \text{ мм}$. Модуль пружності матеріалу – $E = 200 \text{ ГПа}$, а максимальна величина ходу штока – $\eta = 400 \text{ мм}$. Під час функціонування насоса відбувається зміна положення штока в межах повного ходу, що, у свою чергу, викликає варіацію параметрів b та c (рис. 2.7). У крайньому лівому положенні штока ці параметри набувають значень $b = 715 \text{ мм}$ і $c = 415 \text{ мм}$. Зовнішнє кінематичне

навантаження задано у вигляді початкового геометричного відхилення $w_0 = 0.001m$, що моделює геометричні дефекти системи "крейцкопф – напрямні".

На рис. 2.8 зображено залежності абсолютних величин реактивних моментів на краях штока, а на рис. 2.9 – реактивних сил у в'язях штока від величини його ходу. Тут на осі абсцис за нуль прийняте значення ходу, яке відповідає крайньому лівому положенню штока. Бачимо, що реакції M_1 , P_2 , P_3 , M_5 нелінійно зростають, а реакція P_4 спадає при переході штока з крайнього лівого у крайнє праве положення. Слід відзначити, що напрям реакцій не змінюється.

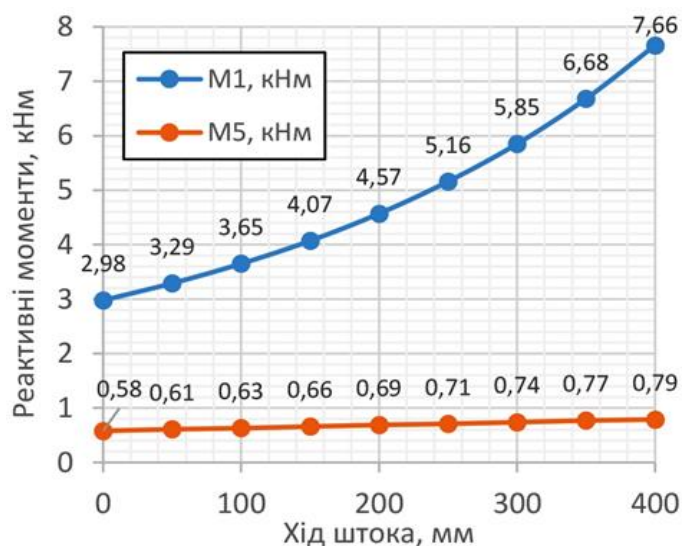


Рисунок 2.8 – Залежність реактивних моментів у в'язях від положення штока

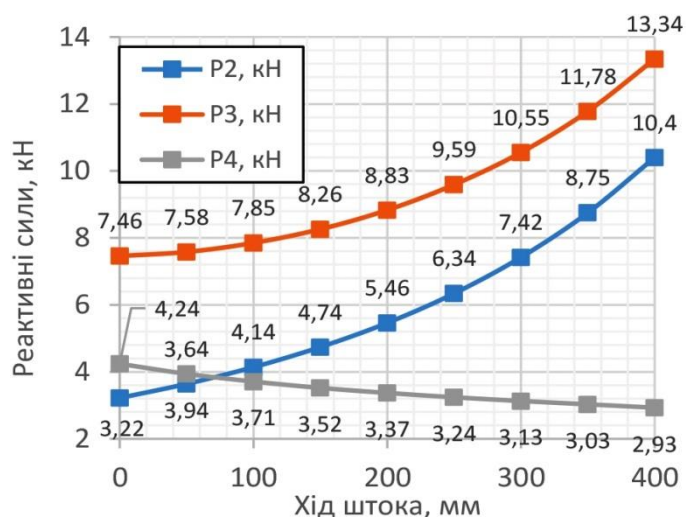


Рисунок 2.9 – Залежність реактивних сил у в'язях від положення штока

На рис. 2.10 показано залежність реакцій у в'язях штока від величини кінематичного навантаження (зміщення крейцкопфа w_0) для крайнього лівого положення штока. Загалом результати (рис. 2.8–2.10) демонструють квадратичну залежність реакцій від ходу та лінійне зростання реакцій із зростанням величини початкового відхилення, що свідчить про лінійний вплив кінематичного навантаження на статичну рівновагу системи.

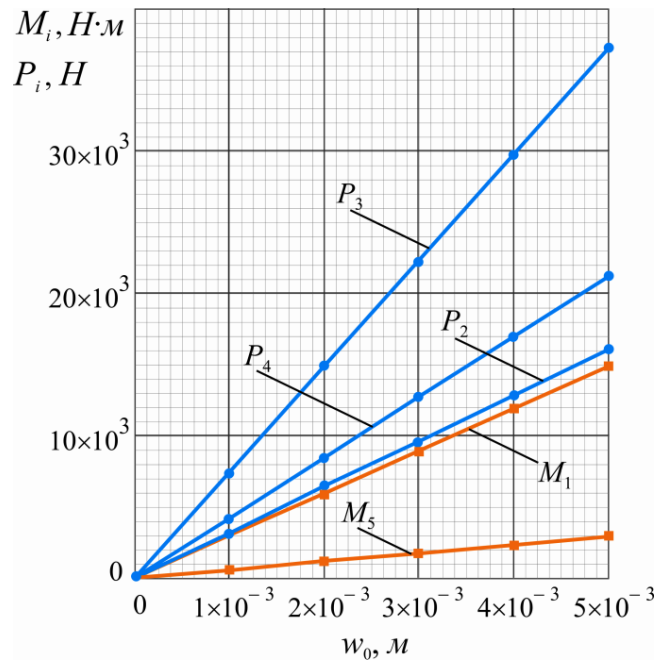


Рисунок 2.10 – Вплив кінематичного навантаження на реакції у в'язях штока

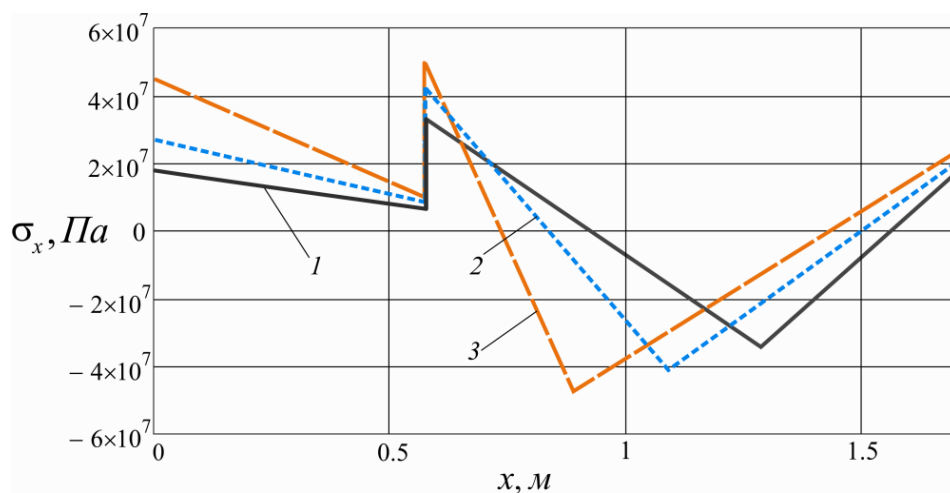
Для оцінки напруженого стану штока внаслідок дії кінематичного навантаження скористались наступними виразами. Функцію розподілу максимальних нормальних напружень вздовж штока $\max \sigma(x)$, отримали підстановкою у формулу Нав'є виразу (2.40), а для оцінки максимальних дотичних напружень $\max \tau(x)$ скористались теорією Журавського і виразом (2.41) [114, 115]. У результаті отримали такі залежності:

$$\max \sigma(x) = \begin{cases} \frac{1}{2k} \frac{D_1}{J} (M_1 - P_2 x), & 0 \leq x \leq a; \\ \frac{1}{2} \frac{D_2}{J} (M_1 - P_2 x + P_3 (x - \psi) \cdot H(x - \psi)), & a \leq x \leq L. \end{cases} \quad (2.47)$$

$$\max \tau(x) = \frac{3+2\nu}{2(1+\nu)} \times \begin{cases} -\frac{P_2}{\pi D_1^2}, & 0 \leq x \leq a; \\ -\frac{P_2 + P_3 \cdot H(x-\psi)}{\pi D_2^2}, & a \leq x \leq L. \end{cases} \quad (2.48)$$

де ν – коефіцієнт Пуассона.

На рис. 2.11 представлено розподіл нормальних напружень уздовж штока для різних фаз його переміщення [8]. Найвищі значення напружень спостерігаються, коли шток займає крайнє праве положення, а найменші – у крайньому лівому положенні. Під час переходу з лівого у праве крайнє положення спостерігається монотонне зростання напружень. Результати аналізу підтверджують, що позаштатні нормальні напруження, зумовлені геометричними дефектами в напрямному вузлі, можуть відігравати істотну роль під час оцінювання міцності і довговічності штока насоса.



1 – крайнє ліве положення штока; 2 – проміжне положення штока;
3 – крайнє праве положення штока

Рисунок 2.11 – Розподіл максимальних нормальних напружень вздовж штока

На рис. 2.12 наведено графік, що відображає зміну найбільших дотичних напружень уздовж штока. Найвищі значення цих напружень, реалізуються під час знаходження штока в крайньому правому положенні, а їх числові значення приблизно на порядок менші ніж нормальні напруження.

На рис. 2.13 зображено характерні розподіли прогинів уздовж осьової лінії штока, які побудовано з використанням формули (2.45). В області між

крайньою лівою опорою та проміжною точкою обпирання спостерігається монотонна зміна прогинів, натомість у сегменті між проміжною та правою опорами виникають характерні екстремальні точки, положення яких відповідає нульовим значенням кутів повороту перерізів штока.

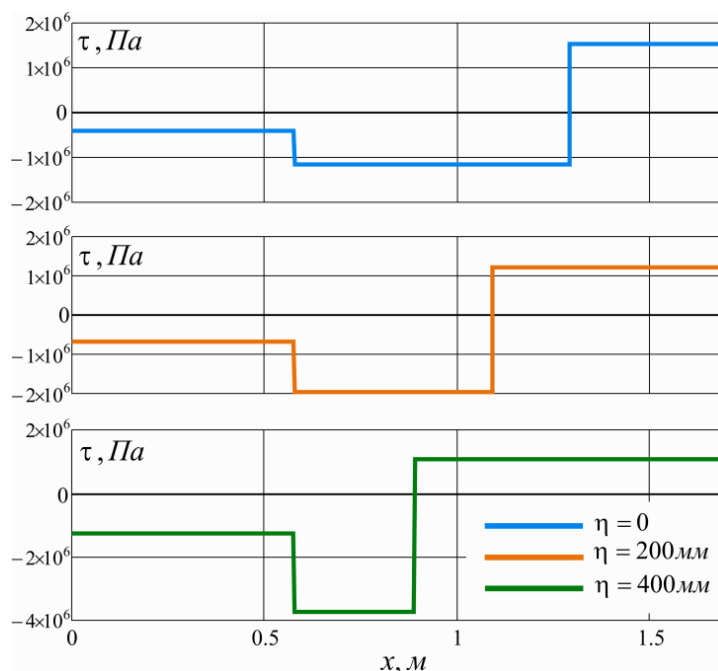


Рисунок 2.12 – Розподіл максимальних дотичних напружень вздовж штока

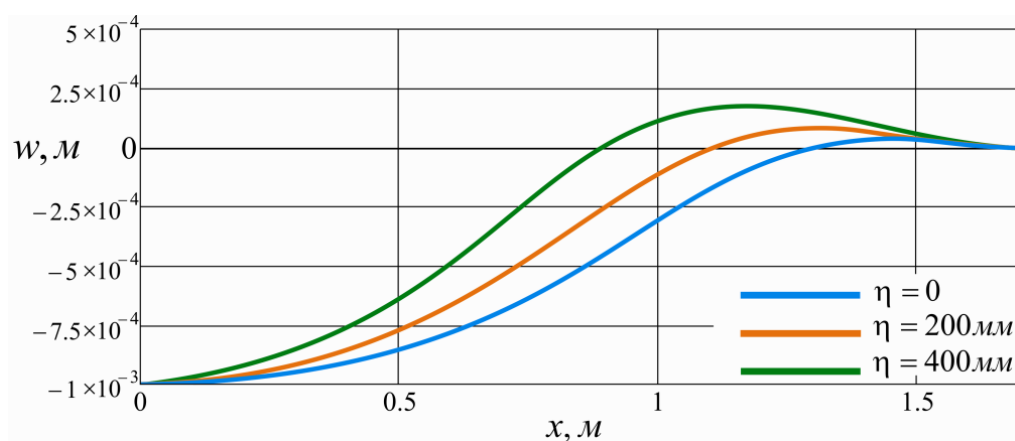


Рисунок 2.13 – Розподіл прогинів штока у різних фазах його положення

Слід підкреслити, що розглянутий напружено-деформований стан не є штатним, а отже, розрахунок еквівалентних напружень з метою оцінки міцності у такій ситуації недоречний. Коректне оцінювання напруженого стану потребує врахування сумарного впливу як додаткових, так і штатних (експлуатаційних) навантажень. Отже встановлено, що навіть за дотримання

регламентованих допусків на зношування рівень додаткових нормальних напружень може перевищувати 50 МПа, що свідчить про їхній суттєвий внесок у загальний напружений стан і необхідність врахування таких ефектів під час аналізу міцності штока, зокрема, зміцненого покриттями.

Теоретичний і числовий аналіз кінематичних навантажень штока дозволяє розробити ефективні підходи до діагностики та прогнозування пошкоджень, а також до вдосконалення конструкції та технічного обслуговування насосних систем. Одержані результати можуть бути безпосередньо використані для підвищення точності розрахунків навантажень у механічних системах із аналогічними кінематичними схемами: у компресоробудуванні, гідравлічних приводах, автомобільній та залізничній техніці, а також у медичній техніці (наприклад, у поршневих дозаторах).

2.4. Верифікація аналітичної моделі штока методом скінченних елементів

Для підтвердження достовірності отриманих аналітичних результатів, що описують напружено-деформований стан штока бурового насоса при кінематичному навантаженні, нами було виконано верифікаційне числове моделювання у середовищі програмного комплексу ЛІРА-САПР. Даний комплекс надає широкі можливості для побудови скінченно-елементних моделей та аналізу напружено-деформованого стану конструкцій в умовах статичних та динамічних навантажень, включаючи врахування контактних умов, кінематичних обмежень і неоднорідної жорсткості. До його переваг слід віднести реалізацію просторових універсальних стержневих скінченних елементів та розвинену бібліотеку матеріалів.

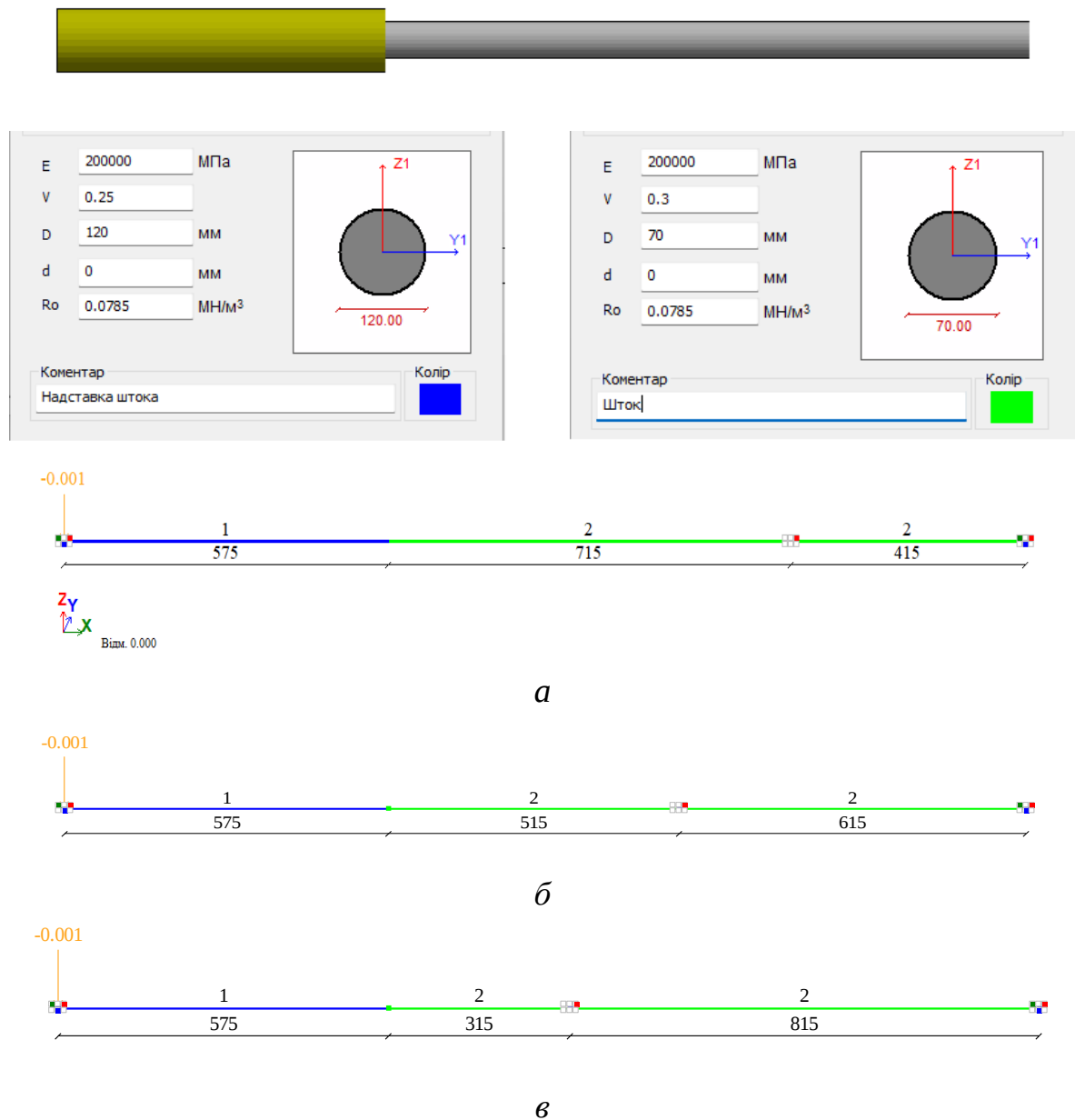
Для моделювання скінченно-елементної моделі штока використано просторові стержневі скінченні елементи, які мають шість ступенів вільності у кожному вузлі: три лінійні переміщення (X , Y , Z) та три кутові переміщення (U_x , U_y , U_z). Це дозволяє коректно передати основні зусилля,

що виникають у вузлах конструкції. Крім глобальної системи координат, кожен стержневий елемент має місцеву правосторонню декартову систему координат, відносно якої визначаються внутрішні зусилля чи переміщення. Під час розрахунку матриця жорсткості будується для всієї пружної частини стержневого елемента, а при здобутті результатів розглядається мінімум п'ять розрахункових перерізів для кожного скінченного елемента, що гарантує точну оцінку розподілу внутрішніх силових факторів уздовж його довжини. Для конструкції штока було сформовано бібліотеку жорсткостей (див. рис. 2.14). Для аналізу поведінки штока було змодельовано його роботу в трьох характерних положеннях: крайнє ліве, крайнє праве і середнє. На рис. 1 показано відповідні скінченно-елементні моделі. Шток змодельовано як система стержневих елементів із шістьма ступенями вільності у вузлі. Геометричні характеристики та жорсткості елементів обрані відповідно до реального прототипу. У моделі враховано кінематичне зміщення опори, яке імітує похибку чи зношення напрямних вузла “крейцкопф – напрямні”.

На рис. 2.15 подано розподіли поперечних сил уздовж осі штока для трьох характерних положень у межах робочого ходу. Відповідно, на рис. 2.16 наведено графіки згинальних моментів для тих самих положень. Значення поперечної сили визначає величину дотичних напружень у поперечному перерізі штока, тоді як згинальний момент прямо пов'язаний із нормальними напруженнями згину.

Порівняння результатів числового моделювання з аналітичними залежностями (див. рис. 2.8 і 2.9) демонструє хорошу збіжність як за характером розподілу, так і за абсолютними значеннями поперечних сил та згинальних моментів.

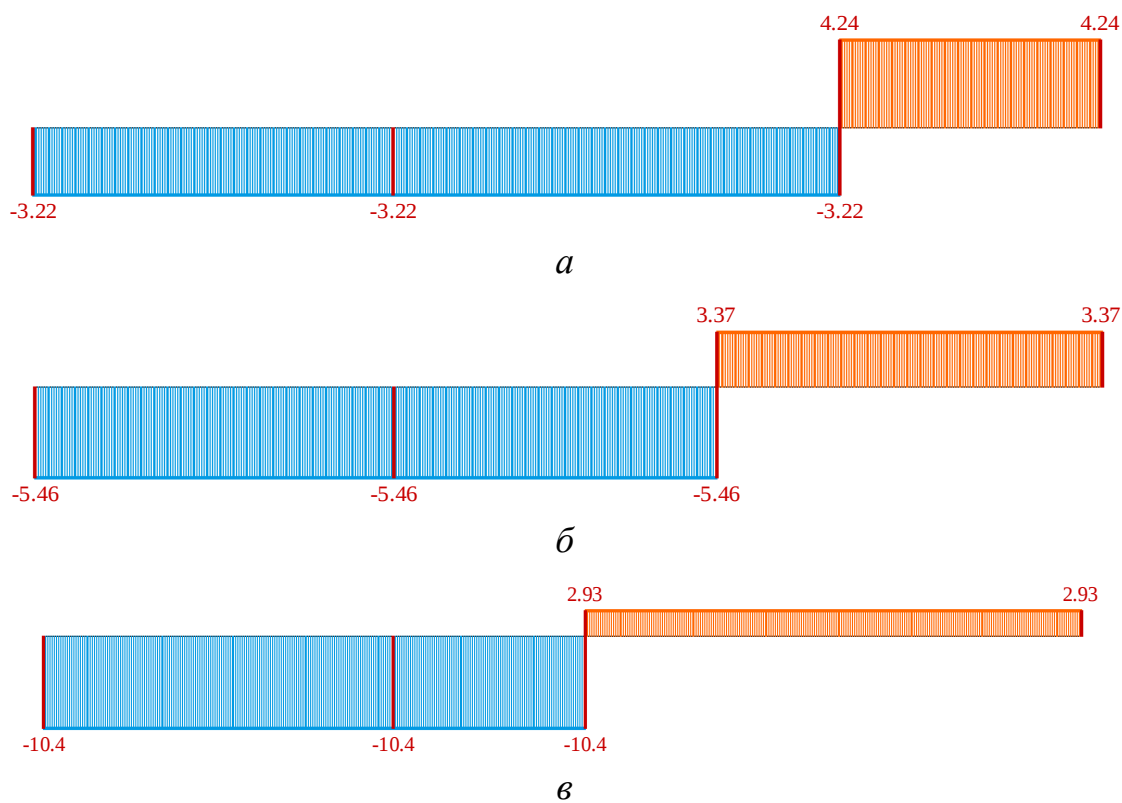
Слід зауважити, що на рис. 2.8 представлено реакції у в'язях, тобто зосереджені сили. Тому для коректного зіставлення з графіками епюр поперечних сил, побудованих у процесі числового аналізу (рис. 2.15), необхідно враховувати стрибкоподібні зміни поперечної сили в точках прикладання реакцій.



а – ліве крайнє положення штока; *б* – середнє положення штока;
в – праве крайнє положення штока

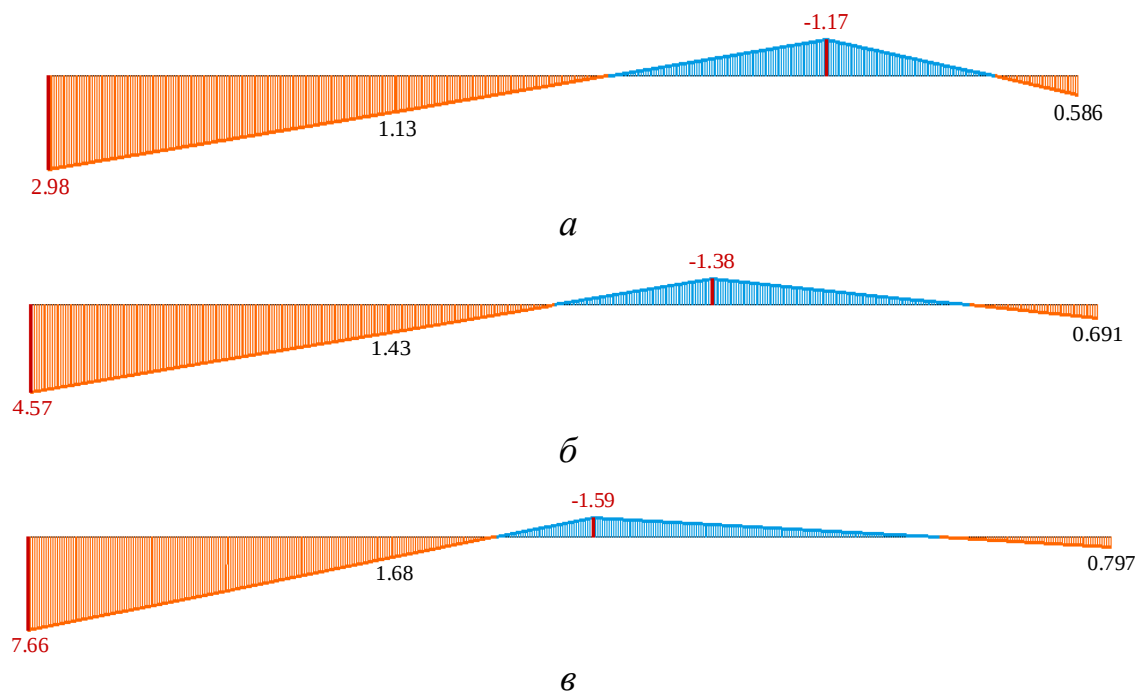
Рисунок 2.14 – Скінченно-елементна модель штока під дією кінематичного навантаження

На рис. 2.17 представлено розподіл вертикальних прогинів штока вздовж його осі, отриманий за результатами числового моделювання. Деформовані форми, отримані в рамках скінченно-елементного аналізу, демонструють майже повну відповідність аналітичним розрахунковим кривим, наведеним на рис. 2.13.



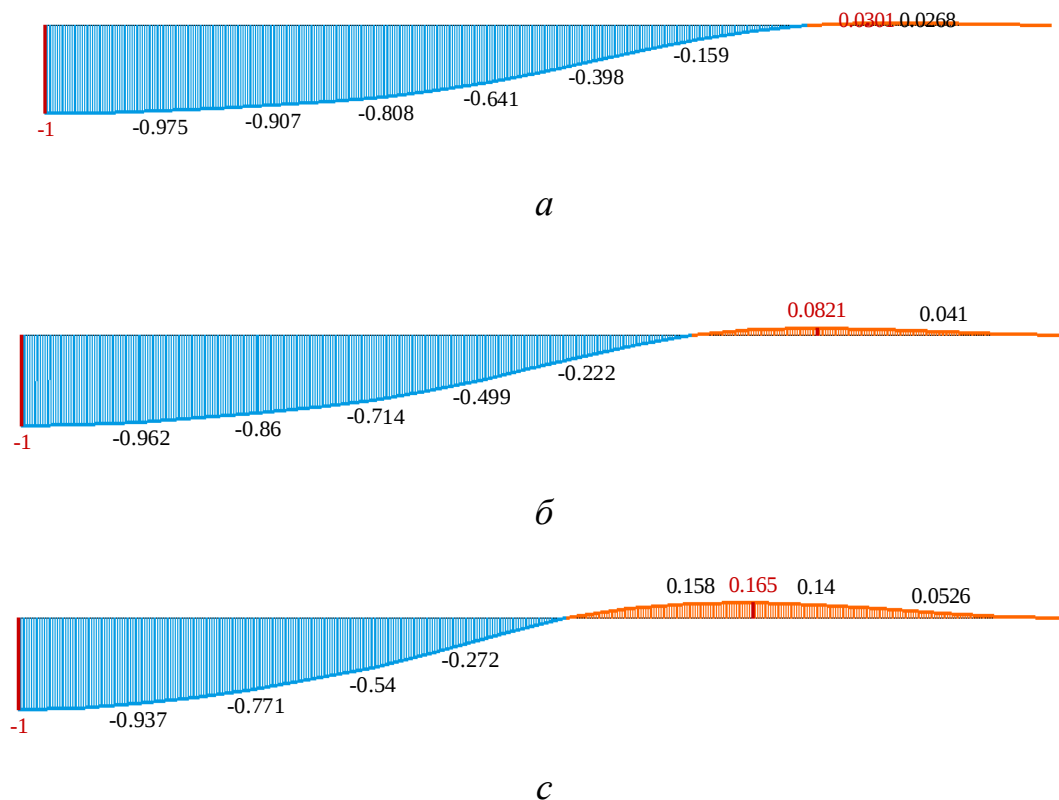
а – ліве крайнє положення штока; *б* – середнє положення штока;
в – праве крайнє положення штока

Рисунок 2.15 – Розподіл поперечних сил за довжиною штока (числові дані)



а – ліве крайнє положення штока; *б* – середнє положення штока;
в – крайнє праве положення штока

Рисунок 2.16 – Розподіл згинальних моментів
за довжиною штока (числові дані)



a – ліве крайнє положення штока; *б* – середнє положення штока;

в – крайнє праве положення штока

Рисунок 2.17 – Розподіл прогинів за довжиною штока (числові дані):

Така збіжність підтверджує високу точність аналітичної моделі навіть в умовах статичної невизначуваності та наявності кінематичних збурень.

Окремий напрям верифікації стосується порівняння напружень. На рис. 2.18 наведено хромограму розподілу нормальних напружень у поперечному перерізі штока в зоні проміжної опори, що відповідає крайньому правому положенню поршня. Добре помітна характерна дволінійна картина розподілу, притаманна згинальному навантаженню, напруження зростають до максимальних значень у крайніх волокнах перерізу. Отримані числові значення перебувають у добрій відповідності з теоретичними оцінками, побудованими за результатами обчислення згинальних моментів у відповідній ділянці. Порівняння максимального значення напружень у цій зоні з графіком на рис. 2.11 підтверджує адекватність моделі.

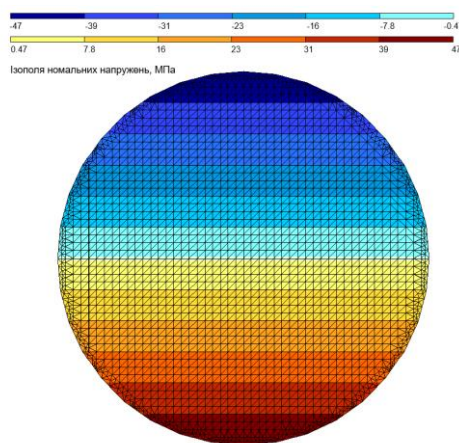


Рисунок 2.18 – Нормальні напруження в поперечному перерізі штока в зоні проміжної опори (крайнє праве положення штока)

Крім того, на рис. 2. 19 подано результати чисельного аналізу дотичних напружень у тому ж перерізі. Компонента XZ , зображена на рис. 2.19 *а*, формує типовий параболічний профіль, який добре відповідає теоретичному розподілу. При цьому значення дотичних напружень є значно меншими за нормальні, що узгоджується з попередніми аналітичними оцінками (див. рис. 2.12). Компонента XY , наведена на рис. 19 *б*, виявляється незначною порівняно з величиною нормальних напружень, тому у інженерних розрахунках цієї складовою напруженого стану можна знехтувати.

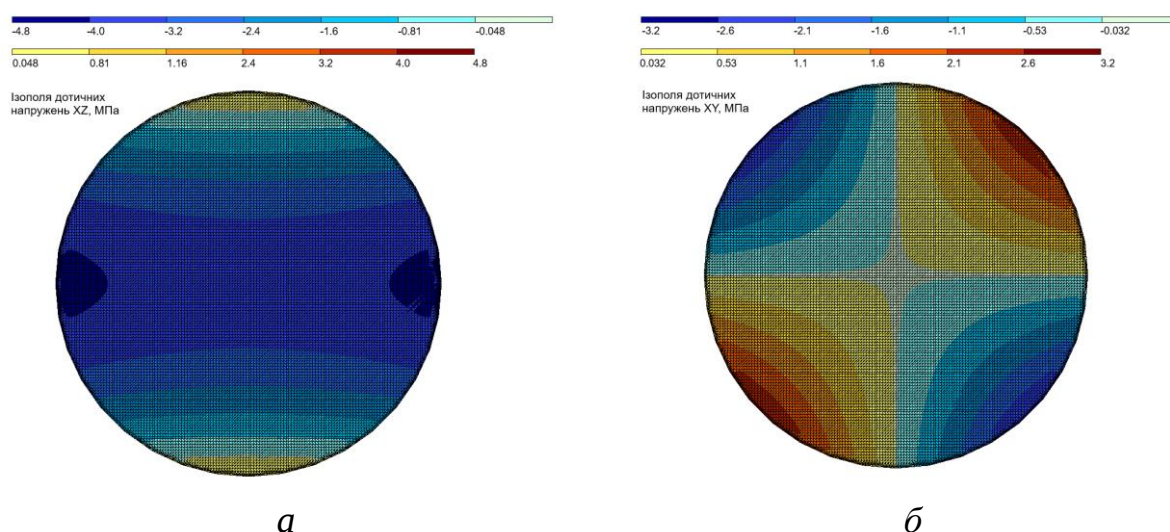


Рисунок 2.19 – Компоненти дотичних напружень (а) – XZ , (б) – XY в поперечному перерізі штока в зоні проміжної опори (числові дані, крайнє праве положення штока)

Узагальнюючи результати, можна стверджувати, що побудована аналітична модель адекватно відображає поведінку штока в умовах кінематичного навантаження, зумовленого зношуванням напрямного вузла. Висока збіжність із числовим моделюванням за ключовими параметрами: згинальними моментами, поперечними силами, прогинами та напруженнями – підтверджує коректність прийнятих рівнянь, граничних умов і допущень.

2.5 Аналітична модель ділянки штока з функціональним покриттям

Розглянемо фрагмент штока, який зміцнено зовнішнім шаром хромового покриття (див. рис. 2.20). Він зазнає комбінованої дії поздовжніх і поперечних навантажень, характерних для нештатних режимів роботи, проаналізованих раніше.

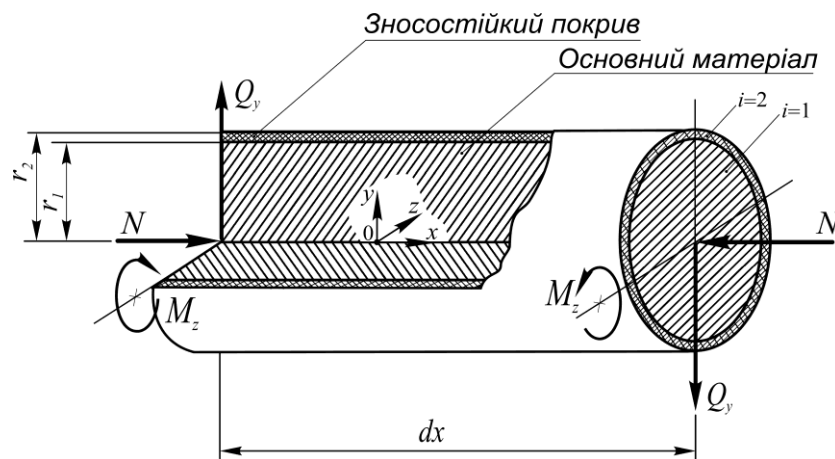


Рисунок 2.20 – Модельна схема фрагмента штока з хромовим покриттям під дією складного навантаження

Таким чином, отримуємо задачу поперечного згину та осьового стиску (чи розтягу) для ділянки циліндричного стержня, структура якого складається з концентричних шарів із різними властивостями. Кожен шар є однорідним, але загальна структура є кусково-неоднорідною по товщині, тобто модулі пружності, коефіцієнти Пуассона та межі міцності змінюються дискретно від шару до шару (є функціями радіальної координати) [8].

В усіх шарах будемо використовувати єдину систему статичних та кінематичних припущень, характерних для лінійної теорії стержнів. Вплив деформацій зсуву та поперечного обтиснення в рамках цієї моделі ігнорується, а гіпотеза плоских нормалей вважається справедливою. Основні внутрішні зусилля в покритій ділянці – це осьова сила N , поперечна сила Q_y і згинальний момент M_z , які приймаються заданими або визначеними з умов роботи штока.

Матеріальні параметри для кожного однорідного шару задаються модулями Юнга E_i , коефіцієнтами Пуассона ν_i та межами текучості σ_{ti} чи міцності σ_{mi} . Внутрішній (базовий) матеріал стрижня далі позначаємо індексом $i=1$, а зовнішній (захисний шар) – індексом $i=2$. Площу поперечного перерізу для i -го шару позначимо F_i .

Для визначення напруженого стану застосовується принцип суперпозиції, що дозволяє окремо розглядати вплив осьової сили, згинального моменту й поперечної сили. Послідовність дій буде наступною. Спочатку оцінюємо розподіл нормальних напружень від осьового навантаження, далі – згинальні напруження, після чого врахуємо вплив поперечної сили.

Розподіл нормальних напружень від осьової сили. Розглядається аналітична модель короткої ділянки сталевго штока з тонким хромовим покриттям, що перебуває під дією осьового навантаження та температурного впливу. Осьова сила розподілиться між неоднорідними областями стержня нерівномірно:

$$N = \sum_{i=1}^{n=2} N_i = \sum_{i=1}^{n=2} \int_{F_i} \sigma_{xi} dF_i. \quad (2.49)$$

Осьові деформації окремих шарів (фізичні співвідношення) штока подамо у вигляді

$$\varepsilon_{x1} = \frac{\sigma_{x1}}{E_1} + \alpha_1 \Delta T; \quad \varepsilon_{x2} = \frac{\sigma_{x2}}{E_2} + \alpha_2 \Delta T,$$

де α_i – коефіцієнт температурного розширення i -го шару, ΔT – температурний перепад. Тоді умова сумісності деформацій неоднорідних шарів матеріалу з урахуванням фізичних співвідношень матиме вигляд:

$$\varepsilon_{x1} = \varepsilon_{x2}, \text{ або } \frac{\sigma_{x1}}{E_1} + \alpha_1 \Delta T = \frac{\sigma_{x2}}{E_2} + \alpha_2 \Delta T. \quad (2.50)$$

Розв'язуючи разом (2.49) і (2.50) та беручи до уваги прийняті вище гіпотези, одержимо вирази нормальних напружень для кожного шару матеріалу стержня від впливу осьової сили N та можливого перепаду температури ΔT

$$\sigma_{x1} = \frac{N + E_2 F_2 (\alpha_1 - \alpha_2) \Delta T}{F_1 + \frac{E_2 F_2}{E_1}}; \quad \sigma_{x2} = \frac{N - E_1 F_1 (\alpha_2 - \alpha_1) \Delta T}{F_2 + \frac{E_1 F_1}{E_2}}. \quad (2.51)$$

У разі коли $\Delta T = 0$ отримаємо

$$\sigma_{xk} = -\frac{N}{F_k} \frac{E_k F_k}{\sum_{i=1}^{n=2} E_i F_i}, \quad k=1, 2, \quad (2.52)$$

або детальніше для сталевого ядра та хромового покриття відповідно:

$$\sigma_{x1} = \frac{-N}{F_1 \left(1 + \frac{E_2 F_2}{E_1 F_1} \right)} = \frac{-4N}{\pi \left(d_1^2 + \frac{E_2}{E_1} d_2^2 [1 - \zeta^2] \right)}, \quad (2.53)$$

$$\sigma_{x2} = \frac{-N}{F_2 \left(1 + \frac{E_1 F_1}{E_2 F_2} \right)} = \frac{-4N}{\pi \left(d_2^2 [1 - \zeta^2] + \frac{E_1}{E_2} d_1^2 \right)}, \quad (2.54)$$

де $d_i = 2r_i$, $\zeta = d_1/d_2$.

Отримані вирази (2.53) та (2.54) показують, що нормальні напруження від дії осьової сили в розглянутій ділянці штока з покриттям розподілені пропорційно до інтегральних жорсткостей на розтяг (стиск) основного матеріалу та покриття.

Розрахунок напружень, зумовлених дією згинального моменту.
Зв'язок між прикладеним згинальним моментом та нормальними

напруженнями, що виникають у матеріалі вкритої ділянки штока, описується інтегральним співвідношенням

$$M_z = \sum_{i=1}^{n=2} \int_{F_i} y \sigma_{xi} dF_i. \quad (2.55)$$

Узгодженість деформацій у шарах різних матеріалів стержня описується наступним співвідношенням

$$\varepsilon_{xi} = \kappa y = \text{const}, \quad (2.56)$$

а фізичні співвідношення

$$\sigma_{xi} = E_i \varepsilon_{xi}, \quad i = 1, 2, \quad (2.57)$$

де κ – кривина зігнутої осі штока в нештатній ситуації навантаження, ε_{xi} – лінійні деформації неоднорідних шарів.

Після інтегрування виразу (2.55) з урахуванням (2.56) та (2.57), отримаємо

$$\sigma_{xk} = \frac{M_z y}{J_{zk}} \frac{E_k J_{zk}}{\sum_{i=1}^{n=2} E_i J_{zi}}, \quad k = 1, 2, \quad (2.58)$$

де J_{zi} – осьовий момент інерції поперечного перерізу i -го шару матеріалу.

Уточнимо співвідношення (2.58), представивши вирази для згинальних геометричних жорсткостей кожного шару матеріалу у зоні штока з покриттям

$$\sigma_{xi} = \frac{64 E_i M_z y}{\pi (E_1 d_1^4 + E_2 d_2^4 [1 - \zeta^4])}. \quad (2.59)$$

З аналізу формули (2.59) випливає, що чим вищою є згинальна жорсткість окремого шару композиції, тим інтенсивніше в ньому розвиваються нормальні напруження. Варто також підкреслити, що характер зміни нормальних напружень у напрямку товщини помітно відрізняється між покриттям і основним матеріалом штока.

Оцінка напружень, зумовлених дією поперечної сили. Розглянемо дотичні напруження, що виникають у матеріалі штока під впливом поперечної сили Q_y . Введемо позначення коефіцієнта зведення

$$k_3 = E_2 / E_1.$$

Для зручності позначимо радіус ядра поперечного перерізу R_1 , а товщину функціонального покриття – δ . Використовуючи положення теорії Журавського щодо дотичних напружень, функцію їхнього розподілу в поперечному перерізі штока з покриттям представимо у такій формі

$$\tau(y) = \frac{Q_y}{J_{36}} \times \begin{cases} \frac{S_1(y)}{2\sqrt{R_1^2 - y^2}}, y \in [0, R_1]; \\ \frac{S_2(y)}{2k_3\sqrt{(R_1 + \delta)^2 - y^2}}, y \in [R_1, R_1 + \delta]. \end{cases} \quad (2.60)$$

Тут, функція зведеного статичного моменту площі поперечного перерізу вище координати y :

$$S_1(y) = \frac{2\pi}{3} (R_1^3 - y^3 + k_3 ((R_1 + \delta)^3 - R_1^3)),$$

$$S_2(y) = \frac{2\pi}{3} k_3 ((R_1 + \delta)^3 - y^3),$$

а зведений момент інерції

$$J_{36} = \frac{\pi}{4} (R_1^4 + k_3 ((R_1 + \delta)^4 - R_1^4)).$$

З аналізу виразу (2.60) випливає, що дотичні напруження змінюються по товщині кожного шару нелінійно. На межі розділу покриття та основного матеріалу вочевидь виникатиме злам графіка, оскільки похідна функції дотичного напруження за координатою y зазнає розриву. Крім того, легко переконатися, що на нейтральній осі $\tau(0) \rightarrow \max$, а на зовнішній поверхні $\tau(r_2) \rightarrow 0$.

Висновки до розділу 2

1. У межах цього розділу побудовано узагальнену інженерну модель штока бурового насоса двосторонньої дії, який функціонує в умовах нештатного кінематичного навантаження, спричиненого похибками виготовлення, або зносом елементів пари тертя "крейцкопф – напрямні станини".

2. На основі моделювання визначено додаткові зусилля та напруження, що виникають у процесі експлуатації штока, та досліджено їхню залежність від ступеня похибки чи зносу і від робочого положення штока в циклі ходу. Установлено, що навіть за регламентованих допусків на зношування, рівень додаткових напружень може бути суттєвим і має враховуватись при аналізі міцності штока.

3. Для оцінки локального напруженого стану запропоновано механіко-математичну модель істотно неоднорідного стрижня з функціональним покриттям. У цій моделі поперечний переріз представлено як двозв'язну область, у якій фізико-механічні властивості змінюються пошарово. Проведено дослідження розподілу напружень в умовах просідання крейцкопфа. Одержано кількісну оцінку міцності вкритої ділянки штока з урахуванням додаткових навантажень.

4. Розроблена аналітична модель має високий ступінь узагальненості, тобто вона дозволяє поширити розгляд на випадки багат шарових покриттів із довільною кількістю шарів.

5. Ключові аналітичні результати, отримані в ході дослідження, були додатково перевірені за допомогою скінченно-елементного моделювання, що підтвердило їхню достовірність та практичну придатність для інженерного застосування.

Результати розділу опубліковано в працях автора [1, 8, 13, 15].

РОЗДІЛ 3

ВИБІР МАТЕРІАЛІВ, МЕТОДИК ДОСЛІДЖЕНЬ І РОЗРОБЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЗМІЦНЕННЯ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ХРОМУВАННЯ В ПРОТОЧНОМУ ЕЛЕКТРОЛІТІ

3.1. Вибір матеріалів, металорізального обладнання, різальних інструментів і вимірювальних приладів

У роботі досліджували зміцнення зразків із конструкційних сталей, легованих і високовуглецевих сталей, які широко використовуються у нафтогазовому машинобудуванні для виготовлення деталей бурових поршневих насосів.

Хімічний склад та механічні властивості сталей наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Хімічний склад та механічні властивості сталей

Марка сталі	Вміст елементів, % (вагові)						Механічні властивості			
	C	Si	Mn	Cr	Ni	інші	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %
Сталь 45 ГОСТ 1050-88	0,46	0,30	0,65	0,16	0,17	Cu–0,19	410	680	19	61
Сталь 40X ГОСТ 4543-71	0,41	0,28	0,67	0,98	0,25	Cu–0,20	720	840	14	60
Сталь 40XH ГОСТ 4543-71	0,42	0,27	0,72	0,74	1,27	Cu–0,28	760	900	20	39

Обробку різанням зразків проводили на токарно-гвинторізному верстаті 16K20 та круглошліфувальному 3A151.

Шліфування поверхонь сталевих деталей здійснювали на круглошліфувальному 3A151 кругом з монокорунду за таких режимів різання: колова швидкість круга $V_k = 30$ м/с, повздовжня подача – (0,2 – 0,4) ширини круга на оберт деталі, поперечна подача круга (глибина різання) – 0,015 – 0,025 мм. Шліфування хромових покриттів виконували на круглошліфувальному верстаті 3A151 алмазним кругом плоского прямого профілю АПП 300x75x15x5 АСО 63/50Б1 – 100 за швидкості обертання $v_k = 35$ м/с. Як мастильно-охолоджувальну рідину використовували водний розчин 1 % кальційованої соди і 0,25 % нітриту натрію.

Для визначення сил різання під час шліфування хромових покриттів використовували систему вимірювань, яка включала тензометричні центри круглошліфувального верстата у вертикальній та горизонтальній площинах і з'єднані через підсилювач з реєструючим пристроєм. Перед початком дослідження провели тарування системи вимірювань з використанням взірцевого динамометра стиску ДОСМ 3–1 (діапазон вимірювання 0...10 кН).

Вимірювання ваги та геометричних розмірів зразків із хромовими покриттями проводили такими вимірювальними засобами:

- зміну маси зразків перед та після трибологічних випробовувань визначали грамометричним методом після зважування на аналітичних вагах ВЛР-200г 2 класу ГОСТ 19491-74, точність зважування $\pm 0,05$ мг;

- лінійні розміри зразків вимірювали мікрометрами МК 25; 50; 75 ГОСТ 6507-90 з ціною поділки 0,01 мм, а також в окремих випадках використовували малий інструментальний мікроскоп МИМ-1, точність вимірювання $\pm 0,01$ мм, а також індикаторні головки годинникового типу з ціною поділки 1 мкм.

Для дослідження конусоподібності деталі вимірювання проводили з використанням індикаторної головки годинникового типу з ціною поділки 1 мкм та оптичної ділильної головки ОДГ-60. Величину конусоподібності – відхилення профілю повздовжнього січення при якому

твірні прямолінійні, але не паралельні, визначали за відомою формулою

$$\Delta_{\text{кон}} = (d_{\text{max}} - d_{\text{min}}) / 2.$$

3.2 Методики дослідження властивостей хромових покриттів

3.2.1 Визначення шорсткості

Шорсткість поверхні електрохімічного хромового покриття оцінювали середньою величиною мікронерівностей. Вимірювання проводили модернізованим приладом профілограф-профілометром моделі Р-201, а також використовували безконтактний інтерференційний 3-D профілограф «Мікрон-альфа», який розроблений в Державному некомерційному підприємстві «Державний університет «Київський авіаційний інститут»» (м. Київ) та дозволяє: будувати 2D і 3D профілі поверхні, профілограму та розраховувати параметри шорсткості досліджуваної поверхні (ГОСТ 2789-73): R_z (мкм) – висоту нерівностей, R_a (мкм) – середнє арифметричне відхилення, R_{3z} – глибина шорсткості основи, R_q – середньоквадратична шорсткість, R_{ku} – коефіцієнт ексцесу профілю шорсткості, R_p – максимальна висота піку профілю, H_{STD} – середньоквадратичне відхилення поверхні, S_{surf} – площа поверхні, SR_{surf} – відношення площі поверхні до площі проекції поверхні.

3.2.2 Визначення мікротвердості

Мікротвердість хромових покриттів та білих шарів, сталеві основи вимірювали на мікрошліфах згідно (ISO 6507-1:2007) за допомогою приладу ПМТ-3 за навантаження на індентор 0,5–1 Н. Час витримки становив 12 секунд. Відстань між відбитками складала 10–15 мкм. Величину мікротвердості розраховували за відомою формулою (ГПа)

$$H = 1854 \frac{P}{d^2},$$

де P – навантаження на піраміду Вікерса, Н;

d – діагональ відбитка, мкм.

3.2.3 Методика випробовування покриттів на зношування

Випробовування на зношування зміцнених зразків проводили на установці для дослідження пар тертя під час зворотно-поступального руху (Гладкий, С.І. та Палажченко, С. П., 2015) [116], яка відтворює умови роботи під час експлуатації металево-гумових пар тертя поршневих насосів двосторонньої дії: металевий шток поршня – гумове ущільнення; втулка циліндрова – гумово-металевий поршень (рис. 3.1, рис. 3.2). Нами була проведена модернізація установки шляхом оснащення її системою електрохімічних вимірювань, яка включала рН-метр, потенціостат і електроди (порівняння, платиновий поляризуючий та робочий – зразок).

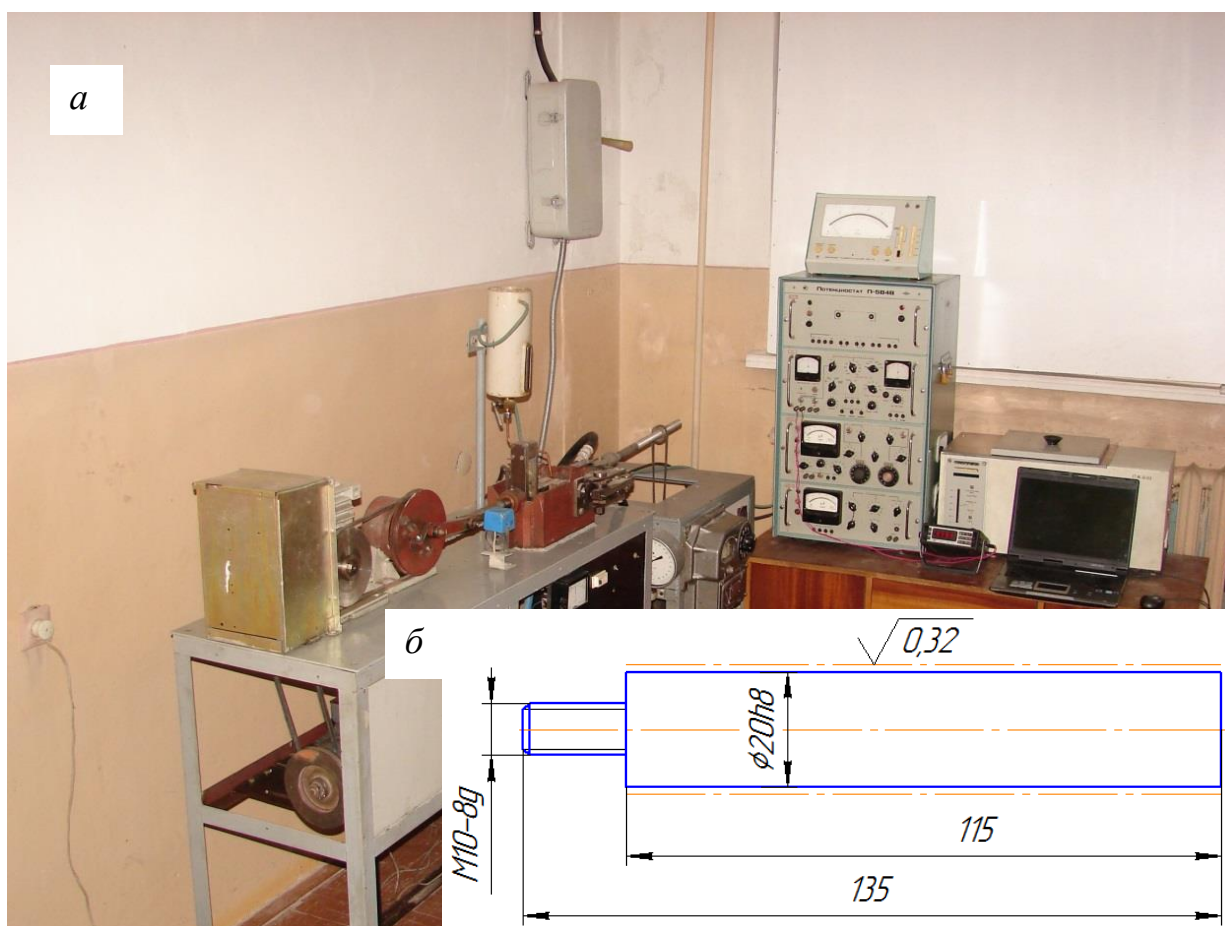
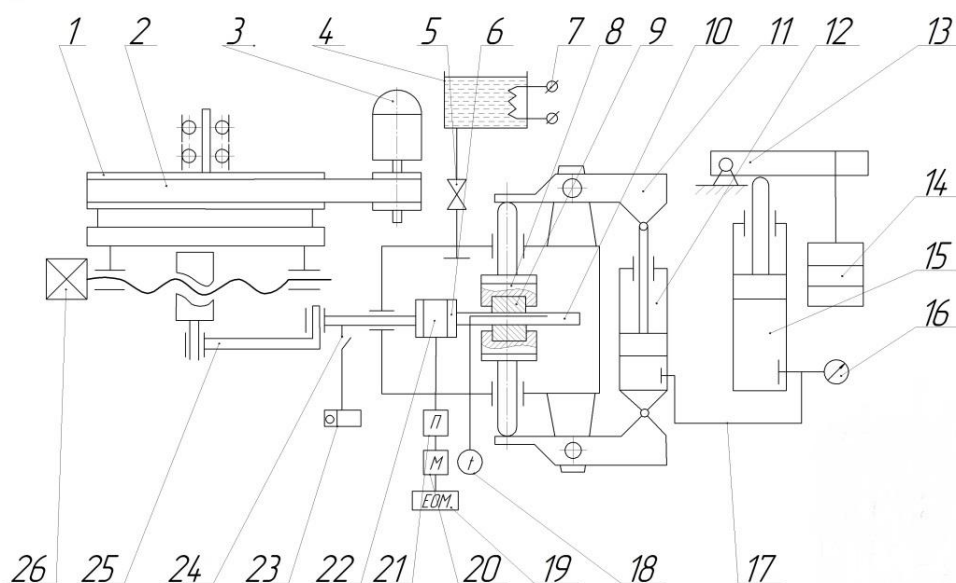


Рисунок 3.1 – Загальний вигляд установки для випробовування на зношування при зворотно-поступовому русі (а) та зразок (б) [116]



1 – шків; 2 – клиновий пас; 3 – електродвигун; 4 – система подачі промивальної рідини в зону тертя; 5 – вентиль; 6 – тримач рухомого зразка; 7 – термостат; 8 – тримач гумового зразка; 9 – гумовий зразок; 10 – рухомий металевий зразок; 11 – коромисло; 12 – гідроциліндр; 13 – важіль; 14 – змінний вантаж; 15 – силовий гідроциліндр; 16 – взірцевий диференційний манометр; 17 – патрубок; 18 – термопара для контролю температури у парі тертя; 19 – комп'ютер; 20 – багатоканальний модуль; 21 – підсилювач; 22 – тензометрична балка; 23 – лічильник імпульсів (циклів); 24 – кінцевий вимикач; 25 – кривошипно-шатунний механізм; 26 – гвинтова пара

Рисунок 3.2 – Схема установки для випробовування на зношування при зворотньо-поступовому русі [116]

Зразок для цієї установки показано на рис. 3.1, б. Хронове покриття наносили на зовнішню циліндричну поверхню зразка (діаметр – 20h8; довжина робочої частини – 115 мм).

Установка для проведення трибологічних досліджень містить раму, приводну частину та систему нормального навантаження зразка, систему подачі промивальної рідини у зону тертя, систему контрольно-вимірювальних приладів та систему інформаційного забезпечення [116].

До приводної частини входять кривошипно-шатунний механізм, кривошип якого приводиться в обертання від електродвигуна через клинопасову передачу. Регулювання довжини ходу рухомого металевго зразка здійснюється за допомогою гвинтової пари, встановленого на шківі. Тримач рухомого металевго зразка з'єднаний із шатуном через тензометричну балку [116].

Система нормального навантаження зразка дозволяє моделювати реальні умови роботи пар тертя поршневого насоса і складається з силового гідроциліндра, шток якого через важіль навантажується змінним вантажем, а поршень створює через магістраль, гідроциліндр, два симетрично розташовані металеві тримачі нерухомих гумових зразків, нормальне навантаження на рухомий зразок. Гідроциліндр через коромисло чинить постійне навантаження на рухомий зразок. Твердість гумового зразка із ущільнення становила 78–85 одиниць, яку виміряли Дюрометром Шора D з однією стрілкою ASTM 2240-D зі шкалою 0–100 HD [116].

Система подачі промивальної рідини складається з бака, який магістраллю з'єднаний через вентиль із ванною та термостатом.

Система контрольно-вимірювальних пристроїв та інформаційного забезпечення дає можливість контролювати: тиск оливи в магістралі (за допомогою вірцевого дифманометра); кількість подвійних ходів рухомого зразка (за допомогою кінцевого вимикача та лічильника імпульсів); температуру в зоні тертя (за допомогою термопари) силу тертя (за допомогою тензометричної балки, сигнал з якої через тензометричний підсилювач надходить на багатоканальний модуль введення аналогової інформації, дає можливість за допомогою ЕОМ отримати інформаційно-числові параметри динаміки та інтенсивності процесу зношування досліджуваних пар тертя). Багатоканальний модуль введення аналогової інформації призначений для послідовного опитування стандартних сигналів первинних перетворювачів, одержання відповідних цифрових відліків та

реєстрації цифрової інформації у вигляді файлів в пам'яті персонального комп'ютера [116].

Дослідження трибологічних властивостей покриттів проводили у відповідності з умовами роботи змінних деталей поршневих насосів двосторонньої дії при зворотно-поступовому русі зразка з покриттям з кінематичними та силовими параметрами, які визначили у Розділі 2: швидкість руху штока (поршня) $v = 1,4$ м/с; реакція в гумовому ущільненні насоса $P_3 = 35$ кН. Як промивальну рідину використовували водяний глиняний розчин з вмістом кварцевого піску від 0 до 10 % (середній умовний діаметр частинок абразиву 0,1 мм) за температури розчину 20–95 °С. Тривалість випробовувань становила 24 години. Величину зносу зразків після завершення випробовування визначали мікрометричним та гвіметричним методами.

3.2.4 Розроблення методики дослідження процесів деструкції гуми під час фрикційної взаємодії в парі тертя «хромована деталь – гумове ущільнення»

Для проведення досліджень процесів трибокрекінгу під час фрикційної взаємодії у парі тертя «хромована деталь – гумове ущільнення» нами був розроблено спосіб та пристрій, які захищені патентом на винахід України [12].

Пристрій (рис. 3.3) містить корпус 1, встановлений в ньому на підшипникових опорах тримач 2 циліндричного металевго зразка 3 та привод обертання тримача 2 із заданою програмою випробовувань кутовою швидкістю ω (на базі машини тертя СМЦ-2). Циліндричний металевий зразок 3 із робочою зовнішньою циліндричною поверхнею 4, із хромовим покриттям. Контрзразок 5, виконаний у вигляді колодки (сектор кільця гумового ущільнення) та має радіальні наскрізні (східчасті) отвори 6 зі сторони робочої внутрішньої циліндричної поверхні тертя 7 для збору продуктів зношування. Засіб створення радіального навантаження 8 між

робочими поверхнями 4 та 7 відповідно циліндричного металевого зразка 3 та гумового контрзразка 5, величину N якого задають програмою випробовувань. Система вимірювання температури у зоні тертя включає термопару 9 і міліпотенціометр 10.

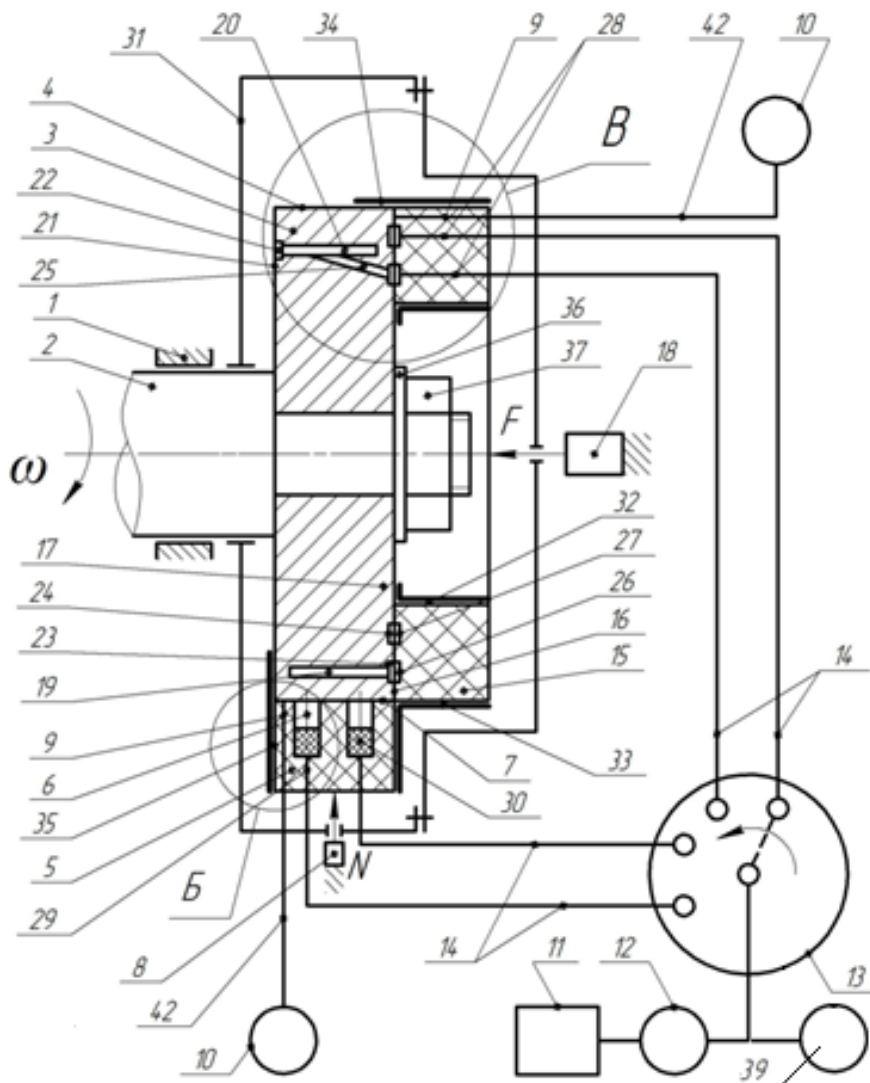


Рисунок 3.3 – Пристрій для дослідження процесів трибокрекінгу під час фрикційної взаємодії в парі тертя «хромована деталь – гумове ущільнення» [12]

Пристрій також містить газоаналізатор 11, вакуумний насос 12, який служить для відкачування газів, що утворюються в процесі тертя робочих поверхонь 4 та 7, комутуючу газорозподільну арматуру 13, газопроводи 14 і кільце-колектор 15. Вказане кільце-колектор 15 виконане із антифрикційного матеріалу, наприклад, фторопласту та встановлене співвісно з віссю

обертання тримача 2 циліндричного металевого зразка 2 і взаємодіє своєю робочою торцевою поверхнею 16 із робочою торцевою поверхнею 17 циліндричного металевого зразка 3 та має можливість тільки осьового переміщення. Засіб осьового притискання 18 кільця-колектора 15 до робочої торцевої поверхні 17 циліндричного металевого зразка 3 із зусиллям F , яке забезпечує герметизацію стику між вказаними робочими торцевими поверхнями 16 і 17, які необхідно попередньо притирати.

У тілі циліндричного металевого зразка 3 виконано, що найменше дві групи осьових глухих отворів 19 і 20 зі сторони його торцевих поверхонь 17 та 21 відповідно, осі яких паралельні до осі обертання цього циліндричного металевого зразка 3 та рівномірно розташовані по колах, центри яких співпадають із вказаною віссю обертання. Кожна з цих груп осьових глухих отворів 19 і 20 розміщена відповідно на різній глибині h_1 і h_2 від робочої зовнішньої циліндричної хромованої поверхні 4 вказаного циліндричного металевого зразка 3. При цьому осьові глухі отвори 20, що виконані зі сторони неробочої торцевої поверхні 21 циліндричного металевого зразка 3 заглушені різьбовими пробками 22. Крім того на робочій торцевій поверхні 17 циліндричного металевого зразка 3 виконані кільцеві концентричні канавки 23 та 24. Розташування кільцевої концентричної канавки 23 співпадає із осьовими глухими отворами 19, а кільцева концентрична канавка 24 системою похилих каналів 25, з'єднана з відповідною групою осьових глухих отворів 20. На робочій торцевій поверхні 16 кільця-колектора 15 також виконані кільцеві концентричні канавки 26 та 27, відповідні кільцевим концентричним канавкам 23 та 24 на робочій торцевій поверхні 17 циліндричного металевого зразка 3.

У кільці-колекторі 15 від западин кільцевих концентричних канавок 26 та 27 виконані бокові наскрізні отвори 28, які через газопроводи 14, комутуючу газорозподільну арматуру 13 та вакуумний насос 12 сполучені з газоаналізатором 11. У тілі полімерного (гумовому) контрзразка 5 виконані радіальні наскрізні (східчасті) отвори 6, що переходять в отвори меншого

діаметру 29, із встановленими в них фільтрами 30 із твердих пористих матеріалів, які, в свою чергу, через газопроводи 14, комутуючу газорозподільну арматуру 13 та вакуумний насос 12 також сполучені з газоаналізатором 11.

Досліджувана пара тертя: робоча зовнішня циліндрична хромована поверхня 4 циліндричного металевого зразка 3 – гумовий контрзразок 5, а також кільце-колектор 15 розміщені у нерухомому герметичному кожусі 31, який для зручності монтажу виконується розбірним із двох частин. Для герметизації рухомих стиків між вказаними вище парами тертя використовують також додатково герметизатори відповідно 32 – 35. Циліндричний металевий зразок 3 нерухомо закріплюють на тримачі 2 за допомогою шайби 36 і гайки 37.

Для вимірювання температур у парах тертя: робоча зовнішня циліндрична хромована поверхня 4 циліндричного металевого зразка 3 – контр зразок (гума) 5, а також робоча торцева поверхня 17 циліндричного металевого зразка 3 – робоча торцева поверхня 16 кільця-колектора 15 використано термопари 9, наприклад, стрічкові. Виводи 38 цих термопар 9 підключені до відповідних міліпотенціометрів 10. Система вимірювання об'єму утворених газів, наприклад, водню під час проведення випробовувань пари тертя на рис. 3.3 умовно не показана.

Для проведення випробовувань циліндричні металеві зразки 3, виготовляють із сталі та наносили хромове покриття. Контрзразки 5 виготовляли із гуми. Твердість гумового контрзразка 5 становила 78–85 одиниць Шора. Перед проведенням випробовувань циліндричний металевий зразок 3 і гумовий контрзразок 5 знежирювали, висушували і зважували.

Система вимірювання об'єму утворених газів, наприклад, водню під час проведення випробовувань пари тертя включає водяний диференційний манометр 39, приєднаний через комутатор 13, для вимірювання різниці тисків між двома точками в системі, де перепад тисків пропорційний різниці у висоті стовпчика рідини в двох колінах манометра. Вимірювання

проводили шляхом фіксації зміни об'єму ΔV внаслідок проникнення водню із зони тертя через хромове покриття у сталеву основу з точністю 0,01 см³. Об'єм водню V , що проник із зони тертя, приведенного до умов нормального тиску, розраховували за відомою формулою $V = \Delta V(1 - 10^{-4}h)$, де h – виміряна висота водяного стовпа в диференційному манометрі, мм. За результатами вимірювання будували залежність об'єму водню від часу випробовування.

3.2.5 Вимірювання електродного потенціалу та зняття поляризаційних кривих

Для оцінки корозійної тривкості хромованих зразків провели електрохімічні дослідження: вимірювання електродного потенціалу та поляризаційні. Випробовування провели у стандартній триелектродній електрохімічній комірці, де робочий електрод – зразок з хромовим покриттям (робоча площа поверхні 1 см²), електрод порівняння – хлоросрібний типу ЕВЛ-1М1, допоміжний (поляризуючий) електрод – платиновий. Дослідження провели в 3 % розчині хлористого натрію в потенціодинамічному режимі з використанням вольтамперометричної системи СВА-1Б-М за швидкості зміни потенціалу 2 мВ/с. За результатами вимірювань будували поляризаційні криві. Як еталон під час проведення досліджень використовували хром (Cr) чистотою 99,95 % (Хенань, Китай). Дослідження проводилися в Центрі колективного користування науковими приладами «Центр електронної мікроскопії та рентгенівського мікроаналізу» Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка Національної академії наук України, Львів.

3.2.6 Дослідження мікроструктури покриттів

Структуру зразків з покриттями досліджували на поперечних мікрошліфах на оптичному металографічному мікроскопі МИМ-8. Для хімічного травлення поверхні мікрошліфів використовували 4 % розчин азотної кислоти в етиловому спирті.

Товщину електрохімічних хромових покриттів, нанесених на сталеву основу, вимірювали на поперечних мікрошліфах мікроскопічним (оптичним) методом (ISO 1463:2021) за допомогою твердоміра ПМТ-3 з використанням окулярного мікрометра з роздільною здатністю 1 мкм.

Пористість електрохімічних хромових покриттів визначали за допомогою програмного забезпечення для металографічного оптичного мікроскопа ZEISS Axio Imager M2m (ZEISS Group, Єна, Німеччина) з використанням пакету програмного забезпечення Pro Imaging, який постачався разом із мікроскопом.

Електронні мікроскопічні дослідження покриттів, проводилися в Центрі колективного користування науковими приладами «Центр електронної мікроскопії та рентгенівського мікроаналізу» Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка Національної академії наук України, Львів. Використовували сканівний електронний мікроскоп ZEISS EVO 40XVP (ZEISS Group, Єна, Німеччина) з системою мікрорентгенівського спектрального аналізу та енергодисперсійний рентгенівський спектрометр INCA ENERGY 350 (Oxford Instruments, Абінгдон, Велика Британія).

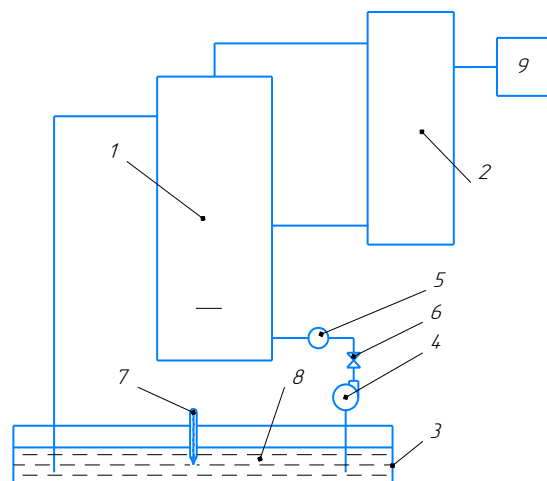
3.3 Розробка установки та оснащення для комбінованого зміцнення деталей з електрохімічним хромуванням у проточному електроліті

Для дослідження впливу параметрів електрохімічного хромування у проточному електроліті на властивості сталевих циліндричних деталей розроблено установку з автоматизованим керуванням (рис. 3.4) та змінними електрохімічними комірками (рис. 3.5). Вона дозволяє формувати покриття на внутрішній і зовнішній поверхнях деталей поршневого насоса відповідно. Деталь вертикально герметизують у комірці, яку встановлюють у витяжній шафі, підключають до джерела живлення та системи подачі електроліту. Електроліт циркулює через бак із хімічно стійкого матеріалу з насосом і системою регулювання температури, а подача здійснюється кислотостійкими патрубками. Через використання агресивних електролітів і високих густин

струму передбачено заходи безпеки: шафа заземлена, обладнана скляною шторкою з блокуванням та автоматичним відключенням у разі аварії.



а



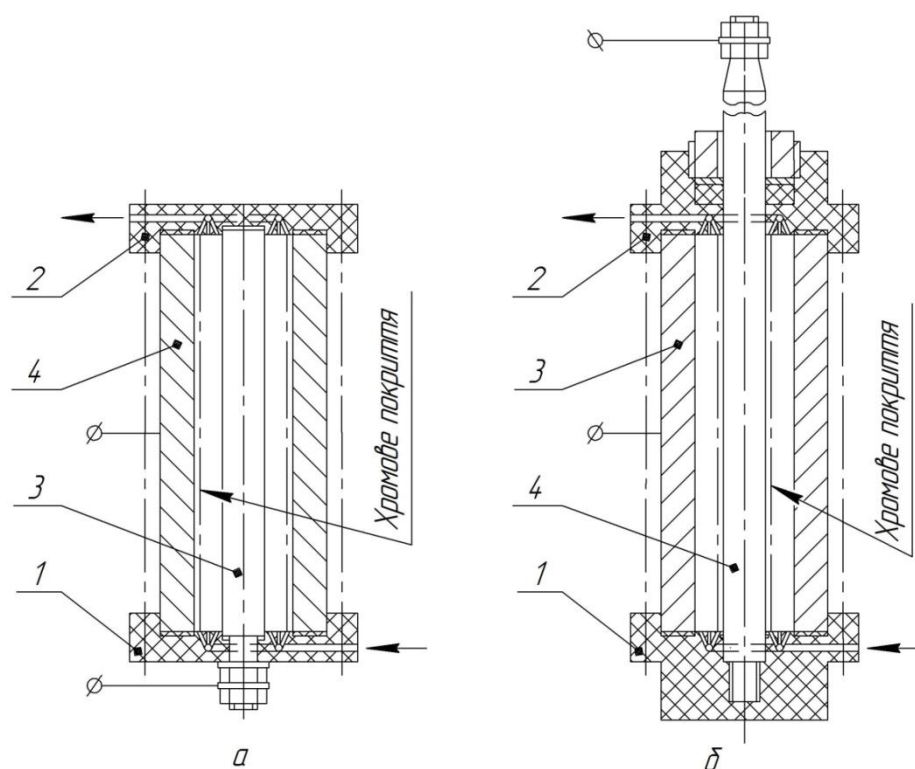
б

- 1 – електрохімічна комірка; 2 – джерело живлення; 3 – бак;
4 – відцентровий насос; 5 – лічильник; 6 – кран; 7 – термометр;
8 – електроліт; 9 – ноутбук

Рисунок 3.4 – Загальний вигляд (а) та схема установки для нанесення хромового покриття в проточному електроліті (б)

Для нанесення електрохімічного хромового покриття в проточному електроліті на втулки циліндрові і штоки поршнів використали електрохімічні комірки (Остапович, В. В., 2015) [117] (рис. 3.5), конструкція яких була нами удосконалена. Ці комірки забезпечують локальне нанесення хромового покриття на робочу поверхню циліндричної деталі.

Електроліт прокачується відцентровим насосом, виконаним в кислотостійкому виконанні, у кільцеву порожнину, що утворена між деталлю і анодом, який виготовлений зі сплаву на основі свинцю. Живлення електрохімічної комірки здійснюється від стандартного джерела постійного струму, яке застосовується у гальванічних лініях для хромування.



1, 2 – нижня і верхня кришка відповідно; 3 – анод;

4 – деталь (втулка циліндрова і шток поршня відповідно)

Рисунок 3.5 – Схеми електрохімічних комірок для нанесення електрохімічного хромового покриття в проточному електроліті на внутрішню поверхню втулки циліндрової (а) та на зовнішню поверхню штока (б) [117]

Розроблена система автоматизованого керування установкою під час проведення електрохімічного хромування робочих поверхонь деталей забезпечує встановлення та вимірювання технологічних параметрів процесу: співвідношення концентрацій компонентів електроліту (хромового ангідриду та сірчаної кислоти), швидкості потоку електроліту в кільцевій протоці між хромованою поверхнею деталі та електродом, густини струму і температури електроліту. Концентрація активних компонентів електроліту для хромування оцінюється непрямым вимірюванням густини електроліту, його електричного опору та водневого показника. Вимірювання швидкості потоку

електроліту та його густини здійснюється коріолісовим датчиком. Зовнішній вигляд інтерфейсу системи автоматизованого керування наведено на рис. 3.6.

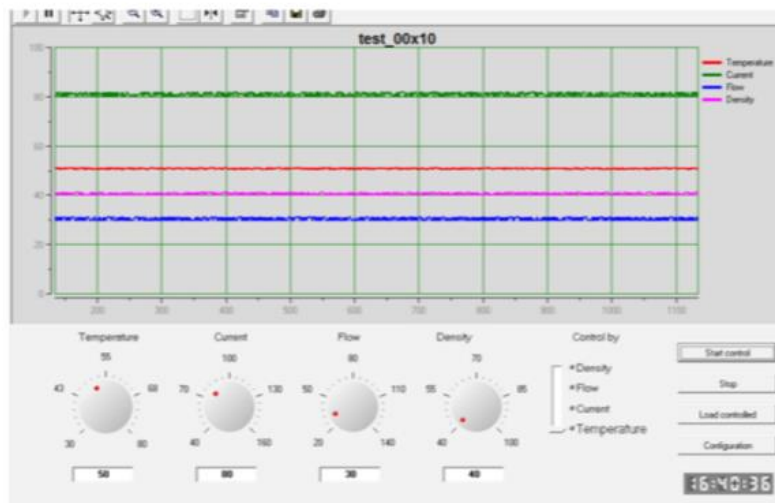


Рисунок 3.6 – Загальний вигляд інтерфейсу системи автоматизованого керування технологічними параметрами процесу електрохімічного хромування в проточному електроліті [7].

Програмне забезпечення дозволяє незалежно контролювати та підтримувати на заданому рівні технологічні параметри процесу електрохімічного хромування, а також за потреби змінювати їх під час електролізу. Максимальна величина струму, яким живиться електрохімічна комірка установки, становить 100 А і підтримується із точністю до 0,01 А. Температура електроліту підтримується вищою за кімнатну і не перевищує 100 °С, із точністю 1 °С. Швидкість потоку електроліту вимірюється в межах до 150 см/с, із похибкою не більшою 1 %, а густина – до 1,9 г/см³ із точністю 0,005 г/см³. Підтримання заданих технологічних параметрів здійснюється системою автоматичного керування із використанням пропорційно інтегрованого закону керування.

Склади електролітів та режими нанесення електрохімічних хромових покриттів на сталь наведені у табл. 3.2 та табл. 3.3.

Таблиця 3.2 – Склад електроліту (Cr VI) та режими нанесення електрохімічних хромових покриттів на сталь

Склад електроліту		Режим обробки		
найменування компонентів	кількість, г/дм ³	температура, °C	густина струму, А/дм ²	швидкість потоку, см/с
Хромовий ангідрид	200–250	55–75	50–150	20–150
Сірчана кислота	3–7			
Оксид алюмінію	20–40			

Таблиця 3.3 – Склад електроліту (Cr III) та режими нанесення електрохімічних хромових покриттів на сталь

Склад електроліту		Режим обробки		
найменування компонентів	кількість, г/дм ³	температура, °C	густина струму, А/дм ²	швидкість потоку, см/с
Сульфат хрому	150–180	45–60	25–150	20–150
Сульфат амонію	90–110			
Борна кислота	17–25			
Мурашина кислота	0,05–0,07			
N-додецилсульфат натрію	0,3–0,5			
Хлорид хрому (II)	0,1–0,3			
Гідроксид калію	20–30			
Оксид алюмінію	20–40			

Під час проведення досліджень електрохімічних хромових покриттів, нанесених у проточному електроліті з нанододатками, експерименти

повторювали тричі з визначенням середніх значень. Для побудови математичних моделей взаємозв'язків залежних змінних із вхідними технологічними параметрами було проведено статистичну обробку результатів експерименту із застосуванням методів кореляційно-регресійного аналізу. На першому етапі кореляційного аналізу підтверджено наявність взаємозв'язків між досліджуваними факторами, а на другому – за допомогою регресійного аналізу побудовано поліноміальні математичні моделі другого порядку для всіх залежних змінних (технологічних параметрів). Коефіцієнт детермінації R^2 для знайдених рівнянь регресії становив від 0,8402 до 0,9927, при цьому коефіцієнт множинної кореляції R знаходився в межах від 0,9166 до 0,9963. Оскільки значення R^2 більше 0,8, то моделі досить коректно описують відповідні залежності та є придатними для подальших розрахунків характеристик хромових покриттів у залежності від величини технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування сталевих циліндричних деталей у проточному електроліті.

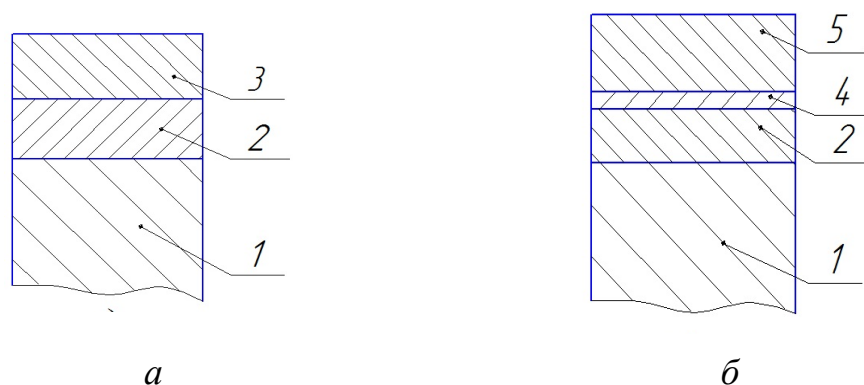
3.4 Розроблення технологічного процесу електрохімічного нанесення хромових покриттів у проточному електроліті на внутрішні / зовнішні поверхні деталей

Розроблений технологічний процес комбінованого зміцнення здійснюють за послідовним маршрутом. Вибір операцій маршруту залежить від будови зміцнених шарів (рис. 3.7), яка визначається їх функціональним призначенням та умовами експлуатації деталей.

Поверхнєве гартування сталевих зразків струмами високої частоти проводили на індукційній установці ТСМК-160 з використанням мідного трубчастого індуктора з охолодженням водою (глибина 1–3 мм).

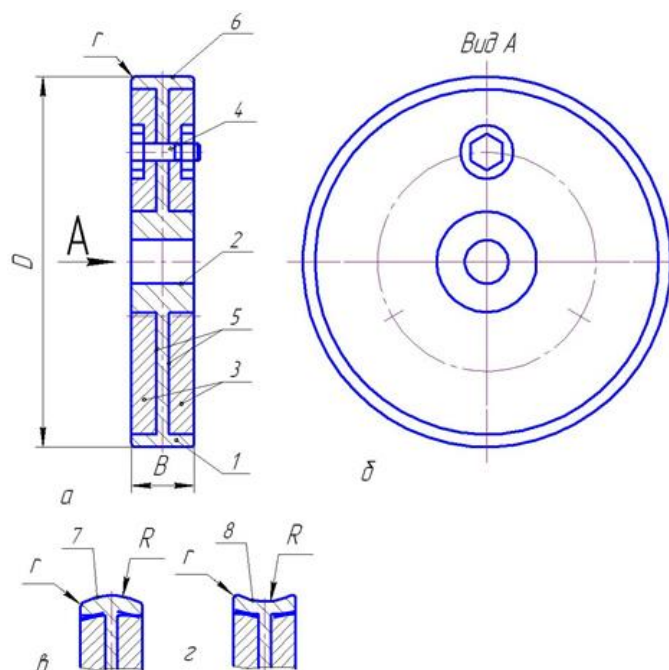
Для формування білих шарів на сталях перед нанесенням хромових покриттів нами була удосконалена конструкція інструменту для фрикційно-зміцнюючої обробки поверхонь деталей (Ропяк, Л. Я. та Остапович В.В., 2012) [118] шляхом виконання охолоджуючих мідних елементів

еквідистантними до зовнішньої робочої поверхні цього інструмента (рис. 3.8).



1 – основа (сталь); 2 – нижній шар, сформований поверхневим гартуванням струмами високої частоти; 3 – шар хромового покриття (спокійний електроліт); 4 – середній шар (білий шар), сформований фрикційною обробкою; 5 – шар хромового покриття (проточний електроліт)

Рисунок 3.7 – Варіанти будови зміцнених шарів на деталях, отриманих згідно базового (а) та розробленого варіанту електрохімічного хромування у проточному електроліті (б)



а – зовнішня робоча циліндрична поверхня прямолінійної форми, переріз;
б – вигляд А на рис. а; в – варіант виконання робочої поверхні інструмента випуклої форми; г – варіант виконання робочої поверхні інструмента вгнутої форми

Рисунок 3.8 – Удосконалена конструкція інструменту для фрикційно-зміцнюючої обробки деталей [118]

Корпус інструмента виготовляли з інструментальної сталі У8 згідно ГОСТ 1435–74, а обидва охолоджуючі елементи – з міді МО (ГОСТ 859-78), які запресовували в кільцеві проточки корпусу. Після складання інструмент балансували. Геометричні розміри: діаметр диска $D = 250$ мм, ширина робочої частини $B = 15$ мм, радіус заокруглення $r = 5$ мм. Інструмент встановили за допомогою посадкового отвору 2 та нерухомо закріпили на шпинделі пристрою, оснащеного електроприводом для примусового обертання інструмента навколо осі, та встановленого на супорті токарно-гвинторізного верстата моделі 1К62. Лінійна швидкість інструмента і зразка відповідно складала – 60 та 0,06 м/с, повздовжня подача супорта – 1,0 мм/об. Як мастильно-охолоджуючу рідину застосували оливу індустріальну І-20А за ГОСТ 20799–75, розбавлену технічним гасом (ГОСТ 18499–73) для збільшення рідкотекучості.

Розроблений технологічний процес комбінованого зміцнення сталевих деталей, містить меншу кількість операцій порівняно із описаним у праці (Остапович, В. В., 2015) [117], представлений у табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Операції технологічного процесу комбінованого зміцнення під час виготовлення або відновлення деталей електрохімічним хромуванням у проточному електроліті

Номер	Назва операції	Деталь	
		виготов- лення	віднов- лення
1	2	3	4
1	Очищення	–	+
2	Дефектоскопія	–	+
3	Видалення шару зношеного покриття	–	+
4	Промивання	–	+
5	Механічна обробка	+	+
6	Гартування струмами високої частоти	+	+
7	Механічна обробка (шліфування)	+	+

Продовження таблиці 3.4

1	2	3	4
8	Фрикційне зміцнення (білий шар)	+	+
9	Знежирювання	+	+
10	Промивання в холодній воді	+	+
11	Встановлення деталі в електрохімічній комірці для хромування	+	+
12	Прогрівання	+	+
13	Анодне декапірування	+	+
14	Електрохімічне хромування деталі в проточному електроліті	+	+
15	Промивання в холодній воді	+	+
16	Промивання в гарячій воді	+	+
17	Демонтаж деталі з електрохімічної комірки	+	+
18	Пасивування	+	+
19	Сушіння	+	+
20	Контроль розмірів деталі, товщини і якості хромового покриття	+	+
21	Алмазне шліфування хромового покриття	+	+
22	Промивання	+	+
23	Контроль розмірів деталі, товщини і шорсткості хромового покриття	+	+
24	Консервація та упакування	+	+

Представлений у табл. 3.4 перелік операцій технологічного процесу можна використовувати для формування зміцнених шарів хромуванням на внутрішніх/зовнішніх поверхнях деталей під час виготовлення нових або відновлення зношених деталей класу тіл обертання зі зміцненням покриттями їх робочих поверхонь, наприклад, втулок циліндрових, плунжерів, штоків поршнів бурових і штангових насосів.

3.5 Планування експериментів для оптимізації технологічних параметрів процесу хромування в проточному електроліті і методика оброблення результатів технологічних досліджень

Для обґрунтування технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування в проточному електроліті та встановлення закономірностей зміни мікротвердості, зношування, шорсткості та конусоподібності циліндричної поверхні деталі з хромовим покриттям у залежності від масового співвідношення концентрацій компонентів електроліту C , густини струму i швидкості потоку електроліту v та температури електроліту T провели лабораторні експериментальні дослідження зразків з хромовими покриттями, нанесеними за розробленою технологією. Для оцінки показників якості покриття вимірювали мікротвердість покриття, випробовували на зношування, визначали шорсткість поверхні та конусоподібність деталі.

Для скорочення кількості дослідів під час оптимізації технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування сталі 40ХН у проточному електроліті: масового співвідношення концентрації компонентів електроліту (сульфат хрому до сульфату амонію) (C), густини струму (i), швидкості потоку електроліту (v) і температури електроліту (T) вибрали ортогональний центральний композиційний план другого порядку (Ропяк Л. Я., Остапович, В. В., 2016) [71]. Для чотирьох факторів загальна кількість дослідів становить 26. Експеримент провели на п'яти рівнях з плечем $\alpha = 1,4826$: $-\alpha$; -1 ; 0 ; $+1$; $+\alpha$ (табл. 3.5). Досліджували вплив цих технологічних параметрів процесу хромування на експлуатаційні властивості покриттів – мікротвердість $H = f(C, i, v, T)$, знос $Y_3 = f(C, i, v, T)$; показники якості та точності – шорсткість $Ra = f(C, i, v, T)$ та конусоподібність $Y_K = f(C, i, v, T)$ вкритих деталей (табл. 3.6).

Для опису функції відклику використали поліном другого порядку

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i \neq j}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2, \quad (3.1)$$

де b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} – коефіцієнти регресії, які характеризують вільний член рівняння, лінійні ефекти, ефекти взаємодії та квадратичні ефекти відповідно;

x_i – фактори експерименту (технологічні параметри процесу);

k – кількість незалежних факторів експерименту ($k = 4$).

Таблиця 3.5 – Рівні варіювання факторів експерименту

Рівні факторів	Натуральні значення			
	співвідношення концентрацій C, %	густина струму i, А/дм ²	швидкість потoku v, м/с	температура електроліту T, °C
Основний рівень (0)	2	100	0,85	55
Інтервал варіювання (1)	0,5	40	0,45	15
Верхній рівень (+1)	2,5	140	1,30	70
Нижній рівень (–1)	1,5	60	0,40	40
Зіркові точки (+ α)	2,741	160	1,52	77
Зіркові точки (– α)	1,259	40	0,18	33

На основі результатів розрахунків, виконаних з використанням програмного забезпечення Statistica 14 (TIBCO Software Inc., USA), було побудовано поверхні відгуку параметрів оптимізації від двох змінних технологічних параметрів, при двох інших, фіксованих на основному рівні та їх двовимірні поперечні перерізи. Також було визначено оптимальні значення компонентного складу та технологічних параметрів нанесення хромових покриттів у проточному електроліті для забезпечення отримання максимальної мікротвердості, мінімального зношування за прийнятних значень шорсткості та конусоподібності циліндричної поверхні деталі.

Таблиця 3.6 – Результати експериментальних лабораторних досліджень мікротвердості, зношування, шорсткості та конусоподібності електрохімічного хромового покриття нанесеного в проточному електроліті для проведення оптимізації плануванням експерименту на основі ортогонального центрального композиційного плану

Номер досліджу	Рівні факторів				Середнє значення параметра оптимізації,			
	C, %	I, А/дм ²	v, м/с	T, °C	Ra, мкм	H, ГПа	Y _з , г	Y _к , мкм
1	1,5	60	0,4	40	0,97	7,33	0,146	14,5
2	1,5	60	0,4	70	0,94	7,81	0,151	14
3	1,5	60	1,3	40	0,63	7,95	0,137	9,5
4	1,5	60	1,3	70	0,67	7,89	0,143	10
5	1,5	140	0,4	40	0,82	7,31	0,125	12
6	1,5	140	0,4	70	0,71	9,33	0,113	10,5
7	1,5	140	1,3	40	0,63	8,59	0,123	9,5
8	1,5	140	1,3	70	0,49	10	0,109	7,5
9	2,5	60	0,4	40	0,81	8,09	0,127	12
10	2,5	60	0,4	70	0,94	7,12	0,136	14
11	2,5	60	1,3	40	0,52	9,18	0,121	8,5
12	2,5	60	1,3	70	0,53	8,14	0,129	8
13	2,5	140	0,4	40	0,63	10,21	0,106	9,5
14	2,5	140	0,4	70	0,69	10,45	0,104	10,5
15	2,5	140	1,3	40	0,43	11,55	0,096	6,5
16	2,5	140	1,3	70	0,41	10,68	0,103	6
17	1,259	100	0,85	55	0,81	7,32	0,141	12
18	2,741	100	0,85	55	0,51	10,34	0,109	7,5
19	2	40	0,85	55	0,73	7,41	0,151	11
20	2	160	0,85	55	0,59	11,32	0,101	9
21	2	100	0,18	55	0,87	9,95	0,112	13
22	2	100	1,52	55	0,47	10,45	0,108	7
23	2	100	0,85	33	0,53	9,83	0,113	8
24	2	100	0,85	77	0,62	10,33	0,109	9
25	2	100	0,85	55	0,57	11,32	0,101	8,5
26	2	100	0,85	55	0,56	11,57	0,099	8,5

Висновки до розділу 3

1. Обґрунтовано вибір матеріалів та методик дослідження впливу технологічних параметрів процесу комбінованого зміцнення на експлуатаційні властивості деталей.

2. Вибрана конструкція установки дозволяє проводити випробовування на знос під час зворотно-поступального руху в середовищі промивальної рідини з абразивом та відтворює реальні умови роботи під час експлуатації металево-гумових пар тертя насосів: циліндрова втулка – гумово-металевий поршень; шток поршня – гумове ущільнення. Розроблено методику дослідження процесів деструкції гуми під час фрикційної взаємодії в парі тертя «хромована деталь – гумове ущільнення», яка дозволить уточнити механізм зношування ущільнень.

3. Модернізовано установку для нанесення електрохімічних хромових покриттів у проточному електроліті, удосконалено конструкції електрохімічних комірок для вирівнювання напруженості електричного поля за їх висотою та розроблено систему автоматизованого керування технологічними параметрами процесу електрохімічного хромування, яка забезпечує підтримання на заданому рівні технологічних параметрів процесу: співвідношення концентрацій компонентів електроліту, швидкості потоку, густини струму та температури електроліту, а також дозволяє контролювати водневий показник електроліту та його електричний опір, що забезпечує рівномірне нанесення покриття, яке має малу шорсткість поверхні, високу мікротвердість і зносостійкість.

4. Удосконалено конструкцію інструменту із охолодженням для фрикційного зміцнення сталевих деталей із еквідістантною поверхнею охолоджуючого елемента до робочої поверхні інструмента.

5. Розроблений новий технологічний процес комбінованого зміцнення деталей типу тіл обертання, який включає поверхневе гартування, формування «білого шару» фрикційною обробкою та нанесення хромового

покриття у проточному електроліті, забезпечить зниження різниці електродних потенціалів у системі хромове покриття – «білий шар» сталевій основи та підвищення корозійної тривкості та роботоздатності деталей насосів в агресивних середовищах із вмістом абразивних частинок.

6. Застосування планування експерименту для оптимізації технологічних параметрів процесу хромування в проточному електроліті (ортогональний центральний композиційний план) дозволить скоротити кількість дослідів та визначити оптимальні режими хромування для забезпечення одержання високої твердості, зносостійкості, якості (шорсткості) та точності (конусоподібності) циліндричних деталей.

Результати розділу опубліковано в працях автора [3, 4, 12, 17, 18].

РОЗДІЛ 4

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ВПЛИВУ
ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ НАНЕСЕННЯ ХРОМОВИХ
ПОКРИТТІВ НА ПОКАЗНИКИ ТОЧНОСТІ ТА ЯКОСТІ ПОВЕРХОНЬ
ДЕТАЛЕЙ4.1 Вплив технологічних параметрів процесу електрохімічного
хромування на експлуатаційні властивості деталей

Розроблений технологічний процес комбінованого зміцнення сталевих деталей, включає поверхневе гартування струмами високої частоти, формування «білого шару» фрикційною обробкою та нанесення електрохімічного хромового покриття в проточному електроліті. Дослідили вплив технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування в проточному електроліті з нанододатками Al_2O_3 на властивості покриттів нанесених на сталеву основу.

Для дослідження впливу технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування в проточному електроліті на експлуатаційні властивості сталевих циліндричних деталей використовували розроблений технологічний процес та установку, яка споряджена системою автоматизованого керування та містить електрохімічну комірку (див. розділ 3). Циліндричний разок під час нанесення хромового покриття встановлюють вертикально в електрохімічній комірці та герметизують.

Як матеріал для виготовлення циліндричних зразків використовували хромонікелеву конструкційну леговану сталь 40ХН (ГОСТ 4543–71), яку поверхнево гартували струмами високої частоти та формували «білий шар». Хромове покриття наносили на зразки зі сталі в стандартному електроліті на основі хромового ангідриду та сірчаної кислоти із нанододатками оксиду алюмінію. Циліндричні аноди – сплав свинець-олово-сурма отримували литвом.

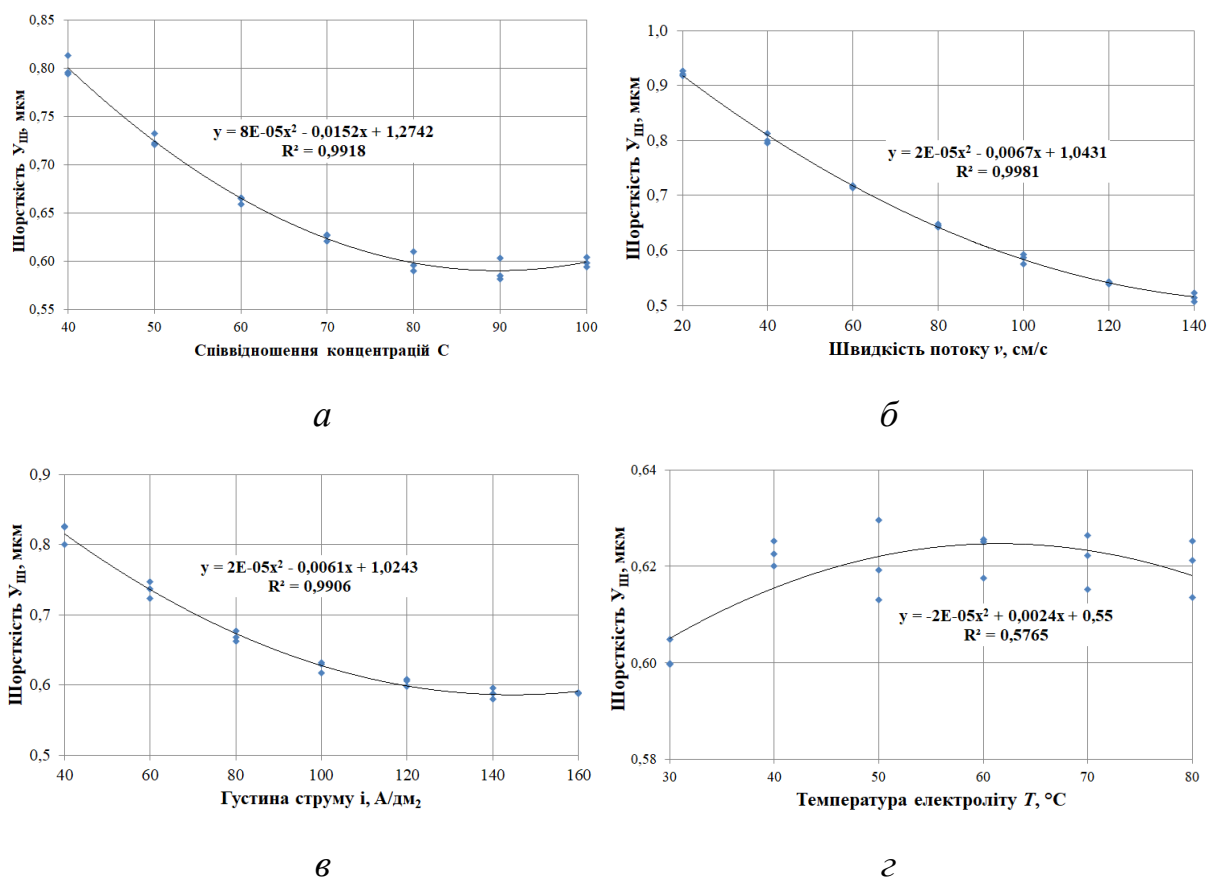
Шорсткість поверхні зразків (R_a) визначали розрахунковим методом на підставі результатів обробки профілограм, знятих на модернізованому приладі профілографі-профілометрі моделі Р-201, відповідно перед нанесенням та після нанесення хромових покриттів.

Для вимірювання товщини і мікротвердості хромових покриттів виготовляли поперечні мікрошліфи та використовували прилад ПМТ-3. Товщина шару нанесеного хромового покриття становила від 150 мкм до 170 мкм. Випробовування хромованих зразків на зношування проводили на модернізованій установці для дослідження пар тертя при зворотно-поступальному русі в середовищі промивальної рідини з абразивом, яка відтворює реальні умови роботи під час експлуатації металево-гумових пар тертя насосів: циліндрова втулка – гумово-металевий поршень; шток поршня – гумове ущільнення; плунжер – гумове ущільнення. Величину зносу хромованих зразків визначали гравіметричним методом за допомогою аналітичних терезів ВЛР-200.

Під час проведення досліджень електрохімічних хромових покриттів, нанесених у проточному електроліті з нанододатками, експерименти повторювали тричі з визначенням середніх значень. Для побудови математичних моделей взаємозв'язків залежних змінних із вхідними технологічними параметрами було проведено статистичну обробку результатів експерименту із застосуванням методів кореляційно-регресійного аналізу. На першому етапі кореляційного аналізу підтверджено наявність взаємозв'язків між досліджуваними факторами, а на другому – за допомогою регресійного аналізу побудовано поліноміальні математичні моделі другого порядку для всіх залежних змінних (технологічних параметрів). Коефіцієнт детермінації R^2 для знайдених рівнянь регресії становив від 0,8402 до 0,9927, при цьому коефіцієнт множинної кореляції R знаходився в межах від 0,9166 до 0,9963. Оскільки значення R^2 більше 0,8, то моделі досить коректно описують відповідні залежності та є придатними для подальших розрахунків характеристик хромових покриттів у залежності від величини технологічних

параметрів процесу електрохімічного хромування сталевих циліндричних деталей у проточному електроліті.

За результатами експериментальних досліджень побудували графічні залежності величини шорсткості поверхні (рис. 4.1), мікротвердості (рис. 4.2) та зносу (рис. 4.3) електрохімічних хромових покриттів, нанесених у проточному електроліті, від технологічних параметрів процесу: співвідношення концентрацій компонентів електроліту, швидкості потоку, густини струму та температури електроліту.



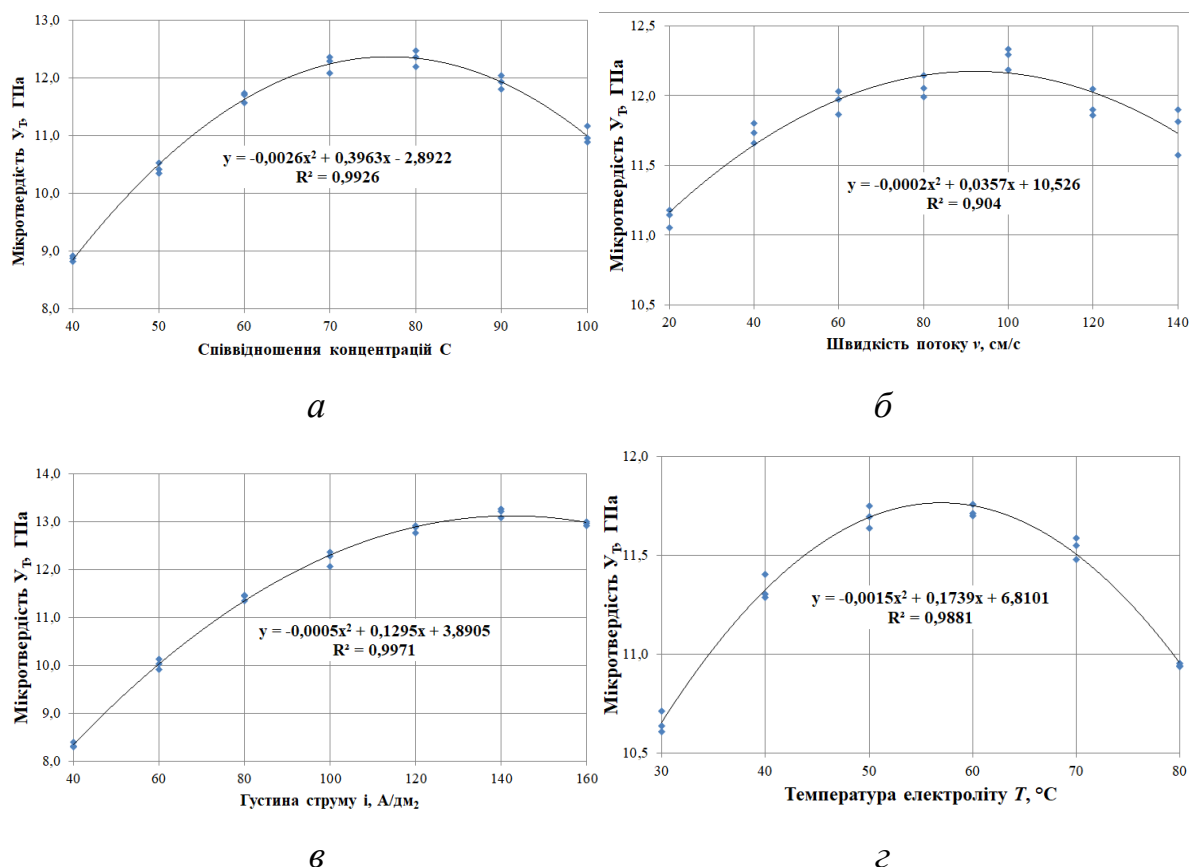
а – співвідношення концентрацій компонентів електроліту;

б – швидкості потоку; в – густини струму; з – температури електроліту

Рисунок 4.1 – Залежність шорсткості поверхні покриття від технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування в проточному електроліті

При цьому значення технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування приймали в діапазонах: співвідношення концентрацій компонентів електроліту – $C = 40\text{--}100$ за постійного

вмісту 25 г/л частинок $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, швидкість потоку – $v = 20\text{--}140$ см/с, густина струму – $i = 40\text{--}160$ А/дм², температура електроліту – $T = 30\text{--}80$ °С. Під час побудови відповідних графічних залежностей решта три технологічні параметри приймали на середньому рівні: співвідношення концентрацій компонентів електроліту – $C = 70$, швидкість потоку – $v = 100$ см/с, густина струму – $i = 85$ А/дм², температура електроліту – $T = 55$ °С.

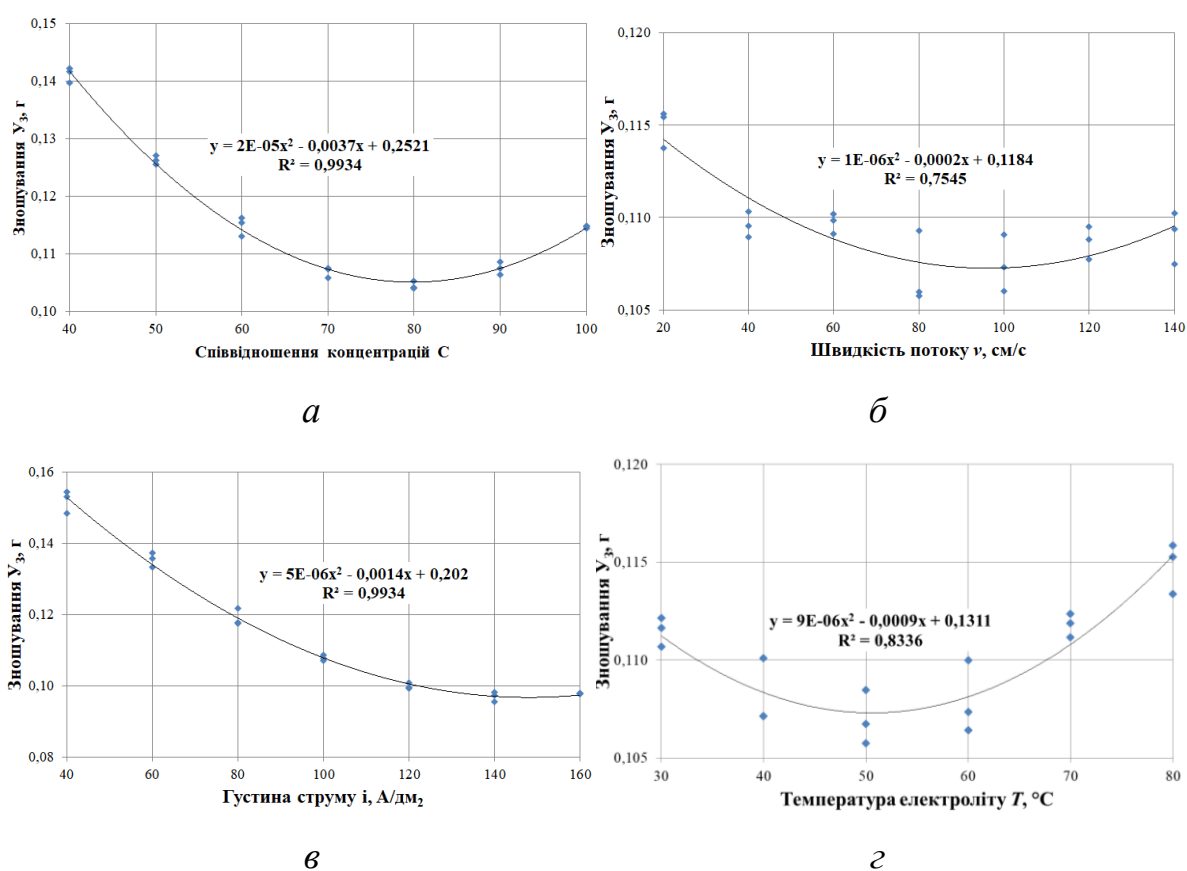


а – співвідношення концентрацій компонентів електроліту; б – швидкості потоку; в – густини струму; г – температури електроліту

Рисунок 4.2 – Залежність мікротвердості покриття від технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування в проточному електроліті

Аналіз впливу технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування на величину шорсткості поверхні покриття (рис. 4.1) показав, що представлена на рис. 4.1, а крива є вгнутою та має мінімум за співвідношення концентрацій компонентів електроліту – $C = 90$. Щодо впливу швидкості потоку на шорсткість (рис. 4.1, б), то отримана крива є спадною у межах

досліджуваного діапазону, при цьому досягається мінімальне значення шорсткості покриття на краю, за максимального значень швидкості потоку – $v = 140$ см/с. Отримана крива залежності шорсткості хромового покриття від густини струму (рис. 4.1, в) є спадною у межах досліджуваного діапазону, а мінімальне значення шорсткості покриття досягається майже на краю, за густини струму близько $i = 145$ А/дм². Залежність шорсткості поверхні хромового покриття від температури електроліту (рис 4.1, г) є випуклою кривою, а максимальне значення шорсткості покриття досягається за температури електроліту біля $T = 60$ °С.



а – співвідношення концентрацій компонентів електроліту;

б – швидкості потоку; в – густини струму; г – температури електроліту

Рисунок 4.3 – Залежність величини зносу покриття від технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування в проточному електроліті

Із аналізу результатів дослідження впливу технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування на мікротвердість покриття (рис. 4.2) встановлено, що всі отримані криві є випуклими та мають максимуми в точках відповідно: співвідношення концентрацій компонентів електроліту – $C = 75$, швидкість потоку – $v = 90$ см/с, густина струму – $i = 140$ А/дм², температура електроліту – $T = 57$ °С. За цих значень технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування у досліджуваних діапазонах забезпечується отримання величини мікротвердості покриття від 11,7 ГПа до 13,1 ГПа. При цьому найбільший вплив на величину мікротвердості чинить густина струму, забезпечуючи формування хромового покриття з великою мікротвердістю – 13,1 ГПа.

Аналізуючи вплив технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування на величину зносу покриття (рис. 4.3) слід відзначити, що представлені на рис. 4.3, а, б, в, г криві є вгнутими та мають мінімуми в точках відповідно: співвідношення концентрацій компонентів електроліту – $C = 80$, швидкість потоку – $v = 95$ см/с, густина струму – $i = 150$ А/дм², температура електроліту – $T = 50$ °С. За вищевказаних значень технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування у досліджуваних діапазонах величина зносу покриття змінюється від 0,095 г до 0,107 г. Встановлено, що найменша величина зносу хромового покриття досягається під час його формування за густини струму – $i = 150$ А/дм² і становить 0,095 г.

Аналіз графічних залежностей шорсткості поверхні (рис. 4.1), мікротвердості (рис. 4.2) та зносу (рис. 4.3) електрохімічних хромових покриттів нанесених у проточному електроліті від технологічних параметрів процесу, свідчить, що показники якості поверхні та фізико-механічні властивості досліджуваних хромових покриттів залежать практично від усіх технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування: співвідношення концентрацій компонентів електроліту, швидкості потоку, густини струму, температури електроліту. Зростання величини

співвідношення концентрацій компонентів електроліту, швидкості потоку та густини струму призводить до зниження шорсткості, а збільшення температури електроліту спричиняє збільшення шорсткості поверхні хромового покриття. Введення до складу хромового покриття наноксидів алюмінію призводить до зростання його мікротвердості, що узгоджується із результатами досліджень з нанесення композиційних електрохімічних покриттів (Bikulčius et al., 2018) [94], (Zeng & Zhang, 2008) [95]. Причому збільшення величини мікротвердості хромового покриття практично повною мірою корелює зі зменшенням його зносу.

Слід зазначити, що майже всі отримані криві (рис. 4.1 – рис.4.3) є параболічного типу, і більшість із них має критичні (максимум/мінімум) точки в межах досліджуваних діапазонів зміни технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування в проточному електроліті. Це свідчить про можливість проведення у подальших дослідженнях оптимізації технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування, які забезпечуватимуть високі експлуатаційні властивості деталей поршневих і плунжерних насосів з хромовими покриттями. Одержані нами результати досліджень узгоджується з результатами представленими в праці (Zhang et al., 2013) [73], де описуються приклади зміцнення хромуванням відповідно штоків гідроциліндрів і гільз поршневого компресора для забезпечення одержання високої твердості робочої поверхні з низьким коефіцієнтом тертя.

Для проведення досліджень хромованих зразків з покриттями використовували стандартні циліндричні взірці діаметром 3 мм для механічних випробовувань на розтяг за кімнатної температури (EN 10002–1:2001, IDT). Випробовування на розтяг проводили на модернізованій нами установці (див. розділ 3), яка дозволяє безперервно реєструвати величину електродного потенціалу зразка з хромовим покриттям у модельному електроліті під час навантаження. Допустимий рівень механічних напружень розтягу, за яких відбувається руйнування хромового

покриття, визначали за різкою зміною (стрибком) величини електродного потенціалу.

Для визначення допустимих рівнів напружень розтягу в циліндричних зразках із хромовими покриттями були нанесенні покриття різної товщини на поверхню сталі: 50, 100 і 150 мкм. Результати випробовувань показали, що за низьких значень напружень розтягу відбувається незначна зміна електродного потенціалу для зразків із хромовими покриттями усіх досліджуваних товщин. Подальше зростання напружень розтягу призводить до руйнування хромових покриттів. При цьому чим більша товщина хромового покриття, тим нижчий для нього допустимий рівень напружень розтягу за яких утворюються наскрізні тріщини в покритті зразка, що призводить до різкої зміни величини електродного потенціалу. Встановлено, що допустимий рівень напружень розтягу для хромових покриттів різних товщин становить відповідно: 50 мкм – 310 МПа; 100 мкм – 220 МПа; 150 мкм – 190 МПа. Таке зниження допустимого рівня напружень розтягу зі зростанням товщини покриття обумовлене зростанням кількості мікротріщин у процесі формування покриттів більшої товщини та збільшенням рівня залишкових напружень розтягу в хромових покриттях.

4.2 Оптимізація технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування в проточному електроліті для забезпечення показників якості циліндричних деталей

Побудовано математичну модель процесу електрохімічного хромування в проточному електроліті та встановлено оптимальні значення технологічних параметрів для забезпечення отримання покриттів з максимальною мікротвердістю, мінімальним зношуванням при низькій шорсткості та конусоподібності циліндричних поверхонь деталей.

Для дослідження впливу технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування в проточному електроліті на експлуатаційні властивості циліндричних деталей використовували розроблений

технологічний процес та установку (див. розділ 3). Хромове покриття наносили на сталь із стандартного електроліту на основі хромового ангідриду та сірчаної кислоти. Аноди (сплав свинцю з сіркою (4 – 6) % і оловом (10 – 15) %) отримували литвом. Матеріалом зразків служила сталь 40ХН, яку поверхнево гартували струмами високої частоти, піддавали шліфуванню і фрикційному зміцненню перед нанесенням хромового покриття, згідно існуючих вимог до підготовки поверхні $R_a = 0,32$ мкм. При нанесенні покриття деталь розташовували в електрохімічній комірці у вертикальному положенні. Товщина нанесеного покриття складала 300 мкм.

За результатами проведення оптимізації планування експерименту на основі ортогонального центрального композиційного плану було отримано невідомі коефіцієнти рівнянь регресії. Оцінку значимості коефіцієнтів рівняння регресії перевірили при рівні 0,05 за допомогою t -критерію Стюдента. Статистично незначимі коефіцієнти були відкинуті. Після цього значимі коефіцієнти рівнянь регресії другого порядку були підставлені у формулу (3.1) та отримано функції відклику (параметр оптимізації), які відображають залежність мікротвердості хромового покриття Y_T , зношування Y_3 , шорсткості $Y_{ш}$ та конусоподібності циліндричної поверхні Y_K в залежності від масового співвідношення концентрацій компонентів електроліту C , густини струму i , швидкості потоку електроліту v , температури електроліту T за результатами проведеного ортогонального центрального композиційного планування експерименту в натуральних значеннях змінних факторів набули такого вигляду для:

– шорсткості

$$Ra = 2,184143 - 0,802962C + 0,135344C^2 - 0,004538i + 0,000021i^2 - \\ - 0,599248v + 0,188093v^2 + 0,000698T - 0,000022T^2 - 0,000250Ci - \\ - 0,044444Cv + 0,003500CT + 0,001458iv - 0,000038iT - 0,001481Tv \quad (4.1)$$

– мікротвердості

$$\begin{aligned}
 H = & -20,2538 + 17,0902C - 3,7315C^2 + 0,0440i - 0,0004i^2 + \\
 & + 3,7208v - 1,5197v^2 + 0,2681T - 0,0016T^2 + 0,0191Ci + \\
 & + 0,2861Cv - 0,0541CT + 0,0005iT - 0,0216Tv
 \end{aligned} \quad (4.2)$$

– зношування

$$\begin{aligned}
 Y_3 = & 0,397339 - 0,162169C + 0,031900C^2 - 0,001158i + 0,000005i^2 - \\
 & - 0,022947v + 0,005685v^2 - 0,000946T + 0,000007T^2 + \\
 & + 0,000308CT - 0,000005iT + 0,000065Tv
 \end{aligned} \quad (4.3)$$

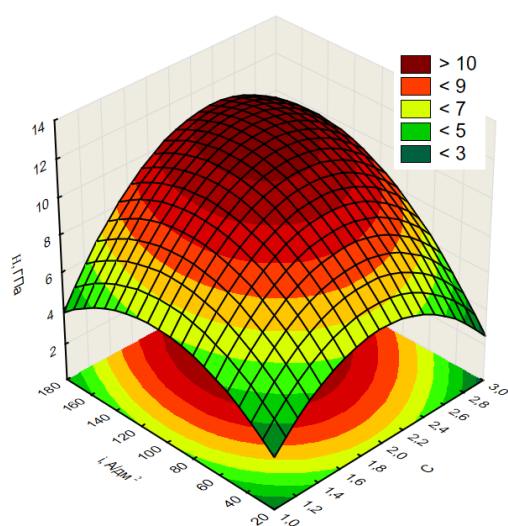
– конусоподібності

$$\begin{aligned}
 Y_K = & 31,2774 - 10,9754C + 1,9084C^2 - 0,0795i + 0,0004i^2 - \\
 & - 8,0562v + 2,8944v^2 + 0,0288T - 0,0004T^2 - 0,0047Ci - \\
 & - 0,6944Cv + 0,0458CT + 0,0191iv - 0,0005iT - 0,0324Tv
 \end{aligned} \quad (4.4)$$

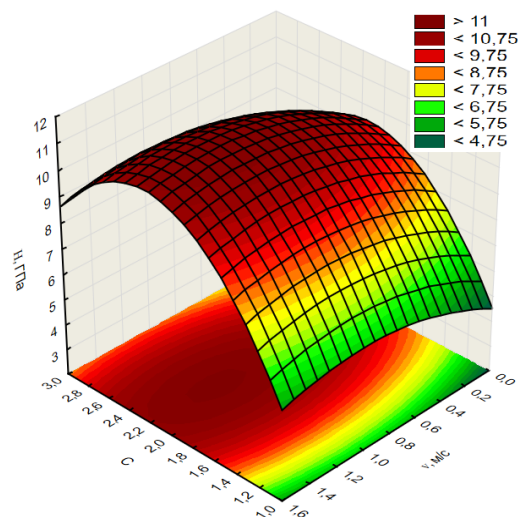
Отримані рівняння регресії (4.1) – (4.4) другого порядку в натуральних величинах можуть використовуватися для розрахунку мікротвердості H , зношування Y_3 , шорсткості Ra і конусоподібності Y_K деталей з хромовим покриттям у залежності від зміни масового співвідношення концентрацій компонентів електроліту C , густини струму i , А/дм², швидкості потоку електроліту v , м/с, температури електроліту T , °С, які відповідно знаходяться в таких межах: $1,26 \leq C \leq 2,74$; $40 \leq i \leq 160$; $0,18 \leq v \leq 1,52$; $28 \leq T \leq 77$.

Для дослідження впливу технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування в проточному електроліті (змінних факторів) на параметри оптимізації побудували поверхні відгуку та їх двовимірні перерізи в залежності від двох змінних факторів (два інші фактори приймали на постійному основному рівні) з використанням програмного забезпечення Statistica 14 (TIBCO Software Inc., USA) (рис. 4.4 – рис. 4.7).

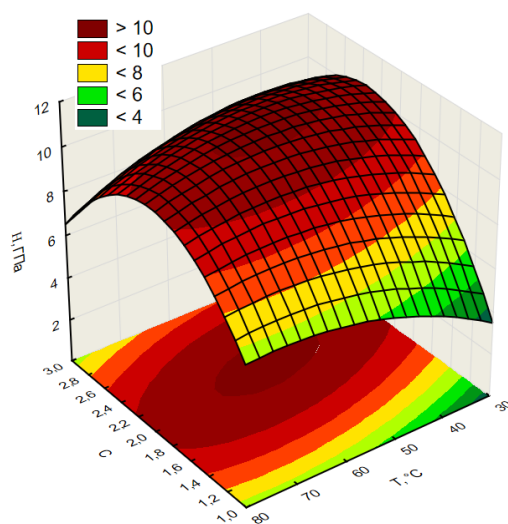
Аналіз отриманих рівнянь регресії другого порядку (4.1) – (4.4) та побудованих поверхонь відгуку (рис. 4.4 – рис. 4.7), свідчить, що величина параметрів оптимізації для хромового покриття залежить практично від усіх технологічних параметрів процесу.



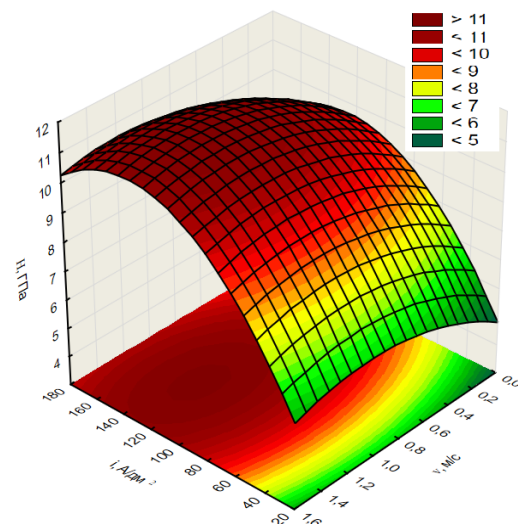
а



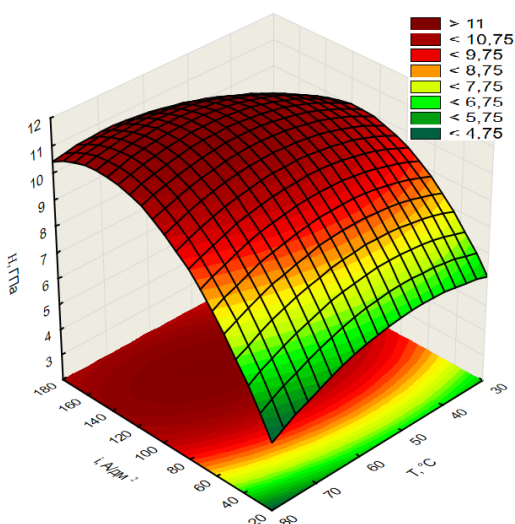
б



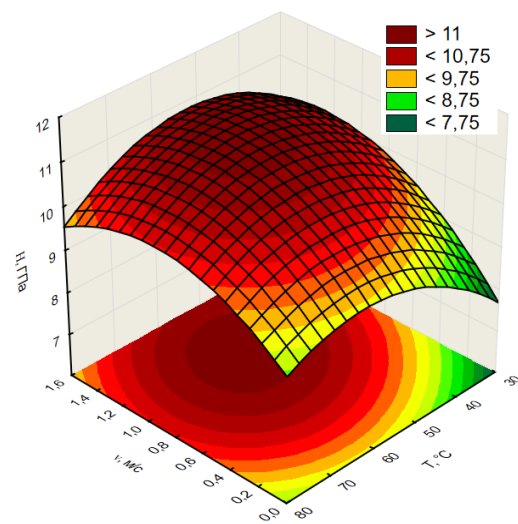
в



г



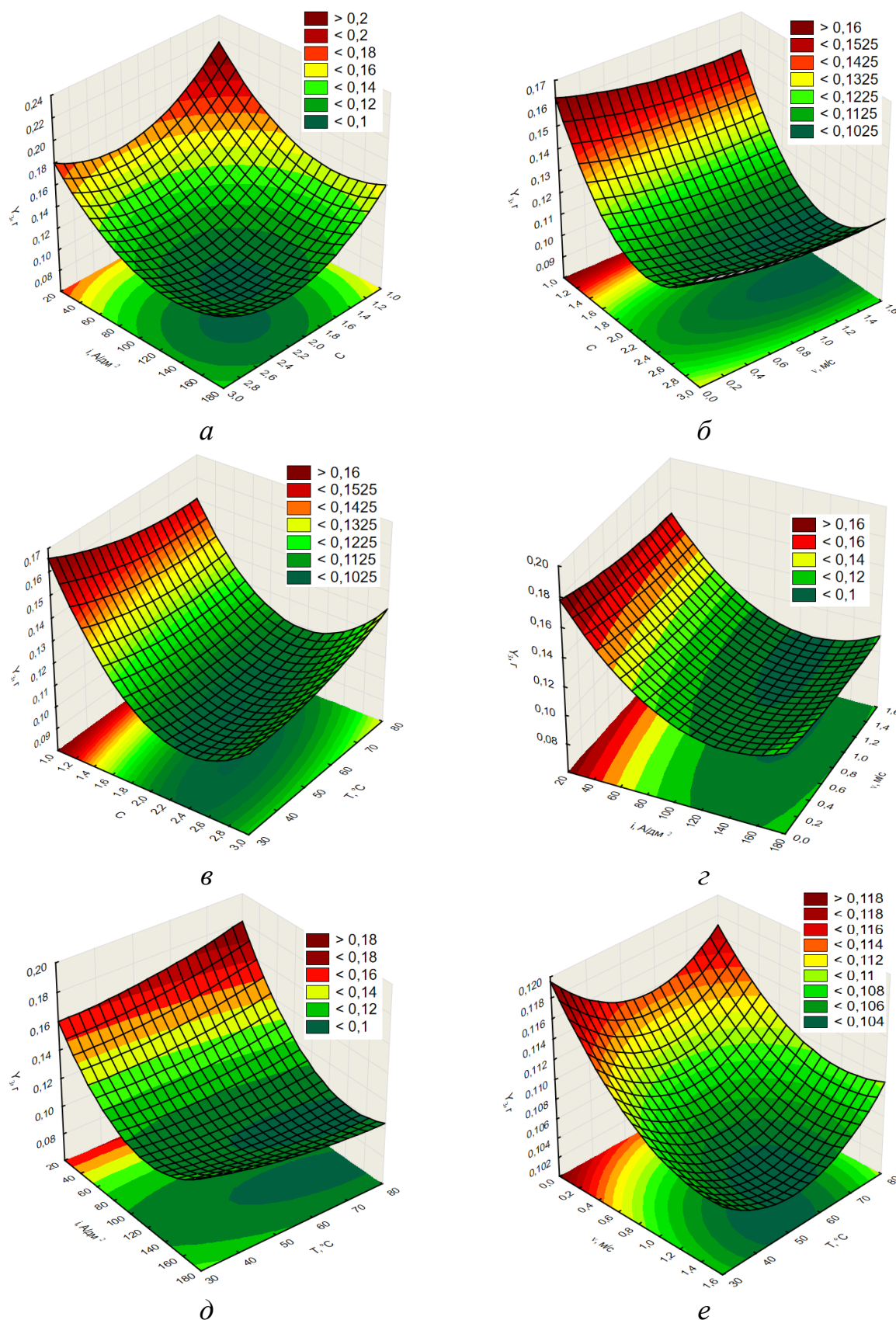
д



е

а – C , i , $v = 0,85$ м/с, $T = 55$ °C; б – C , v , $i = 100$ А/дм², $T = 55$ °C;
 в – C , T , $i = 100$ А/дм², $v = 0,85$ м/с; г – i , v , $C = 70$, $T = 55$ °C;
 д – i , T , $C = 70$, $v = 0,85$ м/с; е – v , T , $C = 70$, $i = 100$ А/дм²

Рисунок 4.4 – Поверхні відгуку залежності мікротвердості покриття від технологічних параметрів електрохімічного хромування в проточному електроліті

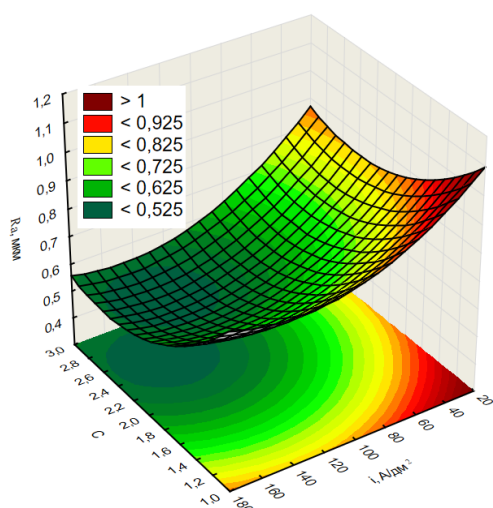


a – $C, i, v = 0,85 \text{ м/с}, T = 55 ^\circ\text{C}$; *б* – $C, v, i = 100 \text{ А/дм}^2, T = 55 ^\circ\text{C}$;

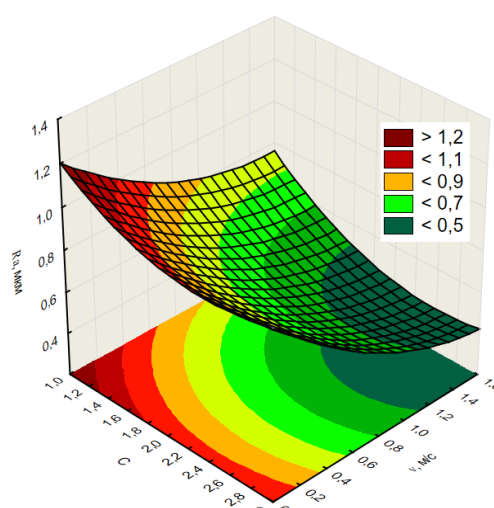
в – $C, T, i = 100 \text{ А/дм}^2, v = 0,85 \text{ м/с}$; *г* – $i, v, C = 70, T = 55 ^\circ\text{C}$;

д – $i, T, C = 70, v = 0,85 \text{ м/с}$; *е* – $v, T, C = 70, i = 100 \text{ А/дм}^2$

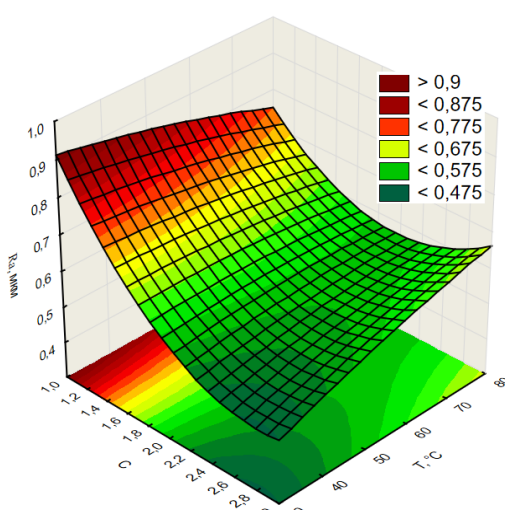
Рисунок 4.5 – Поверхні відгуку залежності зношування покриття від технологічних параметрів електрохімічного хромування в проточному електроліті



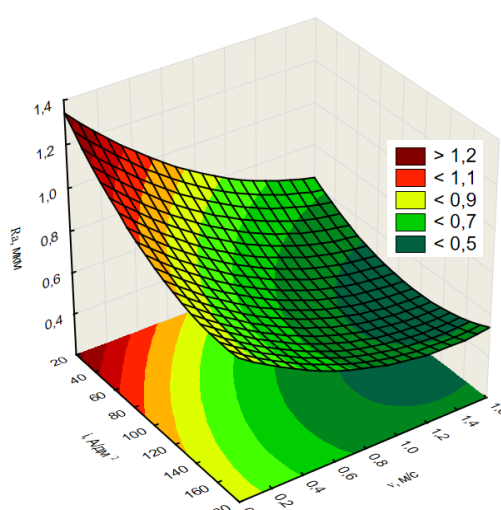
a



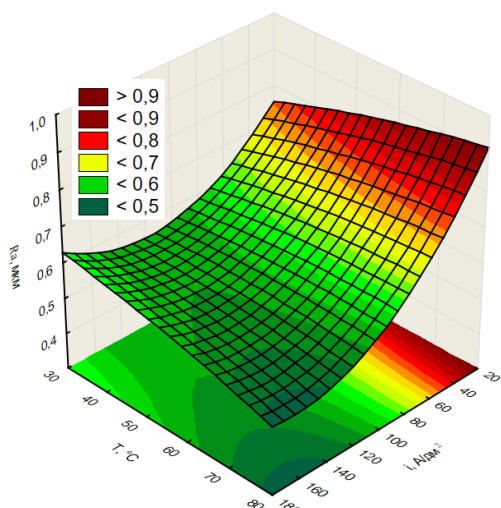
б



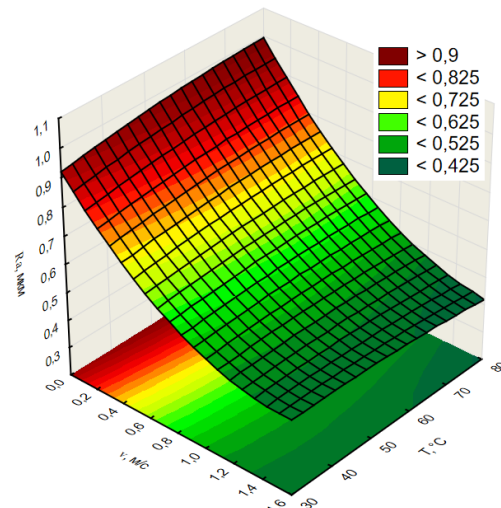
в



г



д



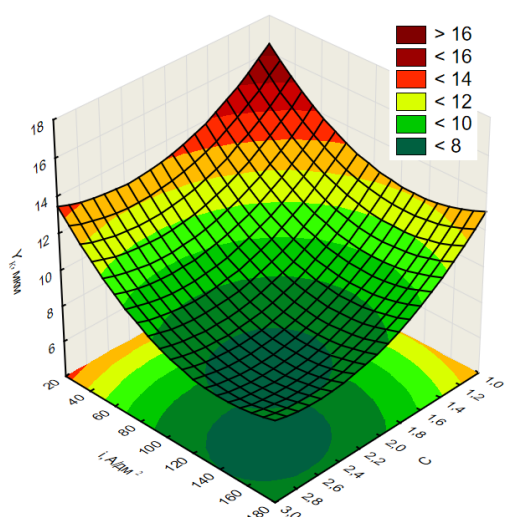
е

a – C, i, v = 0,85 м/с, T = 55 °C; б – C, v, i = 100 А/дм², T = 55 °C;

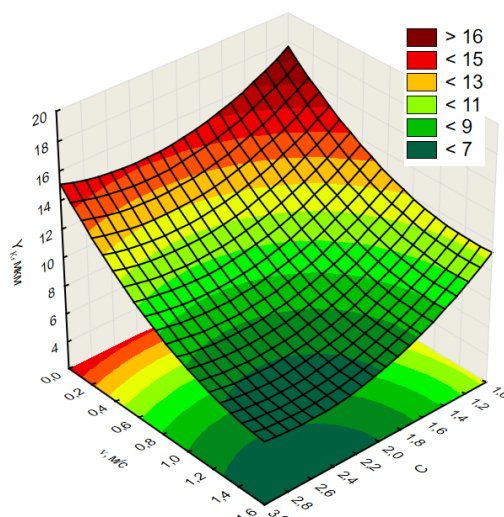
в – C, T, i = 100 А/дм², v = 0,85 м/с; г – i, v, C = 70, T = 55 °C;

д – i, T, C = 70, v = 0,85 м/с; е – v, T, C = 70, i = 100 А/дм²

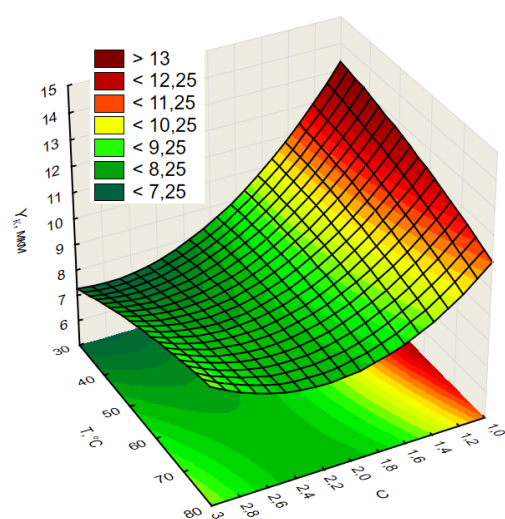
Рисунок 4.6 – Поверхні відгуку залежності шорсткості поверхні покриття від технологічних параметрів електрохімічного хромування в проточному електроліті:



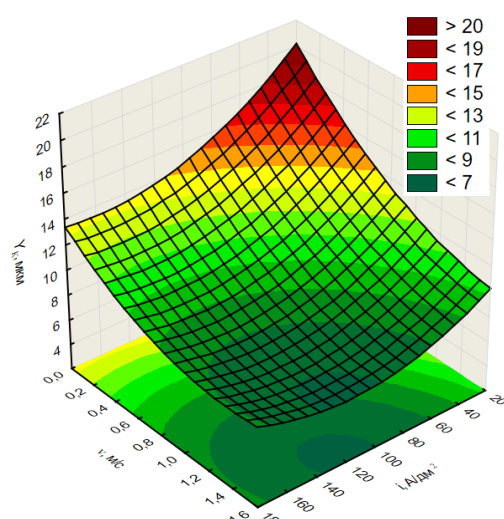
a



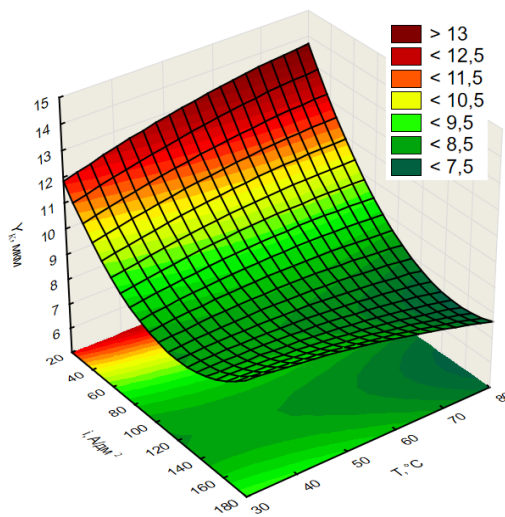
б



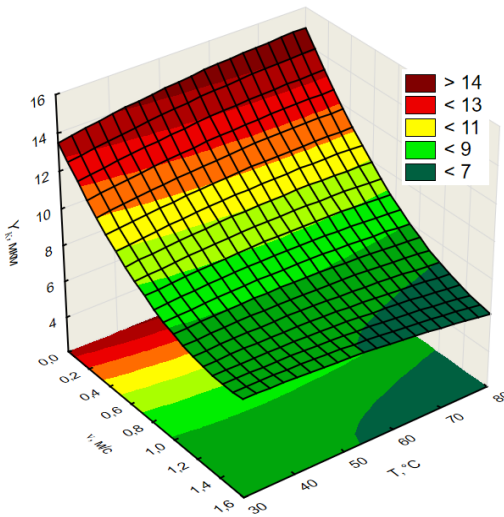
в



г



д



е

$a - C, i, v = 0,85 \text{ м/с}, T = 55^\circ \text{C}; б - C, v, i = 100 \text{ А/дм}^2, T = 55^\circ \text{C};$
 $в - C, T, i = 100 \text{ А/дм}^2, v = 0,85 \text{ м/с}; г - i, v, C = 70, T = 55^\circ \text{C};$
 $д - i, T, C = 70, v = 0,85 \text{ м/с}; е - v, T, C = 70, i = 100 \text{ А/дм}^2$

Рисунок 4.7 – Поверхні відгуку залежності конусоподібності поверхні покриття від технологічних параметрів електрохімічного хромування в проточному електроліті

Із використанням програмного забезпечення Statistica 14 знайшли оптимальні значення технологічних параметрів процесу хромування (табл. 4.1). Слід зазначити, що за максимальної величини мікротвердості нанесеного хромового покриття забезпечується його мінімальне зношування, а оптимальні значення технологічних параметрів процесу знаходяться у межах факторного простору. Для параметрів оптимізації шорсткості та конусоподібності оптимальні значення швидкості потоку знаходяться поза межами факторного простору.

Таблиця 4.1 – Оптимальні значення технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування в проточному електроліті

Параметри оптимізації		Технологічні параметри			
Назва	оптимальні значення	співвідношення концентрацій компонентів C	густина струму i , А/дм ²	швидкість потоку v , м/с	температура електроліту T , °С
		Мінімальні значення			
		1,26	40	0,18	28
		Оптимальні значення			
Мікротвердість H , ГПа	11,46446	2,2834	137,0998	1,1569	55,4244
Зношування Y_3 , г	0,08643	2,2347	134,7902	1,1926	60,5274
Шорсткість Ra , мкм	0,39917	2,5715	121,1061	1,6649*	60,3349
Конусоподібність Y_K , мкм	6,05523	2,6868	118,7962	1,6151**	52,3345
—		Максимальні значення			
		2,74	160	1,52	77

Примітки:

*) оптимальне значення швидкості потоку для шорсткості знаходиться за межами досліджуваного діапазону;

**) оптимальне значення швидкості потоку для конусоподібності знаходиться за межами досліджуваного діапазону.

Аналіз результатів планування експерименту, наведених у табл. 4.1 свідчить, що оптимальні значення технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування в проточному електроліті для параметрів оптимізації: H , Y_3 , Ra , Y_K відрізняються між собою. Для перших двох параметрів оптимізації – мікротвердості та зношування оптимальні значення технологічних параметрів процесу практично співпадають і знаходяться в межах діапазону варіювання факторів. Тобто при максимальній мікротвердості забезпечується мінімальне зношування хромового покриття. Оптимальні значення технологічних параметрів для забезпечення отримання мінімальної шорсткості та конусоподібності близькі між собою, але більш істотно відрізняються від оптимальних технологічних параметрів для забезпечення отримання максимальної мікротвердості та мінімального зношування. При цьому для отримання мінімальних величин Ra , Y_K оптимальне значення швидкості потоку електроліту виходить за межі діапазону варіювання факторів навіть з урахуванням величини зіркового плеча.

Оскільки зносостійкість є важливою експлуатаційною характеристикою для деталей гідравлічної частини поршневих насосів двосторонньої дії то за оптимальні значення технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування в проточному електроліті прийняли ті, які забезпечують отримання мінімальної величини зношування $Y_3 = 0,08643$ г: $C = 2,2347$; $i = 134,7902$ А/дм²; $v = 1,1926$ м/с; $T = 60,5274$ °С. Підставивши ці значення оптимальних технологічних параметрів у формули (4.1) і (4.4) отримаємо розрахункові значення величин шорсткості $Ra = 0,44482$ мкм і конусоподібності $Y_K = 6,67934$ мкм, тобто їх величини будуть дещо більшими від оптимальних $Ra = 0,39917$ мкм, $Y_K = 6,05523$ мкм (табл. 4.2). Необхідну шорсткість і конусоподібність поверхні деталей згідно технічних вимог на їх виготовлення у залежності від їх функціонального призначення доцільно отримувати на подальших операціях механічної обробки: шліфування та алмазного вигладжування.

Таблиця 4.2 – Розрахункові значення параметрів оптимізації, відповідно до оптимальних значень технологічних параметрів процесу хромування, за яких забезпечується мінімальний знос

Параметри оптимізації		Технологічні параметри				Відхилення параметра оптимізації, %
назва	Оптимальне значення	співвідношення компонентів C , %	густина струму i , А/дм ²	Швидкість потоку v , м/с	Температура електроліту, T , °С	
		Оптимальні значення				
		2,2347	134,7902	1,1926	60,5274	
		Розраховані значення параметра оптимізації				
Мікротвердість H , ГПа	11,46446	11,40885				0,49
Зношування Y_3 , г	0,08643	0,08643				0,00
Шорсткість Ra , мкм	0,39917	0,44482				11,43
Конусоподібність Y_K , мкм	6,05523	6,67934				10,31

Відхилення параметра оптимізації визначали за виразом

$$\Delta = \frac{K_o - K_p}{K_o} 100\%, \quad (4.5)$$

де K_o та K_p – оптимальне та розрахункове значення параметра оптимізації, відповідно.

Слід зазначити, що при електрохімічному хромуванні в проточному електроліті циліндричних деталей у вертикальному положенні максимальне збільшення діаметру для зовнішніх поверхонь і зменшення для внутрішніх поверхонь спостерігається у нижній частині деталі. Для усунення конусоподібності та підвищення точності деталей з покриттями їх необхідно перед хромуванням обмірювати і монтувати у вертикальному положенні в електрохімічній комірці навпаки, тобто для валів мінімальним діаметром деталі знизу, а для втулок, при нанесенні покриття на внутрішню поверхню – максимальним діаметром знизу.

Таким чином, дослідженнями показано можливість спрямованого керування процесом електрохімічного хромування в проточному електроліті шляхом зміни технологічних параметрів з урахуванням технологічної спадковості виготовлення деталей.

Отримані результати досліджень доводять можливість практичного застосування оптимальних значень технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування в проточному електроліті при серійному виготовленні втулок циліндрових і штоків поршнів насосів на машинобудівних підприємствах.

4.3 Дослідження впливу режимів алмазного шліфування на шорсткість хромового покриття

Побудували та проаналізували математичні моделі впливу режимів різання при круглому алмазному шліфуванні електрохімічних хромових покриттів, нанесених на сталеву деталь в проточному електроліті, на величину шорсткості обробленої поверхні. На рис. 4.8 – рис. 4.13 наведено графіки залежності шорсткості поверхні Ra від швидкості обертання деталі, глибини різання та повздовжньої подачі стола.

Наведені графіки ілюструють залежність шорсткості поверхні Ra від технологічних параметрів: швидкості обертання деталі, повздовжньої подачі стола та глибини різання. При цьому в кожному із варіантів було використано перебір значень двох із заявлених параметрів, а третій приймали на середньому рівні.

На основі отриманих результатів встановлено, що шорсткість поверхні Ra зростає зі збільшенням досліджуваних параметрів, а саме швидкості обертання деталі, повздовжньої подачі стола та глибини різання. Графіки показують, що для досягнення меншої шорсткості поверхні доцільно застосовувати менші подачі та нижчі швидкості обертання та повздовжньої подачі стола, оскільки зі збільшенням цих параметрів поверхня стає грубішою.

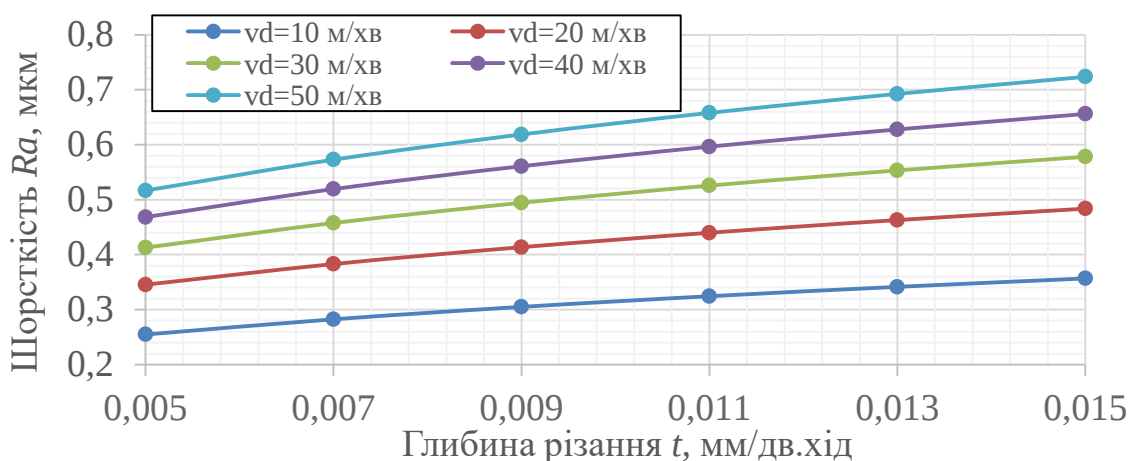


Рисунок 4.8 – Залежність шорсткості поверхні деталі від глибини різання за фіксованих значень швидкості обертання деталі та повздовжньої подачі стола на середньому рівні ($s = 4$ мм/об)

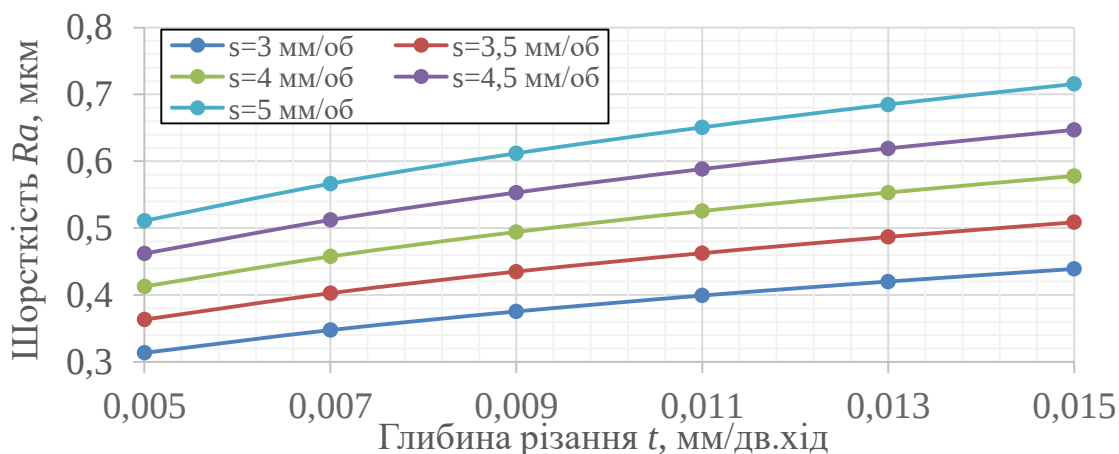


Рисунок 4.9 – Залежність шорсткості поверхні деталі від глибини різання за фіксованих значень повздовжньої подачі стола та швидкості обертання деталі на середньому рівні ($v_d = 30$ м/хв)

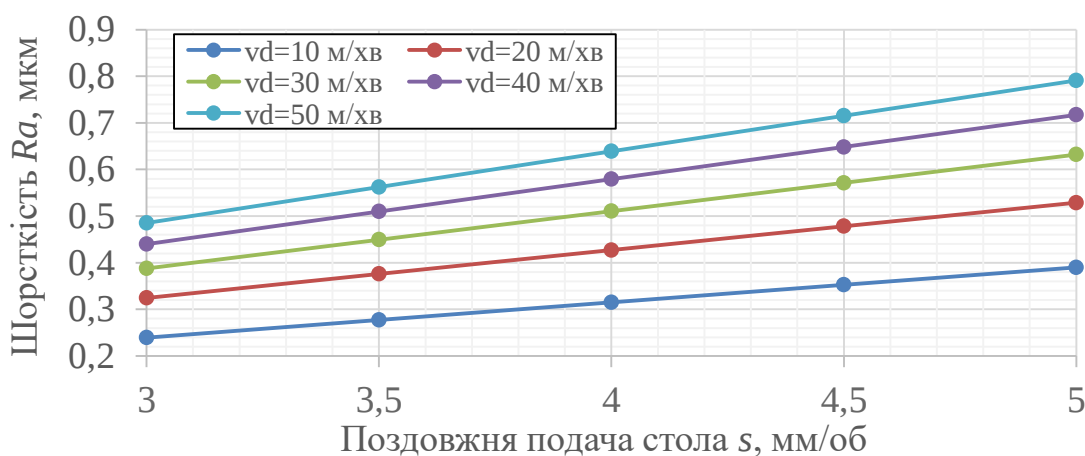


Рисунок 4.10 – Залежність шорсткості поверхні деталі від повздовжньої подачі стола за фіксованих значень швидкості обертання деталі та глибини різання на середньому рівні ($t = 0,1$ мм/дв.хід)

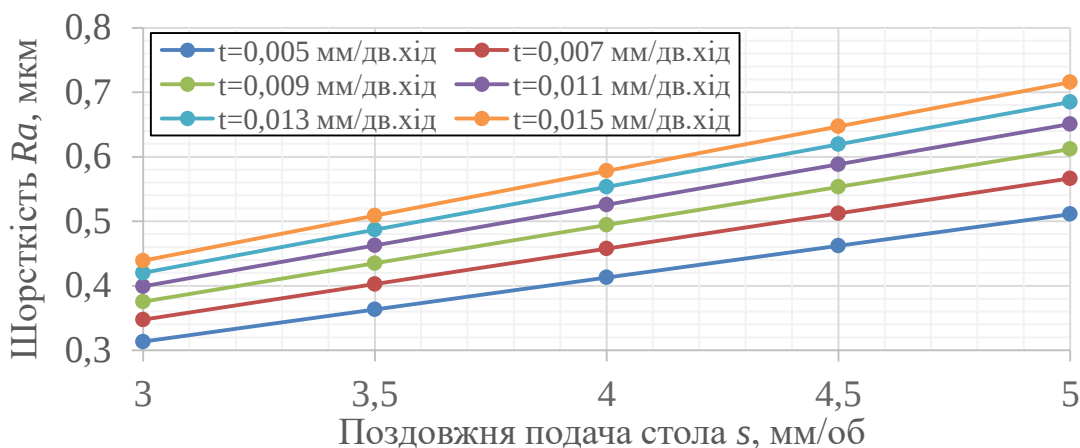


Рисунок 4.11 – Залежність шорсткості поверхні деталі від повздовжньої подачі стола за фіксованих значень глибини різання та швидкості обертання деталі на середньому рівні ($v_d = 30$ м/хв)

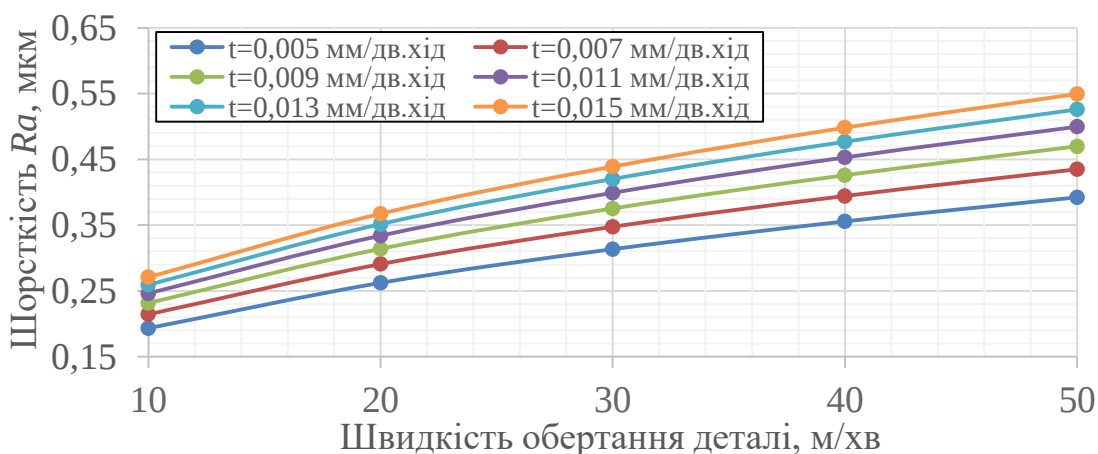


Рисунок 4.12 – Залежність шорсткості поверхні деталі від швидкості обертання деталі за фіксованих значень глибини різання та повздовжньої подачі стола на середньому рівні ($s = 4$ мм/об)

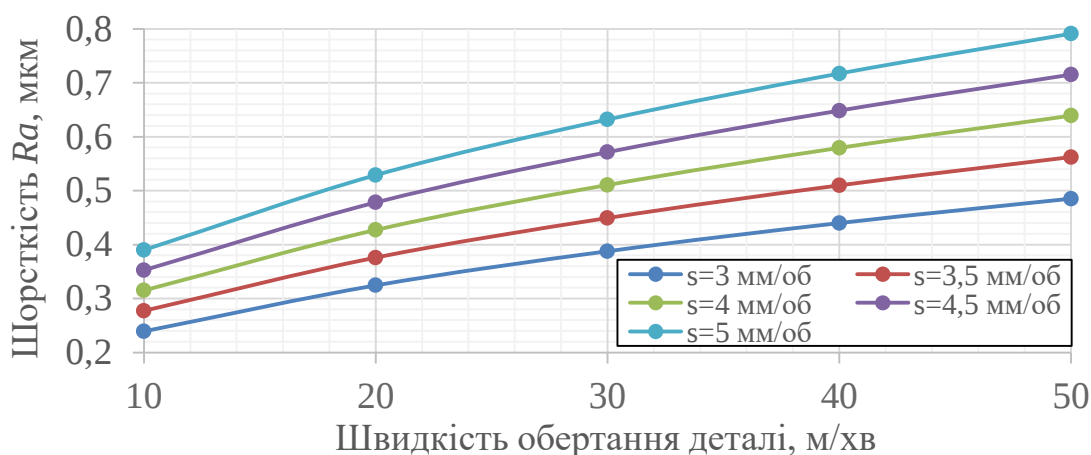


Рисунок 4.13 – Залежність шорсткості поверхні деталі від швидкості обертання деталі за фіксованих значень повздовжньої подачі стола та глибини різання на середньому рівні ($t = 0,1$ мм/дв.хід)

Характер кривих залежностей шорсткості поверхні хромованої деталі від повздовжньої подачі за фіксованих значень швидкості обертання деталі та глибини різання на середньому рівні, а також залежностей – за фіксованих значень глибини різання та швидкості обертання деталі на середньому рівні, є лінійним (рис. 4.10 – рис. 4.11). Решта із наведених залежностей є квадратичними кривими (рис. 4.8 – рис. 4.9 та рис. 4.12 – рис. 4.13). Криві при зміні параметрів розташовані майже паралельно, що свідчить про стійкий характер впливу досліджуваних технологічних параметрів на шорсткість хромованої поверхні на всіх діапазонах.

Це свідчить про визначальний вплив досліджуваних технологічних параметрів на формування мікрогеометрії поверхні, а також показує необхідність та можливість оптимізації режимів обробки для забезпечення необхідної якості поверхонь хромованих деталей.

Після механічної обробки (алмазного шліфування) циліндричних зразків з електрохімічними хромовими покриттями, нанесеними відповідно у спокійному та проточному електролітах, провели дослідження шорсткості їх поверхні на безконтактному інтерференційному 3D профілографі “MICRON-ALPHA” (рис. 4.14 – рис. 4.23). Для оцінки шорсткості циліндричних зразків сканування провели вздовж твірної циліндра (пряма лінія) та по радіусу (дуга кола).

Встановлено, що електрохімічне хромове покриття нанесене у спокійному електроліті має більшу величину шорсткості поверхні вздовж твірної циліндра ($R_z = 2,084$ мкм, $R_a = 0,4183$ мкм) – рис. 4.14, рис. 4.15 і табл. 4.3 та по радіусу ($R_z = 1,579$ мкм, $R_a = 0,2938$ мкм) – рис. 4.16, рис. 4.17, табл. 4.4 і рис. 4.18 порівняно із хромовим покриттям нанесеним у проточному електроліті сканування вздовж твірної циліндра ($R_z = 0,9605$ мкм, $R_a = 0,1395$ мкм) – рис. 4.19, рис. 4.20 і табл. 4.5 та по радіусу ($R_z = 0,7127$ мкм, $R_a = 0,1074$ мкм) – рис. 4.21, рис. 4.22, табл. 4.6 і рис. 4.23. Така відмінність у шорсткості обумовлена тим, що під час хромування у проточному електроліті забезпечується інтенсивне видалення водню з

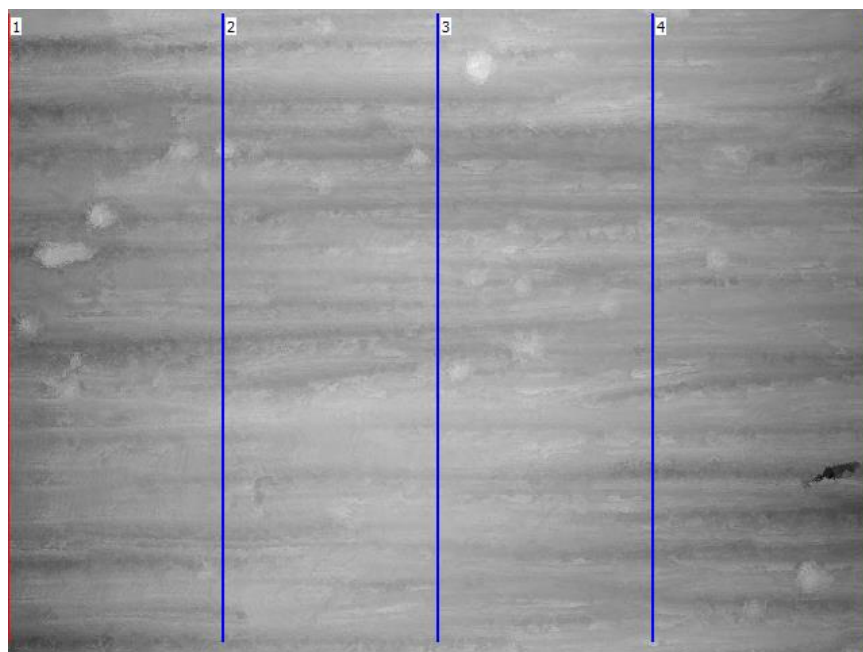


Рисунок 4.14 – Траси сканування вздовж твірної циліндра під час дослідження шорсткості поверхні електрохімічного хромового покриття нанесеного у спокійному електроліті



a



б



в



г

a – траса 1; *б*– траса 2; *в* – траса 3; *г*– траса 5

Рисунок 4.15 – Профілі трас сканування вздовж твірної циліндра під час дослідження шорсткості поверхні електрохімічного хромового покриття нанесеного у спокійному електроліті

Таблиця 4.3 – Параметри шорсткості за трасами сканування вздовж твірної циліндра (1–5) під час дослідження поверхні хромового покриття нанесеного у спокійному електроліті

Параметри	Номер траси сканування					Середнє значення
	1	2	3	4	5	
Максимальна висота профілю Rz, мкм	2,149	2,249	1,820	2,202	2,000	Rz=2,084
Середнє арифметичне відхилення профілю Ra, мкм	0,3860	0,4191	0,4670	0,3976	0,4219	Ra=0,4183
Шорсткість між двома попередньо визначеним опорним лініями H, мкм	1,659	1,740	1,835	1,637	1,741	H=1,722
Глибина шорсткості основи R3z, мкм	2,140	2,268	1,542	2,145	1,823	R3z=1,984
Середньоквадратична шорсткість Rq, мкм	0,4905	0,5232	0,5619	0,5001	0,5352	Rq=0,5222
Коефіцієнт ексцесу профілю шорсткості Rku	3,337	2,931	2,553	2,745	3,567	Rku=3,027
Максимальна висота піку профілю Rp, мкм	1,162	1,403	1,473	1,250	1,062	Rp=1,270
Середньоквадратичне відхилення поверхні H STD						H STD=1,04922
Площа поверхні S surf, мкм ²						S surf=102946
Відношення площі поверхні до площі проекції поверхні SR surf						SR surf=1,16359

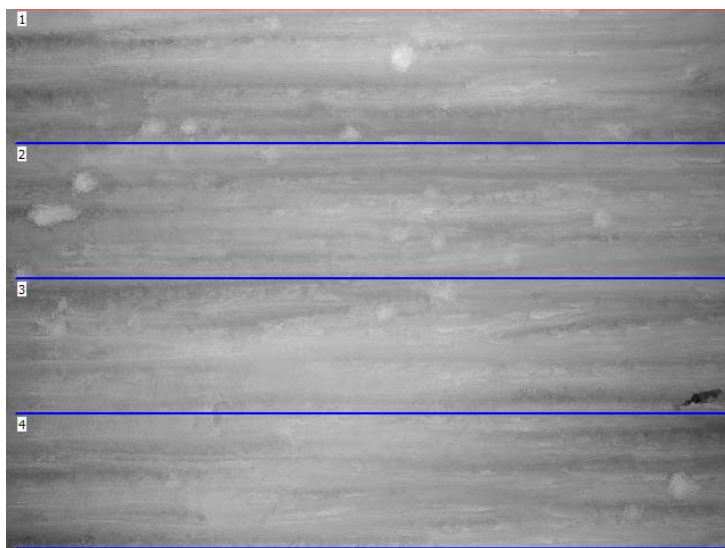
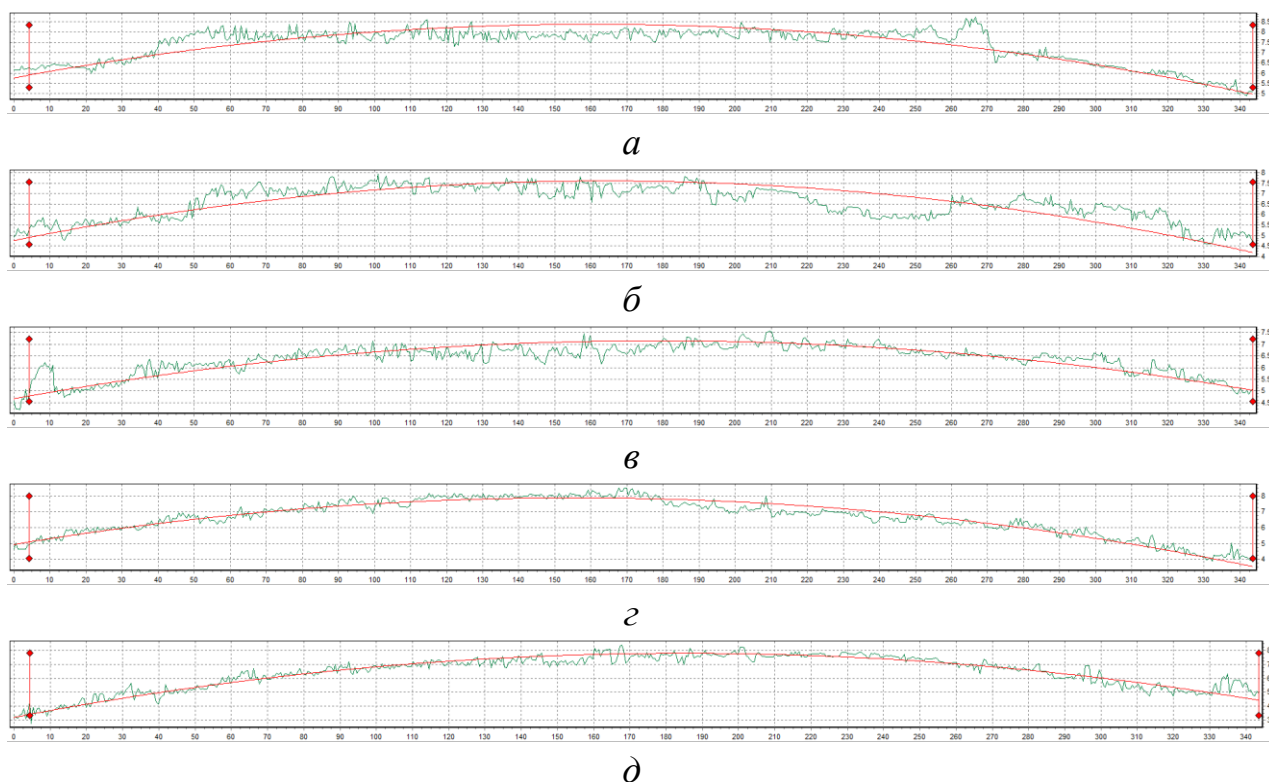


Рисунок 4.16 – Траси сканування по радіусу під час дослідження шорсткості поверхні електрохімічного хромового покриття нанесеного у спокійному електроліті



a – траса 1; *б*– траса 2; *в* – траса 3; *г*– траса 5

Рисунок 4.17 – Профілі трас сканування по радіусу під час дослідження шорсткості поверхні електрохімічного хромового покриття нанесеного у спокійному електроліті

Таблиця 4.4 – Параметри шорсткості за трасами сканування по радіусу (1–5) під час дослідження поверхні хромового покриття нанесеного у спокійному електроліті

Параметри	Номер траси сканування					Середнє значення
	1	2	3	4	5	
Максимальна висота нерівностей профілю за 10 точками Rz, мкм	1,600	1,811	1,582	1,284	1,617	Rz=1,579
Середнє арифметичне відхилення профілю Ra, мкм	0,3084	0,4381	0,2319	0,2443	0,2462	Ra=0,2938
Радіус обраного сегменту сферичної поверхні R, мм	4,936	4,696	6,432	4,108	3,736	R=4,7816
Шорсткість між двома попередньо визначеним опорним лініями H, мкм	1,352	1,849	0,9684	0,9682	1,087	H=1,245
Глибина шорсткості основи R3z, мкм	1,337	1,679	1,481	1,206	1,605	R3z=1,462
Середньоквадратична шорсткість Rq, мкм	0,4024	0,5405	0,3094	0,2978	0,3345	Rq=0,3769
Коефіцієнт ексцесу профілю шорсткості Rku	3,608	2,398	4,929	2,944	4,962	Rku=3,768
Максимальна висота піку профілю Rp, мкм	1,499	1,254	1,320	1,214	1,539	Rp=1,365
Середньоквадратичне відхилення поверхні H STD						H STD=1,04922
Площа поверхні S surf, мкм ²						S surf=102946
Відношення площі поверхні до площі проекції поверхні SR surf						SR surf=1,16359

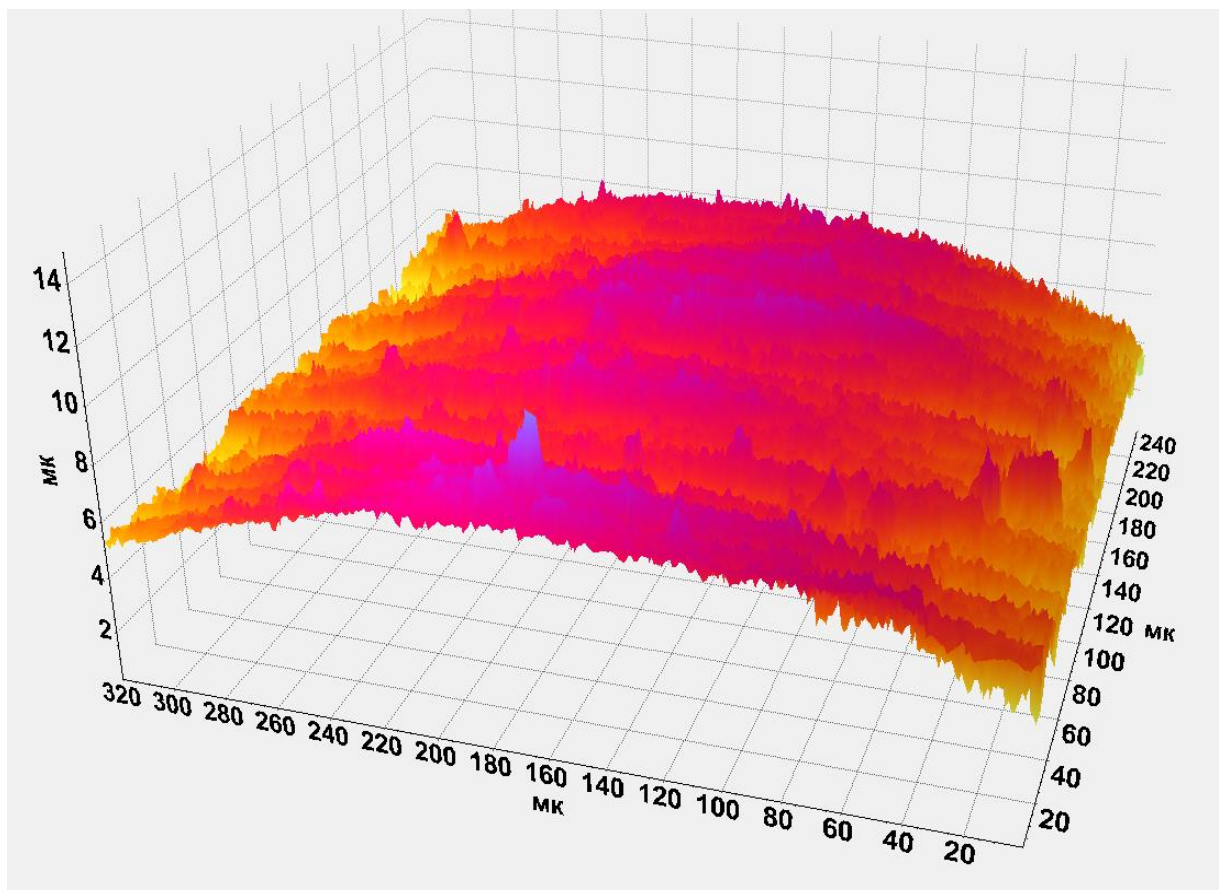


Рисунок 4.18 – 3D-зображення шорсткості поверхні електрохімічного хромового покриття нанесеного у спокійному електроліті

поверхні хрому і покращується оброблюваність покриття (знижується його крихкість). Крім цього, хромове покриття нанесене у проточному електроліті мало також кращі показники й за іншими досліджуваними параметрами шорсткості (дивись табл. 4.3 – табл. 4.6), а саме: глибина шорсткості основи R_{3z} , середньоквадратична шорсткість R_q , коефіцієнт ексцесу профілю шорсткості R_{ku} , максимальна висота піку профілю R_p , мкм, середньоквадратичне відхилення поверхні H_{STD} , площа поверхні S_{surf} і відношення площі поверхні до площі проекції поверхні SR_{surf} . Слід зазначити, що величина шорсткості поверхні покриттів виміряна вздовж твірної циліндра більша від шорсткості виміряної по радіусу кола як для хромових покриттів нанесених у спокійному електроліті, так і для покриттів нанесених у проточному електроліті, що обумовлено особливостями круглого алмазного шліфування.

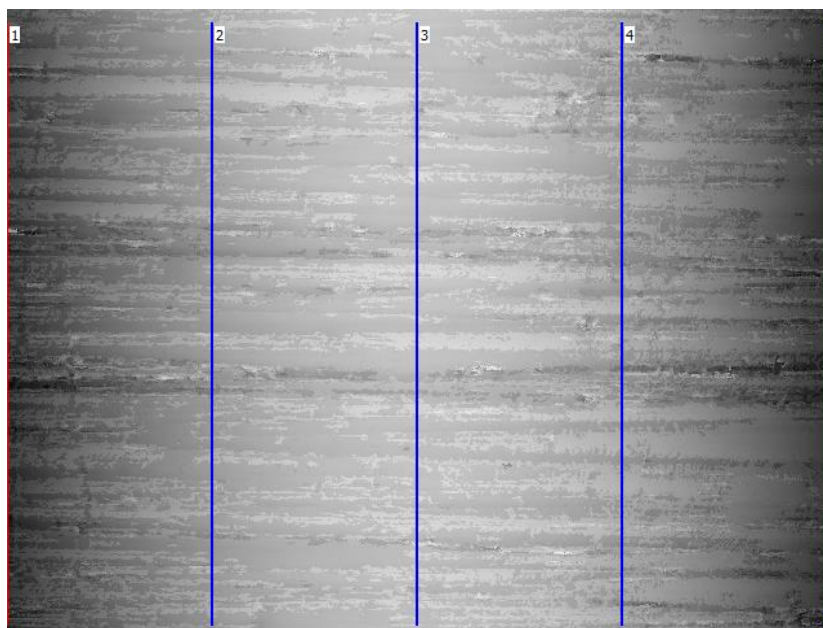
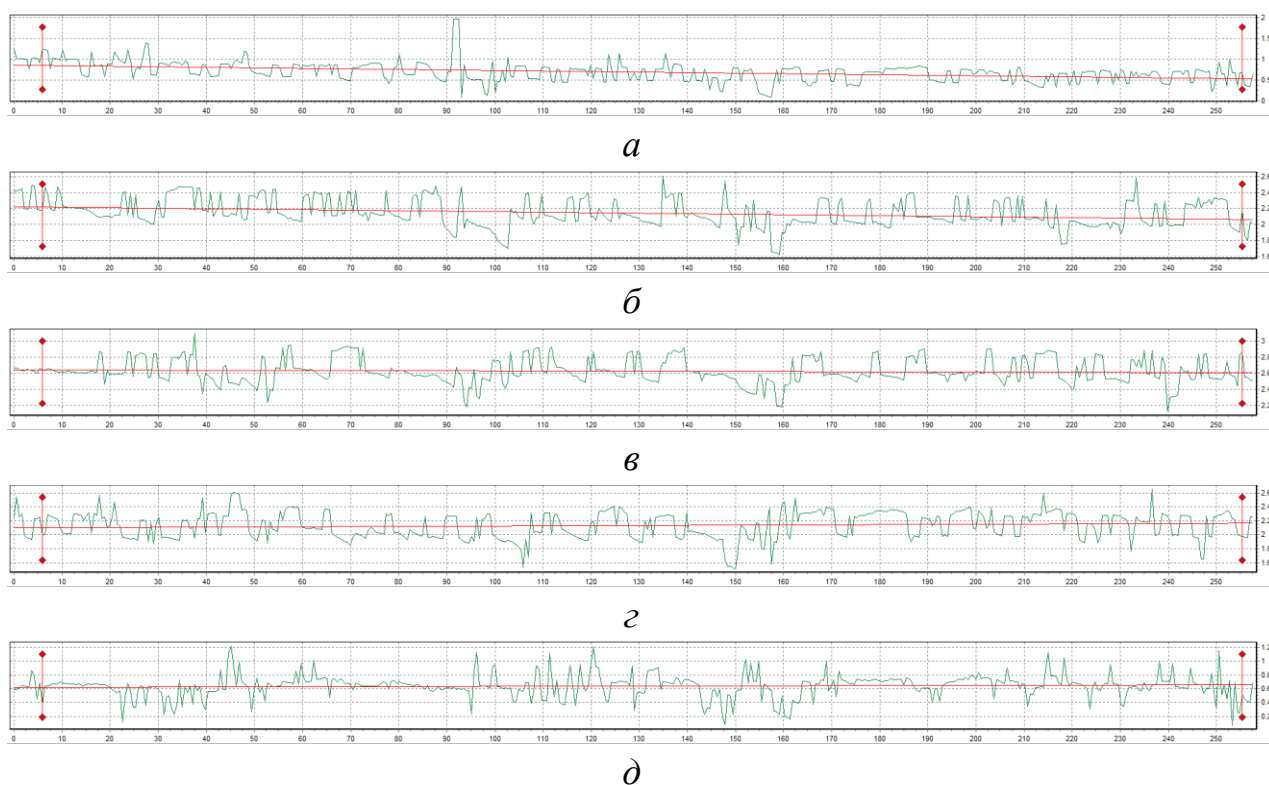


Рисунок 4.19 – Траси сканування вздовж твірної циліндра під час дослідження шорсткості поверхні електрохімічного хромового покриття нанесеного у проточному електроліті



а – траса 1; б– траса 2; в – траса 3; г– траса 4; д – траса 5

Рисунок 4.20 – Профілі трас сканування вздовж твірної циліндра під час дослідження шорсткості поверхні електрохімічного хромового покриття нанесеного у проточному електроліті

Таблиця 4.5 – Параметри шорсткості за трасами сканування вздовж твірної циліндра (1–5) під час дослідження поверхні хромового покриття нанесеного у проточному електроліті

Параметри	Номер траси сканування					Середнє значення
	1	2	3	4	5	
Висота нерівностей профілю за 10 точками Rz, мкм	1,201	0,8053	0,7542	1,002	1,039	Rz=0,9605
Середнє арифметичне відхилення профілю Ra, мкм	0,1673	0,1335	0,1205	0,1625	0,1135	Ra=0,1395
Шорсткість між двома попередньо визначеним опорним лініями H, мкм	0,5049	0,4717	0,5133	0,4985	0,6228	H=0,5222
Глибина шорсткості основи R3z, мкм	1,033	0,8005	0,7316	1,024	1,010	R3z=0,9201
Середньоквадратична шорсткість Rq, мкм	0,2152	0,1648	0,1555	0,1903	0,1675	Rq=0,1787
Коефіцієнт ексцесу профілю шорсткості Rku	8,962	2,987	3,002	3,178	4,958	Rku=4,618
Максимальна висота піку профілю Rp, мкм	1,230	0,5096	0,4617	0,4987	0,5934	Rp=0,6587
Середньоквадратичне відхилення поверхні H STD						H STD=0,61605 0
Площа поверхні S surf, мкм ²						S surf=93890,9
Відношення площі поверхні до площі проекції поверхні SR surf						SR surf=1,06123

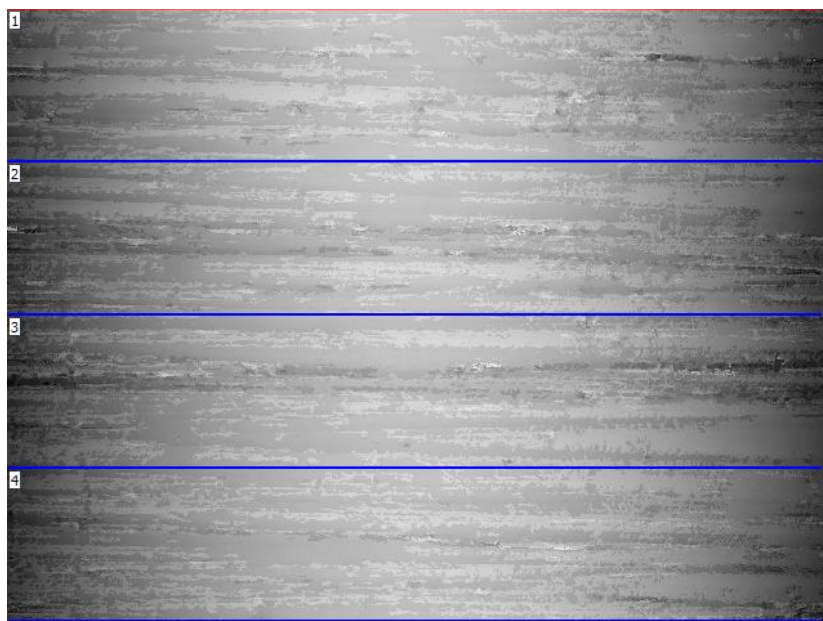
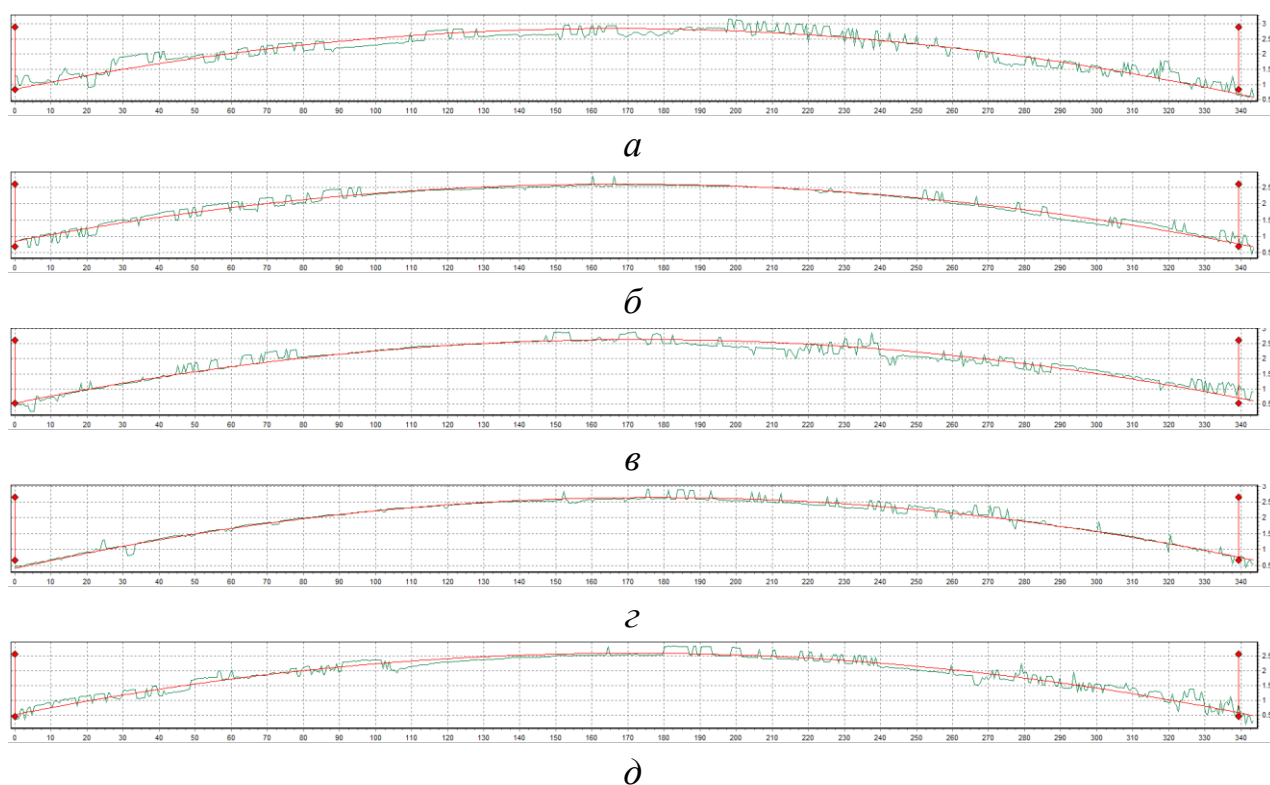


Рисунок 4.21 – Траси сканування по радіусу під час дослідження шорсткості поверхні електрохімічного хромового покриття нанесеного у проточному електроліті



a – траса 1; б– траса 2; в – траса 3; г– траса 5

Рисунок 4.22 – Профілі трас сканування по радіусу під час дослідження шорсткості поверхні електрохімічного хромового покриття нанесеного у проточному електроліті

Таблиця 4.6 – Параметри шорсткості за трасами сканування по радіусу (1–5) під час дослідження поверхні хромового покриття нанесеного у проточному електроліті

Параметри	Номер траси сканування					Середнє значення
	1	2	3	4	5	
Максимальна висота нерівностей профілю за 10 точками R_z , мкм	0,8357	0,5499	0,7935	0,5997	0,7845	$R_z=0,7127$
Середнє арифметичне відхилення профілю R_a , мкм	0,1571	0,07936	0,1128	0,0555	0,1323	$R_a=0,1074$
Радіус обраного сегменту сферичної поверхні R , мм	6,938	8,034	7,150	7,023	7,027	$R=7,2344$
Шорсткість між двома попередньо визначеним опорним лініями H , мкм	0,6309	0,3381	0,5188	0,2781	0,4380	$H=0,4408$
Глибина шорсткості основи R_{3z} , мкм	0,7673	0,5200	0,7525	0,5965	0,8386	$R_{3z}=0,6950$
Середньоквадратична шорсткість R_q , мкм	0,1956	0,1051	0,1575	0,0871	0,1537	$R_q=0,1398$
Коефіцієнт ексцесу профілю шорсткості R_{ku}	2,753	3,602	3,681	7,678	2,843	$R_{ku}=4,111$
Максимальна висота піку профілю R_p , мкм	0,6075	0,3727	0,5082	0,3676	0,5181	$R_p=0,4748$
Середньоквадратичне відхилення поверхні H_{STD}						$H_{STD}=0,616050$
Площа поверхні S_{surf} , мкм ²						$S_{surf}=93890,9$
Відношення площі поверхні до площі проекції поверхні SR_{surf}						$SR_{surf}=1,06123$

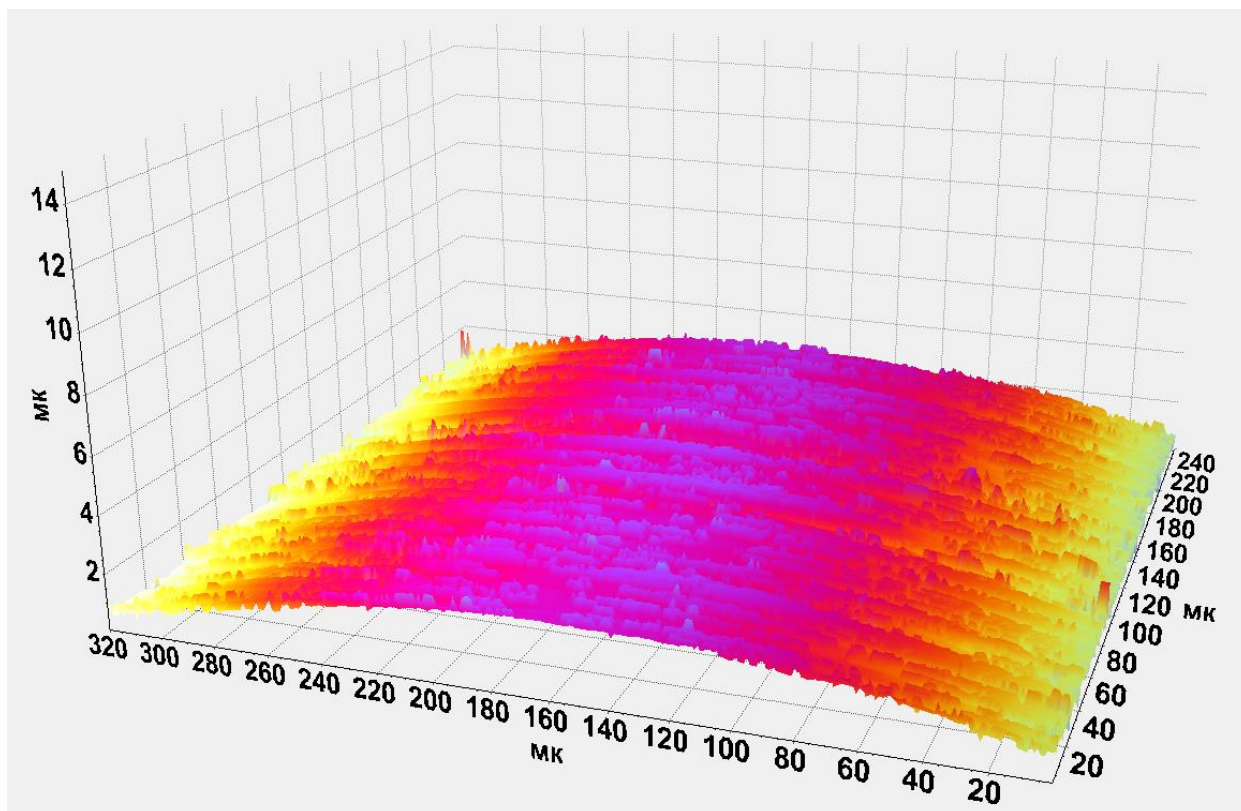


Рисунок 4.23 – 3D-зображення шорсткості поверхні електрохімічного хромового покриття нанесеного у проточному електроліті

4.4 Дослідження властивостей та будови зміцнених шарів хромованих деталей

Процес реверсивного зношування деталей залежить від багатьох чинників: деформування поверхневих шарів пари тертя хромове покриття – гума, зміни їх фізико-механічних і електрохімічних властивостей, наявності абразивних частинок і здатністю металевого елемента швидко відновлювати оксидну плівку в разі її пошкодження.

Встановлено для пари тертя хромове покриття – гума, яка працює в промивній рідині мінімальне зношування забезпечується за шорсткості поверхні покриття $R_a=0,15\text{--}0,40$ мкм.

При цьому покриття, нанесені в проточному електроліті, рівномірно покривають сталеву основу, мають меншу шорсткість поверхні та вищу мікротвердість (11,8 ГПа) порівняно з хромуванням у спокійному електроліті (8,1 ГПа) (рис. 4.24). Це досягається шляхом створенням стабільного потоку

електроліту в кільцевому міжелектродному проміжку електрохімічної комірки, інтенсивним видаленням газів, що утворюються під час електролізу на поверхні деталі та електрода, а також подачею «нового» електроліту в комірку. Крім того, знижується насиченість хромованого покриття і сталевій основи воднем.

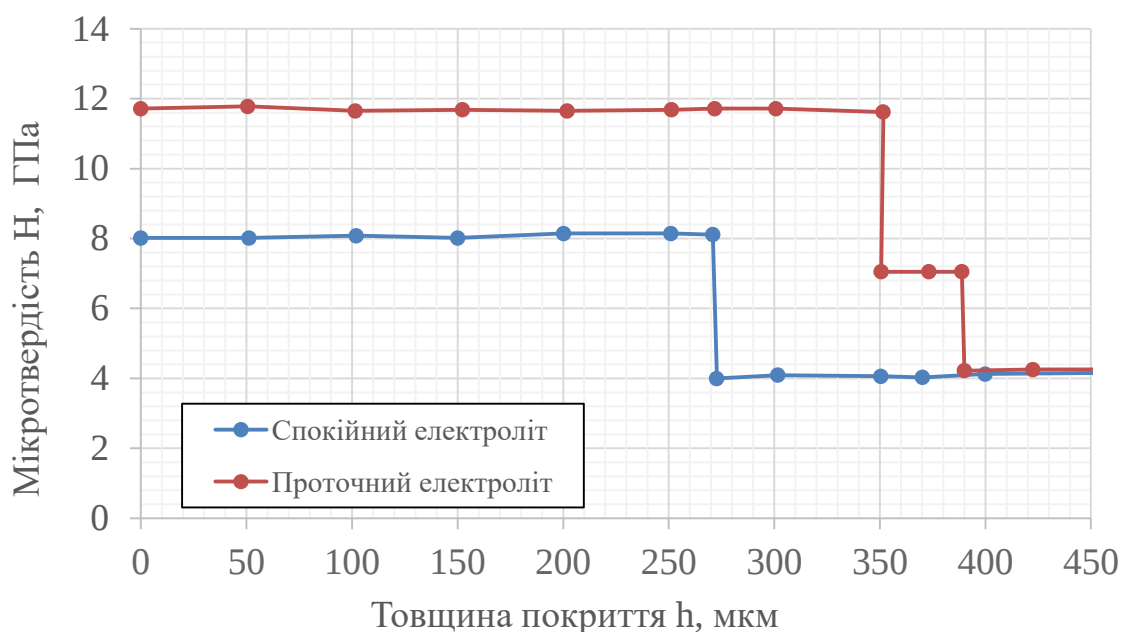
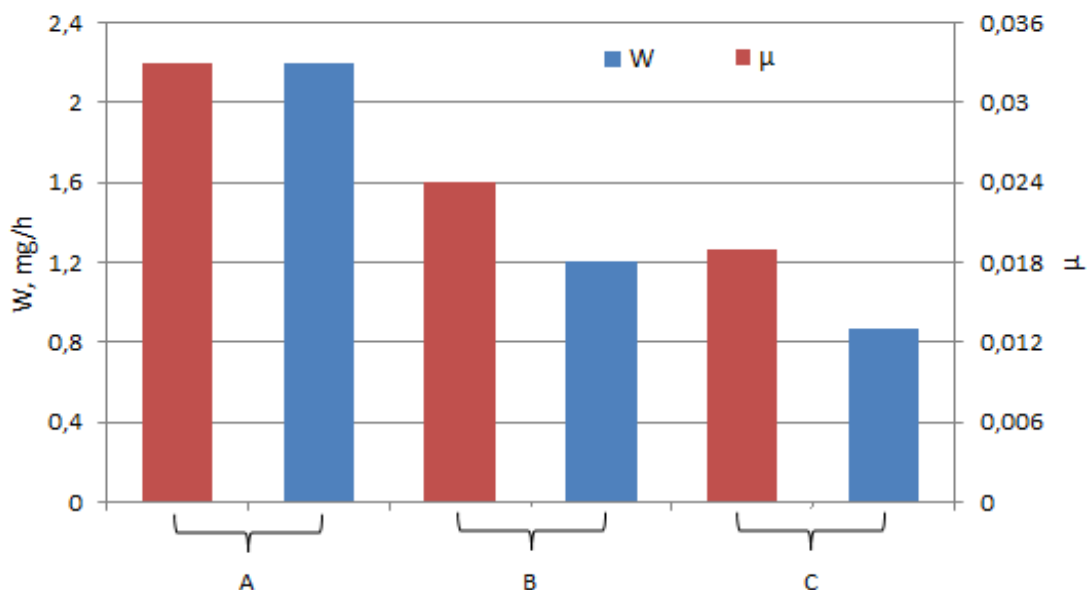


Рисунок 4.24 – Зміна мікротвердості за товщиною електрохімічного хромового покриття нанесеного в електроліті

Випробування зразків з хромовими покриттями проводили на модернізованій установці, яка імітує зворотно-поступальний рух (реверсивне тертя) плунжера насоса і полірованого штока верстата-гойдалки та дозволяє безперервно фіксувати значення коефіцієнта тертя. Результати дослідження представлені на рис. 4.25.

Результати випробувань сталевих зразків із хромованим покриттям на зношування під час зворотно-поступального руху показали, що покриття знижує швидкість зношування хромованого штока/плунжера, які працюють в парі з сальниковим ущільненням в агресивних та абразивних середовищах. Поєднання високої мікротвердості хромових покриттів, нанесених з

проточного електроліту, а також специфіка їх структури забезпечують високу зносостійкість деталям у вузлах тертя.



A – Сталь 40XH; B – хромове покриття (спокійний електроліт);

C – хромове покриття (проточий електроліт)

Рисунок 4.26 – Швидкість зношування хромових покриттів в парі тертя з гумовим ущільненням і значення коефіцієнтів тертя

Хромові покриття нанесені в проточному електроліті також забезпечують зниження коефіцієнта під час роботи деталей в парі тертя метал – гума на 20 % порівняно з покриттями, сформованими хромуванням у спокійному електроліті. Встановлено, що мінімальний знос елементів реверсивної пари тертя електрохімічне хромове покриття – сальникове ущільнення забезпечується за шорсткості поверхні покриття Ra від 0,16 мкм до 0,32 мкм. Все це в кінцевому підсумку збільшує термін служби деталей насоса, знижує навантаження на механічну частину верстата-гойдалки, витрати електроенергії на подолання сил тертя під час видобутку нафти зі свердловин. Крім того, поєднання ежекторних і плунжерних насосів для спільної роботи підвищує енергоефективність видобутку нафти і забезпечує раціональне використання потенційної енергії нафтового газу, а також

покращує екологічну ситуацію на нафтогазопромислах, оскільки виключається спалювання нафти та газу.

На зовнішній циліндричній поверхні зразка зі сталі 40Х, було сформовано фрикційним зміцненням «білий шар» (рис. 4.27). Шорсткість зміцненої поверхні становила $R_a = 0,32 - 0,45$ мкм, а товщина зміцненого шару досягала 40 мкм, мікротвердість 7,1 ГПа.



Рисунок 4.27 – Фото «білого шару» на сталі 40Х (х200), сформованого фрикційно-зміцнюючою обробкою

Крім цього встановлено зменшення проникнення водню у тіло деталі під час деструкції гуми та протікання катодної реакції в електроліті у тарі тертя з хромовим покриттям, нанесеним поверх «білого шару» на сталі 40Х на 7 %.

Дослідження тонкої структури хромових покриттів на сталі провели з використанням сканівного електронного мікроскопа (рис. 4.28, рис. 4.29). Із фотографій видно, що хромове покриття нанесене в проточному електроліті має більшу товщину і невелику кількість пор (рис. 4.29), а хромове покриття нанесене в спокійному електроліті – має меншу товщину та більшу кількість пор, в тому числі й наскрізних (рис. 4.28). Результати енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії (EDS) показали, що основним компонентом покриттів в обох випадках є хром/

Провели електрохімічні дослідження захисної дії хромового покриття нанесеного у проточному електроліті на сталь із «білим шаром», де реєстрували зміну електродного потенціалу за часом (рис. 4.30) та знімали поляризаційні криві (рис. 4.31).

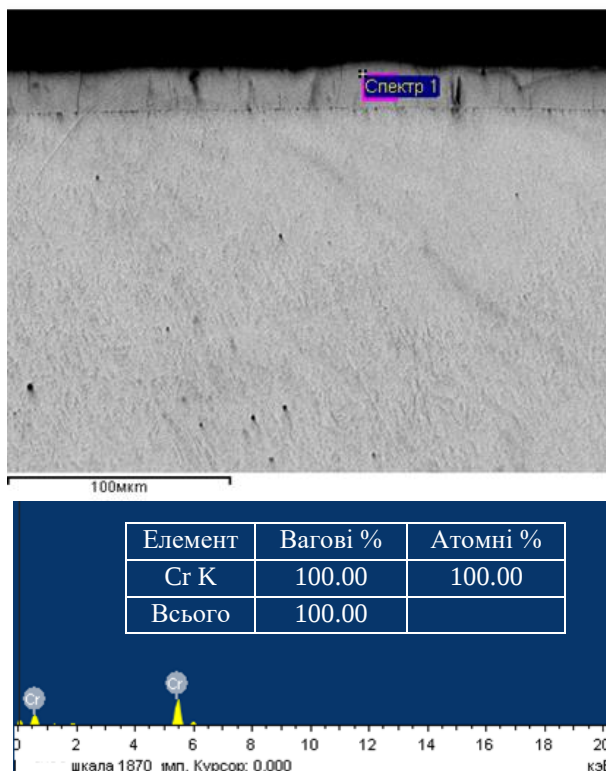


Рисунок 4.28 – Хромове покриття
нанесене на сталь у спокійному
електроліті

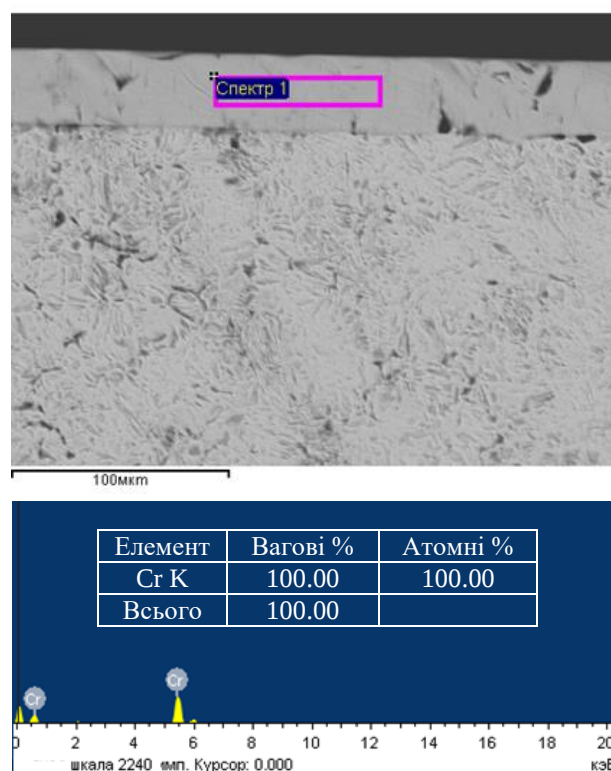


Рисунок 4.29 – Хромове покриття
нанесене на сталь у проточному
електроліті

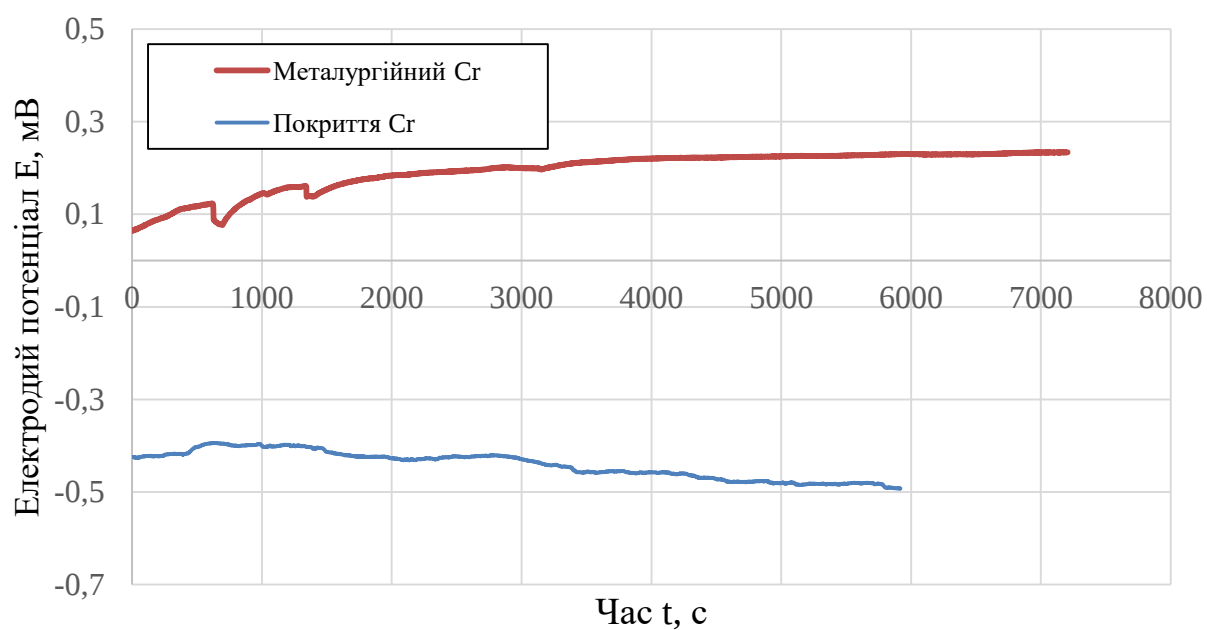


Рисунок 4.30 – Зміна електродних потенціалів хромового покриття
нанесеного в проточному електроліті на сталь та металургійного хрому
(еталон) від часу випробовування в 3 % NaCl

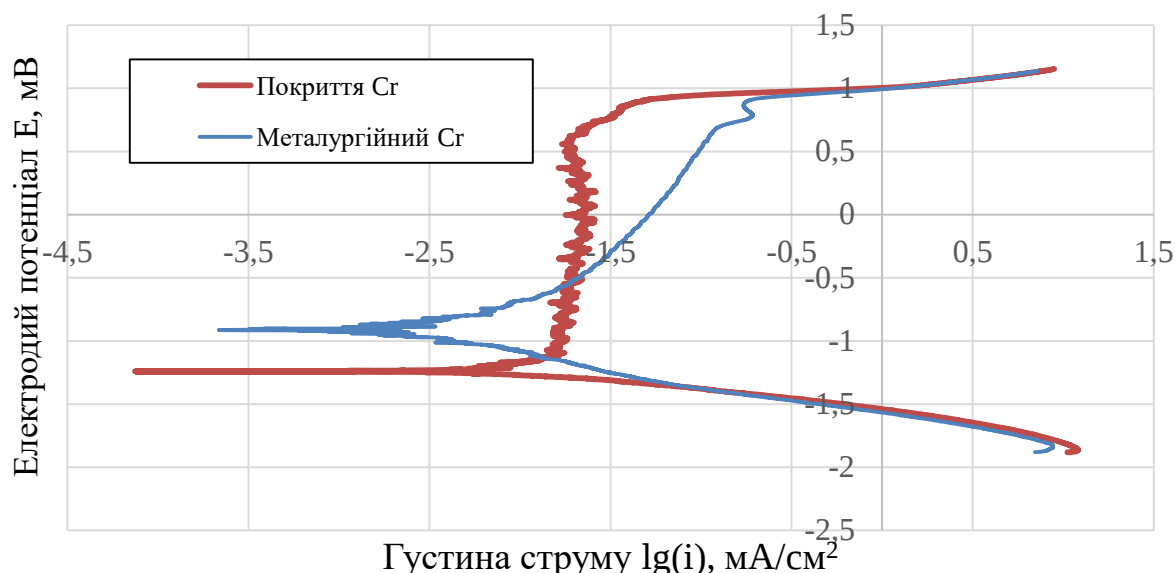


Рисунок 4.31 – Поляризаційні криві для хромового покриття нанесеного в проточному електроліті на сталь та металургійного хрому (еталон) зняті в розчині 3 % NaCl

Як видно із рис. 4.30 електродний потенціал з часом стабілізується як для хромового покриття, так і для металургійного хрому – еталону в 3 % NaCl.

На рис. 4.31 представлені поляризаційні криві відповідно для металургійного хрому (еталон) та хромового покриття, зняті в 3 % NaCl.

Аналіз кривих показав, що на анодних поляризаційних кривих для хромового покриття та металургійного хрому відображаються області пасивності (практично вертикальна ділянка на кривій), що свідчить про високу корозивну тривкість хромового покриття, нанесеного на сталеву основу із «білим шаром» згідно розробленого технологічного процесу комбінованого зміцнення.

Результати корозійних випробовувань у камері сольового туману 3 % NaCl сталевих деталей з хромовими покриттями показали високу корозійну стійкість покриттів нанесених у проточному електроліті (рис. 4.32) порівняно із покриттями нанесеними у спокійному електроліті (рис. 4.33), для якого практично відсутні сліди корозійних уражень.

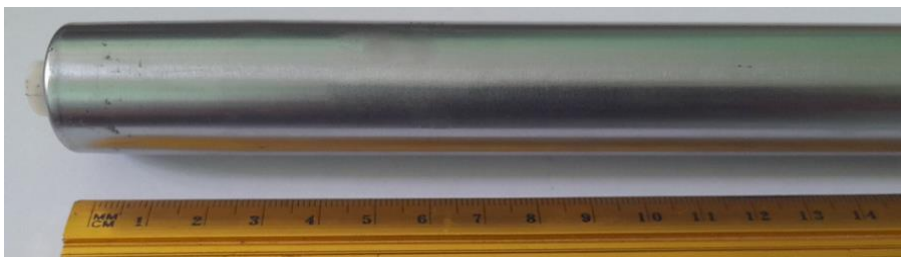


Рисунок 4.32 – Зразок сталевій деталі з хромовим покриттям нанесеним в проточному електроліті після корозійних випробовувань

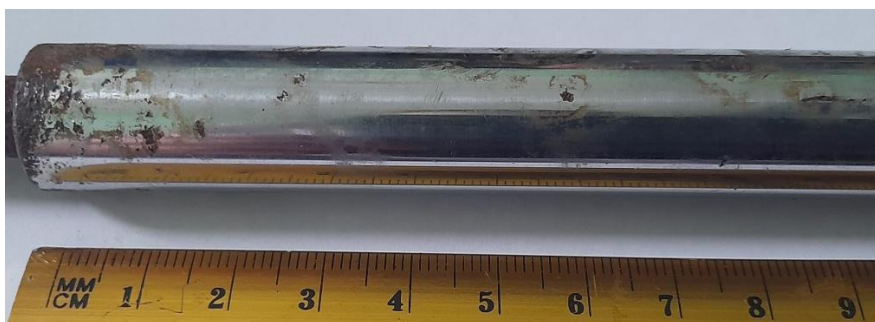


Рисунок 4.33 – Зразок сталевій деталі з хромовим покриттям нанесеним в спокійному електроліті після корозійних випробовувань

4.5 Аналіз міцності ділянки штока з хромовим покриттям

Лише точки на зовнішній поверхні штока зазнають лінійного напруженого стану, оскільки у цій області дотичні напруження відсутні. Натомість внутрішні шари покриття та основного матеріалу функціонують у складному напруженому стані (див. рис. 4.34).

Для аналізу міцності в умовах такого навантаження застосуємо енергетичний підхід на основі критерію Губера–Мізеса. У якості критеріальної величини приймається об'ємна густина потенціальної енергії формозміни, яка накопичується матеріалом під дією складного навантаження. Відповідні еквівалентні напруження визначаються за такою формулою

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}, \quad (4.6)$$

де компоненти головних напружень в матеріалі ділянки з покриттям

$$\left. \begin{matrix} \sigma_1 \\ \sigma_3 \end{matrix} \right\} = \frac{1}{2} \sigma_x \pm \frac{1}{2} \sqrt{\sigma_x^2 + 4\tau_{xy}^2}, \quad \sigma_2 = 0. \quad (4.7)$$

Критерій Губера–Мізеса є одним із найпоширеніших та найефективніших у сучасній механіці матеріалів, оскільки він добре узгоджується з результатами експериментів для широкого класу ізотропних металів. Його перевагою є універсальність, а також здатність адекватно враховувати вплив багатокompонентних напружених станів при розрахунку міцності конструкцій.

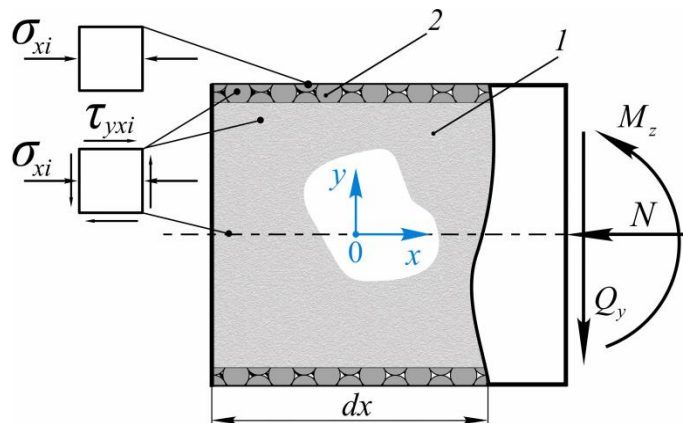


Рисунок 4.34 – Напружений стан в характерних точках штока з покриттям в умовах нештатного навантаження

Підставляючи (4.7) в (4.6) після перетворень отримаємо

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2} = \sqrt{(\sigma_N + \sigma_M)^2 + 3\tau_{xy}^2}, \quad (4.8)$$

У даному випадку нормальні напруження, спричинені дією осьового навантаження, визначаються на основі співвідношень (2.53) та (2.54). Напруження, що виникають унаслідок згину, обчислюються відповідно до формули (2.59). Дотичні напруження розраховуються за допомогою виразу (2.60). У подальших формулах (4.6)–(4.8) для спрощення запису індекс i , що відповідає номеру шару, опущено.

Числова апробація результатів моделювання. Застосуємо отримані аналітичні залежності для кількісної оцінки міцності у межах конкретної технічної задачі. Розглянемо, що буровий насос типу УНБ-600 працює у парі з циліндровою втулкою, внутрішній діаметр якої становить $D_v = 160 \text{ мм}$, і

створює тиск $p = 16,5 \text{ МПа}$. Нормальні стискаючі напруження в новому суцільному штоку бурового поршневого насоса двосторонньої дії можна визначити за формулою $\sigma = p(D_v / D_2)^2$. Для штока з діаметром $D_2 = 70 \text{ мм}$ ці напруження становлять близько 86,2 МПа.

У нашому випадку насос оснащено штоком з хромовим покриттям. Його основний діаметр дорівнює 70 мм, а товщина хромованого шару становить 0,5 мм. У ході експлуатації на шток діють додаткові навантаження, що зумовлені зношенням вузла "крейцкопф – напрямні станини".

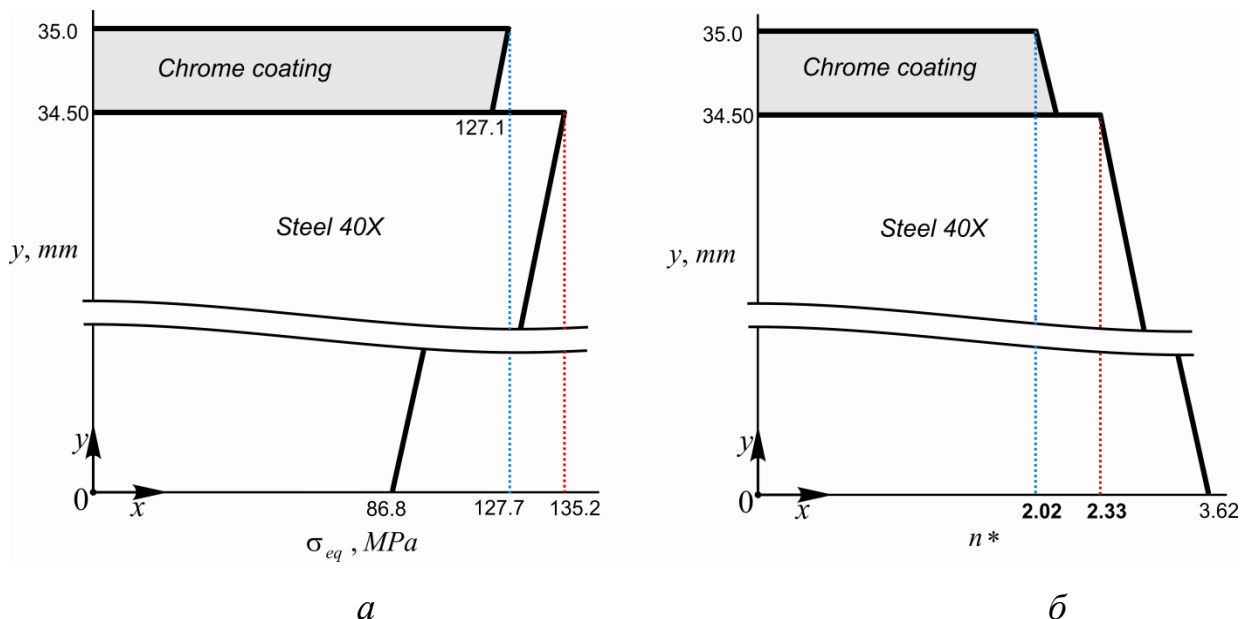
Нагадаємо, що при аналітичному дослідженні напруженого стану вкритої ділянки штока ми враховували дію поперечного зусилля Q_y та згинального моменту M_z , які вважали заданими. Для одержання кількісних результатів скористаємось співвідношеннями, наведеними у п. 2

Механічні властивості для електролітичного хромового покриття з товщиною шару 0,5 мм становлять: модуль пружності $E_2 = 170 \text{ ГПа}$, межа міцності $\sigma_{m2} = 257 \text{ МПа}$. Для сталевого ядра (сталь 40Х) відповідно – $E_1 = 200 \text{ ГПа}$, а межа текучості $\sigma_{T1} = 785 \text{ МПа}$. В зв'язку з тим, що штоки поршневих насосів двосторонньої дії працюють в умовах дії знакозмінних навантажень (стиск – розтягування), то для модельних розрахунків було прийнято $\sigma_{p1} = 315 \text{ МПа}$.

На рис. 4.35, а представлено розподіл еквівалентних напружень у зоні штока, що вкрита хромовим покриттям. Розрахунок цих напружень виконано на основі енергетичного критерію міцності Мізеса з урахуванням додаткових (нештатних) напружень, які виникають унаслідок зношування контактної пари "крейцкопф – напрямні".

Для кількісної оцінки рівня використання міцнісного ресурсу кожного з матеріалів доцільно обчислити коефіцієнти запасу міцності шляхом ділення границі міцності хромового шару на відповідне значення еквівалентного напруження у зоні покриття та границі плинності сталі 40Х – на аналогічне напруження в основному матеріалі. Відповідні результати візуалізовано на

рис. 4.35, б у вигляді поля значень коефіцієнта запасу міцності для двошарової системи.



a – еквівалентні напруження в ділянці штока з хромовим покриттям;

б – розподіл коефіцієнта запасу міцності

Рисунок 4.35 – Оцінка статичної міцності вкритої хромовим покритвом ділянки штока в умовах позаштатного навантаження

Зі структури виразу (4.8) випливає, що еквівалентні напруження змінюються по висоті поперечного перерізу кожного шару нелінійно. Проте через незначну величину дотичних напружень у порівнянні з сумарними нормальними компонентами, ця нелінійність практично не візуалізується на графіку (рис. 4.35, а). Водночас у зоні контакту між хромовим покриттям і сталеву основою спостерігається різка зміна (стрибок) еквівалентного напруження, що зумовлено різними механічними властивостями матеріалів.

На підставі аналізу розподілу коефіцієнтів запасу міцності (рис. 4.35, б) можна зробити висновок, що розглянута ділянка штока відповідає вимогам статичної міцності як за умов нормальної експлуатації, так і при впливі змодельованого додаткового навантаження. Основний матеріал (сталь 40Х) працює з коефіцієнтом запасу $n^* = 2.33$, тоді як хромове покриття – з коефіцієнтом $n^* = 2.02$. При цьому варіація значень коефіцієнта по товщині

матеріалу залишається відносно невеликою, що свідчить про близькість до рівномірного стану. Отже, зміна таких параметрів, як товщина покриття, модуль пружності, границя міцності, а також якість адгезійного зчеплення з основою, відкриває можливості для оптимізації напружено-деформованого стану в системі "основа – зносостійке покриття". Це, своєю чергою, дозволяє сформувати композицію матеріалів із рівномірним використанням міцнісного ресурсу – так звану рівномірну структуру.

Питання впливу товщини захисного хромового покриття на напружений стан у шарі хрому набуває особливої ваги під час оцінки довговічності й надійності штока. Для отримання більш глибокого розуміння цього впливу доцільно проаналізувати числові значення еквівалентних напружень, що є найбільш інформативними з точки зору міцності матеріалу. На рис. 4.36 наведено результати розрахунків напружено-деформованого стану для штоків, поверхня яких укрита хромовим шаром різної товщини.

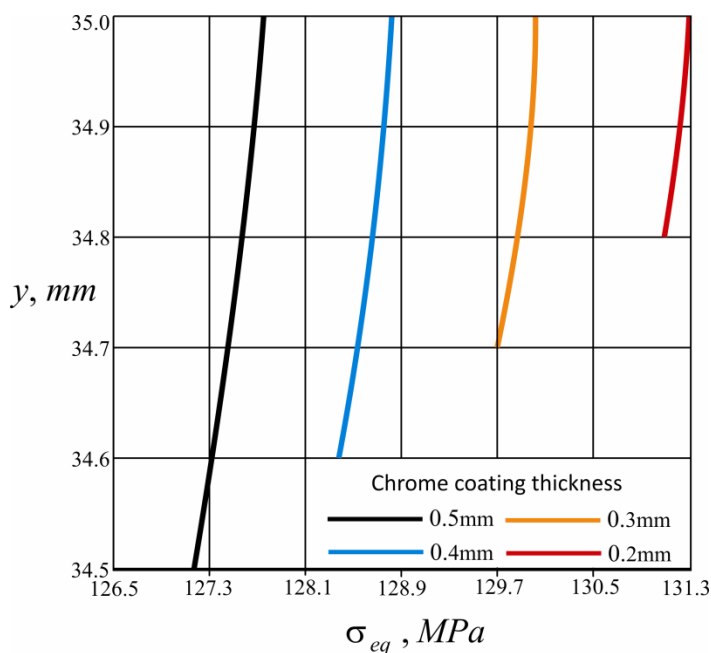


Рисунок 4.36 – Розподіл еквівалентних напружень в хромових покриттях різної товщини δ в умовах позаштатного навантаження штока

В усіх розглянутих випадках геометрія та умови навантаження залишаються незмінними; змінюється лише товщина функціонального покриття. Криві на графіку відповідають розподілу максимальних

еквівалентних напружень у покритті залежно від координати у для чотирьох різних товщин: 0.5, 0.4, 0.3 та 0.2 мм. Аналізуючи отримані дані, можна зробити висновок, що зі зменшенням товщини хромового шару спостерігається підвищення рівня еквівалентних напружень. Такий ефект пояснюється зростанням локальної концентрації напружень у тонших шарах під впливом тих самих зовнішніх навантажень. Для найтовстішого шару хрому (0.5 мм) максимальні напруження досягають лише 127.8 МПа, тоді як для шару 0.2 мм вони вже сягають 131.3 МПа. Проте варто зазначити, що відносний приріст напружень не є значним і складає менше 3%.

З іншого боку, при зменшенні товщини покриття зазвичай підвищується його границя міцності (наприклад, завдяки більшій чистоті осадження, меншим внутрішнім дефектам та підвищеній адгезії тонкого шару до основи). Однак ця тенденція має певні межі, адже зменшення товщини може водночас призводити до втрати захисних властивостей, збільшення ризику локального зносу та зниження опору втомі. При надмірному збільшенні товщини покриття можуть зростати залишкові напруження, а також підвищується ймовірність утворення мікротріщин, що негативно впливає на довговічність деталі в умовах циклічного навантаження.

Таким чином, при оптимізації товщини хромового шару для реальних штоків необхідно враховувати не лише напружений стан, але й комплекс експлуатаційних факторів: залишкові напруження, схильність до мікротріщиноутворення, втомну міцність і реальні властивості отриманого шару.

Підсумовуючи викладене в параграфі, акцентуємо увагу на принципових рисах застосованого авторського підходу до моделювання вкритої ділянки штока. У запропонованій постановці задачі свідомо використано ідеалізацію у вигляді класичної технічної теорії брусів, незважаючи на наявну різницю у жорсткісних характеристиках між хромовим покриттям і сталеною основою. Подібне поєднання матеріалів з контрастними модулями пружності може призводити до певних відхилень у точності результатів, оскільки базова

теорія не враховує усіх особливостей міжшарової взаємодії. Проте саме ця теоретична схема забезпечила отримання компактного, аналітично прозорого опису напружено-деформованого стану, достатнього для попередньої оцінки міцності об'єкта в цілому. Водночас, відмова від гіпотези жорсткої нормалі з метою врахування можливих згинальних депланацій поперечних перерізів або локальних ефектів обтиснення потребувала б використання розширених моделей теорії брусів (наприклад, з урахуванням зсувів або поперечної деформації перерізів). Залучення більш складних математичних моделей дозволило б уточнити розподіл внутрішніх зусиль у шарах композиційної структури. Однак ці уточнення, за очікуванням, мали б лише другорядний вплив на кінцеві розрахункові показники, натомість значно ускладнили б процес моделювання та аналізу.

Ключовим етапом перевірки довготривалої надійності штока з хромовим покриттям має стати розрахунок на зношування та втомну міцність. Проведене дослідження створює необхідне підґрунтя для такої оцінки, оскільки на його основі визначено номінальні значення нормальних і дотичних напружень у характерних точках матеріалу. Ці напруження можуть бути використані як вхідні дані для подальших розрахунків втомної міцності. Після того, як буде сформовано опис циклічного навантаження, визначено границі витривалості матеріалів та відповідні коефіцієнти зниження міцності, стане можливим виконання повноцінної оцінки довговічності без істотних труднощів.

Висновки до розділу 4

1. В результаті проведених досліджень технологічного процесу комбінованого зміцнення сталі з електрохімічним хромування в проточному електроліті:

- побудовано математичну модель процесу на основі якої встановлено, що оптимальні значення технологічних параметрів процесу хромування для отримання максимальної мікротвердості, мінімального зношування

практично співпадають, а для мінімальної шорсткості та конусоподібності не співпадають як з оптимальними технологічними параметрами для мікротвердості та зношування, так і між собою;

- встановлено, що для забезпечення високих експлуатаційних показників деталей з хромовим покриттям оптимізацію слід проводити за мінімальним зношуванням, а необхідну шорсткість і конусоподібність поверхні деталі отримувати на подальших операціях механічної обробки;

- обґрунтовано вертикальне монтування циліндричних деталей в електрохімічній комірці для усунення конусоподібності, яка виникла на попередніх операціях механічної обробки: для валів мінімальним діаметром поверхні, на яку наносять покриття – знизу, а для втулок відповідно максимальним діаметром, для підвищення точності деталей з хромовими покриттями, так як при нанесенні покриття максимальне збільшення діаметру для зовнішніх поверхонь і зменшення для внутрішніх поверхонь спостерігається знизу-вверх.

2. Встановлено, що складові режимів різання мають не однаковий вплив на величину шорсткості обробленої поверхні хромового покриття, при цьому по впливу вони розташовуються в порядку зростання таким чином: глибина різання, повздовжня подача стола верстата та швидкість обертання деталі.

4. Встановлено, що хромові покриття нанесені в проточному електроліті поверх «білого шару», сформованого на сталі, мають меншу різницю електродних потенціалів, ніж у випадку сталі після поверхневого гартування та забезпечують роботоздатність за напружень, які виникають у штоці поршневого насоса двосторонньої дії під час виникнення позаштатної ситуації – зміщення деталей пари тертя «крейцкопф – напрямні станини».

Результати розділу опубліковано в працях автора [2, 3, 8, 12, 20].

РОЗДІЛ 5

ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

5.1 Інженерна методика розрахунку припусків на шліфування деталей з хромовими покриттями

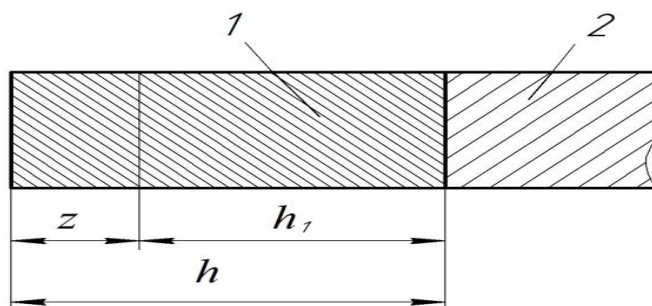
Для забезпечення роботоздатності змінних деталей поршневого насоса двосторонньої дії (штоків поршнів і циліндрових втулок), які працюють в спряженнях із гумовими деталями ущільнення у середовищі промивальної рідини з абразивними частинками, і з метою скорочення часу на припрацювання та зменшення зносу необхідно металевим елементам пар тертя з електрохімічними хромовими покриттями надавати певну величину шорсткості поверхні в межах $R_a = 0,25\text{--}0,32$ мкм.

Загальну товщину h (мкм) електрохімічного хромового покриття нанесеного в електроліті (рис. 5.1) визначають за формулою

$$h = h_1 + z, \quad (5.1)$$

де h_1 – товщина робочого шару електрохімічного хромового покриття, мкм;

z – величина припуску на алмазне шліфування електрохімічного хромового покриття, за якого забезпечується отримання обробленої поверхні із заданою мінімальною шорсткістю, мкм.



1 – шар хромового покриття; 2 – сталева основа

Рисунок 5.1 – Схема електрохімічного хромового покриття

У зв'язку з відсутністю довідкових даних для зносу електрохімічних хромових покриттів нанесених як в спокійному, так і в проточному електролітах товщину робочого шару електрохімічного хромового покриття складно розрахувати аналітично за формулами. Тому її можна визначити експериментальним шляхом у залежності від необхідного ресурсу роботи деталей бурових поршневих насосів з покриттями на основі практичного досвіду або розрахувати за формулою (5.2), визначивши попередньо швидкість зношування хромових покриттів за результатами лабораторних випробовувань на стенді, в умовах аналогічних до експлуатаційних

$$h_1 = I_v \cdot t, \quad (5.2)$$

де I_v – швидкість зношування електрохімічного хромового покриття, мкм/год;

t – заданий ресурс роботи деталі з хромовим покриттям, год.

Мінімальний припуск на діаметр під час механічної обробки зовнішніх і внутрішніх поверхонь тіл обертання розраховують за відомою формулою (Горбацевич А.Ф. та Шкред В.А., 1983) [119]

$$2z_{i \min} = 2(Rz_{i-1} + Rt_{i-1} + \sqrt{\rho_{i-1}^2 + \varepsilon_{yi}^2}), \quad (5.3)$$

де Rz_{i-1} – висота мікронерівностей профілю (Rz – параметр шорсткості поверхні, мкм) на попередньому переході ($i-1$);

Rt_{i-1} – глибина дефектного поверхневого шару на попередньому переході ($i-1$), мкм;

ρ_{i-1} – сумарне значення просторових відхилень для розрахункової поверхні на попередньому переході ($i-1$), мкм;

ε_{yi} – похибка встановлення при виконанні i -го переходу, мкм.

Максимальний припуск на механічну обробку

$$2z_{i \max} = 2z_{i \min} + T_{i-1} - T_i, \quad (5.4)$$

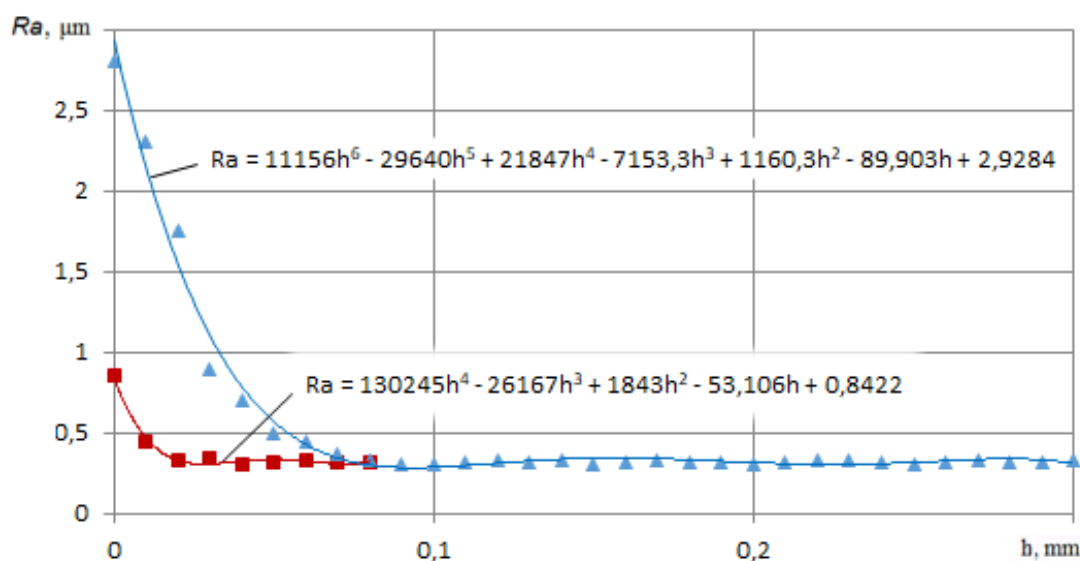
де T_{i-1} і T_i – допуски на розміри на попередньому переході ($i-1$) та переході, що виконується (i) відповідно, мкм.

У довідковій та нормативній літературі також практично відсутні відомості про призначення припусків на механічну обробку електрохімічних хромових покриттів нанесених у спокійному та проточному електролітах для досягнення заданої шорсткості, тому дослідили залежність шорсткості обробленої поверхні від глибини зрізаного шару для покриттів різної товщини.

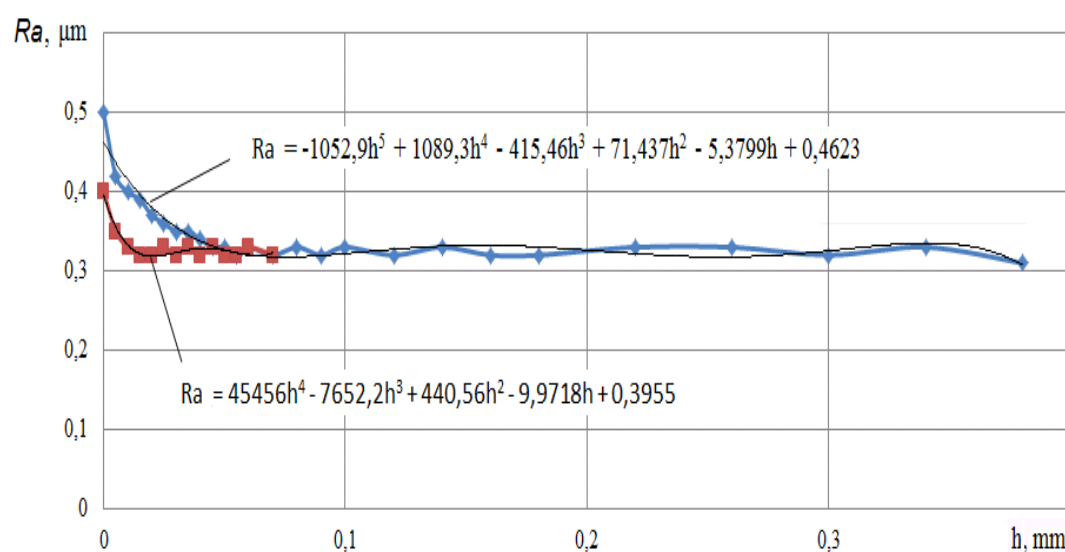
Дослідження виконували на сталевих зразках циліндричної форми, на зовнішню циліндричну поверхню яких наносили хромові покриття різної товщини h від 0,077 мм до 0,37 мм. Після завершення процесу нанесення електрохімічних хромових покриттів на зразки проводили їх пошарову, з постійним кроком – глибиною різання (0,05 мм), механічну обробку алмазним кругом на шліфувальному верстаті 3A151 і визначали величину шорсткості R_a оброблених поверхонь на профілометрі-профілографі.

Результати вимірювань представлені на графіках (рис. 5.2). Марковані точки на рис. 5.2 відображають експериментальні значення параметра R_a відповідно до товщини знятого шару для кожної із вказаних вище товщин покриттів. На рис. 5.2,а: квадратні маркери – $h = 0,08$ мм; трикутні маркери – $h = 0,3$ мм [120], а на рис. 5.2,б: квадратні маркери – $h = 0,08$ мм; ромбічні маркери – $h = 0,37$ мм. Із рис. 5.2 видно, що зі зменшенням загальної товщини електрохімічного хромового покриття зменшується величина дефектного поверхневого шару на шліфування. Для електрохімічних хромових покриттів нанесених у спокійному електроліті товщиною $h = 0,08$ мм та $h = 0,3$ мм дефектний поверхневий шар становить відповідно 12 %; та 27 % від загальної їх товщини, а під час нанесення покриттів у проточному електроліті товщиною $h = 0,077$ мм та $h = 0,37$ мм – 10 % та 15 % відповідно. При подальшому збільшенні глибини зрізаного шару

шорсткість обробленої поверхні хромових покриттів залишається практично незмінною.



a



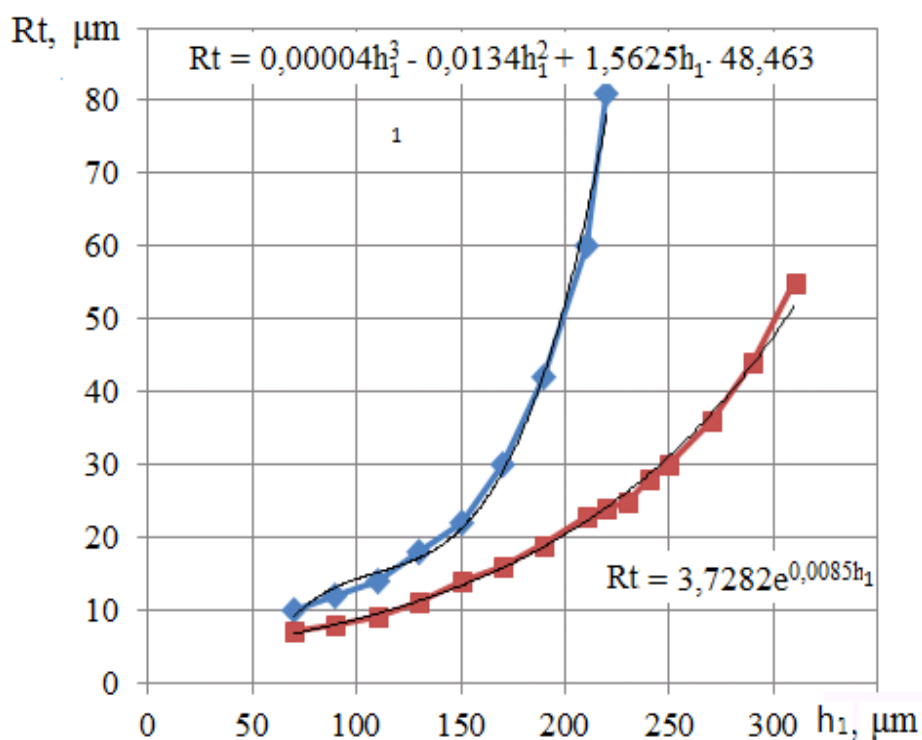
б

Рисунок 5.2 – Залежність шорсткості обробленої поверхні від глибини зрізаного шару для електрохімічних хромових покриттів різної товщини, нанесених в спокійному (Kustov, V. V. et al., 2016) [120] (а) та проточному електролітах (б)

Для нанесених електрохімічних хромових покриттів прийнятні дані отримані під час апроксимації результатів вимірювань параметра шорсткості обробленої поверхні поліномами четвертого (тонке покриття) і п'ятого

ступенів (товсте покриття) відповідно (рис. 5.2). Коефіцієнти кореляції R^2 відповідно становили: 0,986; 0,995 (рис. 5.2,а) і 0,929; 0,928 (рис. 5.2,б) для тонкого і товстого хромового покриття відповідно. Аналіз графічних залежностей (рис. 5.2) показав, що зі збільшенням товщини знятого шару електрохімічного хромового покриття зменшується його шорсткість. Це свідчить про видалення дефектного поверхневого шару, утвореного під час нанесення електрохімічного хромового покриття. Після його зняття алмазним шліфуванням забезпечується стабілізація шорсткості обробленої поверхні деталі, тобто залишається якісний робочий шар електрохімічного хромового покриття.

Оскільки товщина робочого шару покриття є важливою експлуатаційною характеристикою деталі, то встановили її вплив на величину дефектного поверхневого шару (рис. 5.3).



*сині ромбічні маркери – покриття нанесене у спокійному електроліті;
червоні квадратні маркери – покриття нанесене у проточному електроліті*

Рисунок 5.3 – Залежність глибини дефектного поверхневого шару від товщини робочого шару електрохімічного хромового покриття

Із рис. 5.3 видно, що зі збільшенням товщини робочого шару електрохімічного хромового покриття зростає глибина дефектного поверхневого шару, причому цей ріст відбувається більш стрімко для покриттів нанесених у спокійному електроліті порівняно з покриттями нанесеними у проточному електроліті. Таку відмінність глибини дефектного поверхневого шару можна пояснити різними умовами протікання електролізу та газовідведенням від поверхні деталі під час нанесення електрохімічного хромового.

Провівши математичну обробку експериментальних даних отримали рівняння регресії представлені на рис. 5.3, які дозволяють визначити глибину дефектного поверхневого шару в залежності від товщини робочого шару для забезпечення отримання мінімальної шорсткості обробленої поверхні під час алмазного шліфування електрохімічного хромового покриття нанесеного у спокійному електроліті (поліноміальне Rt_1) та в проточному електроліті експоненціальне Rt_2 , відповідно:

$$Rt_1 = 0,00004h_1^3 - 0,0134h_1^2 + 1,5625h_1 - 48,463; \quad (5.5)$$

$$Rt_2 = 3,7282e^{0,0085h_1}, \quad (5.6)$$

де h_1 – товщина робочого шару електрохімічного хромового покриття, мкм.

Розглянемо приклади розрахунку припуску на алмазне шліфування у центрах зовнішньої циліндричної робочої поверхні хромованого штока поршня $\varnothing 70e8(-_{106}^{60})$ бурового поршневого насоса двосторонньої дії УНБ–600. Задавшись ресурсом роботи штока поршня $t = 300$ год, і використавши результати наших лабораторних досліджень швидкості зношування: $I_{v1} = 0,7$ мкм/год – для хромового покриття нанесеного у проточному електроліті; $I_{v2} = 1,2$ мкм/год – для хромового покриття нанесеного у спокійному електроліті (дивись Розділ 4); за формулою (5.2) розраховали необхідну товщину робочого шару електрохімічного хромового покриття нанесеного в проточному електроліті $h_1 = 0,7 \cdot 300 = 210$ мкм. Для забезпечення однакового ресурсу роботи необхідна більша товщина

електрохімічного хромового покриття, нанесеного у спокійному електроліті $h_1 = 1,2 \cdot 300 = 360$ мкм. З метою порівняння величин припуску на алмазне шліфування розрахунки виконали для однакової товщини робочого шару хромових покриттів $h_1 = 210$ мкм. За формулами (5.5) та (5.6), визначили глибину дефектного поверхневого шару для хромового покриття нанесеного в спокійному електроліті $Rt = 59$ мкм та для хромового покриття нанесеного в проточному електроліті $Rt = 22$ мкм відповідно. Результати розрахунків припусків зведені у табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Результати розрахунку припуску на алмазне шліфування зовнішньої циліндричної поверхні штока поршня з хромовим покриттям $\varnothing 70e8(-_{106}^{60})$

Маршрут обробки поверхні діаметром $\varnothing 70e8(-_{106}^{60})$	Елементи припуску, мкм				Розрахункові величини		Допуск на розмір Td , мкм	Граничі розміри, мм		Граничні значення припусків, мкм	
	Rz	Rt	ρ	ε_{yi}	припуск $2 z_{\min}$, мкм	мінімаль- ного діаметра, мм		най- менші	най- більші	$2 z_{\min}$	$2 z_{\max}$
Хромове покриття нанесене у спокійному електроліті											
Заготовка з покриттям	16	59	24	0	–	70,092	120	70,092	70,212	–	–
Шліфування	1,6	–	–	–	198	69,894	46	69,894	69,940	198	272
Хромове покриття нанесене у проточному електроліті											
Заготовка з покриттям	2,5	23	14	0	–	69,971	74	69,971	70,045	–	–
Шліфування	1,6	–	–	–	77	69,894	46	69,894	69,940	77	105

Перевірочний розрахунок для деталей з хромовими покриттями провели за формулою (5.4). Результати розрахунку для покриттів нанесених у:

- спокійному електроліті $272 - 198 = 120 - 46 = 74$ мкм;
- проточному електроліті $105 - 77 = 74 - 46 = 28$ мкм.

Діаметр заготовки з покриттям нанесеним у:

- спокійному електроліті $d_w = 70,152 \pm 0,06$ мм;
- проточному електроліті $d_w = 70,008 \pm 0,037$ мм.

За однакової товщини робочого шару загальна товщина електрохімічного хромового покриття, нанесеного у спокійному електроліті, становить $h = 210 + 59 = 269$ мкм, а для покриття, нанесеного у проточному електроліті – $h = 210 + 22 = 232$ мкм, що дозволяє зменшити припуск на механічну обробку, а відповідно, і затрати на нанесення хромового покриття та його механічну обробку. Крім цього підвищити ресурс роботи хромованих штоків бурових поршневих насосів подвійної дії, які зміцнені комбінованим методом.

Аналіз результатів розрахунку припусків, наведених в табл. 5.1 показав, що припуск на механічну обробку заготовок деталей з хромовим покриттям, нанесеним у спокійному електроліті, є більшим у порівнянні із покриттям, отриманим у проточному електроліті в 2,5 рази. Це обумовлено тим, що під час нанесення електрохімічного хромового покриття у спокійному електроліті виникає більша шорсткість поверхні, утворюється велика конусоподібність, а також зростає глибина дефектного поверхневого шару за рахунок нерівномірного нанесення покриття внаслідок ускладнення газовідведення з поверхні покриття у процесі електролізу порівняно із електролізом у проточному електроліті. Вказані недоліки хромування в спокійному електроліті усуваються під час нанесення покриття на деталі в проточному електроліті, про що свідчить, наприклад, зменшення конусоподібності покриттів, отриманих цим способом приблизно в 1,7 рази та глибини дефектного поверхневого шару у 2,6 рази у порівнянні з цими

характеристиками, отриманими для покриттів нанесених у спокійному електроліті.

5.2 Розвиток аналітичної моделі нарізевого з'єднання трубчастих деталей хромованих металоконструкцій

Для покращення експлуатаційних характеристик бурових та насосно-компресорних труб, які сполучаються нарізовими з'єднаннями, нами запропоновано системний підхід, який включає раціональний вибір матеріалів (сталей, алюмінієвих і титанових стопів), розробку удосконаленої методики розрахунку оболонкових хромованих металоконструкцій (муфт із хромованою зовнішньою поверхнею) [6], механічної обробки нарізей [16], контроль точності [9, 10] та їх зміцнення електрохімічним хромуванням у проточному електроліті для підвищення зносостійкості та корозійної тривкості [3].

Нами було побудовано регресійну залежність [16] для визначення шорсткості нарізи в сталевій муфті/ніпелі в залежності від режимів різання під час різьбошліфування

$$Ra = 10,967s_t^{0,37}d^{0,092}v^{-0,208} \quad (5.7)$$

де s_t – подача на хід, мм/хід; d – діаметр різьби, мм; v – швидкість м/с.

Досліджували муфтове з'єднання гладких насосно-компресорних труб (ГОСТ 633–80), виготовлене із різних металів рис. 5.4. Як матеріали під час досліджень використовували сталь (групи міцності Д), титановий стоп та алюмінієвий стоп. Для зміцнення на зовнішню циліндричну поверхню муфти наносили електрохімічне хромове покриття відповідно до операцій розробленого технологічного процесу на установці для електрохімічного хромування в проточному електроліті, оснащений автоматизованою системою керування (дивись Розділ 3), при цьому різьбові поверхні закривали фторопластовими корками. Механічні властивості досліджуваних матеріалів подано у табл. 5.2.

Таблиця 5.2 – Механічні характеристики матеріалів труб, муфт і хромового покриття

Показник	Матеріал		
	сталь	титановий стоп	хромове покриття
Межа міцності, МПа	655	950–1150	190–310
Межа текучості, МПа	379–552	840–900	–
Модуль пружності, МПа	$2,1 \cdot 10^5$	$1,12 \cdot 10^5$	$1,7 \cdot 10^5$
Пуассонів коефіцієнт	0,28	0,32	0,30
Густина, кг/м ³	7850	4400	6970

Геометричні розміри елементів нарізеного з'єднання «насосно-компресорна труба – муфта – насосно-компресорна труба» (ГОСТ 633–80) подано у табл. 5.3.

Таблиця 5.3. Труби насосно-компресорні гладкі та муфти до них

Умовний діаметр труби, мм	Труба			Муфта	
	зовнішній діаметр, мм	товщина стілки, мм	внутрішній діаметр, мм	зовнішній діаметр, мм	довжина, мм
89	88,9	6,5	75,9	108,0	146
102	101,6	6,5	83,6	120,6	150
114	114,3	7,0	100,3	132,1	156

Хромове покриття наносили на зовнішню циліндричну поверхню муфти товщиною 170 мкм (рис. 5.4).

Розглядається скінченна оболонка з тонким хромовим покриттям, довжина якої L . У довільному нормальному її перерізі ξ прикладена

де $P(\xi)$ – кільцева сила;

$\delta_+(z-\xi)$ – асиметрична імпульсна функція, $\delta_+(z-\xi) = \frac{d}{dz} S_+(z-\xi)$,

$S_+(z-\xi)$ – асиметрична одинична функція $\left(S_+(z-\xi) = \begin{cases} 0 & \text{при } z-\xi \leq 0 \\ 1 & \text{при } z-\xi > 0 \end{cases} \right)$.

Враховуючи (3.8) і умови на краях оболонки, отримуємо таку крайову задачу:

$$\frac{d^4 w}{dz^4} + 4\beta^4 w = \frac{P(\xi)}{D} \delta_+(z-\xi), \quad (5.10)$$

$$\left. \frac{d^2 w}{dz^2} \right|_{z=0} = 0, \quad \left. \frac{d^3 w}{dz^3} \right|_{z=0} = 0, \quad \left. \frac{d^2 w}{dz^2} \right|_{z=L} = 0, \quad \left. \frac{d^3 w}{dz^3} \right|_{z=L} = 0. \quad (5.11)$$

Розв'язок задачі (3.9), (3.10) знайшли у вигляді

$$\begin{aligned} w = & \frac{P(\xi)}{4\beta^3 D} \frac{V_3(\beta L)V_2(\beta(L-\xi)) - V_4(\beta L)V_1(\beta(L-\xi))}{V_3^2(\beta L) - V_4(\beta L)V_2(\beta L)} V_1(\beta z) + \\ & + \frac{P(\xi)}{4\beta^3 D} \frac{V_3(\beta L)V_1(\beta(L-\xi)) - V_2(\beta L)V_2(\beta(L-\xi))}{V_3^2(\beta L) - V_4(\beta L)V_2(\beta L)} V_2(\beta z) + \\ & + \frac{P(\xi)}{\beta^3 D} V_4(\beta(z-\xi)) S_+(z-\xi). \end{aligned} \quad (5.12)$$

Якщо покласти у (5.12) $P(\xi)=1$ Н/м, то отримаємо шукану величину $K_{n2}(z, \xi)$, тобто переміщення точок серединної поверхні оболонки (муфти) у перерізі z від одиничної кільцевої сили, що розміщена у перерізі ξ

$$\begin{aligned} K'_{n2}(z, \xi) = & -\frac{1}{\beta^2 D} \frac{V_3(\beta L)V_2(\beta(L-\xi)) - V_4(\beta L)V_1(\beta(L-\xi))}{V_3^2(\beta L) - V_4(\beta L)V_2(\beta L)} V_4(\beta z) + \\ & + \frac{1}{4\beta^2 D} \frac{V_3(\beta L)V_1(\beta(L-\xi)) - V_2(\beta L)V_2(\beta(L-\xi))}{V_3^2(\beta L) - V_4(\beta L)V_2(\beta L)} V_1(\beta z) + \\ & + \frac{1}{\beta^2 D} V_3(\beta(z-\xi)) S_+(z-\xi). \end{aligned} \quad (5.13)$$

На рис. 5.5 наведені графіки величини $K_{n2}(z, \xi)$ для муфти, що з'єднує насосно-компресорні труби з умовним діаметром 102 мм, отримані за формулою (3.12) при $P(\xi)=1$ Н/м для значень $\xi=0,02; 0,06$ і $0,10$ м для

сталевій, титановій та алюмінієвих оболонок. Параметри вказаної муфти: довжина $L=150$ мм, радіус серединної поверхні $r=55,6$ мм і товщина стінки $h=9,5$ мм. Товщина хромового покриття 170 мкм.

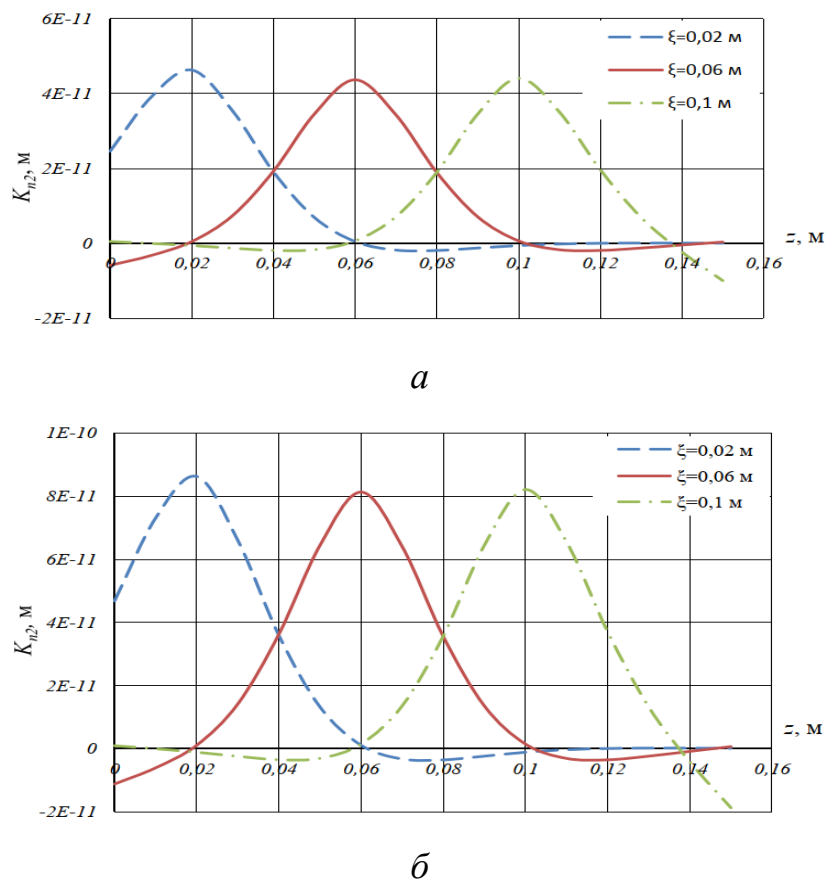


Рисунок 5.5 – Радіальні переміщення точок серединної поверхні оболонки від кільцевої сили для хромованої сталевій (а) та титановій (б) оболонок

Із аналізу графіків (рис. 5.5) видно, що переріз оболонки, у якому досягається максимальне значення величини $K_{n2}(z, \xi)$, співпадає з координатою прикладання кільцевої сили; і чим ближче координата ξ до краю оболонки, тим більший максимум радіального переміщення у цьому перерізі. Радіальні переміщення точок серединної поверхні титановій та алюмінієвих оболонок значно більші, ніж сталевій оболонки. Це пояснюється тим, що модуль пружності титану майже вдвічі менший за модуль пружності сталі зміцненої хромовим покриттям.

У результаті розв'язку крайових задач з визначення радіальних переміщень точок серединної поверхні металевій оболонки (муфти), з

урахуванням властивостей матеріалу оболонки та хромового покриття, викликаних кільцевою силою та кільцевим моментом, прикладеними у довільному перерізі оболонки, отримано функцію радіального переміщення точок серединної поверхні оболонки у довільному перерізі Z від одиничної кільцевої сили, прикладеної у перерізі ξ , та кути повороту нормалі до серединної поверхні оболонки у перерізі Z від вказаних одиничних силових факторів, що прикладені у перерізі ξ .

5.3 Пристрій для контролю биття деталей із різбовими з'єднаннями

Розроблено конструкції пристроїв для контролю точності виготовлення деталей бурових замків, муфт та інших деталей, які мають приєднувальну конічну або гладку різбову поверхню, наприклад штоків бурових поршневих насосів подвійної дії (рис. 5.6), які захищені двома патентами на корисні моделі [9, 10].

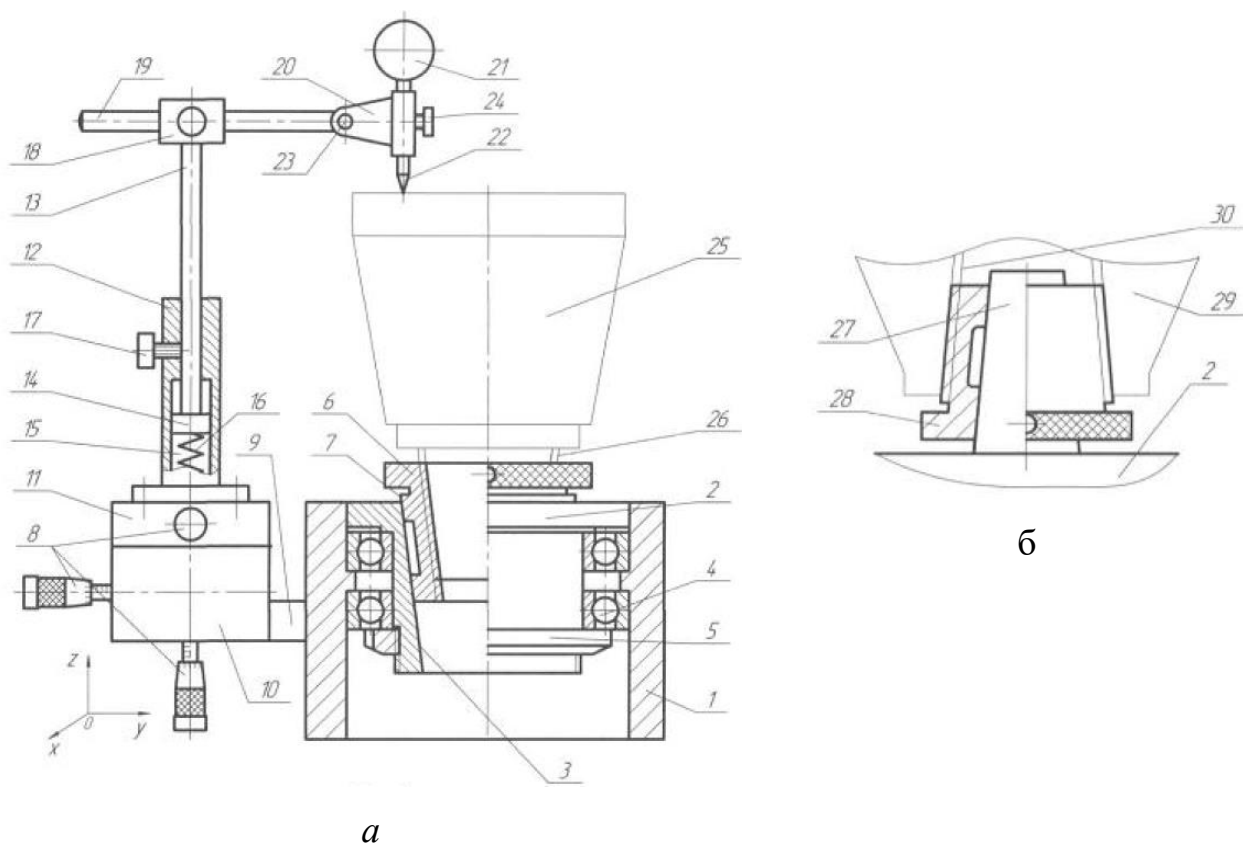


Рисунок 5.6 – Схема пристрою для контролю биття деталі із різьбою (а) та варіант виконання переднього кінця вертикального шпинделя (б)

Пристрій (рис. 5.6) містить корпус 1, змонтований в ньому вертикальний шпindel 2, який має виконаний конічний базовий отвір 3 на передньому кінці, на підшипникових опорах кочення 4 і закріплений гайкою 5. Різьбовий калібр 6 своєю зовнішньою конічною гладкою поверхнею 7 контактує із поверхнею конічного базового отвору 3 вертикального шпинделя 2. Трикоординатний стіл 8, який містить нижню 9, середню 10 і верхню плити 11, через вказану нижню плиту 9 нерухомо закріплений на корпусі 1 пристрою, а вимірювальна стійка 12 в свою чергу закріплена на верхній плиті 11 цього стола 8. Стержень 13 із поршнем 14 встановлений в отворі 15 вимірювальної стійки 12, взаємодіє із пружиною 16 і має можливість вертикального переміщення. Гвинт 17 служить для фіксації у необхідному положенні стержня 14 в стійці 13. На верхньому кінці стержня 13 закріплений кронштейн 18. Повзун 19, на якому через поворотний тримач 20 закріплений індикатор 21 із вимірювальним наконечником 22 з можливістю повороту навколо осі 23. Індикатор 21 кріпиться у поворотному тримачі 20 гвинтом 24. Деталь 25, яка має зовнішню приєднувальну замкову конічну різьбу 26, через різьбовий калібр 6 співвісно встановлюється у базовому конічному отворі з конічною гладкою поверхнею 3 у вертикальному шпинделі 2. Можливий варіант виконання переднього кінця вертикального шпинделя 2 із конічною базовою сходинкою 27. Різьбовий калібр 28 має зовнішню конічну різьбу та внутрішню конічну гладку поверхню і служить для контролю деталі 29 із внутрішньою приєднувальною конічною різьбою 30.

Пристрій для контролю працює таким чином. Для приведення пристрою у вихідний стан спочатку відкручують гвинт 17, а потім стержень 13 повертають навколо вертикальної осі OZ, і разом із повзуном 19 із поворотним тримачем 20 та індикатором 21 відводять із робочої зони пристрою та закручують гвинт 17.

На першому етапі контролю різьбовий калібр 6 із внутрішньою конічною різьбою, нагвинчують на різьбовий хвостовик бурового долота 25, яке має зовнішню приєднувальну замкову конічну різьбу 26. За величиною

натягу контролюють (оцінюють) якість зовнішньої приєднувальної конічної замкової різьби 26 цього бурового долота 25.

На другому етапі контролю деталь 25, разом із нагвинченим на його хвостовик різьбовим калібром 6 із зовнішньою конічною гладкою поверхнею 7 співвісно встановлюють в конічний базовий отвір 3 на передньому кінці вертикального шпинделя 2 таким чином, щоб відбулося повне прилягання робочих конічних поверхонь 7 і 3 відповідно різьбового калібру 6 і вертикального шпинделя 2 (рис. 5.6,а).

Після цього повертають стержень 13 у протилежному напрямку навколо вертикальної осі 02 в робочу зону пристрою таким чином, щоб вісь індикатора 21 із вимірювальним наконечником 22 лежала у вертикальній площині, яка проходить через вісь обертання вертикального шпинделя 2 і вертикальну вісь вимірювальної стійки 12 та фіксують його робоче положення за допомогою гвинта 17. Вимірювальний наконечник 22 індикатора 21 вводять в контакт із контрольованою поверхнею бурового долота 25. При обертанні вертикального шпинделя 2 навколо осі OZ визначають діаметр, осьове і радіальне биття бурового долота 25, а також осьове і радіальне биття породоруйнівних елементів (на рис. 5.6 не показані) цього долота 25.

За допомогою трикоординатного стола 8 контролюють положення вимірювального наконечника 22 індикатора 21 відносно осі 02 обертання вертикального шпинделя 2, а також визначають точність розташування та якість закріплення породоруйнівних елементів на відповідних віддальх на робочій поверхні деталі 25, що особливо актуально для зміцнених деталей покриттями.

Шляхом переміщення трикоординатного стола 8 вздовж осей 0X, 0Y і 0Z, контролюють лінійні та кутові параметри озброєння бурового долота 25. Після завершення вимірювань відкручують гвинт 17, а потім стержень 13 повертають навколо вертикальної осі 0Z, і разом із повзуном 19 із поворотним тримачем 20 та індикатором 21 відводять із робочої зони

пристрою та закручують гвинт 17. Із вертикального шпинделя 2 виймають деталь 25 разом із різбовим калібром 6, відгвинчують останній, і це долото 25 встановлюють в контейнер (на рис. 5.6 не показано) для складування.

Для контролю деталі 29 із внутрішньою приєднувальною замковою конічною різбою 30 використовують вертикальний шпиндель 2, виконаний із конічною базовою сходинкою 27 на його передньому кінці (рис. 5.6). На першому етапі контролю різбовий калібр 28 із зовнішньою конічною різбою вгвинчують в деталь 29, чи хромовану надставку штока, муфту які мають внутрішню приєднувальну замкову конічну різбу 30. За величиною натягу контролюють (оцінюють) якість внутрішньої приєднувальної замкової конічної різби 30 цієї деталі 29.

На другому етапі контролю деталь 29, разом із вгвинченим в її внутрішню приєднувальну замкову конічну різбу 30 різбовим калібром 28 із внутрішньою конічною гладкою поверхнею співвісно встановлюють на конічну базову сходинку 27 на передньому кінці вертикального шпинделя 2 таким чином, щоб відбулося повне прилягання робочих конічних поверхонь відповідно різбового калібру 28 і конічної базової сходинки 27 вертикального шпинделя 2 (рис. 5.6).

Подальший контроль деталі 29 із внутрішньою приєднувальною замковою конічною різбою 30 здійснюють в такому ж порядку, як і деталі 25 із зовнішньою приєднувальною замковою конічною різбою 26.

Аналогічним чином здійснюють контроль якості зміцнених деталей бурового замка: ніпеля і муфти, а також інших деталей із конічною приєднувальною різбою. Запропонований пристрій забезпечує підвищення продуктивності праці контролерів та інформативність контролю різних деталей.

5.4 Розробка технологічної схеми осадження, нейтралізації та очищення гальванічних відходів електрохімічного хромування

Для утилізації відходів гальванічного виробництва (відпрацьованих електролітів хромування) розроблена технологія [7], що включає осадження, нейтралізацію та очищення електролітів з використанням гіроциклон-фільтра (рис. 5.7).

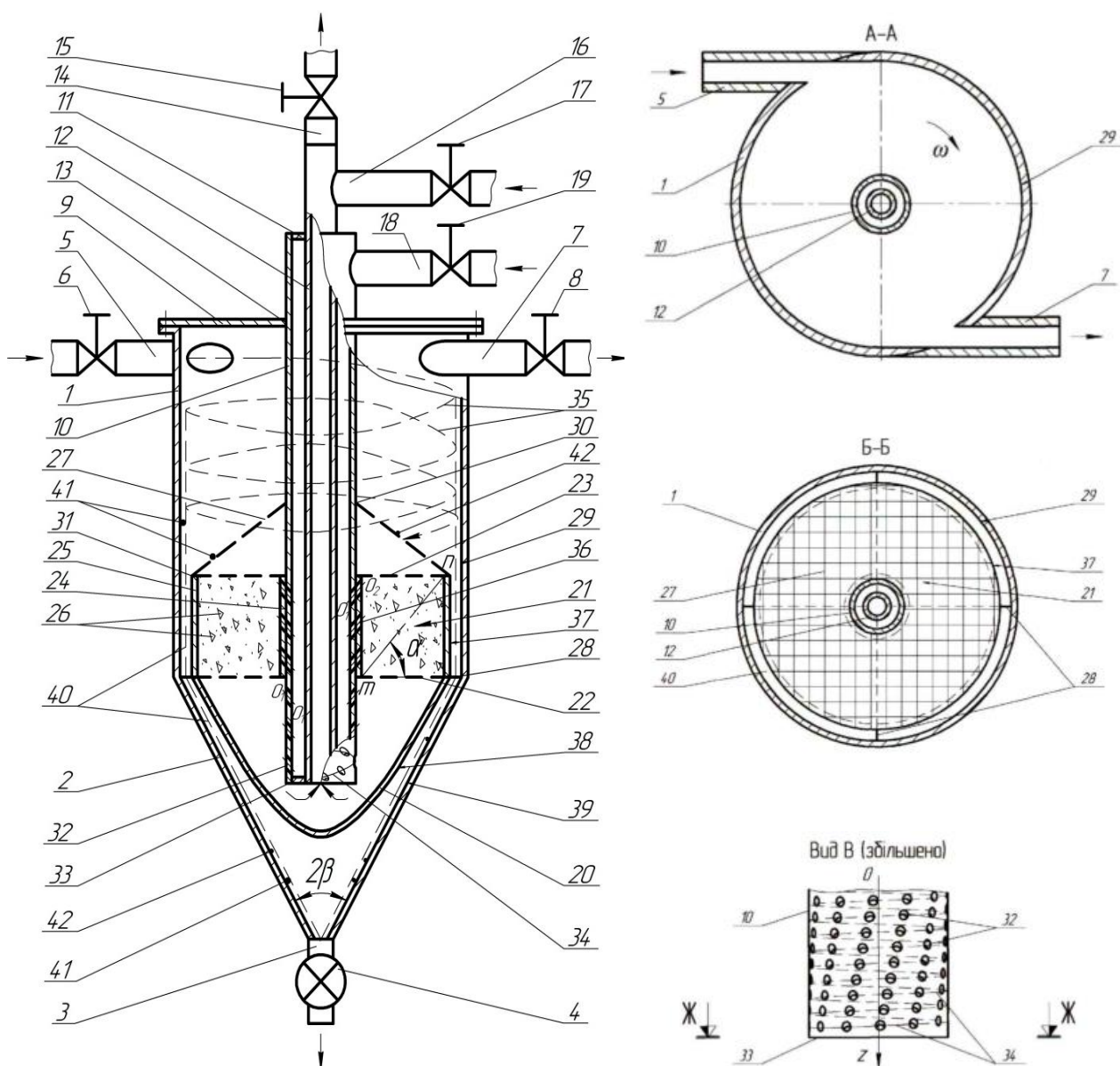


Рисунок 5.7 – Схема гіроциклон-фільтра для комбінованого очищення рідин [11]

Розроблена установка містить два реактори та гідроциклон-фільтр, які сполучені трубопроводами, а також оснащена насосами, вказівниками рівня рідини, рН-метричним обладнанням та автоматизованою системою керування [7]. На першій та другій стадії відповідно здійснюється реагентне осадження та нейтралізація електроліту, а на третій стадії – очищення та фільтрація розчину, тобто тонке його очищення.

Реактор оснащений випарником, електричною мішалкою, повітряним компресором із барботером, трубопроводом для подачі розчинів, які підлягають очищенню від сполук хрому, дозатором та місткістю для відновлювального розчину надлишку сульфату двохвалентного заліза, трубопроводом, дозатором та місткістю для лужного розчину. Насос забезпечує подачу суспензії з реактора через фільтр у другий реактор, який споряджений електричною мішалкою, трубопроводами, дозатором та місткістю для розчину-окислювача. Інший насос забезпечує подачу розчину в гідроциклон-фільтр через вхідний трубопровід, де відбувається очищення та фільтрування цього розчину, що виходить через вихідний трубопровід. Місткості слугують відповідно для збирання твердих продуктів утилізації.

Запропонована нами конструкція гідроциклон-фільтра для тонкого очищення рідин (рис. 5.7) захищена патентом України на винахід [11].

Гідроциклон-фільтр (рис. 5.7) містить вертикальний циліндричний корпус 1 із конічним дном 2, до якого знизу приєднаний штуцер 3 для видалення шламу, що споряджений шлюзовим затвором 4. З протилежних боків до верхньої частини циліндричного корпусу 1 тангенціально приєднані штуцер 5 із вентилем 6 для подачі у циклон-фільтр очищуваного рідинного потоку та штуцер 7 із вентилем 8 для відведення забрудненої води після регенерації насипної фільтрувальної зернистої засипки. Кришка 9 з'єднана з верхньою частиною циліндричного корпусу 1. Перфорована труба 10 через два дистанційні кільця 11 встановлена коаксіально до вихлопної труби 12 і нерухомо закріплена в отворі 13 кришки 9. До верхньої частини вихлопної труби 12 співвісно приєднано штуцер 14 із вентилем 15 для відведення

очищеного рідинного потоку, а перпендикулярно збоку приєднано штуцер 16 із вентилям 17 для подачі чистої води для регенерації насипної фільтрувальної зернистої засипки. До верхньої частини перфорованої труби 10 також перпендикулярно збоку приєднано штуцер 18 із вентилям 19 для подачі чистої води для інтенсифікації регенерації насипної фільтрувальної зернистої засипки.

Всередині циліндричного корпусу 1 встановлена вставка 20, виконана у вигляді перевернутого закритого зрізаного тіла обертання – гіперболоїда обертання та стаціонарна фільтрувальна касета 21, із нижньою кільцевою сітчастою основою 22 і верхньою кільцевою сітчастою кришкою 23, що з'єднані між собою внутрішньою втулкою 24 та зовнішньою втулкою 25, в якій розміщена насипна фільтрувальна зерниста засипка 26. Сітчастий фільтр 27, виконаний у вигляді зрізаного сітчастого конуса. До складу фільтрувальної зернистої засипки 26 стаціонарної фільтрувальної касети 21 входять, наприклад, фрагменти подрібнених та механічно активованих полімерних відходів поліетилентетрафталату або будь-яких інших типів полімерних відходів із розвинутою поверхнею тощо. Стаціонарна фільтрувальна касета 21 нерухомо закріплена на ребрах жорсткості 28, які виконані на внутрішній стінці 29. Перфорована труба 10, проходить через меншу основу 30 зрізаного сітчастого конуса сітчастого фільтра 27 та внутрішньою втулку 24 стаціонарної фільтрувальної касети 21. Нижня більша основа 31 зрізаного сітчастого конуса сітчастого фільтра 27 приєднана до верхньої кільцевої сітчастої кришки 23 стаціонарної фільтрувальної касети 21, а верхня менша основа 30 вказаного зрізаного сітчастого конуса сітчастого фільтра 27 приєднана до перфорованої труби 10. У нижній частині цієї перфорованої труби 10 виконано похилі тангенціальні отвори 32 від торця 33. Кут нахилу осьових ліній $O_1 - O_1$ похилих тангенціальних отворів 32 до площини перпендикулярної до вертикальної осі рівний куту нахилу α висхідної діагоналі $m - n$ поздовжнього осьового розрізу стаціонарної фільтрувальної касети 21. Осьові лінії $O_1 - O_1$ вказаних

похилих тангенціальних отворів 32 розташовані по гвинтовій лінії 34, яка має напрямок підйому витків протилежний до напрямку підйому витків гвинтової лінії траєкторії руху частинок забруднення очищуваних газового чи рідинного потоку 35 у вертикальному циліндричному корпусі 1. У внутрішній втулці 24 стаціонарної фільтрувальної касети 21 виконано також похилі тангенціальні отвори 36, осі $O_2 - O_2$ яких співпадають із осями $O_1 - O_1$ похилих тангенціальних отворів 32 у перфорованій трубі 10.

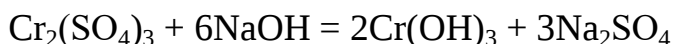
Між зовнішньою стінкою 37 стаціонарної фільтрувальної касети 21, зовнішньою стінкою 38 вставки 20 та внутрішньою стінкою 29 вертикального циліндричного корпуса 1, внутрішньою стінкою 39 конічного дна 2 утворений кільцевий канал 40 для сповзання вниз, відділених від очищуваних газового потоку чи рідинного потоку 35, грубодисперсних частинок забруднення 41 та домішок 42, а також грубодисперсних частинок забруднення 41 та домішок 42, що сповзають із поверхні сітчастого фільтра 27 в зону розташування штуцера 3 для видалення шламу через шлюзовий затвор 4 назовні. Гідроциклон-фільтр оснащений запобіжним клапаном максимального надлишкового тиску та насосами (на рис. 5.7 не показано).

Для забезпечення проведення осадження, нейтралізації та очищення відпрацьованого електроліту установка споряджена автоматизованою системою керування і функціонує наступним чином.

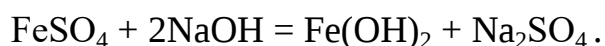
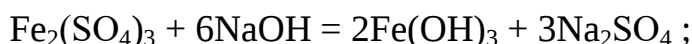
Приклад роботи установки для осадження, нейтралізації та очищення відпрацьованого електроліту після електрохімічного хромування сталевих деталей. Відпрацьований електроліт із гальванічних ванн хромування, який очищають від розчинених сполук хрому, подають у реактор, а через інший трубопровід, дозатором із місткості поступає відновлювальний розчин надлишку сульфату двохвалентного заліза і здійснюють постійне перемішування суміші, забезпечуючи відновлення сполук шестивалентного хрому [121]



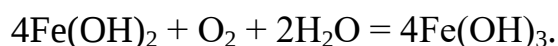
Після прохолодження окислювально-відновлювальної реакції трубопроводом в цей реактор через дозатор із іншої місткості поступає лужний розчин за постійного перемішування реакційної суміші для досягнення водневого показника $\text{pH } 10 \pm 1$ з осадженням катіонів тривалентного хрому



та відповідно двох- і тривалентного заліза



Повітряним компресором із барботером здійснюють насичення реакційної суміші киснем, що міститься в повітрі, забезпечуючи таким чином перетворення гідроксиду двовалентного заліза в гідроксид тривалентного заліза:



При цьому відбувається ізоморфне осадження іонів тривалентного хрому надлишком гідроксиду тривалентного заліза.

У результаті протікання хімічних реакцій утворену суспензію ізоморфного осаду $\text{Cr}(\text{OH})_3/\text{Fe}(\text{OH})_3$ із реактора подають насосом на фільтр, де відбувається відокремлення цього нерозчинного ізоморфного осаду $\text{Cr}(\text{OH})_3/\text{Fe}(\text{OH})_3$, який збирають в окрему місткість. У подальшому очищений від сполук хрому та заліза розчин поступає трубопроводом у реактор, в який, в свою чергу, через трубопровід дозатором із місткості подають розчин-окислювач за постійного перемішування. Після доведення pH розчину до екологічно безпечного нейтрального рівня ($\text{pH } 6,5 \dots 8,5$) він із реактора подається насосом через вхідний трубопровід в гідроциклон-фільтр, де відбувається його комбіноване очищення та фільтрування, а тверді відходи та механічні домішки (шлам) збирають в місткість. Остаточний очищений розчин виходить із гідроциклон-фільтра (рис. 5.7) через вихідний трубопровід і може в подальшому використовуватися у виробництві, забезпечуючи замкнутий цикл промислового водопостачання.

В установці всі вентиля та затвор спорядженні електроприводом, а насоси – електромагнітними пускачами і слугують для забезпечення керування процесом нейтралізації та очищення електролітів в автоматизованому режимі роботи.

На відміну від відомих апаратно-технологічних схем переробки відходів гальванічних виробництв у склад розробленої нами установки додатково введено запатентований гідроциклон-фільтр. для покращення очищення та оснащено установку системою автоматизованого керування процесом осадження, нейтралізації та очищення відпрацьованих електролітів для нанесення покриттів. Детально послідовність автоматизованого керування роботою гідроциклон-фільтра описано у нашій статті [7].

Технічний результат: підвищується надійність роботи, збільшується коефіцієнт корисної дії, продуктивність та економічність установки, а також забезпечується екологічна безпека як для обслуговуючого персоналу, так і для навколишнього природного середовища.

5.5 Практичне застосування технології нанесення хромових покриттів у проточному електроліті

Стратегія сумісного використання струминного і плунжерного насоса з хромованими деталями в нафтовій свердловині описана у нашій статті [5]. Такий струменевий насос за рахунок потоку видобувної рідини, що буде проходити через нього, буде відбирати вільний нафтовий газ із затрубного простору, змішувати його з рідиною і така суміш значно меншої щільності буде закачуватися до гирла свердловини. Правильно підібране розташування струминного насоса в свердловині зменшить навантаження на обладнання та зменшить споживання електроенергії приводом плунжерного насоса. Крім того, для забезпечення ефективної роботи свердловин збільшено термін служби деталей насосів, шляхом хромування в протічному електроліті їх робочих поверхонь [5].

Муфти, бурові замки – це металеві деталі зі складною топологією поверхні. Застосування розробленої методики розрахунку металевих з'єднань труб і технології хромування у проточному електроліті сталевих деталей в комплексі забезпечать високу зносостійкість та корозійну стійкість, а також підвищення надійності нарізевих з'єднань. Такі заходи дозволять підвищити експлуатаційні показники металевих нарізевих з'єднань, що сприятиме запобіганню аварійним ситуаціям, скороченню непродуктивних витрат на ремонтні роботи та збільшенню обсягів видобутку вуглеводнів і зниженню забруднення навколишнього середовища.

Перспективним також є застосування хромування для стволів стрілецької зброї, зокрема й нелетальної дії, деталей пресформ, прокатних валків, медичних інструментів, ходових гвинтів передач гвинт – гайка ковзання / кочення, різних напрямних тощо.

Результати стендових випробовувань (рис. 5.8) зміцнених комбінованим методом штоків бурових поршневих насосів двосторонньої дії УНБ–600 показали підвищення ресурсу роботи в 1,6 рази порівняно із серійними.



Рисунок 5.8 – Стенд для випробовування втулок циліндрових і штоків поршневого насоса двосторонньої дії

Розроблену технологію поверхневого зміцнення змінних деталей бурових поршневих насосів впроваджено в ТзОВ НТФ «ІНТЕРБУР» ЛТД, м. Івано-Франківськ (додаток Г). Технологічний процес комбінованого зміцнення циліндричних поверхонь деталей бурових поршневих насосів комплексним методом включає поверхнєве гартування струмами високої частоти, фрикційне зміцнення, нанесення в проточному електроліті електрохімічного хромового покриття, алмазне шліфування покриття. Для фрикційного зміцнення застосовується інструмент, який споряджений охолоджуючими елементами із міні та еквідістантним їх виконанням відносно робочої частини. Дослідно-промислова установка для нанесення електрохімічних хромових покриттів у проточному електроліті на деталі типу тіл обертання містить такі основні вузли: електрохімічні комірки, джерело живлення, бак для електроліту, систему циркуляції електроліту, систему вентиляції, систему автоматизованого керування, систему блокування.

Економічний ефект від впровадження розробленого технологічного процесу комбінованого зміцнення, який включає нанесення електрохімічних хромових покриттів у проточному електроліті на змінні деталі поршневих насосів досягається за рахунок підвищення ресурсу роботи цих деталей і зниження експлуатаційних затрат на виконання ремонтних робіт при обслуговуванні насосів.

Наукові результати дисертації використовуються при підготовці бакалаврів, магістрів і аспірантів на кафедрі комп'ютеризованого машинобудування Інституту інженерної механіки та робототехніки Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, що сприяє підвищенню рівня професійної підготовки. Як основна і додаткова література при вивченні навчальних дисциплін використовуються такі праці [1–13] (Додаток В).

Висновки до розділу 5

1. Розроблено інженерну методику розрахунку припусків на шліфування деталей з хромовими покриттями, нанесеними в протічному електроліті та можливість зменшення конусоподібності поверхні у 1,7 рази та глибини дефектного поверхневого шару у 2,6 рази у порівнянні з цими характеристиками, отриманими для покриттів нанесених у спокійному електроліті. Встановлено, для електрохімічних хромових покриттів, нанесених в проточному електроліті, оптимальну глибину залягання оброблених поверхонь з мінімальною шорсткістю і показано, що її величина практично не змінюється при подальшому зрізанні шарів хромового покриття.

2. Отримано функцію радіального переміщення точок серединної поверхні металевої оболонки (муфти), з урахуванням властивостей матеріалу оболонки та хромового покриття у довільному перерізі та кути повороту нормалі до серединної поверхні оболонки від дії одиничної кільцевої сили

3. Розроблено конструкції пристроїв для контролю точності виготовлення деталей бурових замків, муфт та інших деталей, які мають приєднувальну конічну або гладку різьбову поверхню, наприклад штоків бурових поршневих насосів подвійної дії. Запропоновані пристрої забезпечують підвищення продуктивності праці контролерів та інформативність контролю різних деталей.

4. Розроблено технологію очищення відпрацьованих електролітів хромування, що включає осадження, нейтралізацію та очищення з використанням гіроциклон-фільтра.

5. Результати стендових випробовувань зміцнених комбінованим методом штоків бурових поршневих насосів двосторонньої дії УНБ–600 показали підвищення ресурсу роботи в 1,6 рази порівняно із серійними.

Результати розділу опубліковано в працях автора [1–3, 5–7, 9–14, 16, 19].

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-технічну задачу з технологічного забезпечення точності та якості виготовлення і відновлення змінних деталей поршневих насосів двосторонньої дії, яка полягає в розробленні прогресивної технології комбінованого зміцнення їх робочих поверхонь, котра забезпечує довговічність і надійність експлуатації виробів.

1. Застосовано системний підхід до вивчення процесів зношування змінних деталей поршневого насоса двосторонньої дії та розробки комбінованої технології зміцнення, яка дозволяє цілеспрямовано керувати технологічними параметрами процесу комбінованого зміцнення і забезпечувати задані фізико-хімічні і механічні властивості поверхневих шарів, а також експлуатаційні характеристики деталей.

2. Розроблено ефективну комбіновану технологію зміцнення сталевих деталей як під час виготовленні нових, так і відновлення зношених, шляхом послідовного формування шарів: нижнього – поверхневим гартуванням струмами високої частоти, середнього – фрикційною обробкою, верхнього – електрохімічним хромуванням у проточному електроліті. Отримані таким чином шари здійснюють багатофункціональний захист змінних деталей поршневих насосів, а саме: від зношування та корозії. Така будова зміцнених шарів покриття дозволяє забезпечувати зниження різниці електродних потенціалів між шаром хромового покриття та білим шаром сталевोї основи.

3. Побудовано багатофакторну модель технологічного процесу електрохімічного хромування в проточному електроліті, на основі якої встановлено, що оптимальні значення технологічних параметрів даного процесу для отримання максимальної мікротвердості, мінімального зношування практично співпадають, а для мінімальної шорсткості та конусоподібності не співпадають, як з оптимальними технологічними параметрами для мікротвердості та зношування, так і між собою.

4. Встановлено, що для забезпечення високих експлуатаційних показників деталей, оптимізацію слід проводити за мінімальним зношуванням, яке досягається за таких умов: масове співвідношення концентрації компонентів $C = 2,2347 \%$; густина струму $i = 134,7902 \text{ А/дм}^2$, швидкість потоку електроліту $v = 1,1926 \text{ м/с}$, температура електроліту $T = 60,5274 \text{ }^\circ\text{C}$, а необхідну шорсткість і конусоподібність формувати на операціях механічної обробки.

5. Встановлено, що шорсткість поверхні хромового покриття при алмазному шліфуванні зростає зі збільшенням глибини різання, швидкості обертання деталі та повздовжньої подачі стола. При цьому найбільший вплив має швидкість обертання, менший – подача стола, а найменший – глибина різання.

6. Визначено різницю електродних потенціалів між шаром хромового покриття, білим шаром, сформованим фрикційним зміцненням, та показано, що максимальна різниця електродних потенціалів в електроліті з високим опором може становити до 85 мВ. За результатами електрохімічних вимірювань встановлено, що хромові покриття зберігають роботоздатність за різних видів навантаження: на розтяг, згин, кручення, не знижуючи рівня допустимих напружень для сталевих основи, характерних під час експлуатації штоків поршневих насосів двосторонньої дії.

7. Розроблено інженерну методику розрахунку припусків на механічну обробку електрохімічних хромових покриттів нанесених у проточному електроліті. Розроблену технологію комбінованого зміцнення на деталей типу тіл обертання передано і впроваджено в ТзОВ НТФ «Інтербур» ЛТД (м. Івано-Франківськ). Промислові випробовування втулок циліндрових та штоків бурових поршневих насосів двосторонньої дії показали збільшення ресурсу їх роботи в 1,6 рази порівняно із серійним. Результати дисертаційної роботи використовуються у навчальному процесі Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Роп'як Л. Я., Величкович А. С., Витвицький В. С., Шовкопляс М. В. Розділ 8. Дослідження впливу похибок виготовлення, складання та зношування на кінематико-силові параметри насоса для визначення режимів випробовування зміцнених деталей. *Проблеми безпечної експлуатації компресорного та насосного обладнання в сучасній промисловості*: колективна монографія / за ред. В. Б. Тарельника, Є. В. Коноплянченка. Суми: ФОП Литовчено Є. Б., 2020. 410 с. ISBN 978-966-97721-8-30.
2. Ropyak L. Ya., Shovkoplias M. V., Vytvytskyi V. S. Determination of machinig allowance for parts with chrome coatings. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2021. № 2. С. 117–127. DOI: <https://doi.org/10.24025/2306-4412.2.2021.242339>.
3. Роп'як Л. Я., Шовкопляс М. В., Витвицький В. С., Стрілецький Ю. Й. Вплив технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування на експлуатаційні властивості покриттів. *Вісник Сумського національного аграрного університету*. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів. 2021. № 3 (45). С. 48–56. DOI: <https://doi.org/10.32845/msnau.2021.3.7>.
4. Посувайло В. М., Шовкопляс М. В., Малінін В. Ю., Романів М. М. Порівняння методів поверхневого зміцнення деталей машин покриттями. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2021. Вип. 4. С. 83–97. DOI: <https://doi.org/10.24025/2306-4412.4.2021.253298>.
5. Bazaluk O., Dubei O., Ropyak L., Shovkoplias M., Pryhorovska T., Lozynskyi V. Strategy of compatible use of jet and plunger pump with chrome parts in oil well. *Energies*. 2022. Vol. 15, no. 1. Art. 83. (Scopus, WoS, Q1). DOI: <https://doi.org/10.3390/en15010083>.
6. Dubei O. Ya., Tutko T. F., Ropyak L. Ya., Shovkoplias M. V. Development of Analytical Model of Threaded Connection of Tubular Parts of Chrome-Plated Metal Structures. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. 2022. Vol.

44, no. 2. P. 251–272. (Scopus, Q3). DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.44.02.0251>.

7. Роп'як Л. Я., Николайчук М. Я., Шовкопляс М. В., Витвицький В. С., Романів М. М., Білінський В. М. Автоматизована установка для очищення гальванічних відходів. *Вісник Сумського національного аграрного університету*. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів. 2022. № 2 (44). С. 70–80. DOI: <https://doi.org/10.32845/msnau.2021.2.15>.

8. Величкович А. С., Шовкопляс М. В., Витвицький В. С., Роп'як Л. Я. Аналіз напруженого стану штока поршневого насоса із функціональним покриттям при геометричних дефектах системи «крейцкопф – напрямні». *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2025. № 1 (58). С. 15–24. DOI: [https://doi.org/10.31471/1993-9965-2024-1\(57\)-44-51](https://doi.org/10.31471/1993-9965-2024-1(57)-44-51).

9. Пат. на корисну модель № 106084. Україна, МПК (2016.01) G01B 5/14. Пристрій для контролю биття бурового долота / Т.О. Пригоровська, Л.Я. Роп'як, О.В. Рогаль, М.В. Шовкопляс. – № u201804522 ; заявл. 24.04.2018 ; опубл. 27.08.2018, Бюл. № 16. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/670928/>

10. Пат. на корисну модель № 129444. Україна, МПК (2016.01) E21B 10/00, E21B 12/00, G01B 5/14. Пристрій для контролю бурового долота / Т.О. Пригоровська, Л.Я. Роп'як, О.В. Рогаль, М.В. Шовкопляс. – № u201805867; заявл. 25.05.2018; опубл. 25.10.2018, Бюл. № 20. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/240424/>

11. Пат. на винахід № 123124. Україна, МПК (2021.02) B01D50/00; B04C9/00; B01D24/46; B01D29/62. Циклон-фільтр для очищення газів або рідин / Л.Я. Роп'як, О.С. Малишевська, М.В. Маковійчук, Т.О. Пригоровська, А.С. Величкович, М.В. Шовкопляс. – № a201909830; заявл. 16.09.2019; опубл. 17.02.2021, Бюл. № 7. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1477700/>

12. Патент на винахід № 126018 Україна, МПК (2006.01) G01N 3/56. Спосіб дослідження процесів трибокрекінгу під час фрикційної взаємодії в металополімерних парах тертя та пристрій для його здійснення / О.І.

Вольченко; Д.О. Вольченко, М. Й. Бурда, Л.Я. Роп'як, Д.Ю. Журавльов, В.С. Витвицький, М.В. Шовкопляс; заявник і власник Івано-Франківський націонал. техн. ун-т нафти і газу. – № а201809783; заявл. 01.10.2018; опубл. 03.08.2022, Бюл. № 31. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1700648/>

13. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 111299. Комп'ютерна програма «Визначення еквівалентних напружень у вкритій хромовим покриттям ділянці штока бурового насоса в умовах нештатного кінематичного навантаження» Роп'як Л. Я., Величкович А. С., Витвицький В. С., Шовкопляс М. В., Дубей О. Я., Тутко Т. Ф. Дата реєстрації: 25.01.2022. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1695294/>

14. Кустов В. В., Витвицький В. С., Шовкопляс М. В. Оптимізація режимів різання під час токарної обробки деталей з покриттям. *Графічна освіта у закладах вищої освіти: стан та перспективи* : зб. тез доп. наук.-практ. семінару, Івано-Франківськ, 19–21 верес. 2018 р. Івано-Франківськ, 2018. С. 104–105.

15. Ropyak L. Y., Velychkovych A. S., Vytvytskyi V. S., Shovkopliash M. V. Analytical study of “crosshead – slide rail” wear effect on pump rod stress state. *16th International Scientific and Engineering Conference “Hermetic Sealing, Vibration Reliability and Ecological Safety of Pump and Compressor Machinery” (HERVICON+PUMPS 2020)*, 8–11 верес. 2020 р., Суми, Україна. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Т. 1741, № 1. № 012039. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1741/1/012039>

16. Ropyak L. Y., Vytvytskyi V. S., Velychkovych A. S., Pryhorovska T. O., Shovkopliash M. V. Study on grinding mode effect on external conical thread quality. *11th International Conference on Advanced Manufacturing Technologies (ICAMaT 2020)*, 29–30 жовт. 2020 р. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Т. 1018, № 1. № 012014. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1018/1/012014>

17. Барц К., Роп'як Л. Я., Стрілецький Ю. Й., Шовкопляс М. В. Автоматизована система контролю технологічних параметрів процесу

електрохімічного хромування. *Датчики, прилади та системи – 2021*: зб. тез IX Міжнар. наук.-техн. конф., с. Лазурне, Херсон. обл., 20–24 верес. 2021 р. Черкаси, 2021. С. 22–23.

URL:<https://er.chdtu.edu.ua/bitstream/ChSTU/3355/1/Збірник%20матеріалів%20МНТК%20ДПС-2021.pdf>

18. Роп'як Л. Я., Романів М. М., Шовкопляс М. В., Малінін В. Ю., Здерко О. Р. Моделювання потоку електроліту в електрохімічній комірці для нанесення покриттів. *Прогресивні технології у машинобудуванні* (РТМЕ–2022): зб. наук. пр. X Міжнар. наук.-техн. конф., Івано-Франківськ – Яремче, 1–5 лют. 2022 р. Івано-Франківськ – Яремче, 2022. С. 127–129.

URL:https://drive.google.com/file/d/1Fw5epmBruamKZjUg-1KvhlOSOugU_6Vj/view

19. Роп'як Л. Я., Шовкопляс М. В. Дослідження процесу алмазного шліфування хромових покриттів. *Процеси механічної обробки, верстати та інструмент*: зб. наук. пр. XII Всеукр. наук.-техн. конф. з міжнар. участю, Житомир, 9–10 листоп. 2023 р. Житомир, 2023. С.131–132. URL: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/12/povnyj-tekst-1.pdf>

20. Шовкопляс М. В., Роп'як Л. Я. Дослідження трибологічних властивостей хромових покриттів. *Молодь в авіації: нові рішення та перспективні технології*: тези доп. Всеукр. наук.-техн. конф. студентів, аспірантів і молодих учених з міжнар. участю, присвяченої 125-річчю Нац. ун-ту «Запоріж. політехніка», 21–22 листоп. 2024 р., Запоріжжя / Нац. ун-т «Запоріж. політехніка». Запоріжжя, 2024. С. 103–105.

21. Михайлюк В. В., Концур І. Ф., Копей Б. В., Дейнега Р. О. Гідромашини: атлас схем та конструкцій. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2022. 27 с.

22. Богатчук І. М., Прунько І. Б., Богатчук Ю. І. Вивчення зносу штоків гідравлічних насосів агрегатних установок нафтогазового технологічного транспорту. *Проблеми трибології*. 2007. № 4. С. 67–75.

23. Парайко Ю. І. Фундаментальні основи надійності вузлів тертя машин та обладнання нафтогазової промисловості. *Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб.* / гол. ред. М. В. Кіндрачук. Київ: Вид-во Нац. авіац. ун-ту «НАУ-друк», 2010. Вип. 53. С. 12–25.

24. Остапович В. В. Вплив технології зміцнення на показники якості та експлуатаційні властивості змінних деталей поршневих насосів двосторонньої дії. *Наукові нотатки*. 2015. Вип. 52. С. 126–134. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nn_2015_52_26

25. Гладкий С. І., Харун В. Р., Парайко Ю. І. [та ін.] Аналіз причин низької зносостійкості вузла ущільнення штока двопоршневого бурового насоса. *Науковий вісник ІФНТУНГ*. 2006. № 2. С. 105–109.

26. Воробйов М. С., Квас М. І. Уточнення інерційного та зайвев'язьового навантаження поршневих машин. *Нафтогазова енергетика*. 2010. № 2. С. 19–22.

27. Концур І. Ф., Артим В. І., Сторож Б. Д., Яценко Т. В., Чичула М. Я. Аналіз умов роботи циліндропоршневої пари та спосіб виготовлення біметалевих циліндрових втулок для бурових насосів односторонньої дії. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2013. № 3 (48). С. 139–146.

28. Ющенко К. А., Борисов Ю. С., Кузнецов В. Д., Корж В. М. Інженерія поверхні: підручник. Київ: Наукова думка, 2007. 558 с. ISBN 978-966-00-0655-3.

29. Остапович В. В., Роп'як Л. Я. Електрохімічні дослідження захисної дії та роботоздатності гальванічних покриттів. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2011. № 2 (39). С. 71–75.

30. Бучинський М. Я., Горик О. В., Чернявський А. М., Яхін С. В. Основи творення машин / за ред. О. В. Горика. Харків: НТМТ, 2017. 448 с. ISBN 978-966-2989-39-7.

31. Горик О. В., Черняк Р. Є., Чернявський А. М., Брикун О. М. Дробоструминне очищення. Теорія і практика / за ред. О. В. Горика. Полтава:

Видавництво ПП «Астроя», 2021. 326 с.

32. Бабей Ю. И. Физические основы импульсного упрочнения стали и чугуна. Киев: Наукова думка, 1988. 240 с.

33. А.с. № 1541035 СССР, МКИ В 24 В 39/00. Ролик для упрочняющей обработки деталей / В.Я. Белоусов, И.Ю. Гладий, З.Д. Василечко, и др.; заявитель и патентообладатель Ивано-Франковский институт нефти и газа. – № 4369277/31-27; заявл. 09.12.87; опубл. 07.02.90, Бюл. № 5. – 3 с.

https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=SU28168374&_cid=P11-MEJZTC-49092-2

34. Кирилів В. І., Кирилів Я. Б., Сидор П. Я. Зміцнення деталей pomp методами інтенсивної пластичної деформації. *Наукові нотатки. Міжвузівський збірник* (за напрямом «Інженерна механіка»). 2009. Вип. 25, ч. 2. С. 109–113.

35. Kusyj J., Kuk A. A centrifugal vibration strengthening method devised to improve technological reliability of machine parts. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015. Vol. 1, no. 7. P. 41–51. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.36336>.

36. Chenakin S. P., Mordyuk B. M., Khripta N. I., Malinin V. Yu. Ultrasonic Impact Treatment: Assessing the Process Energetics. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. 2023. Vol. 45, no. 9. P. 1109–1123. DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.45.09.1109>.

37. Bembenek M., Kopei V., Ropyak L. Y., Levchuk K. Stressed State of Chrome Parts During Diamond Burnishing. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. 2023. Vol. 45, no. 2. P. 239–250. DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.45.02.0239>.

38. Похмурский В. И., Далисов В. Б., Голубец В. М. Повышение долговечности деталей машин с помощью диффузионных покрытий. Киев: Наукова думка, 1980. 188 с.

39. Yakym R. S., Petryna D. Y. Analysis of causes and preventing ways of early workability loss of three-cone rock bit cutters. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. 2020. Vol. 42, no. 5. P. 731–751. DOI:

<https://doi.org/10.15407/mfint.42.05.0731>.

40. Berladir K., Hovorun T., Ivanov V., Vukelic D., Pavlenko I. Diffusion Nitride Coatings for Heat-Resistant Steels. *Materials*. 2023. Vol. 16, no. 21. Art. 6877. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16216877>.

41. Dolgov N. A., Rutkovskiy A. V. Structural Steel Microhardness Improvement by Ion Nitriding. *Strength of Materials*. 2022. Vol. 54, no. 5. P. 819–824. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-022-00458-4>.

42. Внуков Ю. Н., Марков А. А., Лаврова Л. В., Бердышев Н. Ю. Нанесение износостойких покрытий на быстрорежущий инструмент / под общ. ред. Ю. Н. Внукова. Киев: Техника, 1992. 143 с.

43. Лабунец В. Ф., Ворошин Л. Г., Киндрачук М. В. Износостойкие боридные покрытия. Киев: Техника, 1989. 159 с.

44. Man'ko O. V., Stets'ko A. E. Kinetics of the Diffusion Chromium Plating of Steels with Nickel-Cobalt-Phosphorus Coating. *Materials Science*. 2020. Vol. 55, no. 6. P. 870–877. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-020-00381-6>.

45. Верхотуров А. Д., Муха И. М. Технология электроискрового легирования металлических поверхностей. Киев : Техника, 1981. 186 с.

46. Kryshchtopa S. I., Petryna D. Y., Bogatchuk I. M., Prun'ko I. B., Mel'nyk V. M. Surface Hardening of 40KH Steel by Electric-Spark Alloying. *Materials Science*. 2017. Vol. 53, no. 3. P. 351–358. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-017-0082-y>.

47. Haponova O., Tarelnyk V., Mościcki T., Tarelnyk N. Hybrid Surface Treatment Technologies Based on the Electrospark Alloying Method: A Review. *Coatings*. 2025. Vol. 15, no. 6. Art. 721. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings15060721>.

48. Борисов Ю. С., Борисова А. Л. Плазменные порошковые покрытия. Киев: Техника, 1986. 223 с.

49. Петров С. В., Карп И. Н. Плазменное газозоодушное напыление. Киев: Наукова думка, 1993. 495 с.

50. Газотермические покрытия из порошковых материалов: справ. /

Борисов Ю. С., Харламов Ю. А., Сидоренко С. Л., Ардатовская Е. И. Киев: Наукова думка, 1987. 544 с.

51. Похмурський В. І., Студент М. М., Довгунік В. М., Похмурська Г. В., Сидорак І. Й. Електродугові відновні та захисні покриття. Львів: НАН України, ФМІ ім. Г. В. Карпенка, 2005. 200 с.

52. Kuroda S., Kawakita J., Watanabe M., Katanoda H. Warm spraying – a novel coating process based on high-velocity impact of solid particles. *Science and Technology of Advanced Materials*. 2008. Vol. 9, no. 3. Art. 033002 (17 p.). DOI: <https://doi.org/10.1088/1468-6996/9/3/033002>.

53. Мажейка О. Й. Лазерна, плазмова і детонаційна технології зміцнення поверхонь: монографія. Кіровоград: Вид. Лисенко В. Ф., 2011. 260 с. ISBN 966-2570-12-0.

54. Зносостійкість сплавів, відновлення та зміцнення деталей машин: навч. посіб. / Бережний С. П., Бриков М. М., Бриков М. М., Биковський О. Г., Гордієнко В. Н., Гук В. А., Капустян О. Є., Нетребко В. В., Попов В. С., Попов С. Н., Ткаченко Ю. М., Шумікін О. Б., Шумілов А. О. Запоріжжя : ВАТ «Мотор Січ», 2006. 420 с.

55. Smirnov I., Chornyi A., Lysak V., Dolgov N., Sieliverstov I., Parshenko K. Comparison of chemical composition and wear of iron and nickel aluminide coatings applied by plasma spraying. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. Vol. 4, no. 12 (124). P. 47–55. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.286198>.

56. Гладкий С. І. Результати стендових досліджень та промислових випробувань зміцнених пар тертя поршневіх насосів, що працюють при зворотно-поступовому русі. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2008. № 2 (27). С. 82–86.

57. Патент № 40784 Україна, МПК С 23 С 4/04, 26/02, 28/00. Установка для напыления композиционных покрытий электродуговым методом / Кустов В. В., Роп'як Л. Я.; заявник і патентовласник ІФДТУНГ. – № 2000010333; заявл. 20.01.00; опубл. 15.12.03, Бюл. № 12. – 3 с.

<https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/349131/>

58. Holyakevych A. A., Orlov L. M., Pokhmurs'ka H. V., Student M. M., Chervins'ka N. R., Khyl'ko O. V. Influence of the phase composition of the layers deposited on the rods of hydraulic cylinders on their local corrosion. *Materials Science*. 2015. Vol. 50, no. 5. P. 104–110. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-015-9780-5>.

59. Prysyazhnyuk P., Molenda M., Romanyshyn T., Ropyak L., Romanyshyn L., Vytvytskyi V. Development of a hardbanding material for drill pipes based on high-manganese steel reinforced with complex carbides. *Acta Montanistica Slovaca*. 2022. Vol. 27, no. 3. P. 685–696. DOI: <https://doi.org/10.46544/AMS.v27i3.09>.

60. Igartua A., Mendoza G., Fernandez X., Zabala B., Alberdi A., Bayon R., Aranzabe A. Surface Treatments Solutions to Green Tribology. *Coatings*. 2020. Vol. 10, no. 7. Art. 634. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings10070634>.

61. Петров Ю. Н., Косов В. П., Страулат М. П. Ремонт автотракторных деталей гальваническими покрытиями. Кишинев: Картя Молдовеняскэ, 1976. 150 с.

62. Молчанов В. Ф., Аюпов Ф. А., Вандышев В. А., Дзыцюк В. М. Комбинированные электролитические покрытия. Киев: Техника, 1976. 176 с.

63. Молчанов В. Ф. Эффективность и качество хромирования деталей. Киев: Техника, 1979. 229 с.

64. Яворський В. Т., Кунтий О. І., Хома М. С. Електрохімічне нанесення металевих, конверсійних та композиційних покриттів: навч. посіб. для студ. Львів: Держ. ун-т «Львів. політехніка», 2000. 216 с.

65. Liang A., et al. Structure characterization and tribological properties of thick chromium coating electrodeposited from a Cr(III) electrolyte. *Surface and Coatings Technology*. 2013. Vol. 218. P. 23–29. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.12.021>.

66. Air quality guidelines for Europe. 2nd ed. Copenhagen: WHO Regional Publications, European Series, 2000. 273 p.

67. Korzynski M., Pacana A., Cwanek J. Fatigue strength of chromium coated elements and possibility of its improvement with slide diamond burnishing. *Surface and Coatings Technology*. 2009. Vol. 203, no. 12. P. 1670–1676. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2008.12.022>.

68. Sziráki L., et al. Electrochemical behaviour of amorphous electrodeposited chromium coatings. *Materials Chemistry and Physics*. 2012. Vol. 133, no. 2–3. P. 1092–1100. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2012.02.021>.

69. Kagajwala B., [et al.]. Functional Trivalent Chromium Electroplating of Internal Diameters. *Products Finishing*. 2013. Digital Edition. URL: <https://www.pfonline.com/articles/functional-trivalent-chromium-electroplating-of-internal-diameters>

70. Каданер Л. І., Гімельфарб Р. Ю. Зносостійке хромування в проточному електроліті. Київ: Техніка, 1971. 68 с.

71. Роп'як Л. Я., Остапович В. В. Оптимізація технологічних параметрів процесу хромування для забезпечення показників якості деталей поршневих насосів. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2016. № 2/5 (80). С. 50–62. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.65719>.

72. Oduoza C. F., Khan E., Sihra T. Chromium Electroplating of Aluminium Alloys Using Electroless Nickel as Underlayer. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*. 2014. Vol. 2, no. 7. P. 59–74. DOI: <https://doi.org/10.4236/msce.2014.27007>.

73. Zhang N., et al. Anticorrosion Property Study on the Hard Chrome Plating Layer of Hydraulic Cylinder Rod. *Advanced Materials Research*. 2013. Vol. 791–793. P. 394–397. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.791-793.394>.

74. Ma J.-s. The law of barrel wear and its application. *Defence Technology*. 2018. Vol. 14, no. 6. P. 674–676. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2018.06.012>.

75. Li X.-L., et al. An interface shear damage model of chromium coating/steel substrate under thermal erosion load. *Defence Technology*. 2021. Vol. 17, no. 2. P. 405–414. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2020.02.002>.

76. Zou L., Fan J., Huang J., Chen J. The Construction of a Small-Caliber Barrel Wear Model and a Study of the Barrel Wear Rule. *Coatings*. 2024. Vol. 14, no. 9. Art. 1200. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings14091200>.

77. Yusron R. M., Bisoño R. M., Pramudia M. Effect Electrolyte Temperature and Electrode Distance to Electroplating Hard-Chrome on Medium-Carbon Steel. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1569. Art. 042007. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1569/4/042007>.

78. Jeeva P. A. A review on electrodeposition of hard chrome plating. *Journal of Corrosion Science and Engineering*. 2020. Vol. 23, Preprint no. 41. P. 1–12. URL: <https://jcse.org/viewPaper/ID/1647/ZYb7n2oW62RtVBeMwDkwFfrSSbRL9p>.

79. Vinh P. N., Thien N. D., Le C. C. Study the Effect of Chrome Coating Thickness to Fatigue Strength of the Axle-Shaped Machine Parts. *4th International Conference on Green Technology and Sustainable Development (GTSD 2018)*, Ho Chi Minh City, Vietnam, 9–10 листоп. 2018 р. IEEE, 2018. С. 221–226. <https://doi.org/10.1109/GTSD.2018.8595550>

80. Ngon D. T., Cuong L. C., Phoi N. V. Study of the Effect of Chrome Coating Layer to the Fatigue Strength of the Axial Machine Parts. *3rd International Conference on Green Technology and Sustainable Development (GTSD 2016)*, Kaohsiung, Taiwan, 2016. IEEE, 2016. С. 135–140. <https://doi.org/10.1109/GTSD.2016.40>

81. Xia H., et al. Influences of the current density on the performances of the chrome-plated layer in deterministic electroplating repair. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 292. Art. 012075. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/292/1/012075>.

82. Protsenko V. S., Bobrova L. S., Baskevich A. S., et al. Electrodeposition of chromium coatings from a choline chloride based ionic liquid with the addition

of water. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2018. Vol. 53, no. 5. P. 906–915.

83. Katırcı R. A chrome coating from a trivalent chromium bath containing extremely low concentration of Cr^{3+} ions. *International Journal of Surface Science and Engineering*. 2016. Vol. 10, no. 1. Art. 73. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJSURFSE.2016.075318>.

84. Liang A., et al. A favorable chromium coating electrodeposited from Cr(III) electrolyte reveals anti-wear performance similar to conventional hard chromium. *Materials Letters*. 2017. Vol. 189. P. 221–224. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.12.022>.

85. Hall T. D., et al. Development of a Functional Reach Compliant Trivalent Chromium Electroplating Process. *ECS Meeting Abstracts*. 2017. MA2017-01; E01-Green Electrodeposition. T. 4. Apt. № 1045. <https://doi.org/10.1149/MA2017-01/18/1045>

86. Qi J., et al. Chromium valence change in trivalent chromium conversion coatings on aluminium deposited under applied potentials. *Corrosion Science*. 2020. Vol. 167. Art. 108482. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.108482>.

87. Sherwin C., Bhat S., Hebbar S. P. A brief review on nickel and chromium coatings developed by electrochemical route. *International Conference on Emerging Trends in Mechanical Engineering (eTIME-2019)*, 9–10 септ. 2019 p., Mangaluru, India. AIP Conference Proceedings. 2020. T. 2236, № 1. № 040007. <https://doi.org/10.1063/5.0006832>

88. Putri S., Pujiyanto E., Triyono J. Optimization of Electroplating Thickness Quality at Hip Joint Implant Using the Taguchi Method. *Jurnal Teknik Industri*. 2019. Vol. 20, no. 1. P. 45–52. DOI: <https://doi.org/10.22219/JTIUMM.Vol20.No1.45-52>.

89. Bikulčius G., et al. Dry sliding tribological behavior of Cr coatings electrodeposited in trivalent chromium sulphate baths. *Surface and Coatings Technology*. 2017. Vol. 315. P. 130–138. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.01.076>.

90. Addach H., et al. Application of statistical design to optimisation of hardness and hydrogen content of chromium coating under pulse reverse electroplating. *Transactions of the IMF*. 2007. Vol. 85, no. 4. P. 187–193. DOI: <https://doi.org/10.1179/174591907X216422>.

91. Sonntag R., et al. Hard Chrome-Coated and Fullerene-Doped Metal Surfaces in Orthopedic Bearings. *Materials*. 2017. Vol. 10, no. 12. Art. 1449. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma10121449>.

92. Антропов Л. И., Лебединский Ю. Н. Композиционные электрохимические покрытия и материалы. Киев: Техника, 1986. 200 с.

93. Yar-Mukhamedova G., et al. Microhardness changes of nano-structured composition coatings in corrosion process. In: *EUROCORR 2013*, 1–5 September 2013, Estoril, Portugal. P. 1245–1246. DOI: <https://doi.org/10.13140/2.1.3342.1761>.

94. Bikulčius G., et al. Characterization of Cr–ZrO₂ composite coatings electrodeposited from Cr(III) bath. *Chemija*. 2018. Vol. 29, no. 2. P. 97–108. DOI: <https://doi.org/10.6001/chemija.v29i2.3712>.

95. Zeng Z., Zhang J. Electrodeposition and tribological behavior of amorphous chromium-alumina composite coatings. *Surface and Coatings Technology*. 2008. Vol. 202, no. 12. P. 2725–2730. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.10.008>.

96. Клименко С. А., Коломиец В. В., Хейфец М. Л., Пилипенко А. М., Мельнийчук Ю. А., Бурякин В. В.; под общ. ред. С. А. Клименко. Обработка деталей с покрытиями. Киев: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2011. 353 с.

97. Полонский Л. Г. Механическая обработка газотермических покрытий и ее влияние на развитие техники напыления. Вестник НТУ «ХПИ»: сб. науч. трудов. Харьков, 2011. С. 132–145.

98. Пилипенко М. Вібраційна обробка газотермічних покриттів. Черкаси: Сіяч, 2000. 203 с.

99. Кустов В. В., Роп'як Л. Я. Аналіз точності токарної обробки зовнішньої циліндричної поверхні втулок. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. 2015. Вип. 1, ч. 1 (90). С. 86–93.

100. Шацький І. П., Маковійчук М. В., Роп'як Л. Я. Рівновага шаруватого Cu/Ni/Cr-покриття під локальним навантаженням. *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології*. 2023. Т. 21, № 2. С. 379–389. DOI: <https://doi.org/10.15407/nnn.21.02.379>.

101. Роп'як Л. Я., Шацький І. П., Маковійчук М. В. Аналіз взаємодії тонкого покриття з абразивом на основі одновимірної моделі. *Металофізика та новітні технології*. 2019. Т. 41, № 5. С. 647–654. DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.41.05.0647>.

102. Обработка износостойких покрытий / под общ. ред. Ж. А. Мрочека. Минск: Дизайн ПРО, 1997. 208 с.

103. Патент на винахід № 100332 Україна, МПК В23В1/00. Спосіб визначення припуску на механічну обробку виробів з газотермічними покриттями / М. П. Кравченко, Л. Г. Полонський, В. М. Ночвай, В. О. Лошенко, О. А. Степчин; заявник і патентовласник ЖДТУ. – № а201111957; заявл. 11.10.11; опубл. 10.12.12, Бюл. № 23. – 4 с. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1277351/>

104. Кравченко М. П., Ночвай В. М., Полонський Л. Г., Щехорський А. Й., Рижов Ю. Е. Визначення припуску на обробку виробів з газотермічним покриттям ПГ-12Н-01 товщиною 0,6–2,4 мм за критерієм шорсткості. *Вісник ЖДТУ. Процеси механічної обробки в машинобудуванні*. 2011. Вип. 10. С. 178–191.

105. Технологія ремонту та відновлення (Фінішна алмазно-абразивна обробка еластичними інструментами в ремонтному виробництві): монографія / [Клименко С. А., Бурикін В. В., Полонський Л. Г., Сніцар В. Г.]. Житомир: ЖДТУ, 2014. 122 с.

106. Lipa Z., Peterka J., Pokorný P., Václav Š., Buranský I. Contribution to the Investigation of Surface Roughness Models of Grinded Plasma-Jet Sprayed

Ceramic Coatings. *Research Papers Faculty of Materials Science and Technology Slovak University of Technology*. 2010. Vol. 18, no. 28. P. 27–37. DOI: <https://doi.org/10.2478/v10186-010-0003-5>.

107. Роп'як Л. Я., Остапович В. В. Дослідження впливу режимів алмазного шліфування на шорсткість хромового покриття методом математичного планування експерименту. *Наукові нотатки: міжвуз. зб. Луцьк*, 2016. Вип. 53. С. 131–139.

108. Kusyi Y., Stupnytsky V., Kostiuk O., Onysko O., Dragašius E., Baskutis S., Chatys R. Control of the parameters of the surface layer of steel parts during their processing applying the material homogeneity criterion. *Eksploatacja i Niezawodnosc*. 2024. Vol. 26, no. 3. Art. 187794. DOI: <https://doi.org/10.17531/ein/187794>.

109. Onysko O., Kopei V., Barz C., Kusyi Y., Baskutis S., Bembenek M., Dašić P., Panchuk V. Analytical Model of Tapered Thread Made by Turning from Different Machinability Workpieces. *Machines*. 2024. Vol. 12, no. 5. Art. 313. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines12050313>.

110. Vukelic D., Milosevic A., Ivanov V., Kocovic V., Santosi Z., Sokac M., Simunovic G. Modelling and optimization of dimensional accuracy and surface roughness in dry turning of Inconel 625 alloy. *Advances in Production Engineering and Management*. 2024. Vol. 19, no. 3. P. 371–385. DOI: <https://doi.org/10.14743/apem2024.3.513>.

111. Kusyi Y., Stupnytsky V., Onysko O., Dragašius E., Baskutis S., Chatys R. Optimization synthesis of technological parameters during manufacturing of the parts. *Eksploatacja i Niezawodnosc*. 2022. Vol. 24, no. 4. P. 655–667. DOI: <https://doi.org/10.17531/ein.2022.4.6>.

112. Остапович В. В., Роп'як Л. Я., Годлевський А. Ю. Вплив зносу деталей пари «крейцкопф – напрямні» поршневого насоса двосторонньої дії на його кінематичні та силові параметри. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2011. № 3 (29). С. 64–70.

113. Буріння свердловин: довідник у 5 т. Т. 1 Загальні відомості. Бурові установки. Обладнання та інструмент / М. А. Мислюк, І. Й. Рибчич, Р. С.

Яремійчук. Київ : Інтерпрес ЛТД, 2002. 367 с.

114. Jane Helena H. Theory of elasticity and plasticity. PHI Learning Pvt. Ltd., 2017. 248 p.

115. Gere J. M., Goodno B. Mechanics of materials. Stamford : Cengage Learning, 2012. 620 p.

116. Гладкий С. І., Палажченко С. П. Розроблення обладнання для дослідження вузлів тертя, що працюють при зворотно-поступальному русі. *Науковий вісник ІФНТУНГ*. 2015. № 2 (39). С. 89–100.

117. Остапович В. В. Вплив технології зміцнення на показники якості та експлуатаційні властивості змінних деталей поршневих насосів двосторонньої дії. *Наукові нотатки*. 2015. Вип. 52. С. 126–134. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nn_2015_52_26

118. Патент на корисну модель № 72832 Україна, МПК В24В 39/04. Інструмент для фрикційно-зміцнюючої обробки деталей [Текст] / В. В. Остапович, Л. Я. Роп'як; заявник та патентовласник В. В. Остапович, Л. Я. Роп'як. № u201202858; заявл. 12.03.2012; опубл. 27.08.2012, Бюл. № 16. 5 с. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/627690/>

119. Горбачевич А.Ф., Шкред В.А. Курсовое проектирование по технологии машиностроения: учебное пособие для машиностроительных специальностей вузов. Мн. : Высшая школа, 1983. 256 с.

120. Kustov V. V., Ropyak L. Ya., Makoviychuk N. V., Ostapovich V. V. Determination of the optimal allowances for machining of parts with coating. *Metallurgical and Mining Industry*. 2016. № 1. P. 164 – 171.

121. International application PCT, Publication Number WO2015076773, IPC C02F9/08, C02F1/72, C01G37/14, C02F101/22. Method for cleaning industrial water and wastewater of chromium compounds. Nosovskyi O. I., Verovka O. S. Publication Date 28.05.2015, International Application No.PCT/UA2014/000034, International Filing Date 20.03.2014, Priority Data u 201313557 21.11.2013 UA. ULR: https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2015076773&_cid=P11-L26LP4-89503-1 (дата звернення: 07.03.2025).

ДОДАТКИ

Додаток А.

Список опублікованих праць за темою дисертації

Розділ колективної монографії

1. Роп'як Л. Я., Величкович А. С., Витвицький В. С., Шовкопляс М. В. Розділ 8. Дослідження впливу похибок виготовлення, складання та зношування на кінематико-силові параметри насоса для визначення режимів випробовування зміцнених деталей. *Проблеми безпечної експлуатації компресорного та насосного обладнання в сучасній промисловості: колективна монографія* / за ред. В. Б. Тарельника, Є. В. Коноплянченка. Суми: ФОП Литовчено Є. Б., 2020. 410 с. ISBN 978-966-97721-8-30.

Наукові праці у наукових фахових виданнях України та у наукових виданнях, проіндексованих у базах Scopus i Web of Science:

2. Ropyak L. Ya., Shovkoplias M. V., Vytvytskyi V. S. Determination of machinig allowance for parts with chrome coatings. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2021. № 2. С. 117–127. DOI: <https://doi.org/10.24025/2306-4412.2.2021.242339>.

3. Роп'як Л. Я., Шовкопляс М. В., Витвицький В. С., Стрілецький Ю. Й. Вплив технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування на експлуатаційні властивості покриттів. *Вісник Сумського національного аграрного університету*. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів. 2021. № 3 (45). С. 48–56. DOI: <https://doi.org/10.32845/msnau.2021.3.7>.

4. Посувайло В. М., Шовкопляс М. В., Малінін В. Ю., Романів М. М. Порівняння методів поверхневого зміцнення деталей машин покриттями. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2021. Вип. 4. С. 83–97. DOI: <https://doi.org/10.24025/2306-4412.4.2021.253298>.

5. Bazaluk O., Dubei O., Ropyak L., Shovkoplias M., Pryhorovska T., Lozynskyi V. Strategy of compatible use of jet and plunger pump with chrome parts in oil well.

Energies. 2022. Vol. 15, no. 1. Art. 83. (Scopus, WoS, Q1). DOI: <https://doi.org/10.3390/en15010083>.

6. Dubei O. Ya., Tutko T. F., Ropyak L. Ya., Shovkopliash M. V. Development of Analytical Model of Threaded Connection of Tubular Parts of Chrome-Plated Metal Structures. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. 2022. Vol. 44, no. 2. P. 251–272. (Scopus, Q3). DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.44.02.0251>.

7. Роп'як Л. Я., Николайчук М. Я., Шовкопляс М. В., Витвицький В. С., Романів М. М., Білінський В. М. Автоматизована установка для очищення гальванічних відходів. *Вісник Сумського національного аграрного університету*. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів. 2022. № 2 (44). С. 70–80. DOI: <https://doi.org/10.32845/msnau.2021.2.15>.

8. Величкович А. С., Шовкопляс М. В., Витвицький В. С., Роп'як Л. Я. Аналіз напруженого стану штока поршневого насоса із функціональним покриттям при геометричних дефектах системи «крейцкопф – напрямні». *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2025. № 1 (58). С. 15–24. DOI: [https://doi.org/10.31471/1993-9965-2024-1\(57\)-44-51](https://doi.org/10.31471/1993-9965-2024-1(57)-44-51)

Патенти на винаходи і корисні моделі та свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір

9. Пат. на корисну модель № 106084. Україна, МПК (2016.01) G01B 5/14. Пристрій для контролю биття бурового долота / Т.О. Пригоровська, Л.Я. Роп'як, О.В. Рогаль, М.В. Шовкопляс. – № u201804522 ; заявл. 24.04.2018 ; опубл. 27.08.2018, Бюл. № 16. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/670928/>

10. Пат. на корисну модель № 129444. Україна, МПК (2016.01) E21B 10/00, E21B 12/00, G01B 5/14. Пристрій для контролю бурового долота / Т.О. Пригоровська, Л.Я. Роп'як, О.В. Рогаль, М.В. Шовкопляс. – № u201805867; заявл. 25.05.2018; опубл. 25.10.2018, Бюл. № 20. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/240424/>

11. Пат. на винахід № 123124. Україна, МПК (2021.02) B01D50/00; B04C9/00; B01D24/46; B01D29/62. Циклон-фільтр для очищення газів або рідин / Л.Я. Роп'як, О.С. Малишевська, М.В. Маковійчук, Т.О. Пригоровська, А.С. Величкович, М.В. Шовкопляс. – № а201909830; заявл. 16.09.2019; опубл. 17.02.2021, Бюл. № 7. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1477700/>

12. Патент на винахід № 126018 Україна, МПК (2006.01) G01N 3/56. Спосіб дослідження процесів трибокрекінгу під час фрикційної взаємодії в металополімерних парах тертя та пристрій для його здійснення / О.І. Вольченко; Д.О. Вольченко, М. Й. Бурда, Л.Я. Роп'як, Д.Ю. Журавльов, В.С. Витвицький, М.В. Шовкопляс; заявник і власник Івано-Франківський націонал. техн. ун-т нафти і газу. – № а201809783; заявл. 01.10.2018; опубл. 03.08.2022, Бюл. № 31. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1700648/>

13. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 111299. Комп'ютерна програма «Визначення еквівалентних напружень у вкритій хромовим покриттям ділянці штока бурового насоса в умовах нештатного кінематичного навантаження» Роп'як Л. Я., Величкович А. С., Витвицький В. С., Шовкопляс М. В., Дубей О. Я., Тутко Т. Ф. Дата реєстрації: 25.01.2022. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1695294/>

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

14. Кустов В. В., Витвицький В. С., Шовкопляс М. В. Оптимізація режимів різання під час токарної обробки деталей з покриттям. *Графічна освіта у закладах вищої освіти: стан та перспективи* : зб. тез доп. наук.-практ. семінару, Івано-Франківськ, 19–21 верес. 2018 р. Івано-Франківськ, 2018. С. 104–105.

15. Ropyak L. Y., Velychkovych A. S., Vytvytskyi V. S., Shovkopliash M. V. Analytical study of “crosshead – slide rail” wear effect on pump rod stress state. *16th International Scientific and Engineering Conference “Hermetic Sealing, Vibration Reliability and Ecological Safety of Pump and Compressor Machinery”* (HERVICON+PUMPS 2020), 8–11 верес. 2020 р., Суми, Україна. Journal of Physics: Conference Series. 2021. Т. 1741, № 1. № 012039. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1741/1/012039>

16. Ropyak L. Y., Vytvytskyi V. S., Velychkovych A. S., Pryhorovska T. O., Shovkopliias M. V. Study on grinding mode effect on external conical thread quality. *11th International Conference on Advanced Manufacturing Technologies (ICAMaT 2020)*, 29–30 жовт. 2020 р. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Т. 1018, № 1. № 012014. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1018/1/012014>

17. Барц К., Роп'як Л. Я., Стрілецький Ю. Й., Шовкопляс М. В. Автоматизована система контролю технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування. *Датчики, прилади та системи – 2021: зб. тез IX Міжнар. наук.-техн. конф., с. Лазурне, Херсон. обл., 20–24 верес. 2021 р. Черкаси, 2021. С. 22–23.*

URL:<https://er.chdtu.edu.ua/bitstream/ChSTU/3355/1/Збірник%20матеріалів%20МНТК%20ДПС-2021.pdf>

18. Роп'як Л. Я., Романів М. М., Шовкопляс М. В., Малінін В. Ю., Здерко О. Р. Моделювання потоку електроліту в електрохімічній комірці для нанесення покриттів. *Прогресивні технології у машинобудуванні (РТМЕ–2022): зб. наук. пр. X Міжнар. наук.-техн. конф., Івано-Франківськ – Яремче, 1–5 лют. 2022 р. Івано-Франківськ – Яремче, 2022. С. 127–129.*

URL:https://drive.google.com/file/d/1Fw5epmBruamKZjUg-1KvhlOSOugU_6Vj/view

19. Роп'як Л. Я., Шовкопляс М. В. Дослідження процесу алмазного шліфування хромових покриттів. *Процеси механічної обробки, верстати та інструмент: зб. наук. пр. XII Всеукр. наук.-техн. конф. з міжнар. участю, Житомир, 9–10 листоп. 2023 р. Житомир, 2023. С.131–132. URL: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/12/povnyj-tekst-1.pdf>*

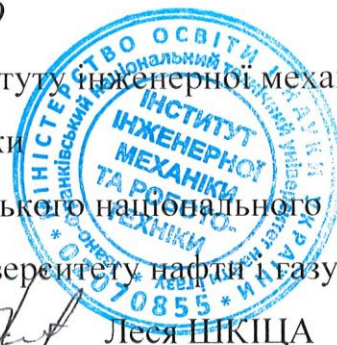
20. Шовкопляс М. В., Роп'як Л. Я. Дослідження трибологічних властивостей хромових покриттів. *Молодь в авіації: нові рішення та перспективні технології: тези доп. Всеукр. наук.-техн. конф. студентів, аспірантів і молодих учених з міжнар. участю, присвяченої 125-річчю Нац. ун-ту «Запоріж. політехніка», 21–22 листоп. 2024 р., Запоріжжя / Нац. ун-т «Запоріж. політехніка». Запоріжжя, 2024. С. 103–105.*

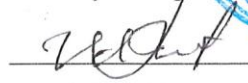
Додаток В.

Акт впровадження у навчальний процес

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор інституту інженерної механіки
та робототехніки
Івано-Франківського національного
технічного університету нафти і газу.



 Леся ШКІЦА
«07» березня 2025 р

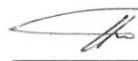
АКТ

про використання результатів науково-дослідницьких робіт

Результати дисертаційного дослідження ШОВКОПЛЯСА Максима Володимировича **«ПІДВИЩЕННЯ РЕСУРСУ РОБОТИ ЦИЛІНДРО-ПОРШНЕВОЇ ПАРИ БУРОВИХ НАСОСІВ»** використовуються в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу на кафедрі «Комп'ютеризованого машинобудування» під час підготовки магістрів та аспірантів за спеціальністю 131 – Прикладна механіка при вивченні дисциплін «Технічна творчість і захист інтелектуальних прав» та «Експериментальні дослідження в прикладній механіці». Впровадження результатів досліджень у навчальний процес сприяє ширшому ознайомленню студентів із сучасними технологічними процесами зміцнення деталей машин, що забезпечує підвищення теоретичного та практичного рівня їх підготовки.

Завідувач кафедри

комп'ютеризованого машинобудування



Віталій ПАНЧУК

Професор кафедри

комп'ютеризованого машинобудування



Любомир РОП'ЯК

Здобувач



Максим ШОВКОПЛЯС

Додаток Г.

Акт впровадження у виробництво

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
 Директор
 ТЗОВ НТФ «ІНТЕРБУР» ЛТД
 Мирослав БІЛЕЦЬКИЙ
 «07» листопада 2025 р.
АКТ

впровадження результатів дисертаційного дослідження ШОВКОПЛЯСА Максима Володимировича «ПІДВИЩЕННЯ РЕСУРСУ РОБОТИ ЦИЛІНДРО-ПОРШНЕВОЇ ПАРИ БУРОВИХ НАСОСІВ»

1. *Детальна назва впровадження:* технологічні процеси виготовлення нових і відновлення зношених змінних деталей поршневих насосів двосторонньої дії комплексним методом, який поєднує поверхневе гартування струмами високої частоти, фрикційне зміцнення та нанесення шару електрохімічного хромового покриття в проточному електроліті, а також подальшу механічну обробку алмазним шліфуванням, що вирішує питання підвищення якості поверхонь та зниження затрат на зміцнення.

2. *Назва підприємства, де зроблено впровадження:*
 ТЗОВ НТФ «ІНТЕРБУР» ЛТД, м. Івано-Франківськ.

3. *Основні результати впровадження:* впроваджені технологічні процеси сприяють підвищенню зносостійкості та довговічності змінних деталей поршневих насосів двосторонньої дії забезпечуючи при цьому високу якість робочих поверхонь завдяки поєднанню термічного, фрикційного зміцнення та електрохімічного нанесення хромового покриття, що суттєво розширює технологічні можливості виготовлення нового та відновлення зношеного обладнання.

Наукові керівники:

професор кафедри комп'ютеризованого
 машинобудування ІФНТУНГ,
 д.т.н., проф.

 Любомир РОП'ЯК

доцент кафедри
 будівництва ІФНТУНГ, к.т.н., доц.

 Андрій ВЕЛИЧКОВИЧ

Здобувач

 Максим ШОВКОПЛЯС