

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

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

РОМАНІВ Микола Миколайович

УДК 621.92:621.793

ДИСЕРТАЦІЯ
УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ФОРМУВАННЯ
МІКРОДУГОВИХ ОКСИДНИХ ПОКРИТТІВ
ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ

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.М. РОМАНІВ

Наукові керівники:

Роп'як Любомир Ярославович,

доктор технічних наук, професор

Бандура Андрій Іванович, доктор

фізико-математичних наук, професор

АНОТАЦІЯ

РОМАНІВ М.М. Удосконалення технології формування мікродугових оксидних покриттів для підвищення якості поверхонь деталей – 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 у галузі технології машинобудування щодо розроблення технологічних засобів для підвищення ресурсу роботи нафтогазового обладнання шляхом мікродугового оксидування (МДО) поверхневого алюмінієвого шару деталей машин.

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

Мета дисертаційної роботи – удосконалення технології формування мікродугових оксидних покриттів на алюмінієвих сплавах, їх механічної обробки для підвищення якості та точності поверхонь деталей із алюмінієвих сплавів задля збільшення ресурсу роботи вузлів сальникових та торцевих ущільнень відцентрових насосів.

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

В першому розділі проведено аналіз умов роботи відцентрових насосів вказує на те, що вони використовуються у нафтогазовій, хімічній промисловості тощо. Для запобігання забруднення навколишнього середовища необхідно надійно ущільнювати місця виходу вала з корпусу насоса. У залежності від конструкції відцентрових насосів, використовують торцеві або сальникові ущільнення.

На основі літературного огляду встановлено, що алюмінієві сплави, не дивлячись на багато переваг, непридатні для роботи у парах тертя, особливо в агресивних середовищах із вмістом абразивних частинок. На підставі аналізу літератури можна виокремити такі варіанти будови одно- та багат шарових покриттів з робочим оксидним шаром, який сформований методом мікродугового оксидування.

Із аналізу варіантів будови покриттів із оксидним робочим шаром, їх можна умовно розділити на дві групи:

- тонкі – робочий оксидний шар (без рихлого зовнішнього шару), товщина менше 100 мкм, не потребують подальшої механічної обробки;

- товсті (на робочому оксидному шарі – товщиною більше 100 мкм утворюється зовнішній рихлий шар). Цей шар містить низькотемпературні фази, що складаються, в основному, із компонентів електроліту. Потребують подальшої механічної обробки.

Оксидне покриття частково росте як у тіло заготовки відносно її номінального розміру, так і назовні. Дослідники недостатньо уваги звертають на вплив вихідної шорсткості поверхні алюмінієвих заготовок на шорсткість сформованого МДО покриття, тобто невраховують технологічну спадковість та зміну форми і розмірів зміцненої деталі.

Тому дослідження присвячене створенню технології та обладнання для формування мікродугових оксидних покриттів і забезпечення показників якості (шорсткості) та точності поверхонь деталей алмазним шліфуванням є актуальним і має важливе як наукове, так і практичне значення.

У другому розділі розглянуто задачу аналітичного визначення електричного опору конічного мікроелектрода, геометрія якого ускладнена розрізом похилою площиною. На відміну від відомих наближених методик, розрахунок виконано без спрощувального припущення про рівність висот вертикальної та похилої частин конуса, що дозволило отримати точніші результати для широкого діапазону геометричних співвідношень. Показано, що електричний опір такого електрода описується сумою дробово-раціональної функції та двох невластних інтегралів другого роду від

необмежених функцій, які відображають внесок окремих ділянок поперечного перерізу у загальний опір.

Проведений аналіз продемонстрував, що наявність похилого зрізу призводить до істотного зниження електричного опору в порівнянні зі прямими конічними мікроелектродами. Встановлено гіперболічну залежність опору від радіуса нижньої основи: зі зростанням останнього величина опору зменшується. Числові результати показали, що зменшення електричного опору може досягати 90% за кута нахилу зрізу $\pi/6$ рад та оптимальному співвідношенні радіусів меншої і більшої основ конуса 1:500. Крім того, значне зниження опору, більш як на 30%, спостерігається і при співвідношенні 1:1000 за умови використання оптимального кута нахилу зрізу $\pi/2$ рад.

На основі проведених досліджень запропоновано нову конструкцію мікроелектрода для електрохімічних досліджень покриттів. Вона забезпечує зручне та надійне розташування хлорсрібного електрода порівняння, стабільність електролітичного контакту й водночас характеризується низьким електричним опором завдяки застосуванню мікрокапіляра зі скошеною конічною частиною. Отримані результати мають практичне значення для удосконалення методів електрохімічних вимірювань, підвищення точності реєстрації локальних мікроелекторохімічних характеристик покриття і розширення можливостей використання мікроелектродів у дослідницькій практиці.

У третьому розділі вибрано алюмінієві деформівний Д16Т та литий сплав, АК8М, які широко використовують у різних галузях машинобудування. Вибрано також металорізальне обладнання, різальні інструменти та вимірювальні прилади.

Розроблено новий варіант технологічного процесу зміцнення алюмінієвих деталей МДО, який включав формування оксидного покриття у проточному силікатно-лужному електроліті з додаванням перекису водню. Для реалізації запропонованого технологічного процесу формування покриттів мікродуговим оксидуванням:

– модернізовано установку для формування оксидних покриттів у проточному електроліті, яка оснащена автоматизованою системою керування технологічними параметрами процесу МДО та забезпечує підтримання на заданому рівні: співвідношення концентрацій компонентів електроліту, швидкості потоку, густини струму, співвідношення катодного і анодного струмів, та температури електроліту, а також дозволяє контролювати величину водневого показника електроліту та його електричного опору;

– удосконалено конструкцію електрохімічних комірок для МДО в проточному електроліті внутрішньої поверхні втулки та зовнішньої поверхні вала.

Для скорочення кількості дослідів використовували планування експериментів:

– планування експериментів для оптимізації технологічних параметрів процесу МДО алюмінію в проточному електроліті;

– повнофакторний експеримент – для побудови математичних моделей впливу технологічних режимів різання на шорсткість обробленої поверхні, величину сил різання та питому витрату алмазів під час шліфування мікродугових оксидних покриттів.

Також у цьому розділі описано методики дослідження властивостей оксидних покриттів: визначення шорсткості, мікротвердості, міцності зчеплення покриття з основою, мікроструктури покриттів з використанням скануючого електронного мікроскопа та електрохімічних досліджень. Запропоновано використати методику електрохімічних вимірювань для визначення рівня допустимих напружень в зразках з оксидним покриттям за стрибком електродного потенціалу. Для оцінки фрикційної термостійкості оксидних покриттів експерименти проводили на машині для випробування матеріалів на тертя УМТ-1 під час сухого тертя зразків за схемою «кільце–кільце».

У четвертому розділі представлено результати технологічних досліджень процесу мікродугового оксидування алюмінієвих деталей у проточному електроліті та їх подальшої механічної обробки. Проведені експерименти дали

змогу встановити закономірності формування оксидних шарів та їх вплив на точність і якість оброблених поверхонь. На основі аналізу отриманих даних побудовано математичну модель процесу МДО, що дозволила визначити оптимальні значення параметрів технології. Встановлено, що значення параметрів, за яких досягається максимальна мікротвердість покриттів, практично збігаються з параметрами, що забезпечують мінімальне зношування. Зокрема, оптимізація за критерієм мінімального зносу ($W = 10,80548$ г) дала такі значення факторів: концентрація H_2O_2 – 8,61 %, густина струму – 6,78 А/дм², швидкість потоку електроліту – 106,68 см/с, температура – 56,85 °С.

Окрему увагу приділено впливу режимів алмазного шліфування на властивості оксидних шарів. Експериментальні дослідження показали, що раціональний вибір глибини різання, швидкості подачі та швидкості круга дозволяє зменшити сили різання, знизити питомі витрати алмазів і забезпечити необхідну шорсткість поверхні. На основі повнофакторного експерименту отримано математичні моделі залежностей шорсткості, колової та радіальної складових сил різання, а також питомої витрати алмазів від режимів алмазного шліфування.

Мікроскопічні дослідження підтвердили формування рівномірної мікроструктури оксидних шарів із низькою пористістю та високою адгезією до основного матеріалу, що гарантує їхню високу якість. Доведено, що деталі з оксидними покриттями, отриманими за розробленою технологією, характеризуються підвищеною зносостійкістю в умовах тертя та мають покращені теплозахисні властивості. Це забезпечує їх ефективне застосування у вузлах тертя та деталях, які працюють при високих температурах і навантаженнях.

Провели електрохімічні дослідження захисної дії оксидного покриття. Поляризаційні криві катодна та анодна зняті в 3 % NaCl свідчать, про високі захисні властивості оксидного покриття.

У п'ятому розділі розглянуто схеми утворення розмірів покриттів сформованих МДО на алюмінієвих деталях із тонким робочим оксидним

шаром, що не потребує механічної обробки та із товстим робочим оксидним шаром, що потребує механічної обробки (алмазним шліфуванням).

Досліджено вплив процесу мікродугового оксидування на формування геометричних параметрів алюмінієвих деталей. Встановлено, що оксидне покриття формується як всередину матеріалу, так і назовні відносно номінального розміру заготовки, причому характер змін залежить від складу сплаву, електроліту та режимів обробки.

Розроблено технологічну схему створення комбінованих покриттів, яка поєднує МДО з механічною обробкою алмазним шліфуванням, що дозволяє забезпечити високу якість оксидних шарів і довговічність деталей. Запропоновано практичні рекомендації щодо вибору електроліту, параметрів обробки та післяопераційного шліфування.

Створено систему очищення відпрацьованого електроліту з автоматизованим керуванням, яка забезпечує повторне його використання, зменшує витрати та екологічний вплив. Стендові випробування показали, що втулки та торцеві ущільнення, зміцнені МДО, мають зносостійкість у 1,55 та 1,4 рази вищу за серійні. Практичне впровадження в ТзОВ «Побережський завод пресових агрегатів» (м. Івано-Франківськ) підтвердило ефективність технології, а розробки інтегровано в навчальний процес університету.

У **висновках** наведено основні результати дисертаційної роботи під час розв'язання поставлених технічних 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 технології формування мікродугових оксидних покриттів для підвищення якості поверхонь алюмінієвих деталей.

При цьому:

- розроблено нову математичну модель конічного мікроелектрода зі зрізаною похилою площиною, що забезпечує значне зниження електричного опору та підвищує точність і відтворюваність локальних електрохімічних вимірювань шорстких поверхонь покриттів;

- удосконалено конструкцію мікроелектрода, що забезпечує зниження електричного опору на 30–90 % залежно від співвідношення геометричних параметрів та кута нахилу зрізу, підвищуючи точність і відтворюваність електрохімічних вимірювань МДО-покриттів;

- розвинуто комплексну технологію МДО алюмінієвих сплавів із відповідним технічним забезпеченням, що дозволяє визначати максимально допустимий рівень шорсткості заготовки перед формуванням оксидного шару, забезпечуючи стабільність та високу якість покриття;

- удосконалено установку МДО з автоматизованою системою керування, що забезпечує стабільність технологічних параметрів та контроль процесу формування шарів;

- розвинуто математичні моделі процесу МДО, які дозволяють визначати оптимальні параметри для досягнення максимального рівня мікротвердості та мінімального зношування покриттів, що забезпечує одночасне підвищення їх зносостійкості та експлуатаційних характеристик;

- вперше розроблено моделі залежності шорсткості поверхні, сил різання та питомої витрати абразиву від параметрів шліфування, які дозволяють обґрунтовано визначати оптимальні режими механічної обробки;

- удосконалено систему очищення відпрацьованого електроліту з автоматизованим керуванням процесами нейтралізації та осадження, що забезпечує повторне використання розчинів, зниження витрат і мінімізацію негативного впливу на довкілля;

Таким чином, наукова новизна дисертації полягає у створенні комплексного підходу до проектування МДО-покриттів, що включає: удосконалені конструкції мікроелектродів для контролю шорсткості, визначення оптимальних параметрів підготовки заготовок, контроль та регулювання залишкових напружень, а також вибір ефективних режимів формування та механічної обробки, що забезпечують підвищену зносостійкість, точність і експлуатаційну надійність алюмінієвих деталей.

Практична цінність отриманих результатів для науки і техніки: полягає у створенні та впровадженні технології зміцнення алюмінієвих деталей машин

оксидними покриттями. Розроблена технологія дозволяє формувати покриття як на ливарних, так і на деформівних алюмінієвих сплавах, що робить її придатною для виготовлення нових деталей або ремонту зношених вузлів машин.

Створено методичне та технічне забезпечення для проведення електрохімічних досліджень, корозійних випробувань та випробувань на зносостійкість деталей із покриттями.

Розроблені технології та обладнання успішно впроваджено у виробництво, а також у навчальний процес на кафедрі комп'ютеризованого машинобудівного виробництва Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, що підтверджує їх практичну та наукову значущість.

Ключові слова: технологічний процес, мікродугове оксидування, електродугове напилення, покриття, шорсткість поверхні, точність обробки, зміцнення деталей, проточний електроліт, мікротвердість, електрохімічні дослідження, алмазне шліфування, дефектний шар, корозійна стійкість, зносостійкість, оптимізація режимів різання, автоматизована система керування, очищення електроліту.

Список опублікованих праць за темою дисертації

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

1. Посувайло, В.М.; Витвицький, В.С.; Романів, М.М.; Пригоровська, Т.О. Вплив технологічних параметрів процесу плазмоелектролітичного оксидування алюмінію на швидкість росту покриттів. *Прикарпатський вісник Наукового Товариства ім. Шевченка. Число 2020, 1(59), 165–178.* [https://doi.org/10.31471/2304-7399-2020-1\(59\)-165-178](https://doi.org/10.31471/2304-7399-2020-1(59)-165-178)

2. Вольченко, Д. О.; Кіндрачук, М. В.; Скрипник, В. С.; Журавльов, Д. Ю., Романів, М. М. Дослідження водневого зносу важконавантажених металевих фрикційних елементів гальм. *Проблеми тертя та зношування 2021, 91(2), 37–45.* (Фахове видання). [https://doi.org/10.18372/0370-2197.2\(91\).15528](https://doi.org/10.18372/0370-2197.2(91).15528)

3. 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**, 4, 83–97. (Фахове видання). <https://doi.org/10.24025/2306-4412.4.2021.253298>

4. 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), 70–80. (Фахове видання). <https://doi.org/10.32845/msnau.2021.2.15>

5. Ropyak, L.; Shihab, T.; Velychkovych, A.; Bilinskyi, V.; Malinin, V.; Romaniv, M. Optimization of Plasma Electrolytic Oxidation Technological Parameters of Deformed Aluminum Alloy D16T in Flowing Electrolyte. *Ceramics* **2023**, 6(1), 146–167. <https://doi.org/10.3390/ceramics6010010> Scopus, WoS (Q2) <https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=21101062489&tip=sid&clean=0>

6. Роп'як, Л.; Бандура, А.; Романів, М. Дослідження властивостей жаростійких покриттів, сформованих плазмовим електролітичним окисдуванням алюмінієвих сплавів. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу* **2024**, 2(57), 15–24. . (Фахове видання). [https://doi.org/10.31471/1993-9965-2024-2\(57\)-15-24](https://doi.org/10.31471/1993-9965-2024-2(57)-15-24)

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

7. Pashechko, M.; Роп'як, Л.Я.; Стрілецький, Ю.Й.; Романів, М.М. Система автоматичного контролю технологічних параметрів процесу мікродугового окисдування /М. Pashechko, Л. Я. Роп'як, Ю. Й. Стрілецький, М. М. Романів // Збірник тез IX Міжнародної науково-технічної конференції «Датчики, прилади та системи – 2021», присвяченій пам'яті професора Шарапова В.М. с. Лазурне (Херсонська обл.) з 20–24 вересня 2021 р. С. 38–39. <https://er.chdtu.edu.ua/bitstream/ChSTU/3355/1/Збірник%20матеріалів%20МНТК%20ДПС-2021.pdf>

8. 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. Збірник наукових праць X міжнародної науково-технічної конференції «Прогресивні технології у машинобудуванні РТМЕ–2022» 1–5 лютого 2022 р. Івано-Франківськ – Яремче, 2022. С. 127–129.

9. Bembenek, M.; Machnik, R.; Роп'як, Л.Я.; Романів, М.М. Дослідження режимів алмазного шліфування плазмових електролітичних оксидних покриттів. Збірник праць X Міжнародної науково-технічної конференції «Датчики, прилади та системи – 2023», присвяченої пам'яті професора Шарапова В.М. 12–14 вересня 2023, м. Черкаси. С. 107–108.
<https://er.chdtu.edu.ua/bitstream/ChSTU/4653/1/%D0%97%D0%B1%D1%96%D1%80%D0%BD%D0%B8%D0%BA%20%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B5%D1%80%D1%96%D0%B0%D0%BB%D1%96%D0%B2%20%D0%9C%D0%9D%D0%A2%D0%9A%20%D0%94%D0%9F%D0%A1-2023.pdf>

10. Barz, C.; Bembenek, M.; Paszczko, M.; Romaniv, M.; Ropyak, L. Ways to increase technology efficiency of manufacturing parts strengthened by plasma electrolytic oxidation. Збірник праць XV Міжнародної науково-технічної конференції. Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2023: матеріали науково-технічної конференції, 27–28 квітня 2023 р., м. Київ / загальна редакція Р. В. Лютий. – Київ: КПП ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 407с.

11. Романів, М.М.; Роп'як, Л.Я. Особливості формування покриттів на алюмінієвих сплавах плазмовим електролітичним оксидуванням. Всеукраїнська науково-технічна конференція студентів, аспірантів і молодих учених з міжнародною участю «Молодь в авіації: нові рішення та перспективні технології» присвячується 125-річчю Національного університету «Запорізька політехніка» 95-річчю Машинобудівного факультету 20-річчю кафедри "Технології авіаційних двигунів" 80-річчю ДП «ІВЧЕНКО-ПРОГРЕС» 21–22 листопада 2024 р. м. Запоріжжя, Національний університет «Запорізька політехніка»: тези доп. 2024. С. 139-141.

12. Bandura, A.; Ropyak, L.; Romaniv, M. Calculation of the Electrical Resistance of a Cone Microelectrode for Electrochemical Studies of Coatings. In Advanced Manufacturing Processes: Book of Abstracts of the 6 th Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes, Odesa, Ukraine,

September 10–13, 2024 / Volodymyr Tonkonogyi, Vitalii Ivanov (Eds.). Book of Abstracts. Sumy: IATDI, 2024. P. 63. https://tmvi.sumdu.edu.ua/docs/InterPartner-2024_Book%20of%20Abstracts.pdf

13. Величкович, А.; Роп'як, Л.; Романів, М. Аналітичне дослідження напруженого стану стержня з покриттям під час центрального розтягування чи кручення. Інженерія поверхні та реновація виробів: Матеріали 24-ї Міжнародної науково-технічної конференції, 26–27 червня 2024 р. – Київ: АТМ України, 15–19 с. https://atmu.net.ua/downloads/archive/2-24sb_compressed.pdf#page=15

14. Bandura, A.; Ropyak, L.; Romaniv, M. Calculation of the Electrical Resistance of a Cone Microelectrode for Electrochemical Studies of Coatings. Tonkonogyi V., Oborskyi G., Ivanov V., Trojanowska J. (Eds.). 6th Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes, InterPartner 2024, Odesa, Ukraine, September 10–13, 2024. Lecture Notes in Mechanical Engineering, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH (2025) pp. 375–385. https://doi.org/10.1007/978-3-031-82746-4_33 (Scopus Q4).

15. Заявка № а202405272 на видачу патента України на винахід, МПК G01N27/333. Мікроелектрод для електрохімічних досліджень покриттів. Винахідники: Роп'як Л. Я., Бандура А. І., Романів М. М. Заявник і володілець ІФНТУНГ. Заявлено 06.11.2024. (Формальна експертиза). <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1826519/>

ABSTRACT

ROMANIV M.M. Improving the technology of forming micro-arc oxide coatings to improve the quality of parts surfaces – Qualification scientific work in the form of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the 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 a topical scientific and technical problem in the field of mechanical engineering technology regarding the development of technological means for increasing the service life of oil and gas equipment by micro-arc oxidation of the surface aluminum layer of machine parts.

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

The purpose of the dissertation work is the improvement of the technology of forming micro-arc oxide coatings on aluminum alloys, their mechanical processing in order to increase the quality and accuracy of surfaces of aluminum alloy parts, with the aim of extending the service life of stuffing box and mechanical seal assemblies of centrifugal pumps.

In the **introduction**, the relevance of the work is substantiated, the purpose and objectives of the research are formulated, the scientific novelty and practical significance of the obtained results are presented, as well as information about approbation, publications, structure, and volume of the dissertation.

In the **first** chapter, an analysis of the operating conditions of centrifugal pumps indicates that they are used in the oil and gas, chemical industries, etc. To prevent environmental pollution, it is necessary to reliably seal the places where the shaft exits the pump casing. Depending on the design of centrifugal pumps, mechanical or stuffing box seals are used. Based on a literature review, it was established that aluminum alloys, despite many advantages, are unsuitable for operation in friction pairs, especially in aggressive environments containing abrasive particles. Based on

the analysis of the literature, the following variants of single- and multi-layer coatings with a working oxide layer formed by the micro-arc oxidation method can be distinguished. From the analysis of coating structures with a working oxide layer, they can be conditionally divided into two groups:

- thin – the working oxide layer (without the porous outer layer), thickness less than 100 μm , which do not require subsequent mechanical processing;
- thick – on the working oxide layer (with a thickness greater than 100 μm) a porous outer layer is formed. This layer contains low-temperature phases, consisting mainly of electrolyte components, and requires subsequent mechanical processing.

The oxide coating partially grows both into the body of the workpiece relative to its nominal size and outward. Researchers pay insufficient attention to the influence of the initial surface roughness of aluminum workpieces on the roughness of the formed MAO coating, i.e., they do not take into account technological heredity and changes in the shape and dimensions of the strengthened part. Therefore, research devoted to the creation of technology and equipment for the formation of micro-arc oxide coatings and ensuring quality indicators (roughness) and accuracy of part surfaces by diamond grinding is relevant and has important scientific as well as practical significance.

In the **second** chapter, the task of analytical determination of the electrical resistance of a conical microelectrode, whose geometry is complicated by a cut with an inclined plane, is considered. Unlike known approximate methods, the calculation was performed without the simplifying assumption of equality of the heights of the vertical and inclined parts of the cone, which allowed obtaining more accurate results for a wide range of geometric ratios. It was shown that the electrical resistance of such an electrode is described by the sum of a fractional-rational function and two improper integrals of the second kind from unbounded functions, which reflect the contribution of individual sections of the cross-section to the total resistance.

The conducted analysis demonstrated that the presence of an inclined cut leads to a significant decrease in electrical resistance compared to straight conical microelectrodes. A hyperbolic dependence of resistance on the radius of the lower

base was established: with an increase of the latter, the value of resistance decreases. Numerical results showed that the reduction of electrical resistance can reach 90% at a cut inclination angle of $\pi/6$ rad and an optimal ratio of the radii of the smaller and larger bases of the cone of 1:500. In addition, a significant reduction of resistance, by more than 30%, is observed even at a ratio of 1:1000 under the condition of using an optimal cut inclination angle of $\pi/2$ rad.

Based on the conducted studies, a new design of a microelectrode for electrochemical studies of coatings was proposed. It ensures convenient and reliable positioning of the silver chloride reference electrode, stability of the electrolytic contact, and at the same time is characterized by low electrical resistance due to the use of a microcapillary with a beveled conical part. The obtained results have practical significance for improving electrochemical measurement methods, increasing the accuracy of recording local micro-electrochemical characteristics of coatings, and expanding the possibilities of using microelectrodes in research practice.

In the **third** chapter, aluminum wrought alloy D16T and cast alloys AL-7, AK8M, which are widely used in various branches of mechanical engineering, were selected, as well as bronze, steel 45, steel 40Kh, steel 40KhN, and steel 70. Metal-cutting equipment, cutting tools, and measuring instruments were also selected.

A new variant of the technological process of strengthening aluminum parts by MAO was developed, which included the formation of an oxide coating in a flowing silicate-alkaline electrolyte. To implement the proposed technological process of forming coatings by micro-arc oxidation:

- the installation for forming oxide coatings in a flowing electrolyte was modernized, equipped with an automated control system of technological parameters of the MAO process, which ensures maintenance at a given level: the ratio of concentrations of electrolyte components, flow rate, current density, ratio of cathodic and anodic currents, electrolyte temperature, and also allows controlling the hydrogen index (pH) of the electrolyte and its electrical resistance;

- the design of electrochemical cells for MAO in a flowing electrolyte for the inner surface of the sleeve and the outer surface of the shaft was improved using 3D modeling.

To reduce the number of experiments, the following experimental planning was applied:

- planning of experiments to optimize technological parameters of the MAO process;
- planning of experiments to obtain mathematical models of the process of diamond grinding of oxide coatings.

Also, this chapter describes methods of studying the properties of oxide coatings: determining roughness, microhardness, adhesion strength of the coating to the base, determining the level of residual stresses in coatings, studying the microstructure of coatings using an electron microscope, and electrochemical studies. It is proposed to use the method of electrochemical measurements to determine the permissible level of stresses in oxide coatings by the jump in electrode potential. To evaluate the heat resistance to friction of oxide coatings, experiments were conducted on a UMT-1 friction-testing machine under dry friction of samples according to the “ring–ring” face scheme.

In the **fourth** chapter, studies were carried out on the influence of technological parameters of the micro-arc oxidation of aluminum on the microhardness, roughness, and taper of the coating at different values of current density, ratios of mass concentrations of electrolyte components, and electrolyte temperature. The obtained functional dependencies turned out to be concave curves relative to one parameter at fixed values of the other two and reach maxima at certain points.

The influence of technological parameters of the MAO process was established: the ratio of component concentrations ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$), current density, flow rate, electrolyte temperature – which ensure obtaining minimum roughness of the oxide coating and sufficiently high physical-mechanical properties (microhardness and wear resistance), as well as accuracy of part geometry (taper). The technological

parameters of MAO were optimized to obtain the minimum surface roughness of the oxide coating.

The heat-shielding properties of oxide coatings on wrought aluminum alloy D16T and cast aluminum alloy AK8M were also investigated. Steel 40KhN was chosen as a standard.

Electrochemical studies of the protective effect of oxide coatings were conducted. The cathodic and anodic polarization curves obtained in 3% NaCl indicate high protective properties of the oxide coating.

Results of optical and scanning electron microscopy of oxide coatings showed the presence of pores, the occurrence of which is due to the peculiarities of the MAO process. EDS analysis of the coating showed that its composition includes chemical elements both from the alloy itself and from the electrolyte.

The influence of diamond grinding modes of the oxide coating on surface roughness, the magnitude of cutting forces (tangential and radial – with the radial force being greater), and the specific consumption of diamonds of the grinding wheel during tangential grinding was also investigated.

In the **fifth** chapter, schemes of the formation of dimensions of MAO coatings on aluminum parts with a thin working oxide layer that does not require mechanical processing, and with a thick working oxide layer that requires mechanical processing (diamond grinding), are considered.

The change in the ratio of the total thickness of the working oxide layer of the coating to the thickness of its internal part relative to the nominal size of the workpiece depends on MAO duration and the chemical composition of aluminum alloys.

An engineering method was developed for calculating machining allowances for parts with oxide coatings during diamond grinding. It was established that the minimum allowance for obtaining surfaces with minimum roughness after diamond grinding of the MAO oxide coating depends on the total thickness of the coating and increases with its growth. The limiting values of allowances for a coating applied in a

flowing electrolyte are approximately 1.6 times smaller than in a stationary electrolyte.

A technological scheme for processing used MAO electrolyte was developed, which includes processes of sedimentation, neutralization, and purification. A mechatronic approach and computer modeling were applied in designing the plant for implementing the specified technology.

Conclusions present the main results of the dissertation in solving the set tasks.

To achieve the goal, a number of tasks were solved in the dissertation, which made it possible to obtain new results, on the basis of which the scientific novelty of the work was formulated, consisting in the further development of the scientific and applied foundations of improving the technology of forming micro-arc oxide coatings to improve surface quality of parts.

At the same time:

- a mathematical model of a microelectrode for studying a rough surface was developed, which differs from known ones by a reduced electrical resistance of such a microelectrode;
- a technology and its technical support for MAO of aluminum alloys was developed for the first time, which allowed establishing the maximum permissible level of workpiece roughness before forming an oxide coating;
- for the first time, regularities of changes in geometric dimensions of aluminum parts and steel parts with a layer of sprayed aluminum after MAO of their outer layers were established, which made it possible to reasonably determine technological machining allowances, taking into account technological heredity between corresponding surfaces of workpieces and finished parts;
- for the first time, it was found that microhardness distribution across the thickness of the oxide coating is non-uniform, with a maximum near the border with the aluminum base and a zone of reduced microhardness in the substrate of wrought alloy D16T, which allowed proposing technological measures for its alignment;

– for the first time, it was found that residual compressive stresses arise in the oxide coating layer formed on solid or sprayed aluminum, which opens up possibilities for technological regulation of their level;

– the mathematical model of optimization of technological cutting modes during diamond grinding of the oxide coating was improved, differing from known ones by ensuring the required surface roughness of cylindrical surfaces at maximum machining productivity and minimum cost of operation.

Practical value of the obtained results: For the machine-building industry, a technological process for forming micro-arc oxide coatings in a flowing electrolyte with improved surface quality characteristics was developed, which increases the wear resistance of replaceable parts of centrifugal pump seal assemblies.

The obtained results of the conducted research have been implemented in production and in the educational process of training mechanical engineers at the Institute of Mechanical Engineering and Robotics of IFNTUOG.

Keywords: technological process, microarc oxidation, electric arc spraying, coating, surface roughness, machining accuracy, hardening of parts, flowing electrolyte, microhardness, electrochemical studies, diamond grinding, defective layer, corrosion resistance, wear resistance, optimization of cutting modes, automated control system, electrolyte cleaning.

List of published works on the topic of the dissertation

Scientific facts from scientific publications of Ukraine and from scientific publications indexed in Scopus and Web of Science databases:

7. Pashechko, M.; Ropiak, L.Ia.; Striletskyi, Yu.I.; Romaniv, M.M. Systema avtomatychnoho kontroliu tekhnolohichnykh parametriv protsesu mikroduhovoho oksyduvannia /M. Pashechko, L. Ya. Ropiak, Yu. Y. Striletskyi, M. M. Romaniv // Zbirnyk tez IKh Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii «Datchyky, prylady ta systemy – 2021», prysviachenii pam'iaty profesora Sharapova V.M. s. Lazurne (Khersonska obl.) z 20–24 veresnia 2021 r. S. 38–39.

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

8. Ropiak, L.Ia.; Romaniv, M.M.; Shovkoplias, M.V.; Malinin, V.Iu.; Zderko, O.R. Modeliuvannia potoku elektrolitu v elektrokhimichnii komirtsi dlia nanesennia pokryttiv. Zbirnyk naukovykh prats Kh mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii «Prohresyvni tekhnolohii u mashynobuduvanni RTME–2022» 1–5 liutoho 2022 r. Ivano-Frankivsk – Yaremche, 2022. C. 127–129.

9. Bembenek, M.; Machnik, R.; Ropiak, L.Ia.; Romaniv, M.M. Doslidzhennia rezhymiv almaznoho shlifuvannia plazmovykh elektrolitychnykh oksydneykh pokryttiv. Zbirnyk prats Kh Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii «Datchyky, prylady ta systemy – 2023», prysviachenoï pam‘iati profesora Sharapova V.M. 12–14 veresnia 2023, m. Cherkasy. S. 107–108.
<https://er.chdtu.edu.ua/bitstream/ChSTU/4653/1/%D0%97%D0%B1%D1%96%D1%80%D0%BD%D0%B8%D0%BA%20%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B5%D1%80%D1%96%D0%B0%D0%BB%D1%96%D0%B2%20%D0%9C%D0%9D%D0%A2%D0%9A%20%D0%94%D0%9F%D0%A1-2023.pdf>

10. Barz, C.; Bembenek, M.; Pasieczko, M.; Romaniv, M.; Ropyak, L. Ways to increase technology efficiency of manufacturing parts strengthened by plasma electrolytic oxidation. Zbirnyk prats XV Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii. Novi materialy i tekhnolohii v mashynobuduvanni-2023: materialy naukovo-tekhnichnoi konferentsii, 27–28 kvitnia 2023 r., m. Kyiv / zahalna redaktsiia R. V. Liutyi. – Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2023. – 407s.

11. Romaniv, M.M.; Ropiak, L.Ia. Osoblyvosti formuvannia pokryttiv na aliuminiievykh splavakh plazmovym elektrolitychnym oksyduvanniam. Vseukrainska naukovo-tekhnichna konferentsiia studentiv, aspirantiv i molodykh uchenykh z mizhnarodnoiu uchastiu «Molod v aviatsii: novi rishennia ta perspektyvni tekhnolohii» prysviachuïetsia 125-richchiu Natsionalnoho universytetu «Zaporizka politekhnika» 95-richchiu Mashynobudivnoho fakultetu 20-richchiu kafedry "Tekhnolohii aviatsiinykh dvyhuniv" 80-richchiu DP «IVChENKO-PROHRES» 21–22 lystopada 2024 r. m. Zaporizhzhia, Natsionalnyi universytet «Zaporizka

politekhnik» : tezy dop. 2024. S. 139-141.

12. Bandura, A.; Ropyak, L.; Romaniv, M. Calculation of the Electrical Resistance of a Cone Microelectrode for Electrochemical Studies of Coatings. In Advanced Manufacturing Processes: Book of Abstracts of the 6 th Grabchenkos International Conference on Advanced Manufacturing Processes, Odesa, Ukraine, September 10–13, 2024 / Volodymyr Tonkonogyi, Vitalii Ivanov (Eds.). Book of Abstracts. Sumy: IATDI, 2024. P. 63. https://tmvi.sumdu.edu.ua/docs/InterPartner-2024_Book%20of%20Abstracts.pdf

13. Velychkovych, A.; Ropiak, L.; Romaniv, M. Analitychne doslidzhennia napruzhenoho stanu sterzhnia z pokryttiam pid chas tsentralnoho roztyahuvannia chy kruchennia. Inzheneriia poverkhni ta renovatsiia vyrobiv: Materialy 24-yi Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii, 26–27 chervnia 2024 r. – Kyiv: ATM Ukrainy, 15–19 s. https://atmu.net.ua/downloads/archive/2-24sb_compressed.pdf#page=15

14. Bandura, A.; Ropyak, L.; Romaniv, M. Calculation of the Electrical Resistance of a Cone Microelectrode for Electrochemical Studies of Coatings. Tonkonogyi V., Oborskyi G., Ivanov V., Trojanowska J. (Eds.). 6th Grabchenkos International Conference on Advanced Manufacturing Processes, InterPartner 2024, Odesa, Ukraine, September 10–13, 2024. Lecture Notes in Mechanical Engineering, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH (2025) pp. 375–385. https://doi.org/10.1007/978-3-031-82746-4_33 (Scopus Q4).

15. Zaiavka № a202405272 na vydachu patenta Ukrainy na vynakhid, MPK G01N27/333. Mikroelektrod dlia elektrokhimichnykh doslidzhen pokryttiv. Vynakhidnyky: Ropiak L. Ya., Bandura A. I., Romaniv M. M. Zaiavnyk i volodilets IFNTUNH. Zaiavleno 06.11.2024. (Formalna ekspertyza). <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1826519/>

ЗМІСТ

ВСТУП	26
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ ТА МОТИВАЦІЯ ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ	35
1.1 Аналіз умов роботи і причин виходу з ладу деталей ущільнень відцентрових насосів	35
1.2 Аналіз літературних даних та постановка проблеми	38
Висновки до розділу 1	56
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНИЙ РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНОГО ОПОРУ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПОХИЛО ЗРІЗАНОГО ЕЛЕКТРОДА КОНІЧНОЇ ФОРМИ ДЛЯ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ШОРСТКОСТІ ПОВЕРХНІ ПОКРИТТІВ	58
2.1 Використання мікроелектродів для дослідження шорсткої поверхні покриттів	58
2.2 Побудова математичної моделі мікроелектрода	61
2.2.1 Вертикальний горизонтально зрізаний електрод конічної форми	62
2.2.2 Вертикальний похило зрізаний електрод конічної форми.	64
2.3 Результати числового розрахунку	69
2.4 Розроблення нової конструкції мікроелектрода для електрохімічних досліджень покриттів	74
Висновки до розділу 2	78
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ МІКРОДУГОВОГО ОКСИДУВАННЯ АЛЮМІНІЮ, ВИБІР МАТЕРІАЛІВ І МЕТОДИК ДОСЛІДЖЕНЬ	79
3.1 Вибір матеріалів і технологій виготовлення заготовок	79
3.1.1 Досліджувані алюмінієві сплави	79
3.1.2 Верстати, різальний та вимірювальний інструмент	80
3.2 Розробка технології та обладнання для мікродугового оксидуванням алюмінієвих сплавів	80

3.2.1 Технологічний процес мікродугового оксидуванням	80
3.2.2 Розробка установки для мікродугового оксидування в електроліті з автоматизованою системою керування	82
3.2.3 Моделювання руху електроліту в міжелектродному просторі електрохімічної комірки	83
3.3 Методика випробовування оксидних покриттів на знос	86
3.3.1 Випробовування захисних втулок валів	87
3.3.2 Випробовування кілець торцевих ущільнень	87
3.4 Методики дослідження будови, фізико-механічних та електрохімічних властивостей оксидних покриттів	88
3.4.1 Методика виготовлення шліфів	88
3.4.2 Методика визначення шорсткості	89
3.4.3 Методика визначення мікротвердості та товщини покриттів	90
3.4.4 Визначення міцності зчеплення оксидного покриття	91
3.5 Планування експериментів для оптимізації технологічних процесів	92
3.5.1 Планування експерименту для оптимізації технологічних параметрів процесу ПЕО в проточному електроліті	92
3.5.2 Планування експерименту впливу складових технологічних режимів різання на шорсткість обробленої поверхні, величину сил різання та питому витрату алмазів у процесі шліфування мікродугових оксидних покриттів	95
3.5.3 Дослідження впливу режимів алмазного шліфування на шорсткість поверхні керамічного оксидного покриття, сили різання та витрату алмазів кругом	99
3.6 Електрохімічні дослідження і визначення рівня допустимих напружень у зразках з покриттями	103
3.6.1 Побудова поляризаційних кривих	103
3.6.2 Визначення допустимого рівня напружень у вкритих зразках	104
3.7. Дослідження мікроструктури та пористості оксидних покриттів	105

Висновки до розділу 3	106
РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ МІКРОДУГОВОГО ОКСИДУВАННЯ НА ПОКАЗНИКИ ТОЧНОСТІ ТА ЯКОСТІ ДЕТАЛЕЙ	108
4.1 Дослідження процесу мікродугового оксидування	108
4.2 Оптимізація технологічних параметрів процесу мікродугового оксидування в проточному електроліті для забезпечення зносостійкості	112
4.3 Дослідження впливу режимів алмазного шліфування мікродугового оксидного покриття на складові величин сил різання, витрату алмазів та шорсткість поверхні	118
4.3.1 Експериментальні дослідження впливу режимів круглого алмазного шліфування МДО покриттів	118
4.3.2 Результати повнофакторного експерименту для вивчення колової сили різання, радіальної сили різання та питомої витрати алмазів шліфувального круга під час шліфування оксидного покриття	121
4.3.3 Результати досліджень шорсткості поверхні оксидного покриття	131
4.4. Мікроскопічні дослідження оксидного покриття	138
4.5 Роботоздатність деталей з оксидними покриттями	140
4.6 Теплозахисні властивості оксидних покриттів	141
Висновки до розділу 4	143
РОЗДІЛ 5 ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	145
5.1 Дослідження утворення розмірів алюмінієвих деталей під час зміцнення мікродуговим оксидуванням	145
5.2 Розробка технологічної схеми отримання комбінованими методами покриттів із робочим оксидним шаром, сформованим мікродуговим оксидуванням	151

5.3 Практичні рекомендації щодо застосування технології формування оксидних покриттів на деталях мікродуговим оксидуванням	152
5.4 Розроблення системи очищення відпрацьованого електроліту мікродугового оксидування алюмінію з автоматизованою системою керування	155
5.5 Результати стендових випробовувань алюмінієвих деталей зміцнених мікродуговим оксидуванням	162
5.5.1 Випробовування захисних втулок вала відцентрового насоса	162
5.6.2 Випробовування торцевих ущільнень вала відцентрового насоса	162
5.7 Практичне застосування розробленої технології мікродугового оксидування деталей	163
Висновки до розділу 5	165
ВИСНОВКИ	168
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	170
ДОДАТКИ	191
Додаток А. Список опублікованих праць за темою дисертації	192
Додаток Б. Зміцнювані змінні деталі відцентрового насоса	196
Додаток В. Акт впровадження у навчальний процес	197
Додаток Г. Акт впровадження у виробництво	198

ВСТУП

Актуальність теми. Однією з ключових задач сучасного машинобудування є забезпечення високої надійності та довговічності роботи машин, агрегатів і промислового обладнання, особливо такого, що використовується в нафтогазовій галузі. Умови експлуатації цього обладнання є вкрай складними, адже воно функціонує в агресивних середовищах, які містять не лише корозійно-активні компоненти, але й значну кількість твердих абразивних частинок. Ці фактори суттєво прискорюють процеси зношування робочих поверхонь деталей, призводять до зниження ресурсу їх роботи та виникнення аварійних ситуацій.

Традиційно для виготовлення відповідальних деталей нафтогазового обладнання застосовуються вуглецеві сталі, які після термічної обробки (загартування) здатні забезпечувати достатню міцність. Однак у таких умовах експлуатації сталі мають істотний недолік – відбувається процес наводнення металу, в результаті чого виникає сульфідне розтріскування. Це явище значно знижує опір сталі до корозійного руйнування та робить її використання у низці випадків малоефективним.

Як альтернатива сталі дедалі більше уваги приділяється використанню алюмінієвих сплавів, які характеризуються низькою густиною, високою питомою міцністю, доброю технологічністю та зручністю в обробленні різанням. Завдяки цим властивостям алюмінієві сплави є привабливими матеріалами для машинобудування. Проте їхні обмеження також очевидні – вони мають невисоку твердість і, відповідно, низьку зносостійкість, що робить їх менш придатними для тривалої роботи в умовах інтенсивного тертя та впливу абразивних частинок.

Для підвищення експлуатаційної стійкості алюмінію і його сплавів традиційно застосовують захисні покриття та наплавки з карбідних матеріалів.

У зв'язку з цим перспективним напрямом вирішення проблеми підвищення зносостійкості алюмінієвих деталей є застосування оксидних покриттів. Відомі різні методи формування оксидних шарів: хімічне оксидування, плазмове напилення, детонаційне напилення та високошвидкісне холодне напилення, які

забезпечують отримання багат шарових твердих покриттів, але потребують складного обладнання та значних енергетичних витрат.

Серед усього різноманіття технологій особливе місце займає мікродугове оксидування (МДО). Важливо зазначити, що заготовку для такого процесу доцільно виготовляти з алюмінію або литих чи деформівних алюмінієвих сплавів залежно від вимог до міцності й жорсткості конкретної деталі. Далі на робочих поверхнях формується оксидний шар заданої товщини за допомогою мікродугового оксидування. Це дозволяє гнучко регулювати експлуатаційні характеристики деталі, адаптуючи їх до конкретних умов експлуатації.

Разом із тим, незважаючи на очевидні переваги, процес МДО ще недостатньо досліджений. Це стосується, перш за все, питань керування його технологічними параметрами. Сьогодні відсутні науково обґрунтовані рекомендації щодо вибору оптимальних заготовок та параметрів їх попередньої підготовки (зокрема, шорсткості поверхні перед проведенням МДО), а також недостатньо вивчено, як змінюються геометричні розміри деталей після формування оксидного шару. Проблемним є й питання подальшої механічної обробки деталей з оксидним покриттям, адже необхідно забезпечувати не лише задану точність розмірів, але й відповідну якість робочих поверхонь.

Таким чином, удосконалення технології формування мікродугових оксидних покриттів для алюмінієвих деталей набуває особливої актуальності. Вирішення цієї задачі дозволить суттєво підвищити якість оброблених поверхонь, покращити зносостійкість і корозійну стійкість деталей, а отже – збільшити ресурс роботи нафтогазового обладнання. Це, своєю чергою, матиме вагомий економічний ефект за рахунок зниження витрат на ремонт і заміну деталей, а також сприятиме підвищенню безпеки та надійності функціонування технологічних систем.

У зв'язку з викладеним, дана дисертаційна робота спрямована на вирішення актуальної науково-прикладної проблеми в галузі технології машинобудування – розроблення теоретичних основ і практичних технологічних рішень, що дозволять удосконалити процес формування мікродугових оксидних покриттів на поверхнях

алюмінієвих деталей, забезпечити підвищення якості їх робочих поверхонь і тим самим збільшити термін служби нафтогазового обладнання.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Дисертаційна робота виконувалась у рамках НДР, де здобувач був виконавцем:

1. «Розробка комплексної технології покращення експлуатаційних властивостей виробів машинобудування методом мікродугового оксидування», Номер проекту: РК 0119U002231, Термін виконання проекту: 2019–2020 р.р., що фінансувався Міністерством освіти і науки України.

2. «Розробка технології формування жаростійких покриттів плазмовим електролітичним оксидуванням на деталях авіаційної та ракетно-космічної техніки» (2023.04/0160), за конкурсом «Наука для зміцнення обороноздатності України» (0124U003748), 2024–2025 рр., що фінансується Національним фондом досліджень України.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є удосконалення технології формування мікродугових оксидних покриттів на алюмінієвих сплавах, їх механічної обробки для підвищення якості та точності поверхонь деталей із алюмінієвих сплавів задля збільшення ресурсу роботи вузлів сальникових та торцевих ущільнень відцентрових насосів.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі:

1. Розробити аналітичне рішення задачі визначення електричного опору кінцевого мікроелектрода зі зрізаною похилою площиною, що дозволить оцінити вплив геометричних параметрів електрода на електропровідність і стабільність локальних електрохімічних вимірювань.
2. На основі математичної моделі мікроелектрода запропонувати нову конструкцію мікроелектрода зі зниженим опором та підвищеною відтворюваністю електрохімічних досліджень покриттів.
3. Визначити оптимальні матеріали для виготовлення заготовок та розробити технологію їх обробки для забезпечення якісного формування оксидних шарів, а також розробити методики для

дослідження експлуатаційних властивостей деталей із оксидними покриттями.

4. Удосконалити установку для проведення МДО у спокійному та проточному електролітах з автоматизованою системою керування для отримання можливості забезпечення стабільності технологічних параметрів процесу і контролю формування оксидного шару.
5. Побудувати математичні моделі процесу МДО, що дозволять визначати оптимальні параметри обробки за критерієм мінімального зношування та максимальної мікротвердості покриттів.
6. Побудувати математичні моделі залежності шорсткості поверхні, величини сил різання та питомої витрати абразивного матеріалу від параметрів режимів алмазного шліфування.
7. Провести мікроструктурні дослідження оксидних шарів.
8. Розробити систему очищення відпрацьованого електроліту з автоматизованим керуванням процесами нейтралізації та осадження.
9. Провести стендові випробування алюмінієвих деталей із МДО-покриттями.

Об'єкт дослідження. Технологічний процес виготовлення деталей сальникових та торцевих ущільнень відцентрових насосів зі зміцненням робочих поверхонь мікродуговим оксидуванням.

Предмет дослідження. Закономірності формування оксидних шарів на алюмінієвих заготовках з різною шорсткістю поверхні та механічна обробка покриттів.

Методи дослідження. У роботі застосовано системний підхід до вивчення досліджуваного об'єкта, що передбачає комплексне обґрунтування будови заготовок, конструкції покриттів, а також розробку технологій і обладнання для їх формування. Теоретичні дослідження базуються на основах технології машинобудування, теорії різання, а також на методах математичного і комп'ютерного моделювання процесів формування оксидних покриттів та механічної обробки деталей. Для експериментальної частини використано

методи фізичного моделювання, математичного планування експериментів, дисперсійного та кореляційного аналізу, що дозволило системно оцінювати вплив технологічних параметрів на властивості покриттів і деталей. Експериментальні результати отримано на модернізованому технологічному обладнанні для мікродугового оксидування алюмінієвих сплавів, а також для механічної обробки сформованих МДО-покриттів. Для дослідження експлуатаційних властивостей деталей розроблено методики визначення залишкових напружень, проведено мікроелектрохімічні вимірювання та випробування на зношування. Мікроструктуру та будову покриттів вивчали сучасними методами металографії та мікрорентгенівського аналізу, що дозволило отримати комплексні дані про їх товщину, щільність, пористість і адгезію до основного матеріалу. Використання зазначених методів забезпечило обґрунтовану оцінку впливу технологічних режимів МДО та механічної обробки на якість і експлуатаційні характеристики алюмінієвих деталей.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у подальшому розвитку теоретичних та прикладних основ удосконалення технології формування мікродугових оксидних покриттів для підвищення якості поверхонь алюмінієвих деталей:

- розроблено нову математичну модель кінчного мікроелектрода зі зрізаною похилою площиною, що забезпечує значне зниження електричного опору та підвищує точність і відтворюваність локальних електрохімічних вимірювань шорстких поверхонь покриттів;

- удосконалено конструкцію мікроелектрода, що забезпечує зниження електричного опору на 30–90 % залежно від співвідношення геометричних параметрів та кута нахилу зрізу, підвищуючи точність і відтворюваність електрохімічних вимірювань МДО-покриттів;

- розвинуто комплексну технологію МДО алюмінієвих сплавів із відповідним технічним забезпеченням, що дозволяє визначати максимально допустимий рівень шорсткості заготовки перед формуванням оксидного шару, забезпечуючи стабільність та високу якість покриття;

- удосконалено установку МДО з автоматизованою системою керування, що забезпечує стабільність технологічних параметрів та контроль процесу формування шарів;

- розвинуто математичні моделі процесу МДО, які дозволяють визначати оптимальні параметри для досягнення максимального рівня мікротвердості та мінімального зношування покриттів, що забезпечує одночасне підвищення їх зносостійкості та експлуатаційних характеристик;

- вперше розроблено моделі залежності шорсткості поверхні, сил різання та питомої витрати абразиву від параметрів шліфування, які дозволяють обґрунтовано визначати оптимальні режими механічної обробки;

- удосконалено систему очищення відпрацьованого електроліту з автоматизованим керуванням процесами нейтралізації та осадження, що забезпечує повторне використання розчинів, зниження витрат і мінімізацію негативного впливу на довкілля;

Таким чином, наукова новизна дисертації полягає у створенні комплексного підходу до проектування МДО-покриттів, що включає: удосконалені конструкції мікроелектродів для контролю шорсткості, визначення оптимальних параметрів підготовки заготовок, контроль та регулювання залишкових напружень, а також вибір ефективних режимів формування та механічної обробки, що забезпечують підвищену зносостійкість, точність і експлуатаційну надійність алюмінієвих деталей.

Практичне значення одержаних результатів полягає у створенні та впровадженні технології зміцнення алюмінієвих деталей машин оксидними покриттями. Розроблена технологія дозволяє формувати покриття як на ливарних, так і на деформівних алюмінієвих сплавах, що робить її придатною для виготовлення нових деталей або ремонту зношених вузлів машин.

Створено методичне та технічне забезпечення для проведення електрохімічних досліджень, корозійних випробувань та випробувань на зносостійкість деталей із покриттями. Практична реалізація результатів дозволяє підвищити зносостійкість, точність та експлуатаційні властивості

деталей, оптимізувати технологічні режими нанесення та алмазного шліфування, а також підвищити екологічну безпеку використання процесу.

Розроблені технології та обладнання успішно впроваджено у виробництво, а також у навчальний процес на кафедрі комп'ютеризованого машинобудівного виробництва Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, що підтверджує їх практичну та наукову значущість.

Особистий внесок здобувача. Здобувач особисто отримав усі результати та положення, винесені на захист дисертації. Результати дисертаційної роботи отримані здобувачем та опубліковані у співавторстві в публікаціях (Додаток А):

[1] – Дослідження швидкості росту покриттів, обробка та інтерпретація результатів;

[2] – організація та проведення експериментів з водневого зносу, обробка та інтерпретація результатів;

[3] – експериментальне дослідження та моделювання процесів нанесення покриттів.

[4] – розробка та тестування автоматизованої установки для очищення гальванічних відходів, аналіз ефективності роботи;

[5] – постановка експериментів та моделювання технологічних режимів; .

[6] – формування покриттів та характеристика їхніх властивостей; аналіз результатів;

[7] – розробка системи автоматичного контролю технологічних параметрів мікродугового оксидування, аналіз отриманих даних;

[8] – розроблення моделей комірок, проведення імітаційного моделювання та аналіз результатів;

[9] – дослідження режимів алмазного шліфування МДО-покриттів;

[10] – розробка технологічних режимів; підготовка матеріалів до конференції;

[11] – формування покриттів на алюмінієвих сплавах; аналіз отриманих результатів;

[12] – розробка методики розрахунку; аналіз електрохімічних характеристик;

[13] – математичне моделювання напруженого стану стержня з покриттям під час центрального розтягування та кручення, аналіз отриманих даних;

[14] – наукове обґрунтування методики та підготовка рукопису для міжнародного видання;

[15] – участь у формулюванні технічного рішення та підготовці заявки; експериментальна перевірка конструкції.

Здобувач висловлює глибоку подяку:

– за оперативне проведення досліджень оксидних покриттів на алюмінії 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 ВИНARУ 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 всеукраїнських та міжнародних науково-технічних конференціях:

– IX Міжнародна науково-технічна конференція «Датчики, прилади та системи – 2021», с. Лазурне (Херсонська обл.), 2021;

– X міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивні технології у машинобудуванні PTME–2022», Івано-Франківськ – Яремче, 2022;

– X Міжнародна науково-технічна конференція «Датчики, прилади та системи – 2023», Черкаси, 2023;

– XV Міжнародна науково-технічна конференція «Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2023», Київ, 2023

- Всеукраїнська науково-технічна конференція студентів, аспірантів і молодих учених з міжнародною участю «Молодь в авіації: нові рішення та перспективні технології», Запоріжжя, 2024
- 6-та Міжнародна конференція Грабченка з передових виробничих процесів, Одеса, 2024;
- 24-та Міжнародна науково-технічна конференція «Інженерія поверхні та реновація виробів», Київ, 2024;

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 15 наукових публікацій, у тому числі:

- 6 статей у наукових фахових виданнях України (на момент опублікування) за спеціальністю 131 – Прикладна механіка, в т.ч. 6 статей у яких число співавторів (разом із здобувачем) більше двох осіб;
- 1 стаття у періодичних наукових фахових виданнях проіндексованих у базах Scopus та/або Web of Science Core Collection (квартиль Q2);
- 1 заявка на видачу патента України на винахід з експертизою по суті.
- 7 тез виступів на наукових конференціях;

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається із анотації двома мовами, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, який налічує 155 найменувань, та додатків. Загальний обсяг роботи становить 147 сторінок, в тому числі 67 рисунків, 22 таблиці та 4 додатки.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ ТА МОТИВАЦІЯ ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Аналіз умов роботи і причин виходу з ладу деталей ущільнень відцентрових насосів

Відцентрові насоси [16–18] широко застосовуються для перекачування рідин у промисловості, енергетиці та водопостачанні, однак їх працездатність значною мірою залежить від стану ущільнень. Деталі ущільнень працюють у складних умовах, зазнаючи впливу високих обертів ротора, підвищеного тиску, температури та абразивного зносу рідини. Основними причинами виходу з ладу ущільнень є механічне тертя між контактуючими поверхнями, ерозія та корозія матеріалу, утворення задирок і тріщин, а також недостатнє змазування або попадання сторонніх часток. Неправильний монтаж, дисбаланс ротора та коливання тиску також прискорюють знос. Аналіз умов експлуатації дозволяє визначити критичні фактори, що впливають на ресурс ущільнень, і розробити заходи для підвищення надійності відцентрових насосів, включно з підбором зносостійких матеріалів, оптимізацією режимів роботи та застосуванням сучасних конструктивних рішень (рис. 1.1, рис. 1.2).

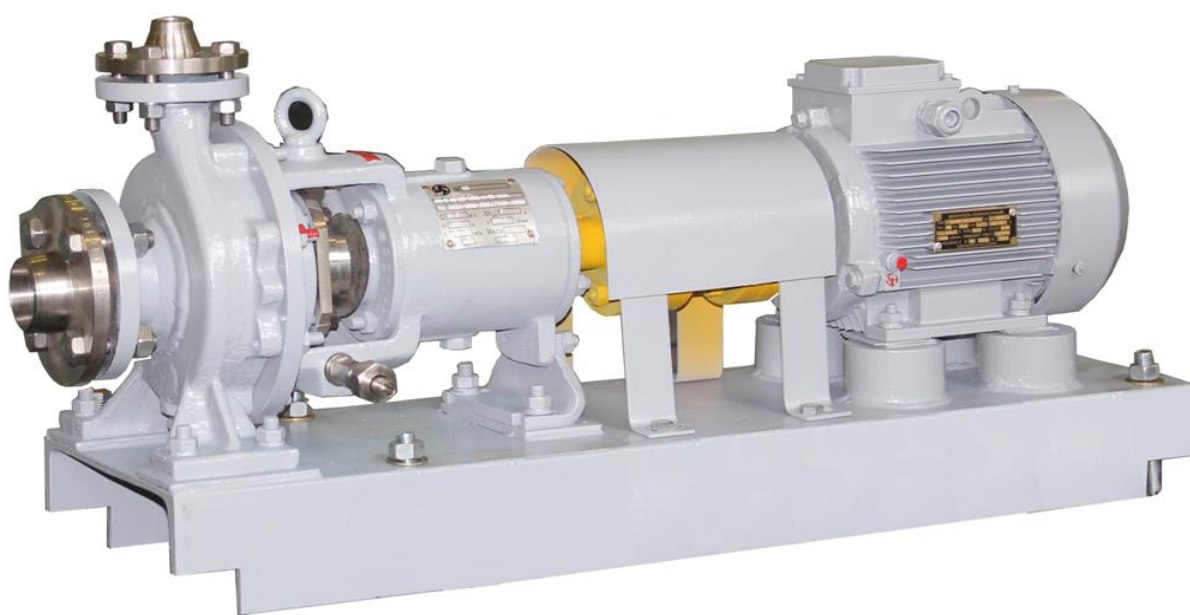


Рисунок 1.1 – Насос відцентровий AX 280/42 із торцевим ущільненням



Рисунок 1.2 – Вузол торцевого ущільнення

Захисні втулки валів у відцентрових насосах із сальниковими ущільненнями виконують функцію бар'єру між ротором та корпусом насоса, запобігаючи прямому контакту вала з насосною камерою та зменшуючи знос основних деталей. Основними факторами їхнього зносу є тертя між втулкою і валом, абразивні домішки у рідині, високі оберти ротора та перепади тиску. Корозія та ерозія матеріалу, нерівномірний контакт та недостатнє змазування також прискорюють зношування. Дефекти втулок призводять до підвищення люфту вала, витoku рідини та пошкодження сальникових ущільнень. Аналіз причин зносу дозволяє оптимізувати матеріали втулок, підвищити точність монтажу та поліпшити умови експлуатації насосів, що продовжує їхній ресурс і підвищує надійність роботи (рис. 1.3).

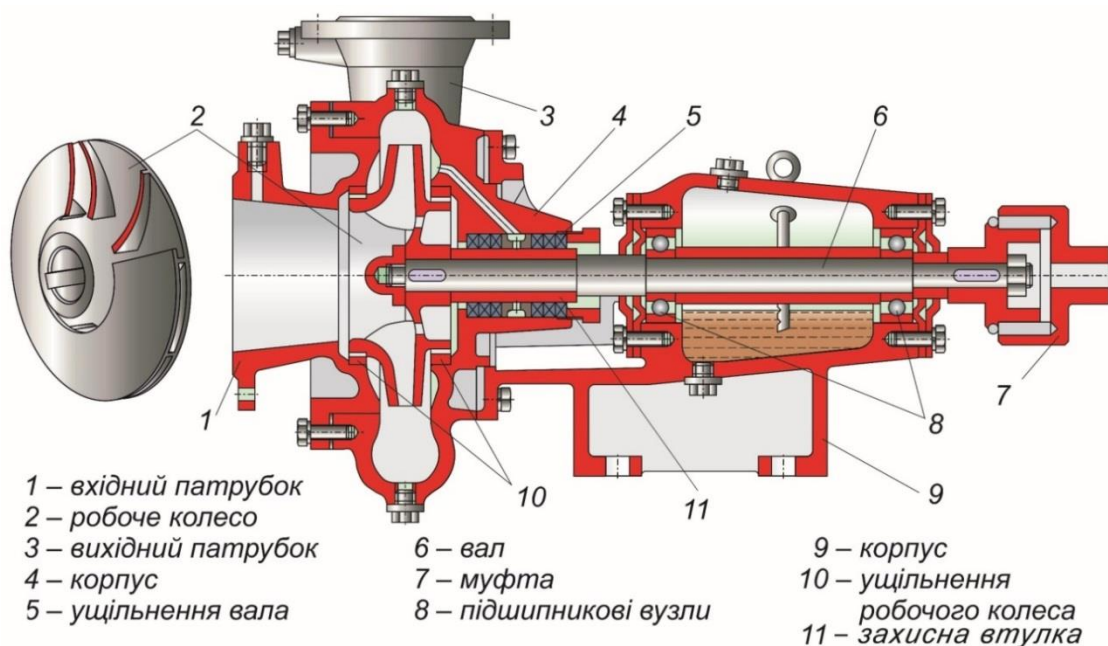
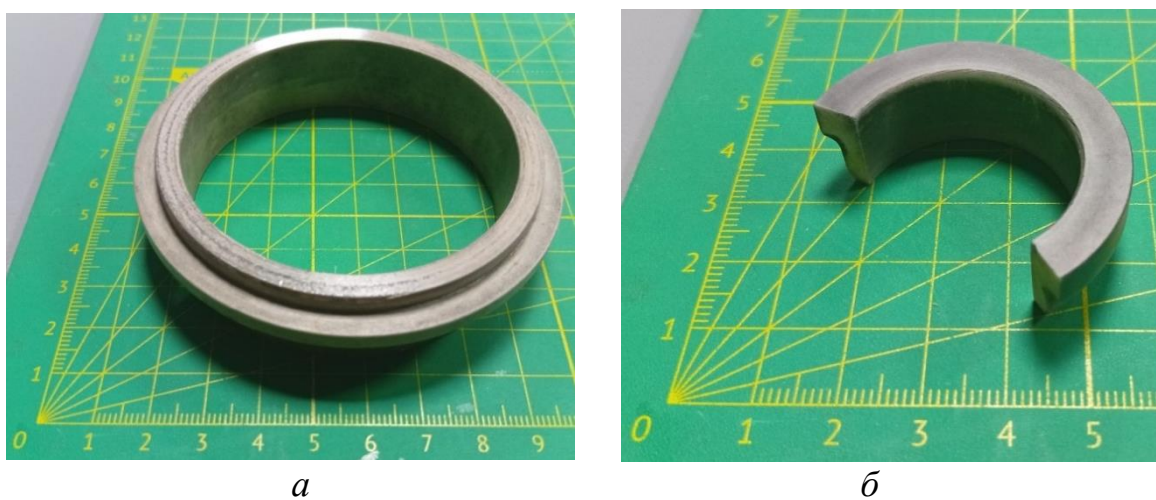


Рисунок 1.3 – Відцентровий насос із сальниковим ущільненням [16]

Керамічні кільця торцевого ущільнення і захисні втулки у відцентрових насосах зазнають інтенсивного зношування під час експлуатації. Основними механізмами зносу є абразивне тертя, ерозія і корозія. Керамічні кільця, незважаючи на високу твердість, можуть утворювати задирки, тріщини та сколи при контакті з твердими домішками у рідині (рис. 1.4). Захисні втулки втрачають рівномір поверхні через тертя вала, вплив високих обертів та перепадів тиску (рис. 1.5).. Нерівномірне змазування та дисбаланс ротора прискорюють процес зносу. Зношування керамічних кілець призводить до підвищення люфту вала та збільшення витoku рідини, а дефекти втулок – до підвищеного зносу сальникових ущільнень. Аналіз характеру зношування дозволяє оптимізувати матеріали та конструкцію, підвищуючи надійність і ресурс насосів.



а – задирки; б – тріщини

Рисунок 1.4 – Характер зношування керамічних кілець торцевого ущільнення



Рисунок 1.5 – Захисна втулка вала насоса

1.2 Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Сьогодні алюмінієві сплави широко використовуються в автомобільній, аерокосмічній та радіоелектронній промисловості, ядерній техніці, гірничій промисловості, нафтогазовидобутку, а також у будівництві та інших галузях сучасного машинобудування. Відносно високі співвідношення між характеристиками міцності та питомою вагою, висока теплопровідність, добра оброблюваність різанням та пластичною деформацією, а також висока корозійна стійкість є найважливішими властивостями, що роблять алюмінієві сплави технологічно привабливими та економічно ефективними конструкційними матеріалами.

Сучасні машини та обладнання експлуатуються в екстремальних умовах за дії високих температур, статичних і динамічних навантажень в агресивних середовищах із вмістом твердих абразивних частинок. Перелічені чинники призводять до інтенсивного корозійно-механічного зношування деталей машин, а їх заміна потребує зупинки дороговартісного обладнання на ремонт, що спричиняє додаткові витрати. Тому пріоритетною задачею машинобудування є забезпечення випуску надійної в експлуатації та конкурентоспроможної на внутрішньому й зовнішньому ринках продукції. Використання традиційних конструкційних матеріалів для виготовлення відповідальних деталей машин не забезпечує повною мірою високі вимоги до якості їх робочих поверхонь. У процесі експлуатації машин та обладнання зношуються зазвичай лише тонкі поверхневі шари деталей, які знаходяться між собою в контакті у вузлах тертя, що призводить до виходу з ладу виробу за незначної втрати геометричних розмірів зношених деталей.

Тому для підвищення зносостійкості, корозійної стійкості та довговічності деталей машин використовують конструкторські, технологічні та експлуатаційні методи.

Конструкторські методи включають раціональний вибір конструкцій машин, їх моделювання, розрахунок, економічно обґрунтований призначення матеріалів та методів їх корозійних та трибологічних випробовувань. Під час

конструювання деталей та вузлів різного призначення застосовують силове та температурне моделювання взаємодії елементів.

Серед експлуатаційних методів на особливу увагу заслуговують заходи спрямовані на безпечну експлуатацію машин та обладнання з дотриманням регламенту, мащення, вчасне періодичне технічне обслуговування.

Розглянутий конструкторський метод можна застосовувати під час проектування нових машин, експлуатаційний – до вже введених в експлуатацію.

Тому для підвищення надійності та довговічності виробів машинобудівного виробництва перспективним є використання функціонально орієнтованих технологій для зміцнення деталей покриттями як на стадії виготовлення нових, так і відновлення під час ремонту зношених деталей обладнання що експлуатується [19, 20, 21, 22, 23].

Зміцнення тонкого поверхневого шару масивної деталі є прогресивним напрямком у технології машинобудування, оскільки дозволяє економити високовартісні леговані сталі та інші конструкційні матеріали, збільшувати ресурс роботи і надійність механізмів, машин, підвищувати ефективність виробництва. До найважливіших властивостей алюмінієвих сплавів, які дозволяють використовувати їх у різних галузях промисловості, відноситься висока корозійна стійкість і відносно високе співвідношення міцнісних характеристик і питомої ваги. Водночас, такі сплави мають дуже хороші характеристики щодо повторного використання. Проте низька зносостійкість алюмінієвих сплавів за підвищених температур перешкоджає їх ще більш широкому застосуванню в техніці. Останнім часом набувають широкого застосування технологічні методи поверхневого зміцнення з використанням висококонцентрованих джерел енергії, зокрема плазми [24, 25, 26, 27, 28]. Сутність цих методів поверхневого зміцнення полягає у тому, що на відносно невеликі об'єми металу діють з великими швидкостями концентрованими потоками енергії високої інтенсивності з наступним швидким охолодженням. Такі умови обробки дозволяють отримувати задані фізико-механічні,

електрохімічні, корозійні та експлуатаційні характеристики поверхневих шарів деталей машин та елементів конструкцій нафтогазової, авіаційної та ракетно-космічної техніки

Для підвищення довговічності деталей машин використовують технологічні методи, які забезпечують формування поверхневих шарів на робочих поверхнях із покращеними фізико-механічними властивостями. Проведені дослідження технологічних процесів виготовлення деталей машин показали, що серед різноманіття методів нанесення покриттів найбільш поширеним серед металевих є хромові [29, 30], а серед неметалевих покриттів – оксидні [31, 32]. Це важливо не лише для розуміння структури ринку покриттів, але й для визначення пріоритетних напрямів проведення науково-дослідних робіт.

У зв'язку з підвищенням вимог до екологічної безпеки гальванічних виробництв та розвитку зелених технологій дослідники в основному зосереджуються на розробці компонентних складів електролітів для нанесення покриттів на основі сполук тривалентного хрому та режимів електролізу взамін шестивалентного хрому який є токсичним, а також на вдосконаленні технологій електрохімічного хромування деталей у проточному електроліті з використанням електрохімічних комірок, що значно зменшує площу контакту електроліту із навколишнім середовищем.

В останні роки інтенсивно розвиваються нові прогресивні технології формування оксидних покриттів на металах вентильної групи (алюміній, титан, тантал, магній, – мікродуговим оксидуванням (інша назва – плазмове електролітичне оксидування, іскрове оксидування тощо), які забезпечують одержання зносостійких, корозійнотривких та іншого функціонального призначення покриттів досить великої товщини.

Серед технологій, які забезпечують формування зносо- та корозивнотривких оксидних покриттів варто відзначити анодування (низька напруга) [33] та мікродугове оксидування в електроліті (висока напруга) [34].

Вказані технології оксидування забезпечують збільшення обсягів використання алюмінієвих, магнієвих і титанових сплавів у різних галузях промисловості для виготовлення відповідальних деталей машин та обладнання. Слід зазначити, що перераховані матеріали можна багато разів використовувати для повторного перероблення.

Відомо, що захисні зносо- та корозивнотривкі покриття на робочих поверхнях деталей машин повинні задовольняти наступним вимогам:

- 1) бути суцільними, ізолюючи метал від корозивного середовища;
- 2) бути механічно стійкими (зносотривкими) і мати високу адгезію до металу основи;
- 3) добуток розчинності фазових складових покриття не повинен перевищувати 10^{-6} моль/л;
- 4) об'єм оксиду матеріалу захисного покриття повинен бути більшим за об'єм металу, що йде на утворення оксидного покриття ($V_{\text{п}}/V_{\text{м}} = 1 \dots 2,5$);
- 5) площа пор у захисному покритті не повинна перевищувати 0,01 %.

Для забезпечення високої міцності зчеплення покриття з основою, його корозійної тривкості та зносостійкості велике значення має стан поверхні заготовки перед формуванням покриттів.

Метод твердого анодування. Алюмінієві сплави мають високу питому міцність та поліпшені ливарні властивості, низьку питому вагу і температуру плавлення та знайшли широке застосування в автомобіле-, авіабудуванні, ракетобудуванні, поліграфічній і текстильній промисловості. Проте цим сплавам притаманна низька корозивна тривкість та зносотривкість. У промисловості для відповідальних деталей в основному використовуються високоміцні алюмінієві сплави з великою кількістю легувальних елементів, наприклад цинку (Zn), магнію (Mg), міді (Cu) і кремнію (Si). Зміцнення сплавів проводять шляхом термічної обробки, що призводить до формування складної мікроструктура, яка містить інтерметаліди та включення різних фаз. Додавання легуючих елементів істотно підвищує механічні властивості сплавів, але для

корозійну тривкості основи, оскільки це може призводити до виникнення електрохімічної неоднорідності – утворення мікрогальванічних елементів, які інтенсифікуватимуть корозійні процеси. Це особливо яскраво проявляється на сплавах системи Al–Cu. Виникнення різниці потенціалів між локальними ділянками алюмінієвого сплаву під час потрапляння електропровідного розчину корозивного середовища на вказані ділянки призводить до утворення та активного функціонування мікрогальванічних елементів і вибіркового розчинення більш активної (анодної) фази. Найпоширенішим типом корозії алюмінієвих сплавів є точкова корозія, а самі сплави мають невисоку твердість. Для підвищення фізико-механічних властивостей сплавів необхідно використовувати захисні покриття. Найчастіше використовують способи штучного вирощування оксиду на поверхні алюмінію – хімічне оксидування та електрохімічне формування оксидного покриття в електроліті – анодування [35, 36]. Тверде анодування базується на використанні високої спорідненості алюмінію до кисню.

Анодування – це електрохімічний процес, в якому алюмінієва основа штучно окислюється і на ній утворюється товста оксидна плівка. Свою назву процес отримав від того факту, що алюмінієва заготовка використовується як анод в електролітичній комірці. На анод подається додатна, а на катод (зазвичай нержавіюча сталь) – від’ємна напруга. Під час підведення напруги на поверхні алюмінію утворюються катіони алюмінію (Al^{3+}), а на межі розділу метал – електроліт формується шар оксиду алюмінію, який утворюється за такими реакціями:



Ці процеси наочно ілюструються схемою [37], зображеною на рис. 1.6.

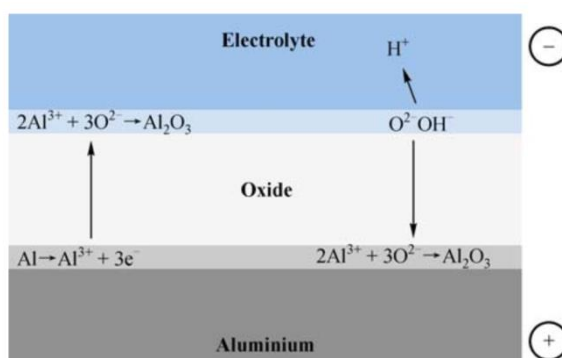
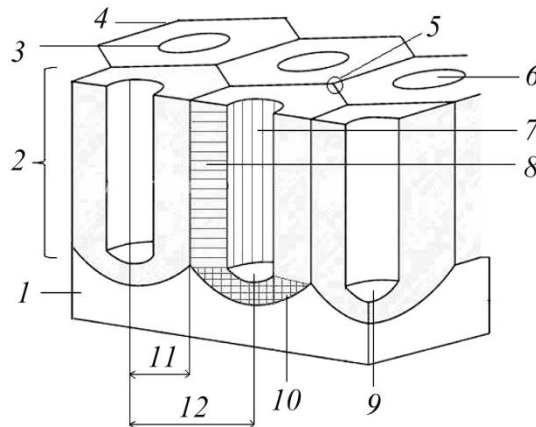


Рисунок 1.7. – Схема утворення оксиду алюмінію під час анодування в електроліті [37]

Кисень O^{2-} та радикали OH^- утворюються внаслідок гідролізу води, оскільки електронна провідність оксиду алюмінію дуже низька, а провідність електроліту та алюмінію висока. Основний спад напруги відбувається власне на оксиді. Це призводить до формування високої електричної напруженості поля 10^6 до 10^7 В/м, яка є достатньою для забезпечення росту оксиду внаслідок іонної міграції. Оскільки анодування алюмінію проводять у водному електроліті, адсорбована вода на аноді буде розкладатись, утворюючи негативно заряджені іони O^{2-} та OH^- . Ці аніони мігрують у напрямку до позитивно зарядженої анодної підкладки. Залежно від напруженості електричного поля, складу та температури електроліту іони оксиду алюмінію будуть безпосередньо виходити в електроліт. Це призводить до формування характерної для анодних покриттів поруватої оксидної структури. Ефективність перетворення і, отже, кінцева морфологія плівки залежатимуть від балансу між зростанням оксиду та розчиненням оксиду (через прямий викид і хімічну атаку агресивним електролітом). Розробці умов синтезу анодних покриттів присвячено велику кількість праць, в яких розглянуто вплив складу електролітів, температури, напруги та їх зміни на товщину, склад, розміри пор, корозійну і зносостійкість анодних покриттів. Одним із технологічно простих та дешевих методів, який дозволяє формувати зносостійкі оксидні покриття на алюмінії, є тверде анодування. Для нього характерним є анодування в сірчаноокислих електролітах (наприклад, 20 % H_2SO_4) за понижених температур

(мінус 8 °С) [35, 38]. Однак цей метод має низку недоліків: поверхневі шари мають низьку твердість (500 HV) та зносотривкість. Оксидний шар на алюмінії складається з тонкого бар'єрного шару, розташованого на межі поділу метал – анодний шар, зовнішньої пористої ділянки з циліндричними порами, що виходять з поверхні анодного шару до бар'єрного. Анодний шар містить щільно розташовані стовпчасті шестикутні комірки з центральною циліндричною порою (рис. 2) [38]. Оксидний шар на поверхні алюмінієвих сплавів формується у вигляді стовпчиків із сильно гідратованого оксиду алюмінію $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Кількість молекул у шарі визначається технологічним режимом його формування. Під час анодування в сірчаноокислотному електроліті діаметр пори типової анодної комірки становить 25 нм, а бар'єрний шар завтовшки 10–30 нм. Вихід продуктів синтезу зсували у бік виходу $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ шляхом збільшення концентрації кисню в електроліті [39], зокрема, вводячи кисень, перекис водню тощо в зону реакції, а також охолоджуючи електроліт до мінусових температур, щоб збільшити швидкість росту, товщину оксиду, його твердість та зносотривкість.



1 – алюміній; 2 – Al_2O_3 ; 3 – пори; 4 – комірка; 5 – потрійна точка; 6 – гирло пори; 7 – стінка пори; 8 – стінка комірки; 9 – основа пори; 10 – бар'єрний шар; 11 – радіус комірки; 12 – відстань між порами

Рисунок 1.7 – Схематичне зображення анодного шару на алюмінії [38]

Встановлені залежності товщини покриттів від концентрації перексиду водню та озону в електроліті наведено на рис. 1.8 [39].

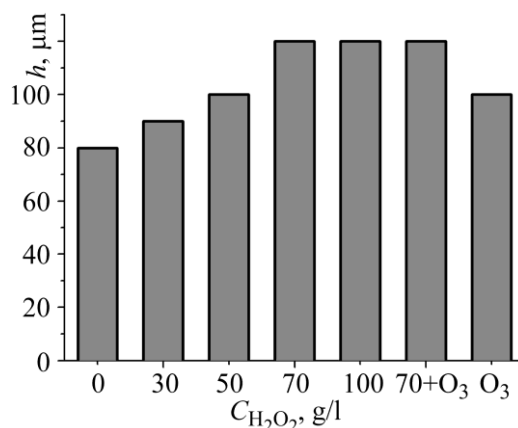


Рисунок 1.8 – Залежність товщини анодного шару від концентрації H_2O_2 в базовому електроліті [39]

Показано [39], що оптимальний вміст перекису водню в електроліті не повинен перевищувати 30 г/л. За цієї концентрації мікротвердість покриття зростає з 360 HV до 680 HV. Додаткове підвищення мікротвердості можна отримати термічною обробкою оксидних покриттів, а підвищення корозійної тривкості – додатковим заповненням пор, наприклад, оксидами хрому тощо. Максимальна мікротвердість анодованих покриттів може досягати 1000 HV.

Згідно вимог стандарту (ГОСТ 9.301–73 Покриття металеві і неметалеві неорганічні. Технічні вимоги) шорсткість поверхні основного металу перед формуванням покриттів повинна бути не більше (мкм): Ra 2,5 – під захисні покриття; Rz 40 – під захисно-декоративні покриття; Rz до 40 – під спеціальні види покриття в залежності від їх функціонального призначення; Ra 1,5 – під тверді та електроізоляційні анодно-окисні покриття на алюмінії та його сплавах. Аналіз вимог щодо величин шорсткості заготовки перед формуванням різних покриттів показав, що вимоги до підготовки алюмінієвої основи є найбільш жорсткими (Ra 1,5 мкм), що потребує додаткових затрат на проведення механічної обробки та призводить до зростання собівартості зміцнених деталей.

Для якісної оцінки впливу поверхні основи на товщину та морфологію оксидних плівок дослідили різні стани поверхні зразків алюмінієвого сплаву

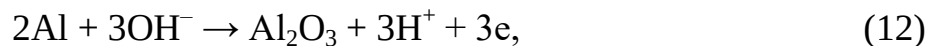
серії 6000 під час твердого анодування [40]. Характеристика (товщина, морфологія поверхні) плівок оксиду алюмінію передбачає значну кореляцію між станами поверхні підкладки та товщиною плівки. Порівняння морфологій чистої та згодом анодованої поверхні свідчить про збільшення швидкості росту товщини плівки зі зменшенням шорсткості підкладки. Встановлено, що для процесу твердого анодування гладкі поверхні підкладки призводять до менш шорстких анодованих плівок.

Метод мікродугового оксидування. Одним із інноваційних способів формування зносо- та корозійнотривких оксидних покриттів є мікродугове оксидування (МДО), який дозволяє формувати захисні оксидокерамічні покриття на металах вентильної групи (Al, Ti, Zr, Mg), які утворюються внаслідок прикладання високої анодної напруги до непровідної оксидної плівки [41].

Покриття формують на компактному алюмінії та його сплавах, на литих алюмінієвих сплавах, магнії, напиленому шарі алюмінієвого покриття на компактну основу [42, 43]. Метод МДО є подальшим розвитком вищеописаного методу анодування, за якого внаслідок взаємодії металу з електролітом під дією електричного струму (без виникнення електричного пробою) формується тонка оксидна плівка. Оксидні покриття, отримані методом МДО, мають, на відміну від анодованих, полікристалічну структуру, товсті, тверді, з високою адгезією до алюмінієвої основи та діелектричними властивостями. Позитивною характеристикою методу МДО є використання екологічно чистих лужних електролітів. Як електроліти зазвичай використовують водні розчини лугів або кислот. Особливо широко ці методи досліджені для формування зносо- та корозійнотривких покриттів на алюмінієвих сплавах. Оксидне покриття формують в електролітній плазмі за прикладання високої напруги до заготовки деталі, зануреної в робочий електроліт, і до електрода, яким зазвичай слугує водоохолоджувана ванна, виготовлена із нержавіючої сталі. Під час МДО за перевищення напруги пробою діелектричної плівки (понад 100 V) на поверхні зразків формуються іскрові розряди, в каналах яких проходить синтез

високотемпературних фаз оксиду алюмінію. У праці [44] розроблено модель синтезу оксидокерамічного покриття в розрядному каналі системи метал – електроліт, схему якої зображено на рисунку 1.9.

Формування оксиду може проходити як за прямими реакціями взаємодії алюмінію з киснем та радикалами OH^- [45]:



так і через проміжні сполуки AlO , Al_2O , AlO_2 та Al_2O_2 :

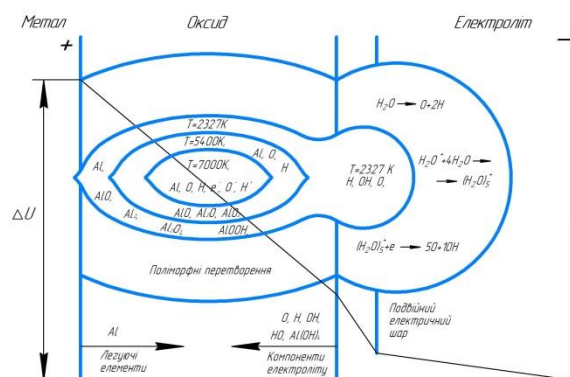


Рисунок 1.9 – Схематичне представлення процесу синтезу Al_2O_3 у розрядному каналі [44]

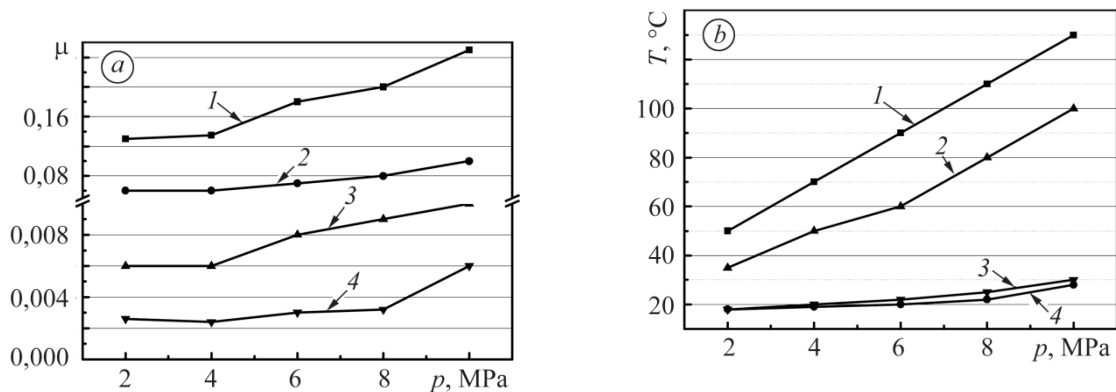
На базі теоретичних та експериментальних досліджень процесу ПЕО було запропоновано ідею збільшення виходу продуктів реакцій шляхом додаткового введення в склад електроліту H_2O_2 , яку підтверджено результатами низки досліджень [46, 47].

Останнім часом широко застосовується формування захисних та зносотривких покриттів на алюмінієвих сплавах у різних електролітах та на різних електричних режимах.

У праці [48] досліджено процес старіння лужносилікатних електролітів і втрату їх роботоздатності. З часом використання у них зменшується концентрація носіїв зарядів, особливо K, Na, Si. Вони відкладаються в зовнішньому шарі оксидного покриття, зменшується швидкість росту оксидів, хоча зростає вміст високотемпературної фази $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ та концентрація гідрооксидів алюмінію. Також оксидні покриття, отримані в старих електролітах, мають меншу поруватість, яка є однією з найважливіших характеристик захисної дії цих покриттів. У дослідженні [49], використовуючи багатороздільну функцію релевантності для локалізації та подальшої сегментації поверхневих об'єктів оксидно-керамічних покриттів, запропоновано експрес-метод визначення розмірів пор та їх кількості. У праці [50] досліджено вплив компонентного складу висококонцентрованих лужно-силікатних електролітів з додатками фосфату та гліцерину на якість шарів МДО на магнієвому сплаві AZ31. Також розглянуто вплив ультразвуку, підведеного в електролітну ванну. Процес контролювали шляхом запису електричних змінних процесу за допомогою реєстратора перехідних процесів та спостереження за явищами розряду на поверхні зразка за допомогою швидкісної цифрової камери. Дослідження проводилося на основі плану експериментів. Розглянуто вплив зміни технологічних параметрів процесу на товщину, твердість та корозійну стійкість покриттів. В дослідженні [51] встановлено, що товщина сформованих ПЕО покриттів на сплаві Д16 в лужному електроліті майже прямолінійно змінюється з часом обробки. Протягом МДО на сплаві Д16 після 10 хв синтезу формується покрив товщиною 8...12 мкм, після 60 хв – 50...70 мкм, а після 120 хв – товщина покриття зростає до 80...120 мкм. Встановлено, що оксидокерамічні покриття товщиною від 50 мкм до 70 мкм, сформовані за 60 хв, мають найвищу корозійну тривкість в 3 %-му розчині NaCl у воді, що зумовлено найменшою кількістю та густиною дефектів порівняно з оксидними покриттями товщиною 8...12 мкм та 80...120 мкм. Автори [51] пояснюють це тим, що зростання часу синтезу до 60 хв спричиняє перехід мікроіскрового розряду в іскровий, за якого температура плазми становить 6000...8000 K,

кількість розрядів зменшується, проте зростає їхня тривалість. Утворюються пори невеликого діаметра. Після 100 хв синтезу потужність електричних розрядів суттєво зростає, іскровий режим переходить в мікродуговий: кількість розрядів зменшується, збільшується їхня тривалість, зростають розміри та знижується температури плазми до 5000...6000 К. Внаслідок цього формуються пори більшого діаметра. Крім цього, на поверхні оксидокераміки можуть утворюватися тріщини.

У праці [52] досліджено трибологічну поведінку вуглецевих матеріалів у парах із оксидним покриттям, сформованим на алюмінієвому сплаві Д16Т. Як мастило використовували: мінеральну оливу І-20; мінеральну оливу І-20 із додатком водного розчину гліцерину (рисунок 1.10).



1, 3 – сталь 45; 2, 4 – чавун СЧ 21-40; 1, 2 – мінеральна олива І-20; 3, 4 – відповідно із додатком 1 % та 2,5 %-го водного розчину гліцерину

Рисунок 1.10 – Усереднені значення коефіцієнта тертя (а) та температури триборозігріву (b) у фрикційних парах оксидне покриття – залізовуглецеві сплави за різних контактних навантажень в мастильних середовищах [52].

Встановлено, що за фрикційної взаємодії сталей із оксидним покриттям в оливогліцериновій суміші реалізуються режими вибіркового перенесення. Виявлено, що такі контактні трибопари роботоздатні до питомих навантажень, вищих за 10 МПа. Встановлено, що тут різко знижуються не тільки знос, але й коефіцієнт тертя та температура триборозігріву контактних пар (час випробувань за кожного навантаження – 4 h). Так, коефіцієнт тертя сталі 45 у парі з оксидним покриттям зменшується в $\square$ 40 разів, а в парі із чавуном – в $\square$

15 разів, водночас температура триборозігріву знижується в 4 рази [52]. Проведено аналіз фазового складу оксидокерамічних покриттів. Встановлено, що для оксидних покриттів, синтезованих на сплаві Д16Т, мікротвердість становить від 18 ГПа до 20 ГПа. Це пов'язано з високим вмістом у складі покриття високотемпературної фази $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (70 %), яка має високу твердість.

Досліджено [53] вплив легування алюмінієвих сплавів міддю, магнієм, кремнієм, цинком та літієм на фазовий вміст, товщина мікротвердість оксидно-керамічних покриттів, сформованих МДО. Встановлено, що усі ці оксидні покриття складаються з α -, γ - та δ -фаз Al_2O_3 . У разі легування кремнієм утворюється також Al_2SiO_5 . Товщина оксидного покриття досягає максимум 500 мкм.

До вище перелічених технологічних методів належить і мікродугове/плазмове електролітичне оксидування (plasma electrolytic oxidation) [54, 55, 56]. Для утворення захисних покриттів на деталях з алюмінію та його сплавів, а також з металів вентильної групи та їх сплавів в електроліті застосовують плазмове електролітичне оксидування [57, 58]. Прикладена висока напруга між деталлю та електродом, зазвичай виготовленим із нержавіючої сталі, викликає електричний пробій оксидної плівки та виникнення іскор і мікродугових розрядів на поверхні деталі, які випадково мігрують по всій поверхні та, посилюючись, призводять до нагрівання деталі та електроліту. Внаслідок перебігу плазмохімічних реакцій у розрядних каналах за високих температур утворюються дисперсні оксиди, що містять різні фази, у тому числі й високотемпературну $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, що забезпечує покриттю високу твердість, зносостійкість і жаростійкість [54, 55, 56, 57]. Дослідники [59, 60] запропонували введення додатків до складу електроліту для покращення жаростійкості оксидних покриттів. Загальновідомо, що стабільність поверхні розділу «покриття–підкладка» пов'язана з міжфазними силами адгезії та електрохімічними властивостями цієї області. Тому велику увагу слід приділяти підбору раціональних товщин шарів покриття, щоб забезпечити як міцність зчеплення з основою, так і необхідний ресурс роботи деталей машин

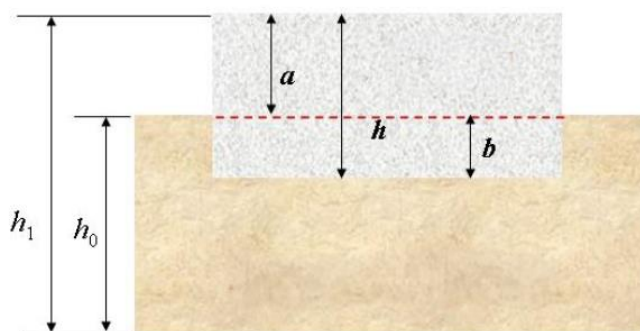
під час зношування в агресивних корозійних середовищах за підвищених температур [61]. На увагу заслуговують теоретичні моделі для дослідження сингулярних полів напружень поблизу дефектів у тонкостінних конструкціях з композиційними покриттями [62, 63, 64, 65, 66] та відгуку функціонально градієнтних та шаруватих покриттів на локальне навантаження від абразивних частинок чи лезового інструменту [67, 68, 69]. Раціонально вибрані режими механічної обробки [70, 72] та обробки заготовок пластичним деформуванням перед формуванням плазмовим електролітичним оксидуванням жаростійких покриттів дозволяють підвищити втомну міцність алюмінієвих деталей з жаростійкими покриттями [72, 73]. Результати моделювання руху електроліту та температури в міжелектродному просторі електрохімічної комірки дозволять раціонально проєктувати оснащення для формування на алюмінієвих деталях складної форми жаростійких покриттів у проточному електроліті та вибирати технологічні режими процесу плазмового електролітичного оксидування, що дозволить підвищити рівномірність товщини оксидного шару порівняно з аналогами [74, 75].

Розподіл температур під час плазмового електролітичного оксидування лишається важливою енергетичною характеристикою цього процесу. Однак математичний опис призводить до рівняння теплопровідності з рухомими межами, позаяк межа між прооксидованим і непрооксидованим шарами постійно змінюється. Це породжує аналітичні складнощі під час розв'язування таких задач [76, 77]. Переважно розв'язання зводиться до використання чисельних методів. Водночас точні розв'язки рівнянь теплопровідності переважно описуються експоненційно-тригонометричними рядами Фур'є, які є частинними випадками кратних рядів Діріхле. Згадані ряди зображають у комплексному просторі аналітичні функції, для яких розроблена докладна і струнка теорія з використанням поняття обмеженості індексу за напрямком [78, 79] та за сукупністю змінних [80]. Цей підхід дозволяє якісно вивчати властивості розв'язків таких рівнянь. Розроблена модель розподілу температур у деталях під час формування оксидного жаростійкого покриття плазмовим

електролітичним оксидуванням дозволить раціонально вибрати форму електродів і технологічні режими процесу плазмового електролітичного оксидування для формування покриттів на алюмінієвих деталях. У дослідженні [75] представлено результати вимірювання температури електроліту в гальванічній ванні та деталі під час плазмового електролітичного оксидування, однак відсутні відомості про розподіл температур безпосередньо в зоні формування оксидного шару покриття, де протікають плазмохімічні реакції. Дослідниками [76] було побудовано математичну модель розподілу температур у деталях під час формування оксидного жаростійкого покриття плазмовим електролітичним оксидуванням, яка звелася до крайової задачі з рухомою межею для рівняння теплопровідності у випадку тришарового нескінченного циліндра. Однак для її аналітичного розв'язування були зроблені деякі припущення у [76], які її суттєво спростили. А саме, зважаючи на той факт, що товщина другого і третього шарів (алюмінію та його оксиду) надзвичайно мала порівняно з радіусом циліндра r_1 , зробили висновок про можливість заміни змінних товщин 2-го і 3-го шарів їх середніми значеннями під час визначення температурного поля в циліндрі радіусом r_1 . І за цієї заміни було знайдено температурне поле в сталевому циліндрі, від якого залежать дифузійні процеси на межі розділу між сталевим циліндром і шаром алюмінію (неокисленого). За допомогою новітніх математичних методів та моделей, які викладені в огляді [81], планується позбутися описаного припущення та розглянути випадок зі змінною товщиною першого та другого шарів. Це дозволить нам побудувати точнішу модель розподілу температур. Зазвичай дослідники зосереджуються на вивченні будови оксидних покриттів, структури, хімічного складу, фізико-механічних властивостей [54, 55, 56, 57, 58], зокрема відзначається зміна мікротвердості за товщиною покриття. При цьому не приділяється належна увага технологічним дослідженням, що стримує розробку енергоефективних технологічних процесів формування жаростійких покриттів та впровадження їх у виробництво [82]. На сьогодні ще не достатньо зрозумілий механізм формування поверхневого оксидного шару, його основних фізикомеханічних

характеристик, вплив технологічних режимів процесу плазмового електролітичного оксидування та механічної обробки на роботоздатність деталей машин у різноманітних умовах експлуатації. Немає достатньо обґрунтованих наукових і технологічних основ розроблення енергоефективних технологічних процесів поверхневого зміцнення алюмінієвих сплавів для забезпечення їх експлуатації за підвищених температур [83, 84, 85].

У праці (Wang, S. et al., 2019) [86] дослідили зміну розмірів заготовок з алюмінію 1060 під час плазмового електролітичного оксидування (ПЕО) у трьох різних електролітах (силікатному, фосфатному та змішаному) та запропоновано механізми росту оксидних покриттів рис. 1.11. На межі розділу алюміній – оксидне покриття спостерігається велика кількість «пагорбоподібних» виступів», що свідчить про зміну величини шорсткості.



h_0 – товщина зразка до ПЕО; h_1 – товщина зразка після ПЕО;

a – товщина зростання назовні; b – частина, що росте в субстрат

Рисунок 1.11 – Схематичне зображення зміни розмірів зразка під час процесу ПЕО [86]

Серед кількох методів зміцнення слід виділити ПЕО, який інтенсивно розробляється і наразі є однією з найпопулярніших, екологічно чистих та досить економічно ефективних технологій формування оксидних шарів на алюмінії та його сплавах [86, 87, 88, 89, 90], а також інших металах, наприклад, титані [91, 92], магнії [93] та сталях [94]. Крім того, МДО є одним з фундаментальних способів покращення експлуатаційних властивостей виробів шляхом модифікації робочих поверхонь алюмінієвих деталей з метою

перетворення поверхневого шару на тверду зносостійку та термостійку оксидну кераміку. МДО – це технологічний процес формування керамічних шарів на поверхні алюмінієвих сплавів в електроліті під високими напругами в режимі іскрових та мікродугових розрядів, що дозволяє отримувати оксидні покриття вищої якості, що міцно зчеплюються з основою деталі, порівнянні з твердим анодуванням та плазмовим напиленням кераміки [95]. Процес МДО супроводжується розрядами, що розвиваються під впливом сильного електричного поля в системі, що складається з деталі (підкладки), оксидного шару, парогазової оболонки, електроліту та електрода (зазвичай гальванічної ванни з нержавіючої сталі) [90]. Електричний пробій у цій системі призводить до виникнення плазмового стану в каналі розряду, в якому під час плазмохімічних реакцій матеріал підкладки перетворюється на хімічні сполуки, що складаються з власне матеріалу підкладки (включаючи легуючі елементи), кисню та компонентів електроліту [88, 89]. При застосуванні раціональних технологічних параметрів процесу МДО отримуємо багатофункціональне зносостійке та термостійке оксидне керамічне покриття, яке має надійний хімічний та металургійний зв'язок з основним матеріалом деталі [87, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95].

Алюмінієвий деформований сплав Д16Т має досить високі механічні властивості порівняно з іншими алюмінієвими сплавами, і вироби з нього широко використовуються в промисловості та побуті. Цей сплав належить до алюмінієвих сплавів системи Al–Cu–Mg, і він схильний до зміцнення та природного старіння. Інтерметаліди, що утворюються в мікроструктурі, є основним фактором механізму зміцнення цього сплаву. Однак ці інтерметаліди призводять до мікроелектрохімічної неоднорідності сплаву, що призводить до точкової корозії, міжкристалічної корозії або розшарування [96, 97, 98]. Тому деформовані сплави такої системи використовуються плакованими шаром алюмінію та/або підданими МДО [99] [71]. Прогнозування фазового складу багатокомпонентних сплавів на основі Al під час МДО в рамках певних термодинамічних підходів [100,101,102] або розрахунків з перших

принципів [103, 104] ускладнюється через утворення метастабільних градієнтних структур, перерозподіл яких вимагає детального статистичного аналізу.

Мікроструктурні властивості, морфологія поверхні деталі, зносостійкість, термостійкість, термостійкість при терті та інші експлуатаційні властивості оксидних керамічних покриттів, сформованих методом ПЕО, залежать від компонентного складу електроліту [105] та параметрів технологічного процесу [105, 106, 107, 108]. Зокрема, у [109] досліджувався вплив технологічних параметрів ПЕО на корозійні властивості оксидних покриттів. Дослідники [110, 111] вивчали трибологічні характеристики покриттів, сформованих МДО за різних видів мастила, та встановили високу зносостійкість під час тертя в парі з вуглецевою сталлю, а також виявили вплив водню на зносостійкість сталей, що контактують із шарами ПЕО, синтезованими на алюмінієвих сплавах, під час випробувань у мінеральному мастилі [112]. Низка досліджень присвячена вивченню теплопровідності, теплозахисних властивостей [113,114,115,116] та термостійкості [117] оксидних керамічних покриттів на різних матеріалах, результати яких демонструють низьку теплопровідність та високі захисні властивості цих покриттів, зокрема з урахуванням теплопровідності підкладки [118]. У працях [119, 120] повідомляється про використання оксиду алюмінію для армування композитних покриттів з метою покращення їх захисних властивостей.

Таким чином, залежно від обраного матеріалу підкладки, електричних параметрів процесу ПЕО (густина струму, співвідношення анодного та катодного струмів, напруга, частота, час), хімічного складу, концентрації та температури електроліту, можна отримати оксидно-керамічні покриття з комплексом фізико-механічних властивостей, які найбільш повно задовольняють конкретні експлуатаційні вимоги споживачів/ Складність вибору раціональних технологічних параметрів ПЕО зумовлена різноманітністю хімічного складу алюмінієвих сплавів, а також компонентного складу електролітів, температури та електричних режимів формування

покриттів. Однак у літературі практично відсутня інформація про трибологічні та теплові характеристики деталей з оксидними покриттями та процеси формування ПЕО-покриттів у проточному електроліті. Тому розробка процесів ПЕО-зміцнення для формування оксидно-керамічних покриттів на поверхні деталей з гетерогенних сплавів є актуальною проблемою. Використання методології планування експериментів під час розробки різних технологій дозволяє значно скоротити кількість експериментів та встановити оптимальні режими процесу [121, 122, 123, 124]. Технологічний процес МДО повинен бути оптимізований саме для обраної марки деформованого алюмінієвого сплаву та залежно від галузі застосування та бажаних експлуатаційних властивостей деталей, покритих захисними керамічними покриттями.

На актуальність досліджень вказує також досить висока науково-публікаційна активність щодо питань процесів мікродугового оксидування металів та сплавів вентильної групи.

Однак у літературі практично відсутні відомості щодо дослідження технологічних режимів нанесення покриттів у проточному електроліті, зокрема траєкторій руху електроліту в електрохімічній комірці для нанесення покриттів на поверхню циліндричних деталей. Недостатньо уваги приділено дослідженням впливу шорсткості поверхні заготовки на формування оксидних покриттів під час мікродугового оксидування і на утворення розмірів вкритих деталей.

Для вирішення цих технічних проблем виникає потреба у розробленні теоретичних основ та технологічних засобів підвищення енергоефективності процесу плазмового електролітичного оксидування алюмінієвих сплавів, а також техніко-економічних та екологічних показників процесу мікродугового оксидування. Це стало мотивацією до проведення досліджень у дисертаційній праці.

Висновки до розділу 1

Проведений у цьому розділі аналіз стану технології мікродугового оксидування алюмінієвих деталей зумовив вибір теми, формулювання науково-

технічної проблеми, мети, задач, об'єкту та предмету дисертаційного дослідження, описаних у вступі.

Результати розділу опубліковано в працях автора [1, 3].

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНИЙ РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНОГО ОПОРУ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПОХИЛО ЗРІЗАНОГО ЕЛЕКТРОДА КОНІЧНОЇ ФОРМИ ДЛЯ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ШОРСТКОСТІ ПОВЕРХНІ ПОКРИТТІВ

2.1 Використання мікроелектродів для дослідження шорсткої поверхні покриттів

Машини та обладнання працюють у складних умовах під впливом значних механічних навантажень, високих температур та корозійно-активних середовищ, що містять абразивні частинки. Всі ці фактори посилюють корозію металів та їх сплавів. Процес корозії металевих сплавів в електролітних розчинах має електрохімічну природу і супроводжується потоком анодних і катодних реакцій через неоднорідність поверхні металу. Електрохімічна неоднорідність може бути на макро-, мікро- та нанорівнях. Анодна реакція – це процес розчинення (окислення металу), а кон'югована реакція – це катодна реакція (відновлення кисню або водню), що відбувається на різних ділянках поверхні.

Розробляються нові технології формування захисних металевих жароміцних алюмінієвих покриттів, титанових покриттів та оксидних покриттів, утворених, наприклад, плазмовим електролітичним оксидуванням. Використовуються інгібітори корозії, електрохімічний захист та комбіновані методи захисту металів і сплавів тощо. Розробка покриттів для ефективного захисту металів від корозії, корозійного розтріскування та корозійної втоми вимагає проведення низки електрохімічних досліджень, які, в свою чергу, вимагають використання різних електродів (порівняльних, поляризаційних, іонно-чутливих, комбінованих тощо) та вимірювальних систем для розуміння процесів корозії та механізмів захисного ефекту покриттів. Традиційні методи електрохімічних досліджень дозволяють отримати середні значення показників корозії для корозійної поверхні матеріалу/покриття, але не дають достовірної

інформації про реактивність локальних мікроелементів у місцях виникнення корозійних процесів: структурних компонентах, поверхневих дефектах або мікротріщинах у сталі [125] та алюмінії [126]. Проведення мікроелектрохімічних досліджень матеріалів та покриттів вимагає використання мікроелектродів з розміром робочої частини в мікрони, що призводить до збільшення вхідного електричного опору мікроелектрода. Зокрема, такий електрод дозволяє оцінювати шорсткість поверхні електродного покриття (рис. 2.1). Тому нашою метою є аналітична оцінка електричного опору електродів різної геометричної форми: горизонтально усіченого конуса, косо усіченого конуса та пошук оптимальних розмірів електродів, що забезпечують мінімальний опір.

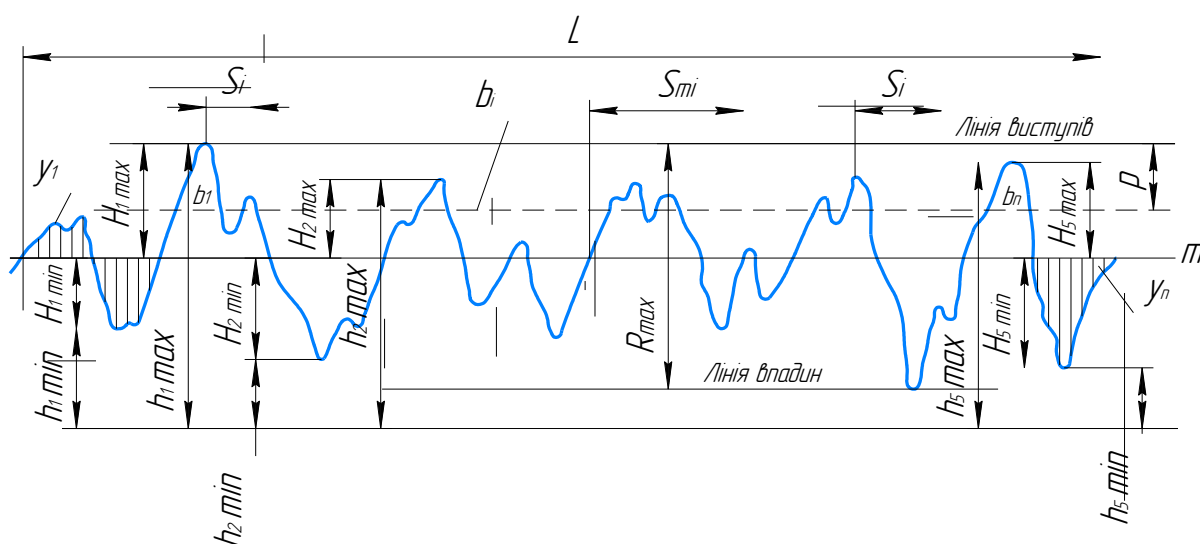


Рисунок 2.1 – Шорсткість поверхні

Для оцінки захисного ефекту покриттів проводяться випробування на корозію в різних середовищах, в тому числі з використанням електрохімічних методів [127] та випробування на знос за різних схем фрикційного взаємодії, наприклад, ковзного тертя [128]. Результати механічних випробувань зразків з покриттями [129] та аналітичні й чисельні оцінки моделей тіл з покриттями [130] дозволяють оцінити загальні фізичні та механічні характеристики покриттів, їх міцність та здатність витримувати зовнішні навантаження. Ці методи надають інформацію про цілісну поведінку покриття [131], але мають

обмежену здатність враховувати та виявляти локальні дефекти та неоднорідності [132]. Врахування явища часткового закриття тріщин у тонкостінних структурах [133], яке найлегше описати за допомогою моделі контакту вздовж лінії, має вирішальне значення для аналізу провідності під час електрохімічних досліджень. На відміну від цього, електрохімічні дослідження з використанням конічних мікроелектродів забезпечують набагато вищу просторову роздільну здатність і використовуються як під час формування покриттів [134], так і для дослідження захисного ефекту покриття. Завдяки концентрації електричного поля на загостреному кінці мікроелектроди можуть виявляти локальні зміни електрохімічних властивостей покриття [135], пов'язані з дефектами, пористістю, корозійними процесами тощо [136]. Це дозволяє отримати детальну інформацію про внутрішню структуру та якість покриття на мікрорівні, а також про полярність відносно підкладки. Водночас механічні випробування дають змогу безпосередньо оцінити експлуатаційні властивості покриттів, такі як міцність, адгезія та зносостійкість, тоді як електрохімічні методи дозволяють лише опосередковано прогнозувати ці характеристики на основі вимірюваних електрохімічних параметрів. Очевидно, що механічні та електрохімічні методи дослідження захисних покриттів є взаємодоповнюючими. Поєднання цих підходів забезпечує комплексну оцінку структури, електрохімічних властивостей та якості покриттів, що є важливими факторами під час розробки їх складу та технологічних режимів формування для забезпечення високої експлуатаційної надійності виробів. Для проведення електрохімічних досліджень структурних компонентів сплавів і покриттів та отримання точних і надійних результатів вимірювань необхідно використовувати мікроелектроди, діаметр яких менший за розмір досліджуваного об'єкта. Це призводить до збільшення електричного опору мікроелектрода, що, в свою чергу, вимагає використання вимірювального та реєстраційного обладнання з високим входним електричним опором. Тому аналітичне дослідження електричного опору мікроелектрода різних форм стало мотивацією для нашого дослідження.

2.2 Побудова математичної моделі мікроелектрода

Щоб знайти аналітичний вираз для опору, інтеграли, що визначають опір, були зведені до інтегралів від оберненої величини до площі поперечного перерізу утвореної фігури. Тому нам довелося розглянути задачу знаходження аналітичного виразу для заданої площі поперечного перерізу. Це було зроблено на основі відомих формул для площ кругових секторів і сегментів. Аналітичне розв'язання задачі обчислення електричного опору вертикального конічного електрода, зрізаного похилою площиною, знайдено без припущення, що висота вертикальної частини електрода дорівнює висоті похилої частини електрода. Відповідний опір визначається сумою дробово-раціональної функції та двох інтегралів, які представляють різні складові електричного опору через площу поперечного перерізу. Два з цих інтегралів є невластивими інтегралами другого роду від необмежених функцій. Для обчислення невластивих інтегралів ми використовували команду `quad_qag` [137] із середовища `wxMaxima`. `wxMaxima` – це система комп'ютерної алгебри з відкритим кодом [138]. Команда реалізує простий глобально адаптивний інтегратор на основі стратегії [139]. Вона дозволяє вибрати серед 6 пар квадратурних формул Гауса-Кронрода [140] правило для обчислення самого інтеграла. Правило з більшим номером підходить для інтегралів з високою частотою коливань, як у нашому випадку. Сильне коливання викликане наявністю у знаменнику виразів, що містять тангенси та котангенси кута твірної та кута площини перерізу. Іншою особливістю, що спонукала до використання цих формул, є наявність у знаменнику арккосинуса дробового раціонального виразу, що містить змінну інтегрування. Усі отримані невластиві інтеграли не беруться в скінченних квадратурах і відносно змінної інтегрування є інтегралами від ірраціональних виразів. За основну змінну інтегрування взяли висоту поперечного перерізу мікроелектрода відносно його меншої основи.

Ми скористаємося викладами та результатами з [141]. Там було розглянуто задачу про відшукування електричного опору вертикального горизонтально зрізаного електрода конічної форми, а також задачу про

розрахунок електричного опору вертикального електрода конічної форми зрізаного похилою площиною. Однак друга задача була розв'язана за додаткового припущення, що висота вертикальної частини електрода рівна висоті похилої частини електрода, точніше, $h_\alpha = h_\gamma$ (див. рисунок 2.2) У цій праці ми розглянемо загальніший випадок без цього припущення.

Будемо розглядати два випадки:

- а) вертикальний горизонтально зрізаний електрод конічної форми;
- б) вертикальний похило зрізаний електрод конічної форми.

Для зручності нижче частково повторимо міркування з [141] для випадку а).

2.2.1 Вертикальний горизонтально зрізаний електрод конічної форми

Для обчислення опору однорідного електрода у формі вертикального горизонтально зрізаного конуса розділимо його паралельними до його нижньої основи площинами на n горизонтальних частин однакової висоти $\Delta z = z_{i+1} - z_i = h/n$, $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ та з відповідними радіусами основ r_i . Кожну меншу конічну частину з деяким наближенням замінимо циліндром тієї ж висоти, радіус якого збігається з радіусом відповідної меншої основи (рис. 2.2). Тоді електричний опір кожного з циліндричних елементів обчислимо за формулою:

$$R_i = \rho \frac{\Delta z}{S_i}, \quad i \in \{1, 2, \dots, n\},$$

де ρ – питомий опір,

$S_i = \pi r_i^2$ – площа поперечного перерізу (на рисунку 2.1 – S_i – це площа нижньої основи i -го конуса).

Знайдемо залежність зміни площі перерізу від висоти.

З рисунка 2.2 видно, що

$$r_i = r_l + (i - 1)\Delta \tan \gamma = r_l + z_i \tan \gamma,$$

де $\tan \gamma = \frac{r_u - r_l}{h}$.

Тоді знайдемо формулу для площі поперечного перерізу:

$$S_i = \pi r_i^2 = \pi (r_l + z_i \tan \gamma)^2. \quad (2.1)$$

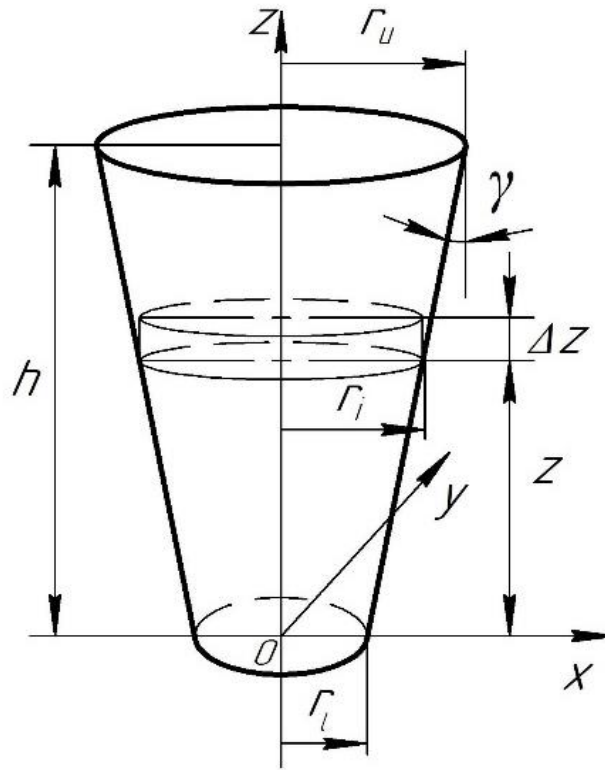


Рисунок 2.2 – Розрахункова схема для горизонтально зрізаного конічного електрода

Якщо просумувати по висоті, то знайдемо електричний опір східчастого конічного тіла, що буде наближено відповідати опору зрізаного конуса, тобто

$$R \approx R_n = \sum_{i=1}^n R_i = \sum_{i=1}^n \rho \frac{\Delta z}{S_i}. \quad (2.2)$$

Перейшовши у формулі (2.2) до границі при $n \rightarrow \infty$, отримаємо точне значення електричного опору через інтеграл по змінному поперечному перерізу:

$$R = \int_0^h \frac{\rho}{S(z)} dz. \quad (2.3)$$

Підставивши (2.1) у (2.3), отримаємо

$$\begin{aligned} R &= \int_0^h \frac{\rho dz}{\pi(r_l + z \tan \gamma)^2} = \frac{\rho}{\pi \tan \gamma} \cdot \frac{-1}{(r_l + z \tan \gamma)} \Big|_0^h = \\ &= \frac{\rho}{\pi \tan \gamma} \left(\frac{-1}{r_l + h \tan \gamma} + \frac{1}{r_l} \right) = \frac{\pi}{\rho \tan \gamma} \left(-\frac{1}{r_u} + \frac{1}{r_l} \right) = \frac{\rho}{\pi \tan \gamma} \cdot \frac{r_u - r_l}{r_l r_u} = \frac{\rho h}{\pi r_l r_u}. \end{aligned} \quad (2.4)$$

2.2.2 Вертикальний похило зрізаний електрод конічної форми.

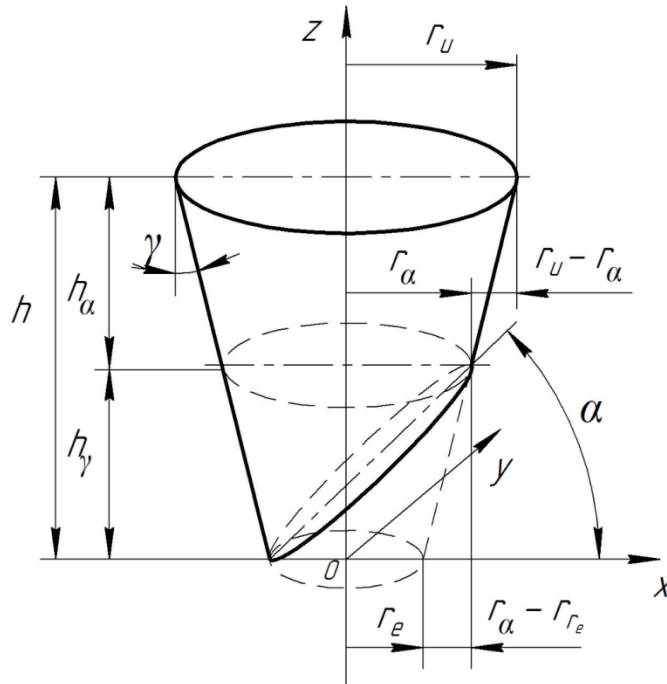


Рисунок 2.3 – Розрахункова схема для похило зрізаного конічного електрода

З рисунка 2.3 видно, що $h_\gamma = (r_u - r_\alpha)\cot\gamma$, $h_\alpha = (r_l + r_\alpha)\tan\alpha$. Зрозуміло, що

$$\begin{aligned} h &= h_\gamma + h_\alpha = (r_u - r_\alpha)\cot\gamma + (r_l + r_\alpha)\tan\alpha = \\ &= r_u\cot\gamma + r_l\tan\alpha + r_\alpha(\tan\alpha - \cot\gamma). \end{aligned}$$

Звідси, одержуємо формулу для обчислення радіуса r_α :

$$r_\alpha = \frac{h - r_u\cot\gamma - r_l\tan\alpha}{\tan\alpha - \cot\gamma}.$$

Нагадаємо, що $\tan\gamma = \frac{r_u - r_l}{h}$. Тоді висота h_α дорівнює

$$\begin{aligned} h_\alpha &= \left(r_l + \frac{h - r_u\cot\gamma - r_l\tan\alpha}{\tan\alpha - \cot\gamma}\right)\tan\alpha = \left(r_l + \frac{h - r_u\frac{h}{r_u - r_l} - r_l\tan\alpha}{\tan\alpha - \frac{h}{r_u - r_l}}\right)\tan\alpha = \\ &= \frac{2hr_l\tan\alpha}{h - (r_u - r_l)\tan\alpha}. \end{aligned}$$

Опір конуса, зрізаного похилою площиною, складатиметься з трьох доданків. Перший доданок – це опір горизонтально зрізаного конуса з радіусом нижньої основи рівним r_α та радіусом верхньої основи рівним r_u . Позначимо

цей опір через R_γ . Для його відшукування скористаємося формулою (2.4), підставивши h_γ замість h та r_α замість r_l . Тоді

$$R_\gamma = \frac{\rho h_\gamma}{\pi r_u r_\alpha} = \frac{\rho}{\pi} \frac{(r_u - \frac{h - r_u \cot \gamma - r_l \tan \alpha}{\tan \alpha - \cot \gamma}) \cot \gamma}{r_u \frac{h - r_u \cot \gamma - r_l \tan \alpha}{\tan \alpha - \cot \gamma}} = \frac{\rho}{\pi} \cdot \frac{\cot \gamma (r_u \tan \alpha - h + r_l \tan \alpha)}{r_u (h - r_u \cot \gamma - r_l \tan \alpha)}.$$

Позаяк $\cot \gamma = \frac{h}{r_u - r_l}$, отримуємо остаточну формулу

$$R_\gamma = \frac{\rho}{\pi} \cdot \frac{h(r_u \tan \alpha - h + r_l \tan \alpha)}{(r_u - r_l) r_u (h - r_u \frac{h}{r_u - r_l} - r_l \tan \alpha)} = \frac{\rho}{\pi} \cdot \frac{h(h - (r_u + r_l) \tan \alpha)}{r_u r_l (h + (r_u + r_l) \tan \alpha)}. \quad (2.5)$$

Отриманий вираз для R_γ є дробово-раціональною функцією, тобто, по суті, мероморфною функцією [142] на комплексній площині для кожної з її змінних при фіксованих значеннях інших.

Другий і третій доданок опору похило зрізаного конуса будуть породжені ділянкою конуса на рис. 2.3 між кругом радіуса r_l та кругом радіуса r_α . Позначимо цей опір через R_α . Якщо через цю ділянку провести перерізи паралельними площинами на відстані Δz , як у пункті а), то дістанемо два різні випадки таких перерізів, кожен з яких забезпечує один доданок для знаходження загального опору:

- 1) площа відповідного кругового сегмента менша за площу півкруга;
- 2) площа відповідного кругового сегмента більша за площу півкруга.

Спершу розглянемо випадок, коли площа відповідного кругового сегмента менша за площу півкруга.

З відповідного рисунку 2.4 видно, що цей випадок можливий лише тоді, коли висота відповідного сегмента менша за радіус півкруга. Висота h_s кругового сегмента для перерізу, розміщеного на висоті z_i над нижньою основою конуса становить $h_s = z_i \cot \alpha + z_i \tan \gamma = z_i (\cot \alpha + \tan \gamma)$ (див. рис. 2.3).

Круговий сегмент стане півкругом за умови, що його висота збігатиметься з радіусом відповідного перерізу, тобто з $r_i = r_l + z_i \tan \gamma$. Тоді з $h_s = r_i$ випливає, що $z_i (\cot \alpha + \tan \gamma) = r_l + z_i \tan \gamma$. Тому $z_i \cot \alpha = r_l$. Отже, умова перетворення кругового сегмента на перерізі паралельною до основи

площиною на висоті z у півкруг для похило зрізаного конуса має вигляд $z = r_l \tan \alpha$.

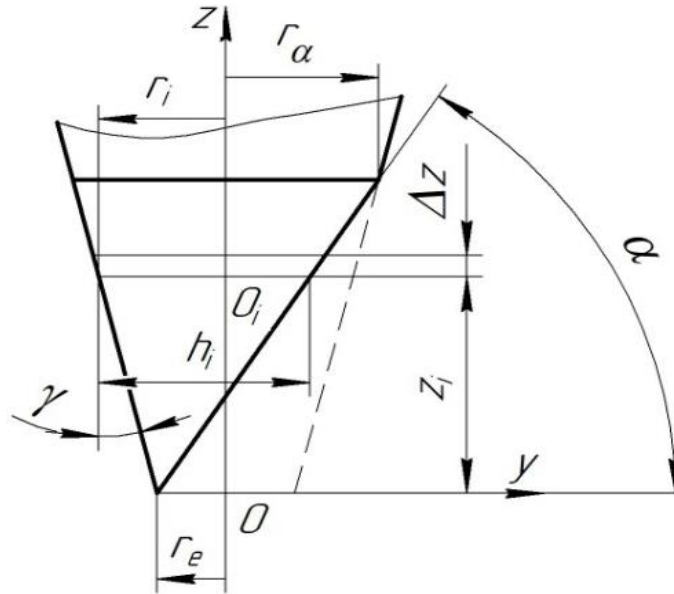


Рисунок 2.4 – Поздовжній розріз нижньої частини похило зрізаного електрода

Таким чином, зважаючи на (2.3), отримуємо, що

$$R_\alpha = R_1 + R_2,$$

де $R_1 = \int_0^{r_l \tan \alpha} \frac{\rho dz}{S_1(z)}$, $R_2 = \int_{r_l \tan \alpha}^{h_\alpha} \frac{\rho dz}{S_2(z)}$, $S_1(z)$ та $S_2(z)$ – площі кругових сегментів на перерізі висотою z для випадків 1 та 2 відповідно. Нижче виведемо формули для відшукування цих площ.

1) Нехай $0 \leq z \leq r_l \tan \alpha$.

Тоді з рисунка 2.5 видно, що $\beta = 2 \arccos \frac{r_i - h_i}{r_i}$. Отже, площа сектора з центральним кутом β рівна $S_{sec} = r_i^2 \cdot \frac{\beta}{2} = r_i^2 \arccos \frac{r_i - h_i}{r_i}$. Відповідний катет c_i становить $c_i = \sqrt{r_i^2 - (r_i - h_i)^2} = \sqrt{2r_i h_i - h_i^2}$. Площа трикутника, що спирається на цей круговий сектор, становить $S_\Delta = 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot c \cdot (r_i - h_i) = (r_i - h_i) \sqrt{2r_i h_i - h_i^2}$. Нарешті, площа сегмента $S_{seg} = S_{sec} - S_\Delta = r_i^2 \arccos \frac{r_i - h_i}{r_i} - (r_i - h_i) \sqrt{2r_i h_i - h_i^2}$. Отже, остаточно отримуємо

$$\begin{aligned}
S_1(z) = S_{seg} &= (r_l + z \tan \gamma)^2 \arccos \frac{r_l + z \tan \gamma - z(\cot \alpha + \tan \gamma)}{r_l + z \tan \gamma} - (r_l + z \tan \gamma - \\
&- z(\cot \alpha + \tan \gamma)) \sqrt{2(r_l + z \tan \gamma)z(\cot \alpha + \tan \gamma) - z^2(\cot \alpha + \tan \gamma)^2} = \\
&= (r_l + z \tan \gamma)^2 \arccos \frac{r_l - z \cot \alpha}{r_l + z \tan \gamma} - \\
&- (r_l - z \cot \alpha) \sqrt{z(\cot \alpha + \tan \gamma)(2r_l + z \tan \gamma - z \cot \alpha)}
\end{aligned}$$

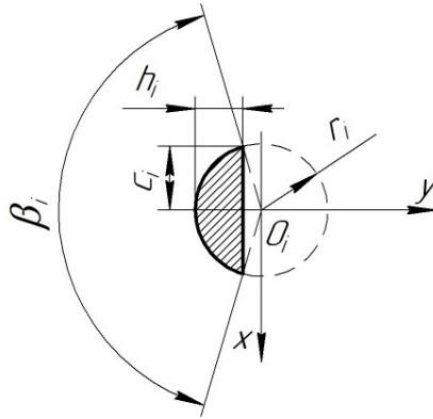


Рисунок 2.5 – Поперечний переріз нижньої частини електрода
для випадку $0 \leq z < r_l \tan \alpha$

Відповідно, на основі формули (2.3) опір R_1 у цьому випадку становить

$$R_1 = \int_0^{r_l \tan \alpha} \frac{\rho dz}{(r_l + z \tan \gamma)^2 \arccos \frac{r_l - z \cot \alpha}{r_l + z \tan \gamma} - (r_l - z \cot \alpha) \sqrt{z(\cot \alpha + \tan \gamma)(2r_l + z \tan \gamma - z \cot \alpha)}}. \quad (2.6)$$

2) Нехай $r_l \tan \alpha \leq z \leq h_\alpha$.

Рисунок 2.6 демонструє крайній варіант між рисунком 2.5 та рисунком 2.7. Тоді з рисунка 2.7 видно, що $\beta = 2 \arccos \frac{h_i - r_i}{r_i}$. Як і у попередньому пункті, отримуємо, що площа сектора з кутом $2\pi - \beta$ рівна

$$S_{sec} = \pi r_i^2 - r_i^2 \frac{\beta}{2}, \text{ відповідний катет } c \text{ становить } c = \sqrt{r_i^2 - (h_i - r_i)^2} =$$

$\sqrt{2r_i h_i - h_i^2}$, площа трикутника, утвореного центральним кутом β , рівна

$$S_{\Delta} = 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot c(h_i - r_i) = \sqrt{2r_i h_i - h_i^2} (h_i - r_i) = (h_i - r_i) \sqrt{h_i(2r_i - h_i)}.$$

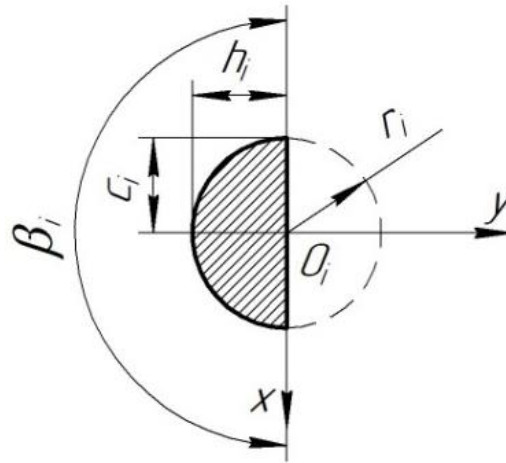


Рисунок 2.6. Поперечний переріз нижньої частини електрода
для випадку $z = r_l \tan \alpha$

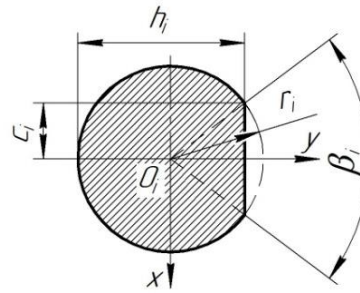


Рисунок 2.7 – Поперечний переріз нижньої частини електрода
для випадку $r_l \tan \alpha < z \leq h_\alpha$

Нарешті, площа сегмента $S_{seg} = S_{sec} + S_\Delta$, тобто

$$S_2(z) = (r_l + z \tan \gamma)^2 \left(\pi - \arccos \frac{z \cot \alpha - r_l}{r_l + z \tan \gamma} \right) + \\ + (z \cot \alpha - r_l) \sqrt{z(\cot \alpha + \tan \gamma)(2r_l + z \tan \gamma - z \cot \alpha)}.$$

Відповідно, на основі формули (2.3) опір R_1 у цьому випадку становить

$$R_2 = \int_{r_l \tan \alpha}^{h_\alpha} \frac{\rho dz}{(r_l + z \tan \gamma)^2 \left(\pi - \arccos \frac{z \cot \alpha - r_l}{r_l + z \tan \gamma} \right) + (z \cot \alpha - r_l) \sqrt{z(\cot \alpha + \tan \gamma)(2r_l + z \tan \gamma - z \cot \alpha)}} \quad (2.7)$$

Слід зазначити, що інтеграли з такими властивостями на комплексній площині можуть визначати мероморфні функції або аналітичні функції з точками розгалуження [143] залежно від того, який з трьох параметрів комплексифікувати.

Отже, опір похило зрізаного конуса становить

$$R = R_\gamma + R_1 + R_2,$$

де R_γ , R_1 , R_2 визначаються за формулами (2.5), (2.6), (2.7), відповідно.

Зазначимо, що з рисунка 2.3 видно, що за фіксованих радіусів нижньої та верхньої основи конуса максимальний кут заточування α визначається з рівності $\tan \alpha = \frac{h}{r_u + r_l}$.

2.3 Результати числового розрахунку

Для обчислення інтегралів R_1 та R_2 використали середовище комп'ютерної алгебри wxMaxima. А саме застосували команду `quad_qag`, яка втілює простий глобально адаптивний інтегратор на основі стратегії Ейнда (Piessens, 1973) та дозволяє вибрати серед 6 пар квадратурних формул Гауса-Кронрода для правил обчислення самого інтеграла. Правило з вищим номером придатне для сильно коливних інтегралів, як у нашому випадку.

Результати обчислень наведені у вигляді рисунків 2.8 – 2.11, що показують зміну опору залежно від зміни радіуса r_l нижньої основи конуса при фіксованих інших значеннях параметрів (радіус верхньої основи, висота і кут заточування електродна, тобто кут нахилу площини зрізу), а також у вигляді рисунків 2.12 – 2.15, що показують графік залежності опору від зміни кута заточування.

На рисунку 2.8 бачимо стрімке експоненційне спадання опору при наближенні радіуса нижньої основи до $5 \cdot 10^{-6}$ м та поступове зменшення впливу цього радіуса на подальшу зміну опору мікроелектрода.

На рисунку 2.9 бачимо лінійне спадання опору при зміні значень радіуса нижньої основи конічного мікроелектрода від $5 \cdot 10^{-4}$ м до 0,001 м.

На рисунку 2.10 (як і на рис. 2.8) бачимо стрімке експоненційне спадання опору при наближенні радіуса нижньої основи до $5 \cdot 10^{-6}$ м та поступове зменшення впливу цього радіуса на подальшу зміну опору мікроелектрода. Така повна аналогія пояснюється однаковою геометричною структурою цих двох випадків. Тут різниця тільки у питомому опорі.

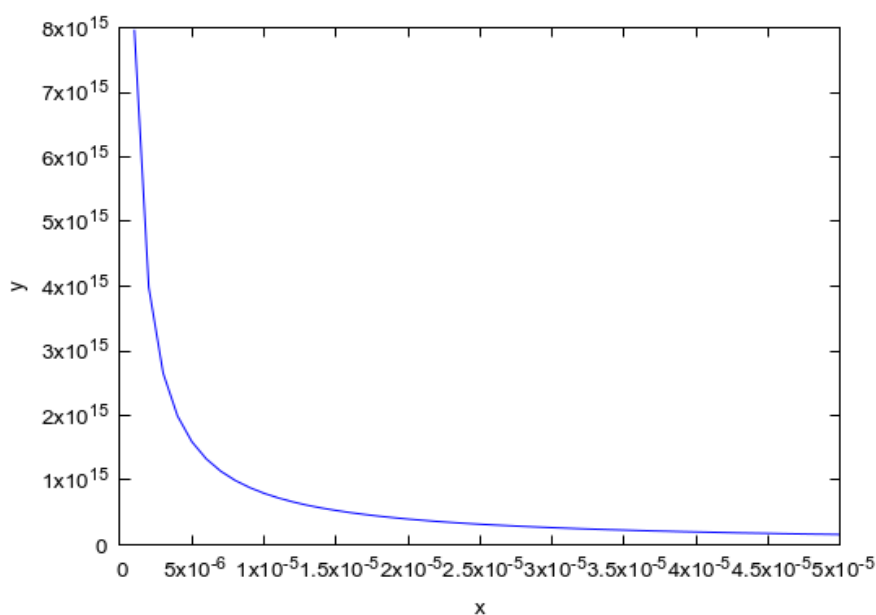


Рисунок 2.8 – Графік залежності опору мікроелектрода від радіуса нижньої основи $r_l \in [10^{-6}; 5 \cdot 10^{-5}]$ при фіксованих значеннях $\rho = .25 \cdot 10^8, r_u = 0.001, h = 0.02, \alpha = \frac{\pi}{6}$

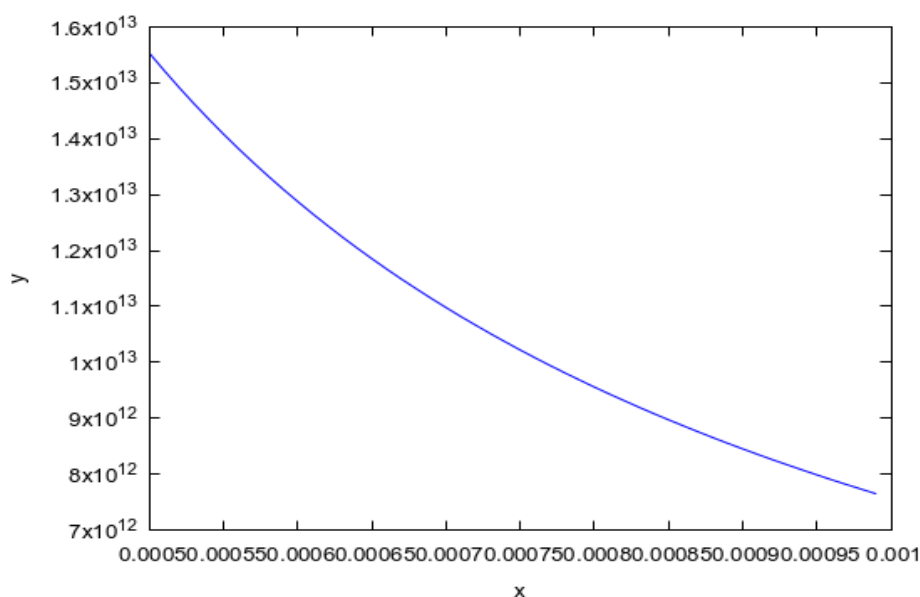


Рисунок 2.9 – Графік залежності опору мікроелектрода від радіуса нижньої основи $r_l \in [0.0005; 0.001]$ при фіксованих значеннях $\rho = .25 \cdot 10^8, r_u = 0.001, h = 0.02, \alpha = \frac{\pi}{6}$

На рисунку 2.11 (як і на рис. 2.9) бачимо опору при зміні значень радіуса нижньої основи конічного мікроелектрода від $5 \cdot 10^{-4}$ м до 0,001 м. Тут різниця тільки у питомому опорі.

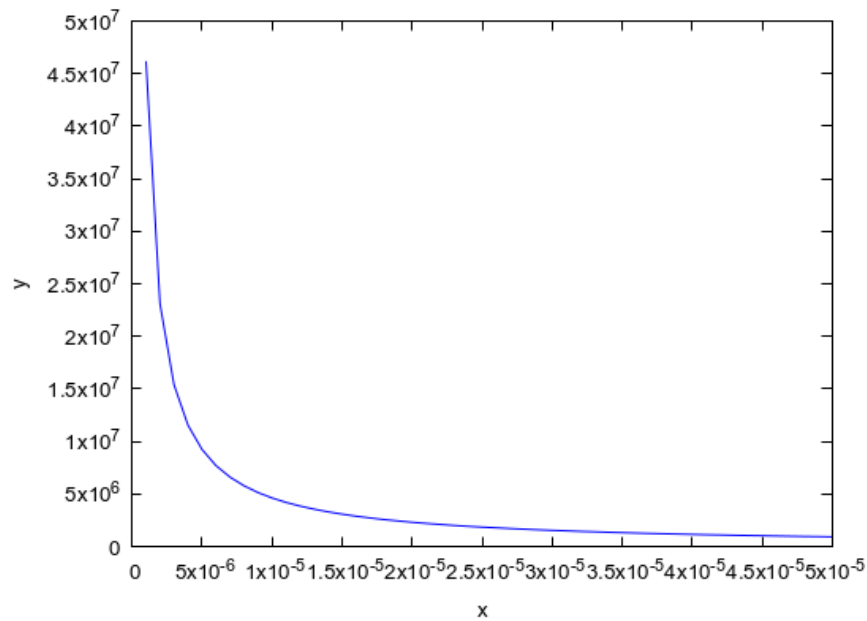


Рисунок 2.10 – Графік залежності опору мікроелектрода

від радіуса нижньої основи $r_l \in [10^{-6}; 5 \cdot 10^{-5}]$

при фіксованих значеннях $\rho = \frac{1}{6.9}, r_u = 0.001, h = 0.02, \alpha = \frac{\pi}{6}$

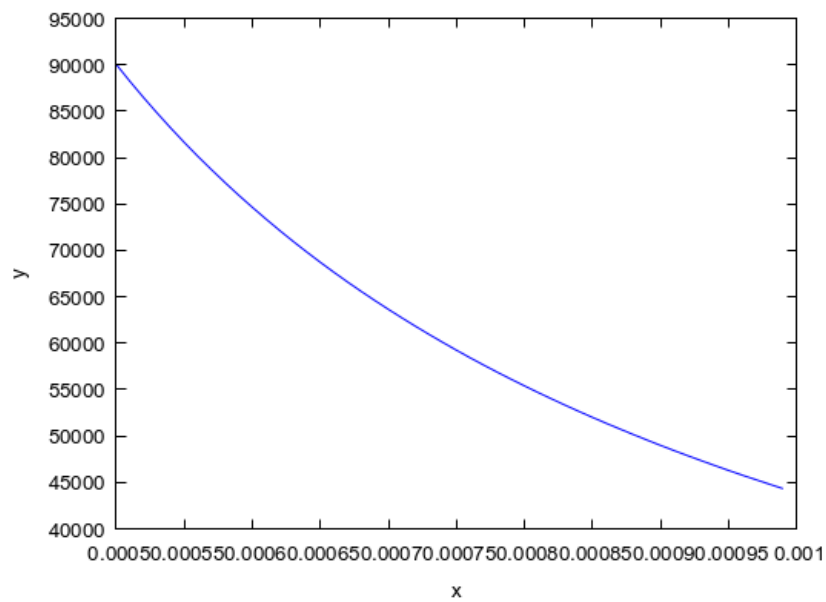


Рисунок 2.11 – Графік залежності опору мікроелектрода

від радіуса нижньої основи $r_l \in [0.0005; 0.001]$

при фіксованих значеннях $\rho = \frac{1}{6.9}, r_u = 0.001, h = 0.02, \alpha = \frac{\pi}{6}$

Суто геометрично рисунок 2.12 відносно рис. 2.8 та рис. 2.10 є їхнім дзеркальним відображенням. Але математично тут інший змінний параметр, а

саме кут заточування. Там спершу маємо поступове спадання опору мікроелектрода при зростанні кута заточування мікроелектрода і приблизно при значенні 1,3 радіана настає стрімке експоненційне спадання опору.

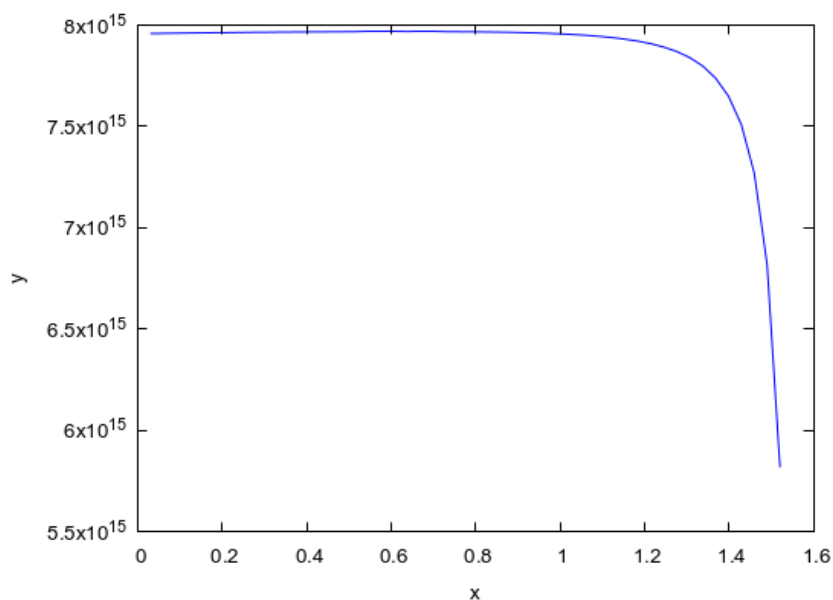


Рисунок 2.12 – Графік залежності опору мікроелектрода від кута заточування $\alpha \in [0; 1.52078]$

при фіксованих значеннях $r_l = 10^{-6}, \rho = .25 \cdot 10^8, r_u = 0.001, h = 0.02$

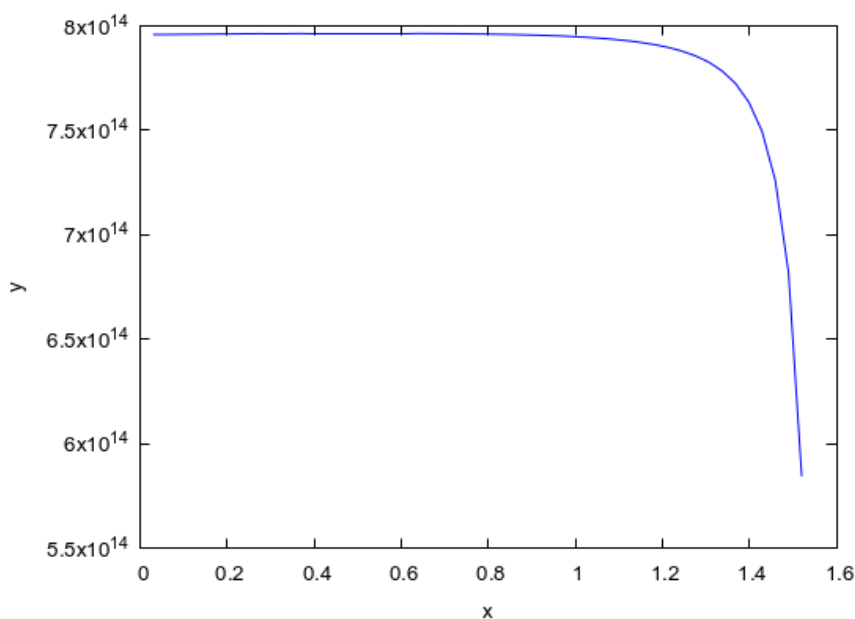


Рисунок 2.13 – Графік залежності опору мікроелектрода від кута заточування $\alpha \in [0; 1.52033]$

при фіксованих значеннях $r_l = 10^{-5}, \rho = .25 \cdot 10^8, r_u = 0.001, h = 0.02$

Рисунок 2.13 має те саме якісне тлумачення, що й рис. 2.12, але при меншому радіусі нижньої основи.

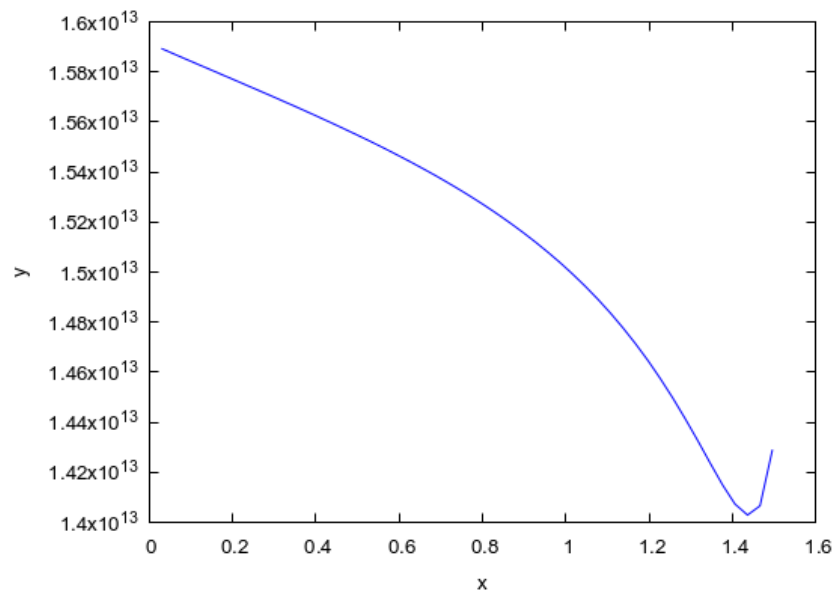


Рисунок 2.14 – Графік залежності опору мікроелектрода від кута заточування $\alpha \in [0; 1.49593]$

при фіксованих значеннях $r_l = 0.0005, \rho = .25 \cdot 10^8, r_u = 0.001, h = 0.02$.

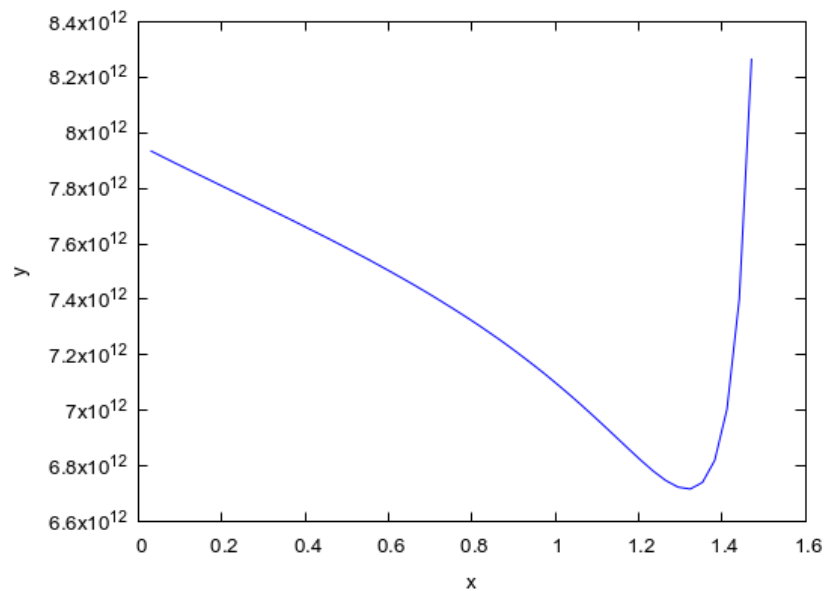


Рисунок 2.15 – Графік залежності опору мікроелектрода від кута заточування $\alpha \in [0; 1.47112]$

при фіксованих значеннях $r_l = 0.001, \rho = .25 \cdot 10^8, r_u = 0.001, h = 0.02$.

Рисунок 2.14 показує, що при певних значення інших параметрів можна добитися найменшого значення опору відносно різних значень кута заточування. У цьому цінність цих мікроелектродів, бо регулюючи кут заточування можемо відібрати електрод з найменшим електричним опором.

Рисунок 2.15 подібний до рисунку 2.14, бо також демонструє наявність точки мінімуму серед обчислених значень опору при зміні кута заточування.

Можна стверджувати, що при збільшенні кута α від 0 до $\pi/2$ вираз для R_γ є спадною функцією цього параметра. Натомість знаменники інтегральних виразів для опорів, заданих інтегралами R_1 і R_2 , також є спадними функціями, а отже, самі інтегральні вирази і, відповідно, інтеграли R_1 і R_2 є зростаючими функціями. У зв'язку з цим на рисунку 2.3 та рисунку 2.4 ми бачимо строге зменшення опору зі збільшенням кута. Це пояснюється тим, що в загальному опорі зменшення опору від R_γ набагато більше, ніж збільшення опору від членів R_1 і R_2 .

Істотною перевагою використання мікроелектродів розглянутих форм для електрохімічних досліджень є забезпечення підвищення точності та надійності результатів електрохімічних вимірювань на металевих покриттях, а також підвищення продуктивності наукових досліджень.

2.4 Розроблення нової конструкції мікроелектрода для електрохімічних досліджень покриттів

Відомий електрод для електрохімічних досліджень, який складається з електрода порівняння, що має електричний вивід та сполучений через електроліт зі скляним капіляром Луггіна, що заповнений електролітом [144].

Дана конструкція електрода дозволяє вимірювати електродні потенціали поверхні металів і сплавів, але не забезпечує можливість проведення мікроелектрохімічних досліджень на структурних складових сплавів і покриттів в електролітах та в корозійних тріщинах і щілинах.

Відомий також мікроелектрод для електрохімічних вимірювань, який складається з електрода порівняння, з'єднаного через електроліт з скляним мікрокапіляром, заповненим електролітом, і допоміжного поляризуючого

електрода, покритого діелектричною ізоляцією по всій бічній поверхні, приєднаного до стінки мікрокапіляра, що додатково містить іон-чутливий електрод, покритий діелектричною ізоляцією по всій бічній поверхні, причому допоміжний поляризуючий електрод та іон-чутливий електрод встановлені ексцентрично та діаметрально протилежно в каналі мікрокапіляра та приєднані до його внутрішньої стінки, при цьому відношення зовнішнього діаметра діелектричної ізоляції цих електродів до внутрішнього діаметра каналу мікрокапіляра складає 1:(3–8), а торці допоміжного поляризуючого та іон-чутливого електродів лежать в одній площині з торцем мікрокапіляра [145].

Конструкція відомого мікроелектрода для електрохімічних досліджень характеризується великим електричним опором і потребує застосування вимірювального приладу з високим вхідним електричним опором для вимірювання електродного потенціалу, різниці електродних потенціалів, електричного струму в мікрогальванічних парах та водневого показника електроліту під час проведення електрохімічних корозійних досліджень металів, сплавів та покриттів, що призводить до зниження точності та достовірності результатів цих наукових досліджень.

Найбільш близьким аналогом мікроелектрода за технічною суттю, що заявляється, вибраним як прототип, є мікроелектрод для електрохімічних досліджень покриттів, який містить тримач із розташованим в його порожнині електродом порівняння, що з однієї сторони має електричний вивід, а з іншої сторони через електроліт сполучається зі скляним мікрокапіляром заповненим цим електролітом, причому конічна частина цього скляного мікрокапіляра виконана у вигляді конуса, що зрізаний площиною перпендикулярною до поздовжньої осі вказаного скляного мікрокапіляра, та засоби герметизації скляного мікрокапіляра в тримачі [146].

Конструкція відомого мікроелектрода дозволяє вимірювати електродний потенціал і величину струму в електроліті на поверхні структурних складових металевого сплаву та покриття, забезпечує можливості вимірювання концентрації іонів в електроліті та проведення електрохімічних вимірювань на

структурних складових поверхні металевих сплавів і в корозійних тріщинах та щілинах, а також проводити мікробіологічні дослідження на живих клітинах організмів і навколо них. Однак така конструкція мікроелектрода для електрохімічних досліджень характеризується великим електричним опором і потребує застосування вимірювального приладу з високим вхідним електричним опором або підсилювачів, що призводить до зниження точності та достовірності результатів вимірювань та зменшення продуктивності виконання наукових досліджень.

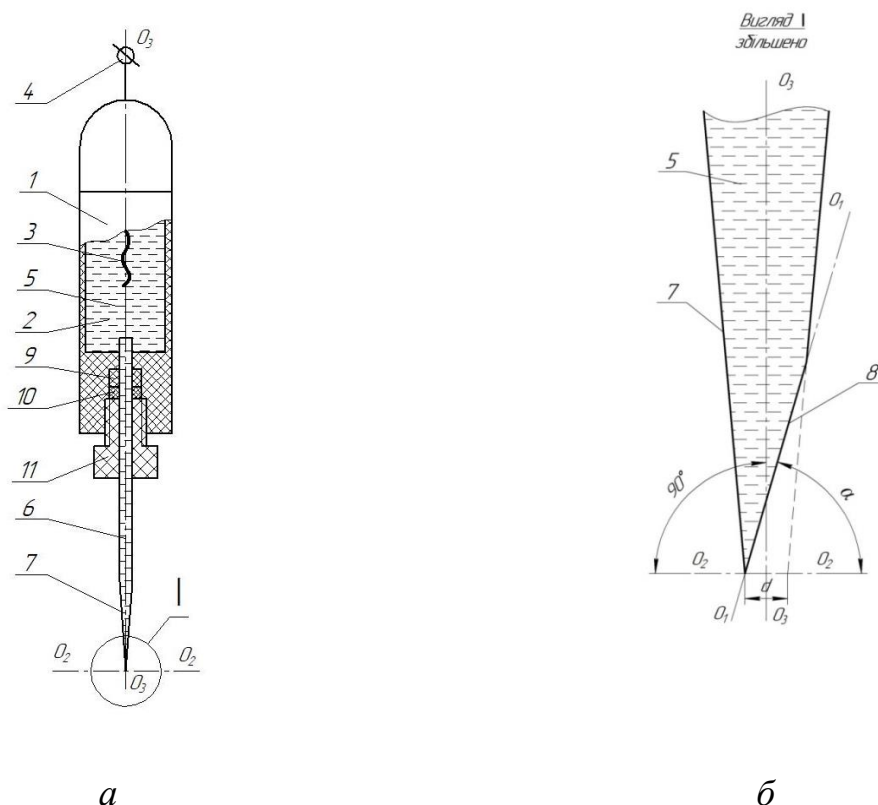
Мікроелектрод для електрохімічних досліджень покриттів (рис. 2.16, *а* та рис. 2.16, *б*) містить тримач 1, розташований в його порожнині 2 електрод порівняння 3, наприклад, хлорсрібний, що з однієї сторони має електричний вивід 4, який служить для під'єднання до системи вимірювань (на рис. 2.16 не показана), а з іншої сторони – сполучається через електроліт 5 зі скляним мікрокапіляром 6 з конічною частиною 7, який заповнений цим електролітом 5.

Конічна частина 7 цього скляного мікрокапіляра 6 виконана у вигляді конуса зрізаного похилою площиною O_1-O_1 (рис. 2.16, *б*). Кут нахилу α цієї похилої площини O_1-O_1 зрізу 8 до площини O_2-O_2 , яка перпендикулярна до поздовжньої осі O_3-O_3 вказаного скляного мікрокапіляра 6, визначають із нерівності $74^\circ \leq \alpha \leq 75^\circ$.

Для герметизації місця виходу скляного мікрокапіляра 6 із тримача 1 та запобігання витікання електроліту 5 служить еластичне ущільнююче кільце 9, яке через неметалеву шайбу 10 стискається спеціальним болтом 11.

Скляний мікрокапіляр 6 з конічною частиною 7 виготовляють із спеціального боросилікатного скла марки Pyrex®, яке характеризується високою хімічною стабільністю, високою температурою розм'якшення, малим коефіцієнтом теплового розширення і високою діелектричною проникністю (діелектрична стала) та низькою розчинністю у водних електролітах. Скляну трубку, наприклад, із зовнішнім діаметром 2 мм, внутрішнім діаметром 1,7 мм та довжиною 80 мм нерухомо закріплюють у захватах спеціального пристрою для виготовлення скляних мікрокапілярів, наприклад, механічного,

електромеханічного типу тощо (на рис. 2.16 не показано), здійснюють локальне нагрівання посередині цієї трубки та шляхом подальшого динамічного розтягування і розривання одержують два скляних мікрокапіляри 6 з конічною частиною 7, яка має діаметр кінчика d від 1 до 5 мкм. Після цього за допомогою вимірювального мікроскопа контролюють геометричні розміри скляних мікрокапілярів 6 та їх конічної частини 7 (на рис. 2.16 не показано).



- 1 – тримач; 2 – порожнина; 3 – хлорсрібний електрод порівняння;
 4 – електричний вивід; 5 – електроліт; 6 – скляний мікрокапіляр;
 7 – конічна частина; 8 – площина O_1-O_1 ; 9 – ушільнення;
 10 – шайба; 11 – спеціальний болт

Рисунок 2.16 – Мікроелектрод для електрохімічних досліджень покриттів

На спеціальному верстаті проводять алмазне заточування конічної частини 7 скляного мікрокапіляра 6 під кутом α для отримання зрізу 8 та проводять його очищення (на рис. 2.16 не показано). Скло-ний мікрокапіляр 6 з конічною частиною 7, яка має зріз 8, заповнюють електролітом 5 відомими методами, наприклад, спочатку його витримують у середовищі пари над киплячою дистильованою водою, а потім витримують в електроліті 5, яким і

відбувається остаточне заповнення за рахунок протікання дифузійних процесів (на рис. 2.16 не показано). Далі заповнений таким чином скляний мікрокапіляр 6 вставляють у тримач 1 із хлорсрібним електродом порівняння 3 та герметизують, використовуючи еластичне ущільнююче кільце 9, неметалеву шайбу 10 та спеціальний болт 11 (рис. 2.16, а).

Висновки до розділу 2

1. У даному розділі отримано аналітичне рішення задачі визначення електричного опору вертикального конічного електрода, розрізаного похилою площиною, без спрощувального припущення про рівність висоти вертикальної та похилої частин електрода. Показано, що відповідний опір описується сумою дробової раціональної функції та двох інтегралів, які відображають окремі складові електричного опору за площею поперечного перерізу, при цьому обидва є невласними інтегралами другого роду від необмежених функцій.

2. Встановлено, що розріз конуса похилою площиною призводить до зменшення електричного опору мікроелектрода у порівнянні зі звичайним конічним мікроелектродом. Опір гіперболічно зменшується зі збільшенням радіуса нижньої основи.

3. На основі числових результатів підтверджено, що падіння електричного опору становить до 90% для кута нахилу $\pi/6$ рад та оптимального співвідношення меншої основи до більшої основи конічного мікроелектрода 1:500. Крім того, суттєве зниження опору більш ніж на 30% досягається при співвідношенні меншої та більшої основ конуса 1:1000 і оптимальному куті нахилу $\pi/2$ рад.

4. Запропоновано конструкцію мікроелектрода для електрохімічних досліджень покриттів, яка забезпечує надійне розташування хлорсрібного електрода порівняння, стабільність електролітичного контакту та низький електричний опір, завдяки використанню мікрокапіляра зі скошеною конічною частиною.

Результати розділу опубліковано в працях автора [14, 15].

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ МІКРОДУГОВОГО ОКСИДУВАННЯ АЛЮМІНІЮ, ВИБІР МАТЕРІАЛІВ І МЕТОДИК ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Вибір матеріалів і технологій виготовлення заготовок

3.1.1 Досліджувані алюмінієві сплави

Як матеріали для виготовлення експериментальних зразків під час дослідження процесу мікродугового оксидування використали алюмінієвий деформований та алюмінієвий ливарний сплав, які піддаються гартуванню:

- алюмінієвий деформівний сплав Д16Т системи Al–Cu–Mg, загартований і зістарений(табл. 3.1);
- алюмінієвий ливарний сплав АК8М системи Al–Si–Cu, загартований і зістарений(табл. 3.2).

Таблиця 3.1 – Хімічний склад і механічні властивості Д16Т (ГОСТ 4784–74)

Сплав	Хімічний склад, %								Механічні властивості			
	Al	Cu	Mg	Mn	Zn	Fe	Si	Ni	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	E, ГПа	НВ
Д16Т	Основний компонент	3,8-4,9	1,2-1,8	0,3-0,9	0,3	0,5	0,5	0,1	392	255	72	160

Таблиця 3.2 – Хімічний склад і механічні властивості ливарного сплаву АК8М (ГОСТ 1583–93)

Сплав	Хімічний склад, %							Механічні властивості			
	Al	Mg	Si	Cu	Mn	Ti	Fe	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	E, ГПа	НВ
АК8М	Основний компонент	0,3-0,5	7,5-9	1-1,5	0,3-0,5	0,1-0,3	до 0,9	105	284	71	95

Вибрані алюмінієві сплави є одні з найбільш розповсюджених для виготовлення деталей машин.

Як еталон використовували алюміній технічної чистоти А0 (ГОСТ 11069–2001). Твердість НВ 32.

3.1.2 Верстати, різальний та вимірювальний інструмент

Зразки для досліджень виготовляли на токарному верстаті 16K20 та на фрезерному верстаті 6313. Шліфували на круглошліфувальному 3А151 і плоскошліфувальному 3Г71.

Шліфування оксидних покриттів виконували на круглошліфувальному верстаті 3А151 алмазним кругом. Сили різання під час шліфування оксидних покриттів вимірювали із використанням динамометричних центрів, які з'єднані через підсилювач з реєструючим пристроєм. Тарування системи вимірювання сил провели взірцевим динамометром стиску (до 10000 Н).

Перед формуванням мікродуговим оксидуванням покриттів зразки алюмінієвих сплавів піддавали механічній обробці для отримання шорсткості поверхні заготовки $Ra = 0,8\text{--}2,5$ мкм. Для формування твердих та електроізоляційних анодно-окисних покриттів на алюмінії та його сплавах рекомендована ГОСТ 9.301–73 величина шорсткості становить Ra 1,5 мкм.

Лінійні розміри зразків вимірювали мікрометром МК 25 (ГОСТ 6507–90) з ціною поділки 0,01 мм, малим інструментальним мікроскопом МИМ-1 з точністю $\pm 0,01$ мм та індикаторною головкою годинникового типу з точністю ± 1 мкм.

3.2 Розробка технології та обладнання для мікродугового оксидуванням алюмінієвих сплавів

3.2.1 Технологічний процес мікродугового оксидуванням

Виготовлення зразків і деталей з алюмінієвих сплавів з робочими поверхнями, зміцненими мікродуговим оксидуванням, здійснювали за

розробленим технологічного процесом (табл. 3.3), який забезпечує виготовлення нових і відновлення зношених деталей машин.

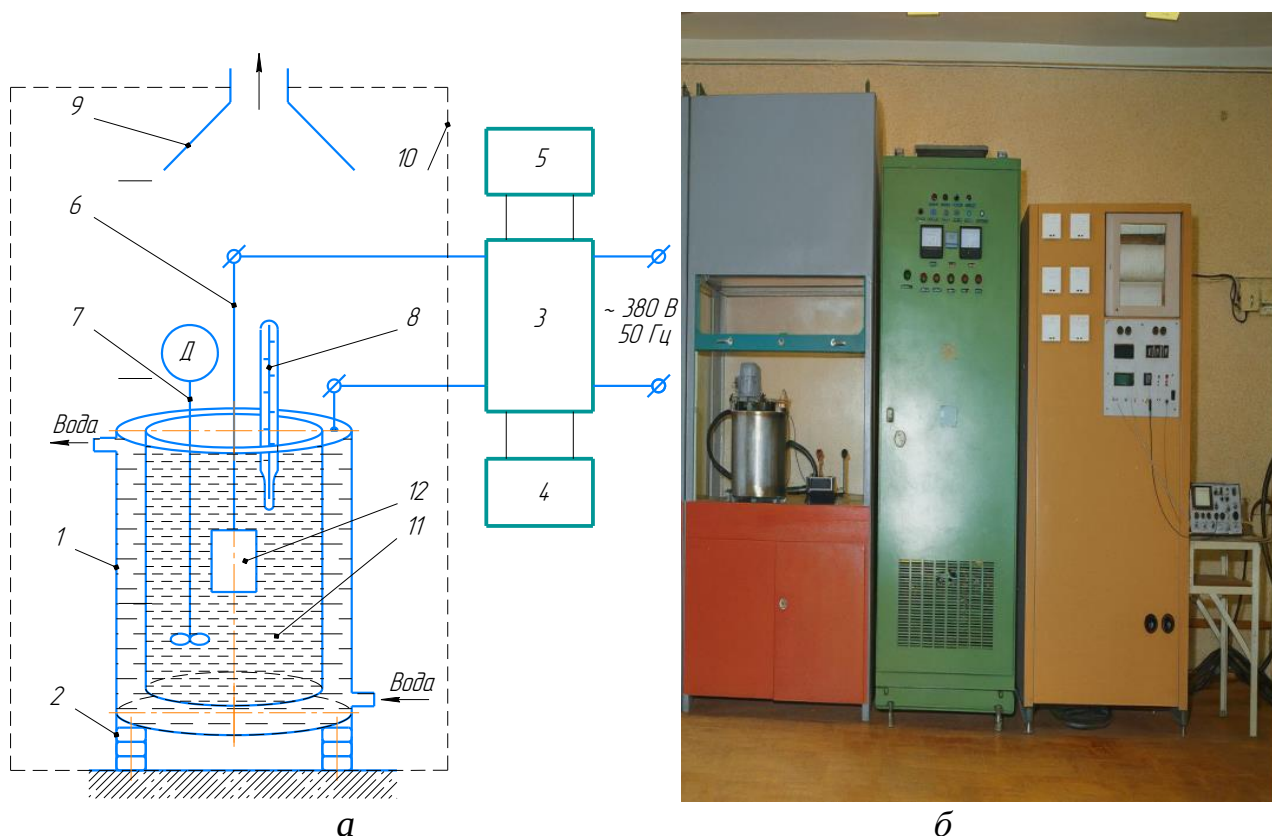
Таблиця 3.3 – Операції технологічного процесу виготовлення/відновлення деталей з робочими поверхнями, зміцненими мікродуговим оксидуванням у проточному електроліті

Номер	Назва операції	Деталь	
		виготов- лення	віднов- лення
1	Заготовка деталі	+	+
2	Механічна обробка	+	+
3	Підготовка поверхні	+	+
4	Відновлення розміру, наприклад, напиленням шару алюмінію	—	+
5	Механічна обробка	—	+
6	Підготовка поверхні	—	+
7	Встановлення і герметизація деталі в електрохімічній комірці	+	+
8	Формування покриття мікродуговим оксидуванням	+	+
9	Промивання	+	+
10	Виймання деталі із електрохімічної комірки	+	+
11	Сушіння	+	+
12	Контроль якості оксидного покриття	+	+
13	Видалення розпушеного шару	+	+
14	Чорнова механічна обробка	+	+
15	Чистова механічна обробка	+	+
16	Викінчувальна механічна обробка	+	+
17	Промивання	+	+
18	Сушіння	+	+
19	Контроль розмірів та шорсткості деталі з оксидним покриттям	+	+
20	Додаткова обробка покриття, наприклад, наповнення пор	+	+

Підготовчі операції, промивання, сушіння в технологічному процесі виготовлення/відновлення деталей виконуються аналогічним чином, як під час твердого анодування алюмінію.

3.2.2 Розробка установки для мікродугового оксидування в електроліті з автоматизованою системою керування

Для формування покриттів на досліджуваних алюмінієвих сплавах мікродуговим оксидуванням розроблено установку, яка забезпечує формування оксидних покриттів на деталях у спокійному/проточному електроліті (рис. 3.1) та дозволяє регулювати форму електричного сигналу, частоту, напругу, густини і співвідношення анодного та катодного струму, а також підвищити енергоефективності процесу плазмового електролітичного оксидування деталей із алюмінієвих сплавів під час формування оксидних покриттів в електроліті.



1 – гальванічна ванна; 2 – електроізоляційні опори; 3 – джерело електричного живлення; 4 – пульт керування; 5 – система керування технологічними параметрами процесу МДО; 6 – струмовідвід; 7 – механічна мішалка; 8 – термометр; 9 – витяжна вентиляція; 10 – витяжна шафа із системою блокування; 11 – електроліт; 12 – заготовка деталі

Рисунок 3.1 – Схема (а) та загальний вигляд (б) установки для мікродугового оксидування деталей в проточному електроліті:

Зовнішній вигляд інтерфейсу системи керування установкою наведено на рис. 3.2.

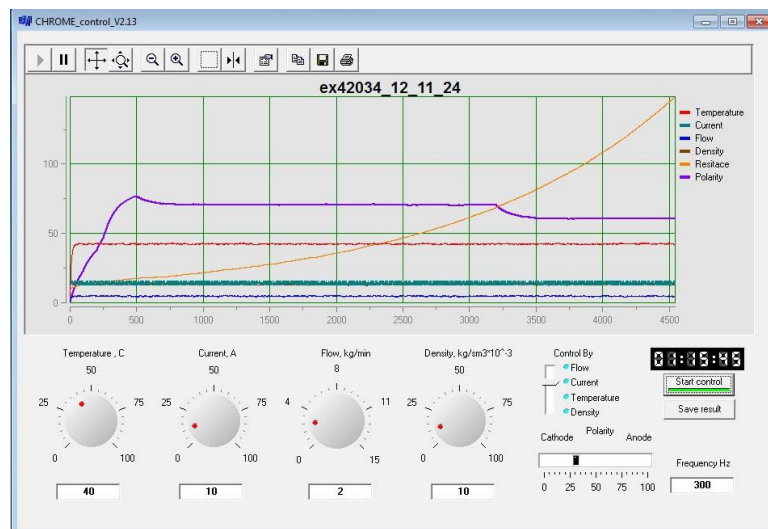


Рисунок 3.2 – Загальний вигляд інтерфейсу системи керування технологічними параметрами процесу мікродугового оксидування в проточному електроліті

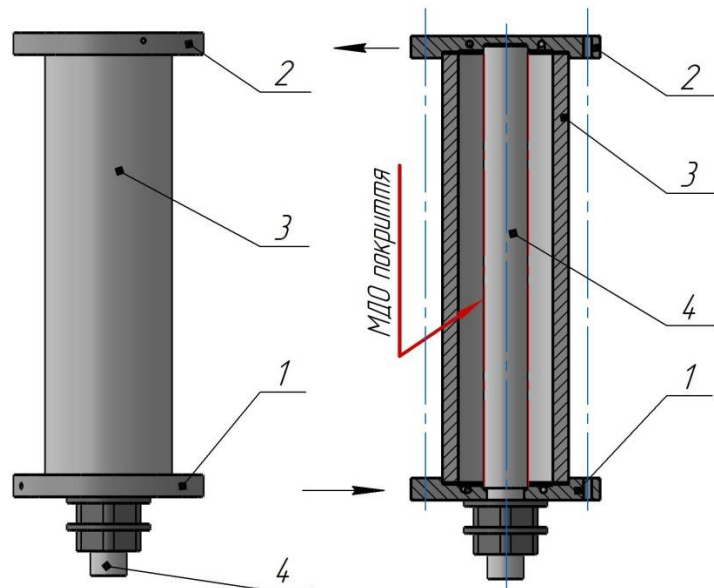
Установка включає джерело живлення змінним струмом конденсаторного типу (напруга до 1000 В), систему вимірювання величин напруги та струму в катодному та анодному періодах, систему циркуляції електроліту, змінні електрохімічні комірки з електродами з нержавіючої сталі X18H10T, систему охолодження електроліту, систему витяжної вентиляції та систему блокування від ураження електричним струмом і вище вказану систему керування.

Перед формуванням МДО-покриття зразки алюмінієвого сплаву піддавалися механічній обробці для отримання шорсткості поверхні заготовки в діапазоні $Ra = 0,8\text{--}2,5$ мкм. Під час формування оксидного покриття циліндричний зразок/деталь розміщується вертикально, співвісно з віссю електрохімічної комірки та герметизується фторопластовими ущільненнями.

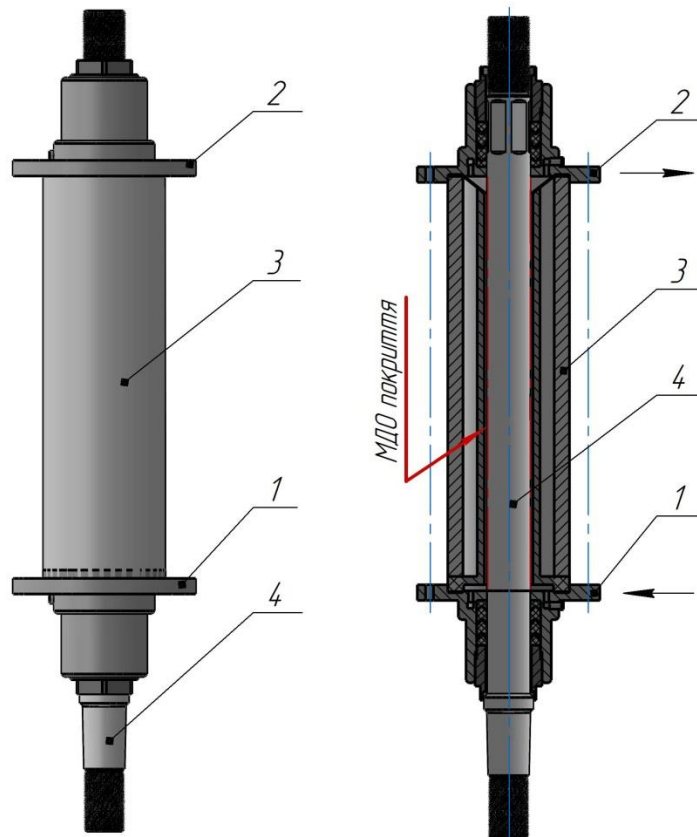
3.2.3 Моделювання руху електроліту в міжелектродному просторі електрохімічної комірки

Для побудови 3D-моделі електрохімічних комірок для формування оксидних покриттів на внутрішніх та зовнішніх циліндричних поверхнях деталей у проточному електроліті спочатку створили 3D-моделі кожної деталі,

а потім об'єднали їх у збірку, використовуючи навчальну версію SolidWorks (рис. 3.3, а, б).



а



б

1, 2 – нижня і верхня кришка; 3 – анод;
4 – деталь (захисна втулка і шток поршня відповідно)

Рисунок 3.3– 3D-модель електрохімічної комірки формування оксидних покриттів на внутрішніх (а) та зовнішніх (б) циліндричних поверхнях деталей у проточному електроліті

Конструкція електрохімічних комірок була нами удосконалена шляхом виконання анодів із конусною поверхнею для забезпечення стабілізації напруженості електричного поля під час електролізу, знизу – вверх, оскільки збільшується відповідно за висотою комірки концентрація виділеного водню в електроліті. Ці комірки забезпечують рівномірне формування оксидного покриття на довгомірних циліндричних деталях.

Після цього запустили додаток Flow Simulation для визначення швидкостей потоку електроліту, задавши початкові параметри, поверхні куди подається і звідки відводиться електроліт та виконали розрахунок. Після виконання розрахунку появляється додаткова вкладка із результатами. В ній знаходимо елемент траєкторія потоку та вибираємо необхідні нам технологічні параметри розрахунку (рис. 3.4, а, б). За результатами розрахунків можна створювати дво- або тривимірні траєкторії руху електроліту в міжелектродному просторі електрохімічної комірки для формування покриттів тощо [8].

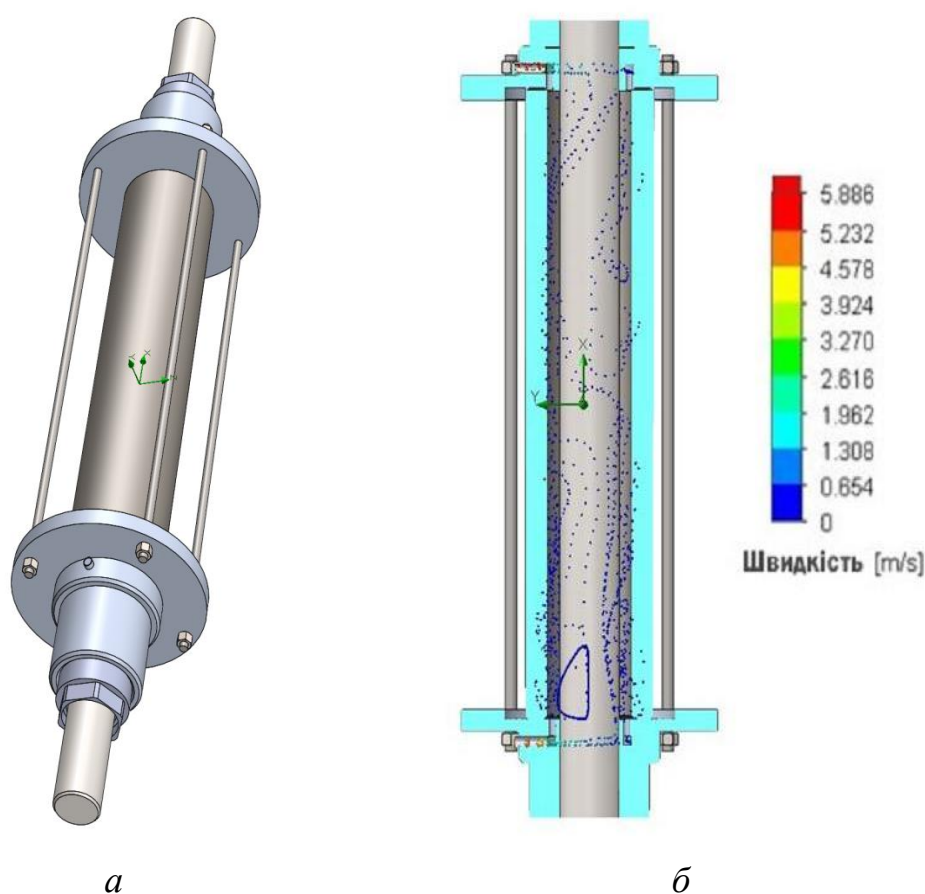


Рисунок 3.4 – Імітаційна модель електрохімічної комірки для формування оксидних покриттів (а) та розподіл швидкостей потоку електроліту (б)

На основі огляду науково-технічної літератури, патентів та результатів власних попередніх досліджень процесу МДО для експериментів був обраний силікатно-лужний електроліт на водній основі. Для приготування електролітів використовували хімічно чисті компоненти: гідроксид калію (KOH), згідно з ГОСТ 9285–78, та силікат натрію (Na_2SiO_3), згідно з ГОСТ 13078–81 і перекис водню H_2O_2 , згідно ГОСТ 177–88. Електроліт готували простим змішуванням компонентів у дистильованій воді, яку отримували за допомогою дистилятора води ДЕ-4-2.

Технологічні режими формування оксидного покриття плазмовим електролітичним оксидуванням: напруга від 100 до 1000 В; густина струму від 2 до 8 A/dm^2 , співвідношення компонентів електроліту (Na_2SiO_3)/(KOH) від 2 до 12, швидкість потоку електроліту від 28 до 132 cm/s , температура електроліту становила від 27 до 72 °С. На основі наведених технологічних режимів для зменшення кількості натурних експериментів проведено планування експерименту (див. пункт 3.5). Товщина сформованого робочого шару оксидного покриття становила від 10 мкм до 300 мкм.

3.3 Методика випробовування оксидних покриттів на знос

Трибологічні випробовування оксидних покриттів провели на стандартній машині для випробовування матеріалів на тертя 2168 УМТ (рис. 3.5), яка дозволяє моделювати реальні умови роботи деталей у вузлах відцентрових насосів: захисних втулок валів; кілець торцевих ущільнень (діапазон чисел обертання зразка від 30 до 3000 хв^{-1}).

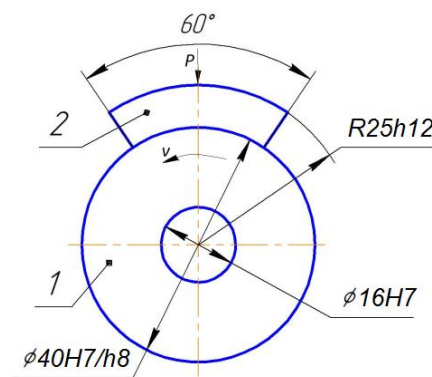


Рисунок 3.5 – Фотографія машини для випробовування матеріалів на тертя 2168 УМТ

Перед випробовуваннями зрізці піддавали припрацюванню в тих умовах, в яких проводились випробовування.

3.3.1 Випробовування захисних втулок валів

Захисні втулки валів випробовували за схемою: «диск – колодка» (рис. 3.6). Зразки для такої схеми тертя показані на рис. 3.3. Оксидне покриття наносили на зовнішню циліндричну поверхню диска. Колодкою слугував фрагмент сальника встановлений у спеціальній державці з кутом охоплення 60 градусів.



1 – диск; 2 – колодка (фрагмент сальника)

Рисунок 3.6 – Схема випробовування зразків:

Випробовування проводили у діапазоні чисел обертання зразка від 300 до 3000 хв^{-1} , з точністю $\pm 5\%$, що відповідає числу обертів валів відцентрових насосів. Питомий тиск на диск становив 1 МПа. Диск на 10 мм занурювали в місткість з глинистим розчином, що містив кварцевий пісок (10 % із зернистістю 10 мкм. Цей розчин під час проведення випробовувань перемішували механічною мішалкою і його температура становила 22 °С. Ступінь зношування зразків визначали зважуванням на лабораторних аналітичних вагах моделі ВЛА-200-М.

3.3.2 Випробовування кілець торцевих ущільнень

Кільця торцевих ущільнень випробовували за схемою торцевого тертя: «кільце – кільце». На торці зразків формували оксидне покриття. Оцінку фрикційної термостійкості оксидних покриттів, сформованих МДО, проводили

згідно з рекомендаціями (ГОСТ 23.210–80 Забезпечення зносостійкості виробів. Метод оцінки фрикційної термостійкості матеріалів). Експерименти проводили під час сухого тертя. Розміри зразків: зовнішній діаметр $D = 28$ мм, внутрішній діаметр $d = 20$ мм, $h = 15$ мм, площа номінальної поверхні тертя нерухомого зразка $A = 2,9$ см². Частота обертання рухомого зразка становила 1000 хв^{-1} , з точністю $\pm 5\%$. Навантаження на зразок становило 200 Н , з точністю $\pm 4\%$. Температуру в зоні тертя вимірювали за допомогою автоматичного електронного потенціометра класу точності $0,5$ з використанням хромель-копелевої (Е) термопари типу ЧК, діапазон вимірювання якої становить від -50 до $+600$ °С. Суть методу полягає в тому, що обертовий та нерухомий кільцеві зразки досліджуваної пари матеріалів встановлюються співвісно, притискаються один до одного торцевими робочими поверхнями із заданою осьовою силою, а також контролюється температура фрикційного нагрівання. Нерухомий кільцевий зразок монтується в шарнірному вузлі для забезпечення самовстановлення. Для порівняльних випробувань використовували конструкційну сталь леговану 40ХН (ГОСТ 4543–2016). Термостійкість оксидних покриттів під час тертя оцінюють за залежністю зміни температури від часу випробувань. Тривалість випробувань, після припрацювання зразків, контролювали секундоміром.

3.4 Методики дослідження будови, фізико-механічних та електрохімічних властивостей оксидних покриттів

3.4.1 Методика виготовлення шліфів

Шліфи вирізали із деталей з оксидними покриттям кутовою машиною Dnipro-M, оснащеною алмазним відрізним кругом, таким чином, щоб площина покриття була перпендикулярна до площини шліфа. Для запобігання впливу на метал основи різання здійснювали за рясного охолодження водою.

Для запобігання завалу кромок, а також з метою збільшення опорної поверхні шліфа проводили заливку зразка легкоплавкими металевим сплавом

Вуда Під час заливання розтопленим металом зразок поміщали у металеву форму перпендикулярно до площини її основи.

Виготовлення шліфів починають з обробки грубим шліфувальним папером з поступовим переходом від крупнозернистого до дрібнозернистого. При переході від одного номера шліфувального паперу до іншого шліф ретельно очищали від шліфувального пилу. Напрямок руху змінювали на 90 градусів під час переходу від однієї стадії до іншої.

Підготовка зразків до досліджень здійснюється з використанням шліфування та подальшого їх полірування. Приготування шліфів провели на шліфувально-полірувальному верстаті марки Struers (рис. 3.7).



Рисунок 3.7 – Загальний вигляд шліфувально-полірувального верстата марки Struers

Остаточну обробку – полірування проводили на фетровому або сукняному крузі за допомогою пасти з окису хрому.

3.4.2 Методика визначення шорсткості

Шорсткість поверхні зразків без покриття і з оксидним покриттям вимірювали інтерференційним профілометром «Micron-alpha» (рис. 3.8), який призначений для реєстрації мікротопографії поверхонь методом обробки послідовності інтерференційних картин в білому світлі. Прилад дозволяє: будувати 2D і 3D зображення поверхні; кількісно оцінювати характеристики рельєфу поверхні; розраховувати параметри шорсткості поверхні; обчислювати об'єм виступу (западини); спостерігати інтерференційні картини; проводити металографічні дослідження. Основні технічні характеристики: поле

сканування (X, Y) – 250x200 мкм. Максимальна вимірювана висота рельєфу (Z) – 60 мкм. Роздільна здатність по вертикалі (Z) – 5 нм.



Рисунок 3.8 – Безконтактний інтерференційний 3D-профілометр «Micron-alpha»

Згідно ГОСТ 2789-73 визначали: висоту нерівностей R_z (мкм), тобто середню відстань між п'ятьма найвищими і п'ятьма найнижчими точками, відповідно виступами і западинами профілю; середнє арифметичне відхилення точок профілю R_a (мкм) від середньої лінії профілю в межах ділянки базової довжини l та інші параметри.

Дослідження шорсткості провели в Центрі колективного користування науковими приладами «Центр електронної мікроскопії та рентгенівського мікроаналізу» Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка Національної академії наук України, м. Львів.

3.4.3 Методика визначення мікротвердості та товщини покриттів

На поперечних мікрошліфах приладом ПМТ-3, оснащеним алмазним індентором Вікерса (навантаження 0,5 Н до 1 Н, витримка 12–15 с, відстань 15–25 мкм), вимірювали мікротвердість оксидних покриттів та алюмінієвої основи. Відстань між відбитками. Величину мікротвердості розраховували за відомою формулою, враховуючи довжину діагоналі відбитка і навантаження.

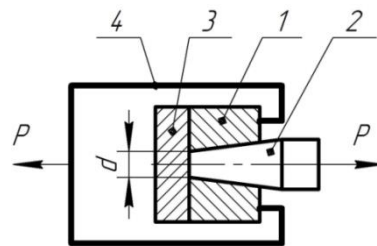
Товщину оксидних покриттів визначали на поперечних мікрошліфах мікротвердоміром ПМТ-3 із використанням окуляр-мікрометра з ціною поділки 1 мкм.

Зміну розмірів визначали експериментально, шляхом вимірюванням зразків без покриття, зразків із оксидними покриттями і товщини оксидного покриття на поперечних металошліфах, використовуючи твердомір ПМТ-3 (табл. 6.2). Для оперативного контролю оксидного покриття використовували також товщиномір.

Конусоподібність визначали як середнє значення різниці максимального та мінімального діаметра деталі з оксидним покриттям. Вимірювання проводили за допомогою індикатора годинникового типу з ціною поділки 1 мкм.

3.4.4 Визначення міцності зчеплення оксидного покриття

Міцність зчеплення мікротвердість покриття з алюмінієвою основою визначали методом конічного штифта під час нормальному відриву. Навантаження зразка здійснювали на установці [147] за схемою наведеною на рисунку 3.9.



1 – алюмінієвий зразок (основа); 2 – алюмінієвий конічний штифт;

3 – оксидне покриття; 4 – тяга

Рисунок 3.9 – Схема випробовування оксидного покриття на відривання:

Величину міцності зчеплення оксидного покриття з основою розраховували за відомою формулою

$$\sigma = \frac{4P}{\pi d^2},$$

де P – сила нормального відриву, Н;

d – діаметр меншої основи конуса (зі сторони межі оксидного покриття), м.

3.5 Планування експериментів для оптимізації технологічних процесів

Для проведення технологічних експериментів застосували методи планування: для оптимізації технологічних параметрів процесу мікродугового окисдування в проточному електроліті (ортогональний центральний композиційний експеримент); для отримання математичних моделей впливу складових технологічних режимів різання на шорсткість обробленої поверхні, на величину сил різання та на питому витрату алмазів у процесі шліфування мікродугових оксидних покриттів (повнофакторний експеримент).

3.5.1 Планування експерименту для оптимізації технологічних параметрів процесу ПЕО в проточному електроліті

Проведено експериментальні дослідження, результати яких дозволяють розрахувати коефіцієнти рівнянь регресії, тобто залежності для мікротвердості H та зносу W :

$$H = f(C, i, v, T); \quad W = f(C, i, v, T); \quad (3.1)$$

МДО-покриттів на алюмінієвому сплаві Д16Т від технологічних параметрів процесу: концентрації H_2O_2 (C), густини струму (i , А/дм²), швидкості потоку електроліту (v , см/с) та температури електроліту (T , °С) обрали ортогональний центральний композитний план другого порядку.

У нашому випадку, для чотирьох експериментальних факторів $k = 4$ та двох експериментів у центрі плану № 2, загальна кількість експериментів становила $N = 24 + 2 \cdot 4 + 2 = 26$.

Ортогональне центральне композитне планування МДО-експериментів проводилося на п'яти кодованих рівнях з кроком, що дорівнює $\alpha = 1,4826$: $-\alpha$; -1 ; 0 ; $+1$; $+\alpha$.

Обрані фактори відповідають усім вимогам, що до них пред'являються. Точність підтримки технологічних параметрів процесу МДО становила 3–5%. Інтервали варіювання наведено в таблиці 3.4.

Порядок проведення експериментів було обрано з серії випадкових чисел, щоб виключити вплив нерегульованих та неконтрольованих факторів. Кожен

експеримент повторювали тричі на тому ж рівні факторів та обчислювали середнє арифметичне значення початкового параметра в кожному експерименті (табл. 3.5).

Таблиця 3.4 – Рівні варіації факторів під час експериментів МДО.

Рівні факторів	Концентрація H_2O_2	Густина струму, i , А/дм ²	Швидкість потoku, v , см/с	Температура електроліту, T , °С
Основний рівень	7	5	80	50
Інтервал варіації	3,5	2	35	15
Верхній рівень	10,5	7	115	65
Нижній рівень	3,5	3	45	35
Зіркові точки (+)	12,19	8	131,89	72.2
Зіркові точки (–)	1,81	2	28.11	27.8

Для опису функцій відгуку параметрів оптимізації досліджуваного технологічного процесу формування МДО-покриттів у проточному електроліті було використано 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} – регресійні коефіцієнти;

x_i – фактори експерименту, $k = 4$.

У результаті оптимізації методом планування експерименту за ортогональним центральним композиційним планом були визначені невідомі коефіцієнти рівнянь регресії. Їх значимість перевіряли при рівні довіри 0,05 за допомогою t-критерію Стюдента, після чого статистично незначущі коефіцієнти відкинули. Значущі коефіцієнти рівнянь регресії другого порядку підставили у формулу (3.1), внаслідок чого отримано функції відгуку мікротвердості та зношування циліндричної поверхні деталі з мікродуговим оксидним покриттям.

Таблиця 3.5 – План-матриця результатів експериментальних лабораторних досліджень мікротвердості та зношування мікродугового оксидного покриття під час проведення ортогонального центрального композиційного плану

Номер досліджу	Рівні факторів				Середнєзначення	
	C, %	W _{сер}	v, см/с	T, °C	H _{сер} , ГПа	W _{сер} , МКМ
1	3,1	3	45	35	15,5	41
2	3,1	3	45	65	16,3	44
3	3,1	3	115	35	16,8	36
4	3,1	3	115	65	16,6	39
5	3,1	7	45	35	15,5	29
6	3,1	7	45	65	19,3	21
7	3,1	7	115	35	17,9	28
8	3,1	7	115	65	20,7	19
9	5,7	3	45	35	16,5	29
10	5,7	3	45	65	15,2	35
11	5,7	3	115	35	19,1	26
12	5,7	3	115	65	16,8	31
13	5,7	7	45	35	20,9	17
14	5,7	7	45	65	21,6	16
15	5,7	7	115	35	23,4	11
16	5,7	7	115	65	21,4	15
17	2,6	5	75	50	15,4	38
18	6,3	5	75	50	20,9	19
19	4,4	2	75	50	15,5	44
20	4,4	8	75	50	22,5	14
21	4,4	5	8,3	50	20,7	21
22	4,4	5	141,7	50	21,7	18
23	4,4	5	75	27,8	20,4	21
24	4,4	5	75	72,2	21,1	19
25	4,4	5	75	50	23,3	14
26	4,4	5	75	50	23,9	13

На основі отриманих рівнянь регресії поверхні відгуку параметрів оптимізації (мікротвердість та знос) побудовано у залежності від двох змінних технологічних параметрів, при цьому два інші зафіксовано на базовому рівні.

3.5.2 Планування експерименту впливу складових технологічних режимів різання на шорсткість обробленої поверхні, величину сил різання та питому витрату алмазів у процесі шліфування мікродугових оксидних покриттів

Для проведення технологічних досліджень було використано метод планування (повнофакторний експеримент): отримання математичних моделей впливу складових режиму різання на шорсткість оброблюваної поверхні, значення складових сили різання та питому витрату алмазів під час кругового зовнішнього шліфування керамічних оксидних покриттів.

Досліджено процес алмазного шліфування зовнішньої циліндричної поверхні, зміцненої керамічним МДО-покриттям. Покриття формували в електроліті на циліндричних зразках деформованого алюмінієвого сплаву Д16Т.

Критерій оптимальності був прийнятий як середнє арифметичне відхилення: шорсткості, (мкм), значення складових сили різання: кругової сили (Н) та радіальної сили, (Н) та питомої витрати алмазів шліфувального круга q (мкг/г), від елементів режимів різання під час зовнішнього кругового алмазного шліфування керамічних оксидних покриттів.

Під час призначення технологічних режимів різання матеріалу вибирали діапазон значень лінійної швидкості алмазного круга v_k з довідкових таблиць та узгоджували із рекомендаціями виробника абразивного інструменту. Поєднуючи кількість обертів шпинделя круглошліфувального верстата з діаметром заданого алмазного круга забезпечували, щоб результуюча лінійна швидкість алмазного круга потрапляла в цей діапазон. Шліфування виконувалося алмазним кругом із лінійною швидкістю $v_k = 35$ м/с. Як мастило та охолоджувальну рідину використовувався водний розчин 1% кальційованої соди та 0,25% нітриту натрію.

Проведено повнофакторний експеримент $2k$ разів, $k = 3$, кількість змінних факторів (загальна кількість експериментів становила $N = 8$), матриця планування якого наведена в таблиці 3.6. При виборі послідовності експериментів для усунення систематичних помилок використовувався генератор випадкових чисел.

Таблиця 3.6 – План-матриця повногофакторного експерименту

№ експе- рименту	Значення кодованих факторів				Взаємодія кодованих фактори				Вихідний параметр			
									повторюваність експериментів		середнє значення	
	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	Y_1	Y_2	Y_3	$\bar{Y}_v$
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	Y11	Y12	Y13	Y1с
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	Y21	Y22	Y23	Y2с
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	Y31	Y32	Y33	Y3с
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	Y41	Y42	Y43	Y4с
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	Y51	Y52	Y53	Y5с
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	Y61	Y62	Y63	Y6с
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	Y71	Y72	Y73	Y7с
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	Y81	Y82	Y83	Y8с

Для спрощення математичної моделі, що описує залежність параметра від змінних факторів (елементів режимів різання), ми обрали степеневу функцію, наприклад, для шорсткості: вона має такий вигляд

$$R_a = C_a \cdot t^m \cdot v^n \cdot s^p, \quad (3.2)$$

де C_a – постійний коефіцієнт;

t – глибина різання, мм/оберт;

v – лінійна швидкість заготовки під час обертання, м/хв;

s – поздовжня подача верстатного столу, мм/оберт;

m, n, p – невідомі показники степеня

Лінійна швидкість під час обертання алмазного круга не враховувалася в цій функції, але її вважали постійною для досліджуваного процесу шліфування керамічного оксидного покриття.

Рівняння (3.2) є нелінійним, але логарифмуючи його можна привести до лінійної форми:

$$\ln R_a = \ln C_a + m \ln t + n \ln v + p \ln s. \quad (3.3)$$

Для спрощення розрахунків та врахування множинної лінійної регресії було введено такі позначення:

$$\begin{aligned} \ln R_a &= Y; & \ln C_a &= b_0; & m &= b_1; & t &= X_1; \\ n &= b_2; & v &= X_2; & p &= b_3; & s &= X_3. \end{aligned}$$

Підставивши прийняті позначення у формулу (3.3), отримали:

$$y = b_0 + b_1 \ln X_1 + b_2 \ln X_2 + b_3 \ln X_3. \quad (3.4)$$

Рівняння (3.4) є постульованою емпіричною моделлю залежності середньоарифметичного відхилення профілю поверхні, значень складових сили різання та питомої витрати алмазів шліфувального круга q від режимів різання під час круглого алмазного шліфування керамічного оксидного покриття.

Перетворення натуральних значень параметрів режимів різання в безрозмірні кодовані змінні для полінома здійснювалося за відомою формулою:

$$x_i = \frac{2(\ln X_i - \ln X_{i \max})}{\ln X_{i \max} - \ln X_{i \min}} + 1, \quad (3.5)$$

де x_i – натуральні значення елементів режимів різання під час круглого алмазного шліфування;

$X_{i \max}, X_{i \min}$ – мінімальне та максимальне натуральні значення коефіцієнтів;

i – порядковий номер незалежного коефіцієнта відповідно.

Числові значення режимів різання під час круглого алмазного шліфування керамічного оксидного покриття були взяті такими, що використовуються на практиці для шліфування оксидної кераміки, та обмежені технологічними можливостями кругошліфувальних верстатів. Обрані коефіцієнти відповідають усім вимогам, що до них пред'являються. Рівні зміни коефіцієнтів зведено в таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 – Рівні зміни технологічних режимів круглого алмазного шліфування керамічних оксидних покриттів

Інтервали варіацій та рівні факторів	Глибина різання t , мм/дс		Швидкість деталі v , м/хв		Поздовжня подача s , мм/оберт	
	X_1	$\ln X_1$	X_2	$\ln X_2$	X_3	$\ln X_3$
Основни рівень, $x_i = 0$	0,0055	–	40	–	3	–
Інтервал варіації $\Delta x = 1$	0,0035	–	20	–	2	–
Верхній рівень, $x_i = +1$	0,009	–4,711	60	2.996	5	1.609
Нижній рівень, $x_i = -1$	0,002	–6.215	20	4.094	1	0

Підставивши числові значення з таблиці 3.7 у формулу (3.5), отримано вирази для кодування факторів:

$$x_1 = 2.88539 \ln t + 16.28771; \quad (3.6)$$

$$x_2 = 1.24267 \ln v - 5.86135; \quad (3.7)$$

$$x_3 = 3.91523 \ln s - 3.30132. \quad (3.8)$$

Рівняння (3.4) з введенням членів, що враховують взаємодію факторів, записується в кодованих змінних:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3, \quad (3.9)$$

де $b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{123}$ – коефіцієнти регресії, що характеризують відповідно вільний член рівняння, лінійні ефекти та ефекти

взаємодії факторів; x_1, x_2, x_3 – експериментальні фактори (елементи режимів різання керамічного оксидного покриття).

Для забезпечення відтворюваності експериментальних результатів кожен експеримент повторювали тричі ($r=3$) на тому ж рівні фактора, а середнє арифметичне вихідного параметра в кожному експерименті розраховували за формулою:

$$\bar{y}_v = \frac{1}{r} \sum_{u=1}^r y_{ui}. \quad (3.10)$$

Повнофакторіальний експеримент стосується ортогональних планів і дозволяє значно спростити обчислення коефіцієнтів рівняння регресії (3.9). Вводячи позначення $\bar{Y}_v = \ln \bar{y}_v$, можна знайти коефіцієнти рівняння регресії (3.9) для повнофакторного експерименту, використовуючи такі формули:

$$b_0 = \frac{\sum_{v=1}^N \bar{Y}_v}{N}; \quad (3.11)$$

$$b_i = \frac{\sum_{v=1}^N x_{iv} \bar{Y}_v}{N}; \quad (3.12)$$

$$b_{ij} = \frac{\sum_{v=1}^N x_{iv} \cdot x_{jv} \cdot \bar{Y}_v}{N}, \quad i \neq j; \quad (3.13)$$

$$b_{ijw} = \frac{\sum_{v=1}^N x_{iv} \cdot x_{jv} \cdot x_{wv} \cdot \bar{Y}_v}{N}, \quad i \neq j \neq w, \quad (3.14)$$

де $i = 0, 1, 2, 3$ – номер коефіцієнта регресії.

3.5.3 Дослідження впливу режимів алмазного шліфування на шорсткість поверхні керамічного оксидного покриття, сили різання та витрату алмазів кругом

Для забезпечення високої якості робочої поверхні циліндричних деталей (низької шорсткості) та покращення експлуатаційних властивостей виробів використовується МДО з подальшим алмазним шліфуванням керамічного оксидного покриття. Результати експериментів наведено в таблиці 3.

Таблиця 3.8 – Результати повного факторного експерименту для шорсткості, проведеного згідно з матрицею плану.

№ експерименту	Значення кодованих факторів				Взаємодія кодованих факторів				Вихідний параметр шорсткості, мкм				
									повторюваність експериментів			середнє значення	Логарифм
	x0	x1	x2	x3	x1x2	x1x3	x2x3	x1x2x3	yv ₁	yv ₂	yv ₃	$\bar{y}_v$	$\bar{Y}_v$
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	0,07	0,09	0,08	0,08	-2,52
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	0,17	0,19	0,21	0,19	-,66
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	0,11	0,13	0,15	0,13	-2,04
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	0,30	0,33	0,30	0,31	-1,17
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	0,12	0,13	0,11	0,12	-2,12
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	0,29	0,37	0,33	0,33	-1,11
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	0,19	0,20	0,24	0,21	-1,56
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	0,52	0,51	0,47	0,50	-0,69

Побудовано та проаналізовано математичні моделі впливу режимів різання під час кругового алмазного шліфування керамічних оксидних покриттів, сформованих на алюмінієвій деталі зі сплаву Д16Т в електроліті, на шорсткість обробленої поверхні.

Використовуючи методику, описану в статті, коефіцієнти рівняння регресії (3.9) були розраховані за формулами (3.11)–(3.14), значення яких наведено в таблиці 3.9.

Таблиця 3.9 – Значення коефіцієнтів рівняння регресії для шорсткості.

Індикатор	Коефіцієнти							
	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{123}
Значення коефіцієнта	-1.61013	0,23938	0,24388	0,45163	-0,00012	0,01813	-0,01738	-0,01838

Отриману модель було піддано статистичному аналізу. Значимість коефіцієнтів регресії (3.9) була перевірена за допомогою t-критерію Стюдента. Для цього було розраховано дисперсію коефіцієнтів регресії:

$$S^2(b_i) = \frac{1}{Nr} S^2(Y). \quad (3.15)$$

З довідкових таблиць було знайдено критичне значення t_c t-критерію Стьюдента для ступенів свободи та рівень значущості $f_E = N(r - 1) = 8(2 - 1) = 8$, значення якого дорівнює $\alpha = 0.05$, і за ним оцінювалася половина довжини довірчого інтервалу:

$$\Delta b_i = t_c S(b_i), \quad (3.16)$$

де $S(b_i)$ – похибки коефіцієнтів.

Дисперсію коефіцієнтів регресії було розраховано за формулою (3.15), і вона становить 0,03067. Тоді, згідно з (3.16), маємо

$$\Delta b_i = 2.306 \cdot 0.03067 = 0.0707.$$

Коефіцієнт рівняння регресії вважається значущим, якщо $|b_i| \geq \Delta b_i$ (тут b_i означає $b_0, b_i, b_{ij}, b_{ijw}$).

Статистично незначущі коефіцієнти були відкинуті, і рівняння регресії (3.9) набуло вигляду:

$$y = -1.61013 + 0.23938x_1 + 0.24388x_2 + 0.45163x_3. \quad (3.17)$$

Адекватність моделі перевіряли за допомогою F-критерію Фішера:

$$F = \frac{S_{ad}^2}{S^2(Y)}, \quad (3.18)$$

де S_{ad}^2 – дисперсія адекватності моделі.

Дисперсію адекватності моделі розраховували за формулою:

$$S_{ad}^2 = \frac{r \sum_{v=1}^N (\tilde{Y}_v - \hat{Y}_v)^2}{N - \lambda}, \quad (3.19)$$

де λ – кількість значущих коефіцієнтів у рівнянні регресії;

$\hat{Y}_v$ – оцінені значення вихідного параметра, отримані після підстановки рівнів факторів (–1 та +1) в уточнене рівняння регресії (3.17) відповідно до матриці планування повного факторного експерименту.

Для перевірки адекватності отриманої математичної моделі (3.17) розраховували значення шорсткості, наведені в таблиці 3.10.

Таблиця 3.10 – Розрахункові значення параметра шорсткості поверхні керамічного оксидного покриття.

Індикатор		Числовий експеримент							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Розрахункове значення параметра шорсткості	$-\ln R_a$	2.545	1,6418	2.0573	1.154	2.0663	1.163	1,5785	0,6753
	R_a , мкм	0,078	0,194	0,128	0,315	0,127	0,313	0,206	0,509

Дисперсія адекватності, розрахована за формулою (3.15), становить $S_{ad}^2 = 0.00387$.

Розраховане значення F порівнюється з вибраним F_{tab} з довідкової таблиці відповідно для ступенів свободи $f_{ad} = N - \lambda = 8 - 4 = 4$ $f_E = N(r - 1) = 8(2 - 1) = 8$ і рівень значущості $\alpha = 0.05$. Якщо умова $F < F_{tab}$ виконується, то модель вважається адекватною. Математичний опис моделі є адекватним, оскільки $F = 0.257 < 3.84$

Крім того, було розраховано коефіцієнт множинної кореляції:

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum_{v=1}^N (\bar{Y}_v - \hat{Y}_v)^2}{\sum_{v=1}^N (\bar{Y}_v - \bar{Y})^2}}, \quad (3.20)$$

де $\bar{Y}$ — середнє значення $\bar{Y}_v$

Значення R знаходиться в діапазоні $0 \leq R \leq 1$. If $R = 0$. Якщо $R = 1$, то коефіцієнти регресії не вносять вклад у досліджувану залежність, то рівняння регресії повністю описує результати експерименту.

Вихідні дані для розрахунку коефіцієнта множинної кореляції зведені в таблиці 3.11.

Тоді:

$$R = \sqrt{1 - \frac{0.00773716}{2.57668875}} = 0.99840.$$

Таблиця 3.11 – Числові значення для розрахунку коефіцієнта множинної кореляції для шорсткості.

№ експе- рименту	Середнє значення вихідного параметра $\bar{Y}_v$	Розраховане значення вихідний параметр $\hat{Y}_v$	$(\bar{Y}_v - \hat{Y}_v)^2$	$(\bar{Y}_v - \bar{Y})^2$
1	-2,526	-2,545	0,00036100	0.838827016
2	-1,661	-1,6418	0,00036864	0,002588266
3	-2.040	-2,0573	0,00029929	0,184792516
4	-1,171	-1,154	0,00028900	0,192830766
5	-2.120	-2,0663	0,00288369	0.259972516
6	-1,109	-1,163	0,00291600	0.251126266
7	-1,561	-1,5785	0,00030625	0,002413266
8	-0,693	-0,6753	0,00031329	0.841118266
–	$\bar{Y} = -1,61013$	–	Сума 0,00773716	Сума 2.573668875

Таким чином, рівняння регресії (3.17) повністю описує результати експерименту.

Після перекодування змінних у рівнянні регресії (3.17) отримуємо:

$$\ln R_a = -1.89690 + 0.31831 \cdot \ln(t) + 0.44398 \cdot \ln(v) + 0.56123 \cdot \ln(s). \quad (3.21)$$

Потенціюючи рівняння регресії (20), отримуємо:

$$R_a = 0.15003 t^{0.31831} v^{0.44398} s^{0.56123}. \quad (3.22)$$

Подібний зв'язок представлений у статті [148].

3.6 Електрохімічні дослідження і визначення рівня допустимих напружень у зразках з покриттями

3.6.1 Побудова поляризаційних кривих

Для оцінки корозійної тривкості алюмінію з оксидним покриттям під час електрохімічних досліджень побудували поляризаційні криві, які базується на

вивченні залежності швидкості електрохімічної реакції (катодної чи анодної) від електродного потенціалу (залежності $i = f(E)$). Випробовування провели у стандартній триелектродній електрохімічній комірці, де робочий електрод – зразок з оксидним покриттям (робоча площа поверхні 1 см^2), електрод порівняння – хлоросрібний типу ЕВЛ-1М1, допоміжний (поляризуючий) електрод – платиновий. Як електроліт використали 3 % NaCl. Режим – потенціодинамічний, який забезпечує вольтамперометрична система СВА-1Б-М за швидкості розгортки потенціалу – 2 мВ/с. Дослідження виконали в Центрі колективного користування науковими приладами «Центр електронної мікроскопії та рентгенівського мікроаналізу» Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка Національної академії наук України, м. Львів.

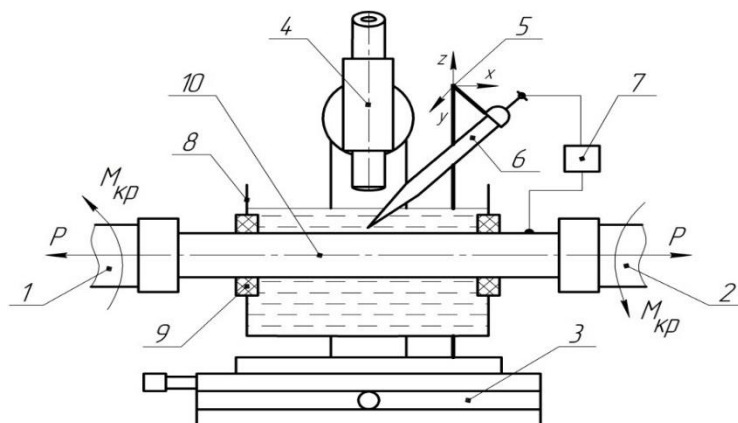
3.6.2 Визначення допустимого рівня напружень у вкритих зразках

Дослідження шорсткої поверхні алюмінію та окисдованих зразків з покриттями в напруженому стані провели в електроліті, використавши лабораторну установку (рис. 3.10.) [147]. Для підвищення точності мікроелектрохімічних вимірювань використали розроблений нами мікроелектрод, конічна частина якого виконана зрізаною похилою площиною. Кут нахилу α цієї похилої площини O_1-O_1 зрізу до площини O_2-O_2 , яка перпендикулярна до поздовжньої осі O_3-O_3 вказаного скляного мікрокапіляра, визначають із нерівності $74^\circ \leq \alpha \leq 75^\circ$ (рис. 2.16), на який подана заявка на винахід з експертизою по суті [15].

Для електрохімічних вимірювань застосовували водний електроліт з низькою електропровідністю ($0,009 \text{ н H}_2\text{SO}_4 + 0,14 \% \text{ H}_2\text{O} + 0,00005 \% \text{ K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$). Сканування мікроелектродом здійснювали вздовж і впоперек зразків.

Допустимий рівень нормальних (розтяг силою P) напружень визначали електрохімічним методом на стандартних 5-ти кратних зразках (діаметр робочої частини 3 мм) з оксидними покриттями. Одночасно з навантаженням циліндричних зразків з покриттям в електроліті реєстрували зміну електродного потенціалу та величину напружень. У момент руйнування

оксидного покриття (зародження тріщини та утворення ювенільної поверхні) відбувається різний стрибок електродного потенціалу. За допустимий рівень нормальних/дотичних напружень приймали напруження менші від тих, за яких у покриттях утворювались тріщини. Середнє арифметичне значення допустимих напружень визначали за результатами трьох випробовувань.



- 1 – пасивний захват; 2 – активний захват; 3 – двокоординатний стій;
 4 – оптичний мікроскоп; 5 – трикоординатний мікроманіпулятор;
 6 – електрод (мікроелектрод) порівняння; 7 – вольтметр; 8 – комірка для електроліту; 9 – ущільнення; 10 – зразок з покриттям

Рисунок 3.10 – Схема установки для електрохімічних досліджень зразків з покриттями під навантаженням (у напруженому стані)

3.7. Дослідження мікроструктури та пористості оксидних покриттів

Пористість оксидних 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, що постачався з мікроскопом. Дослідження провели в Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя.

Мікроскопічні дослідження структури та хімічного складу оксидних покриттів, сформованих методом МДО на алюмінієвому сплаві Д16Т, провели в Центрі колективного користування науковими приладами «Центр електронної мікроскопії та рентгенівського мікроаналізу» Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка Національної академії наук України, м. Львів. Використовували

оптичний мікроскоп ZEISS Stemi 2000-C (Germany) та скануючий електронний мікроскоп ZEISS EVO 40XVP (ZEISS Group, Jena, Germany) із системою мікрорентгенівського спектрального аналізу INCA ENERGY 350 (Oxford Instruments, Abingdon, UK) (рис. 3.11).



Рисунок 3.11 – Фотографія скануючого електронного мікроскопа ZEISS EVO 40XVP

Перед проведенням електронно-мікроскопічних досліджень наносили на поверхню зразків з оксидним покриттям моношар золота для збільшення їхньої провідності.

Висновки до розділу 3

1. Обґрунтовано вибір алюмінієвих деформованих і ливарних сплавів різних систем легування та технологію одержання заготовок.

2. Розроблено технологічний процес формування покриттів мікродуговим оксидуванням у проточному електроліті для виготовлення нових і відновлення зношених алюмінієвих деталей.

3. Розроблено установку для мікродугового оксидування у спокійному та проточному електролітах з системою автоматизованого керування технологічними параметрами процесу на різних рівнях. Крім цього,

удосконалено конструкції електрохімічних комірок на основі 3D моделювання потоку електроліту для формування оксидних покриттів.

4. Розроблено методику визначення допустимих рівнів напружень на розтяг в окисдованих алюмінієвих зразках із застосуванням нової конструкції мікроелектрода для електрохімічних вимірювань.

5. Використання розробленого мікроелектрода, кінчна частина якого виконана зрізаною похилою площиною, дозволило підвищити точність мікроелектрохімічних вимірювань. Встановлено, що оптимальним є розташування зрізу під кутом α до площини O_2-O_2 , перпендикулярної до поздовжньої осі O_3-O_3 скляного мікрокапіляра, при цьому значення кута визначається з нерівності $74^\circ \leq \alpha \leq 75^\circ$. Така геометрія забезпечує стабільність формування електричного контакту, зменшує паразитні опори та дозволяє отримати більш відтворювані результати локальних електрохімічних досліджень покриттів.

6. Застосовано методи планування: ортогональний центральний композиційний експеримент – з метою оптимізації параметрів процесу мікродугового оксидування в проточному електроліті; повнофакторний експеримент – для побудови математичних моделей впливу технологічних режимів різання на шорсткість обробленої поверхні, величину сил різання та питому витрату алмазів під час шліфування мікродугових оксидних покриттів.

Результати розділу опубліковано в працях автора [5, 6, 7, 8, 12, 13, 14, 15].

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ МІКРОДУГОВОГО ОКСИДУВАННЯ НА ПОКАЗНИКИ ТОЧНОСТІ ТА ЯКОСТІ ДЕТАЛЕЙ

4.1 Дослідження процесу мікродугового оксидування

Для формування оксидних покриттів мікродуговим оксидуванням вибрали широко розповсюджений силікатно-лужний електроліт на водній основі. Під час приготування електроліту використовували хімічно чисті компоненти – гідроксид калію (KOH) і силікат натрію (Na_2SiO_3). Електроліт готували простим змішуванням компонентів у дистильованій воді.

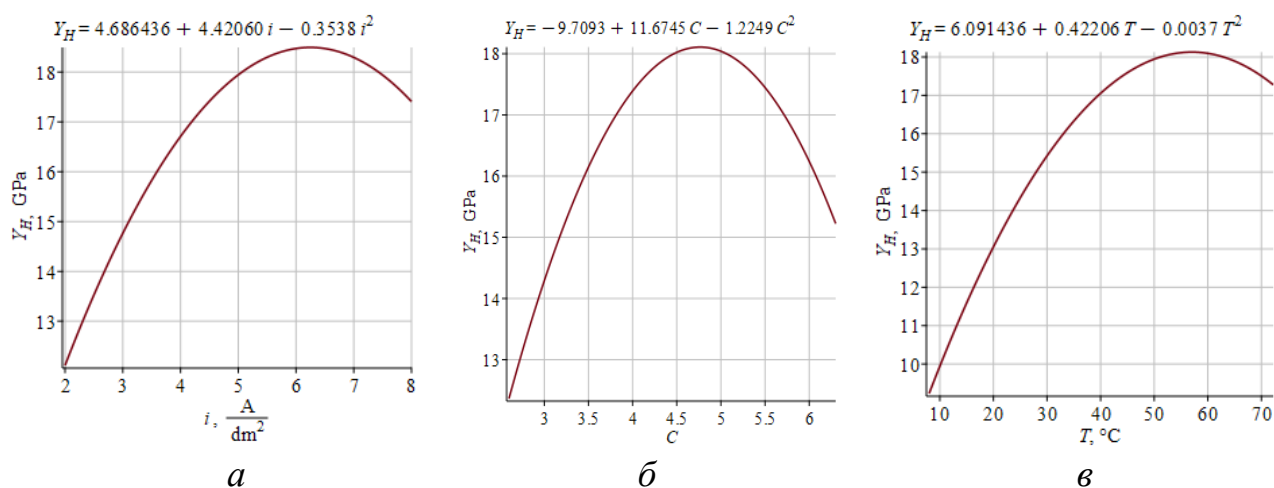
Після проведення мікродугового оксидування деталі з оксидним покриттям промивали у проточній воді. Сушіння проводили на повітрі за кімнатної температури.

Для контролю товщини оксидного покриття виготовляли поперечні мікрошліфи і проводили вимірювання на вимірювальному мікроскопі. Мікротвердість оксидних покриттів вимірювали на поперечних мікрошліфах приладом ПМТ–3 при навантаженні на алмазну піраміду Віккерса 1,0 Н.

Для оперативного контролю покриття використовували – товщиномір. Товщина оксидного покриття, сформованого мікродуговим оксидуванням, становила від 200 до 300 мкм.

Провели дослідження впливу технологічних параметрів процесу мікродугового оксидування алюмінію на мікротвердість покриття (рис. 4.1) за фіксованих значень густини струму, співвідношень масових концентрацій складників електроліту або температури електроліту попарно нарізно та отримали три різні регресійні криві для мікротвердості у вигляді квадратичної залежності. Зрозуміло, що всі одержані функціональні залежності виявилися увігнутими кривими відносно одного параметра при конкретних значеннях решти двох зазначених вище параметрів та досягають максимумів в точках відповідно: густина струму $i = 6,3 \text{ A/dm}^2$ (рис. 4.1, а), співвідношення масових

концентрацій складників електроліту ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{KOH}$ – силікату натрію та гідроксиду калію) $C = 4,7$ (рис. 4.1, б), температура електроліту $T = 58\text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 4.1, в). Швидкість потоку електроліту в даному процесі не чинить статистично істотного впливу на зміну величини мікротвердості. За перерахованих оптимальних значень технологічних параметрів процесу мікродугового оксидування у зображених на рисунках діапазонах забезпечується отримання величини мікротвердості покриття від 18,1 GPa до 18,5 GPa. При цьому найсуттєвіший внесок на величину мікротвердості забезпечується густиною струму, що гарантує формування оксидного покриття алюмінію з великою мікротвердістю 18,5 GPa за температури $50\text{ }^\circ\text{C}$ та співвідношення масової концентрації складників проточного електроліту H_2O_2 $C = 4,4$.

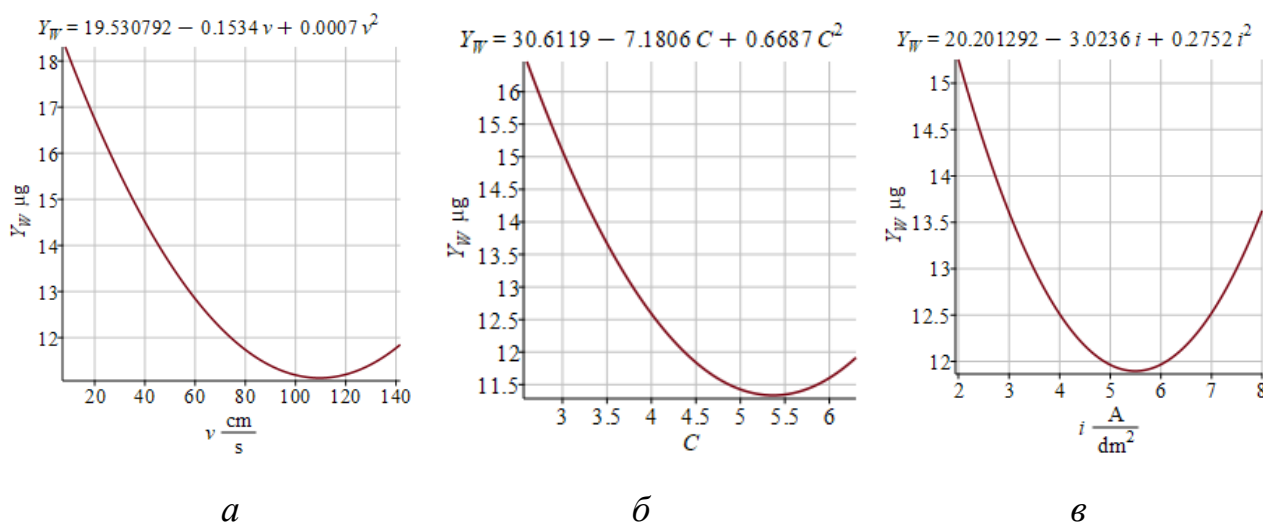


а – густини струму ($T = 50\text{ }^\circ\text{C}$; $C = 4,4$); б – співвідношення концентрацій компонентів електроліту ($T = 50\text{ }^\circ\text{C}$; $i = 5\text{ A/dm}^2$); в – температури електроліту ($C = 4,4$; $i = 5\text{ A/dm}^2$)

Рисунок 4.1 – Залежність мікротвердості покриття від технологічних параметрів процесу мікродугового оксидування алюмінієвого сплаву в проточному електроліті

Водночас під час аналізу впливу технологічних параметрів процесу мікродугового оксидування алюмінію на величину зносу покриття (рис. 4.2) варто відзначити, що показані на рис. 4.2, а, б, в залежності є опуклими функціями та мають мінімуми в точках відповідно: швидкість потоку

$v = 110$ cm/s, співвідношення масових концентрацій складників електроліту $C = 4,4$, густина струму $i = 5,5$ A/dm². За вище вказаних значень технологічних параметрів процесу мікродугового оксидування алюмінію у досліджуваних діапазонах величина зносу покриття змінюється від 11 μ g до 11,8 μ g. З'ясовано, що найменша величина зносу 11 μ g оксидного покриття на алюмінії досягається під час його формування за швидкості потоку електроліту $i = 110$ cm/s. Для описаних умов вплив температури електроліту на ступінь зносу оксидного покриття алюмінію був статично незначущим, тому в регресійних залежностях, знайдених для величину зносу, вказана температура відсутня як параметр.



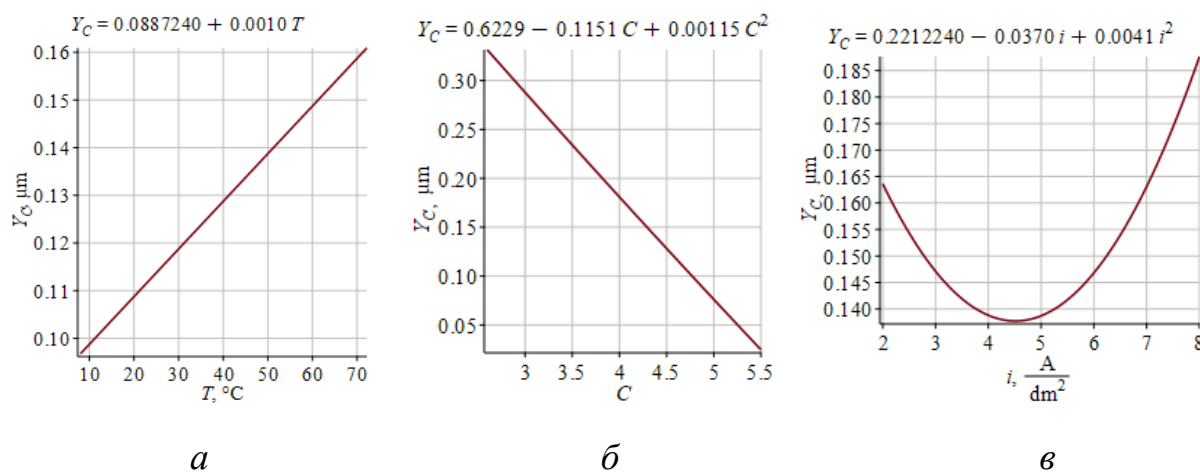
а – швидкості потоку ($i = 5$ A/dm²; $C = 4,4$); б – співвідношення концентрацій компонентів електроліту ($i = 5$ A/dm²; $v = 75$ cm/s);

в – густини струму ($C = 4,4$; $v = 75$ cm/s)

Рисунок 4.2 – Залежність величини зносу оксидного покриття від технологічних параметрів процесу мікродугового оксидування алюмінієвого сплаву в проточному електроліті

Дослідження конусоподібності зразків з оксидними покриттями провели за фіксованих значень двох параметрів з таких трьох: температура електроліту $T = 50$ °C, співвідношення масових концентрацій складників електроліту $C = 4,4$, густина струму $i = 5$ A/dm². Вплив швидкості потоку на конусоподібність при зазначених числових значеннях технологічних

параметрів був статистично незначущим під час процесу мікродугового оксидування алюмінію. Водночас для решти параметрів отримали три різні регресійні криві мікротвердості: дві з них у вигляді лінійної залежності, а одна у вигляді квадратичної залежності. Остання виявилася опуклою функцією відносно густини струму та досягає свого локального екстремуму при густині струму $i = 7 \text{ A/dm}^2$ (рис. 4.3, в). Відповідне найменше значення конусоподібності становить $0,03 \text{ }\mu\text{m}$. Залежності конусоподібності від температури електроліту та співвідношення масових концентрацій складників електроліту виявилися лінійними. Тому найменші значення конусоподібності у досліджуваних діапазонах спостерігалися у крайніх правих точках діапазону, себто при таких числових значеннях температури електроліту $T = 72 \text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 4.3, а) та співвідношення масових концентрацій складників електроліту $C = 6,7$ (рис. 4.3, б). Конусоподібність рівна 0 мкм отримана за співвідношення концентрацій компонентів електроліту рівному $C = 4,7$.



а – температури електроліту ($i = 5 \text{ A/dm}^2$; $C = 4,4$); б – співвідношення концентрацій компонентів електроліту ($i = 5 \text{ A/dm}^2$; $T = 50 \text{ }^\circ\text{C}$); в – густини струму ($C = 4,4$; $T = 50 \text{ }^\circ\text{C}$)

Рисунок 4.3 – Залежність конусоподібності поверхні оксидного покриття від технологічних параметрів процесу мікродугового оксидування алюмінієвого сплаву в проточному електроліті:

4.2 Оптимізація технологічних параметрів процесу мікродугового оксидування в проточному електроліті для забезпечення зносостійкості

Для забезпечення якості робочої поверхні циліндричних деталей із оксидним робочим шаром та підвищення експлуатаційних властивостей виробів побудували математичну модель процесу мікродугового оксидування в проточному електроліті. Це дозволило встановити оптимальні значення технологічних параметрів для забезпечення отримання покриттів із максимальною мікротвердістю та мінімальним зношуванням циліндричних поверхонь деталей.

Для дослідження впливу технологічних параметрів процесу мікродугового оксидування у проточному електроліті на експлуатаційні властивості циліндричних деталей використовували розроблену технологію та установку (розділ 3). Перед формуванням мікродугового оксидного покриття алюміній проточували для отримання шорсткості поверхні $R_a = 0,8\text{--}1,1$ мкм. В дослідженнях приймали $R_a = 0,9$ мкм. Під час формування оксидного шару покриття циліндричну деталь розташовували вертикально, співвісно з віссю електрохімічної комірки. Товщина сформованого робочого оксидного шару покриття складала 300 мкм.

Для обґрунтування технологічних параметрів процесу мікродугового оксидування в проточному електроліті та встановлення закономірностей їх впливу на фізико-механічні властивості покриття провели лабораторні експериментальні дослідження зразків із покриттями сформованими за розробленою технологією. Дослідили зміну мікротвердості та зношування циліндричної поверхні деталі з мікродуговим оксидним покриттям у залежності від концентрації H_2O_2 C , густини струму i , швидкості потоку електроліту v та температури електроліту T . З метою оцінки показників якості покриття вимірювали мікротвердість покриття та випробовували на зношування за зворотно-поступального руху.

Функції відклику (параметр оптимізації), що відображають залежність мікротвердості оксидного покриття H та зношування W у залежності від

концентрації H_2O_2 C , густини струму i , швидкості потоку електроліту v , температури електроліту T , за результатами проведеного ортогонального центрального композиційного планування експерименту в натуральних значеннях змінних факторів рівняння регресії другого порядку для H , W , набувають такого вигляду для:

– мікротвердості

$$H = -12,8597 + 2,6561C - 0,1537C^2 + 2,9974i - 0,3666i^2 + 0,1121v - 0,0004v^2 + 0,3913T - 0,0031T^2 + 0,1027Ci - 0,0144CT + 0,0173iT - 0,0007vT \quad (4.1)$$

– зношування

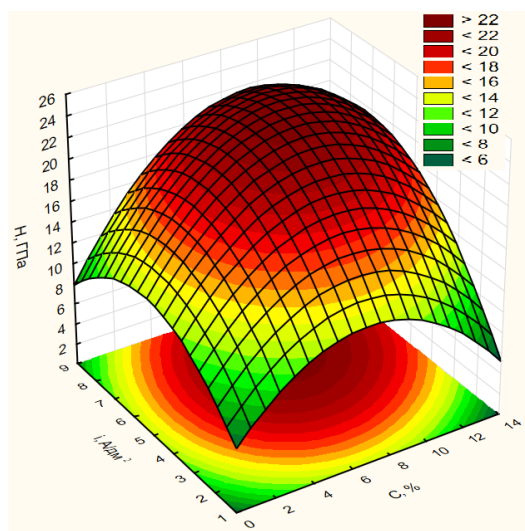
$$W = 113,5191 - 8,4652C + 0,3929C^2 - 13,8294i + 1,2350i^2 - 0,1834v + 0,0006v^2 - 0,3344T + 0,0042T^2 + 0,0298CT + 0,0062iv - 0,0646iT + 0,0004vT \quad (4.2)$$

Отримані рівняння регресії другого порядку в натуральних величинах (4.1) – (4.2) можуть використовуватися для розрахунку мікротвердості H та зношування W деталей з оксидним покриттям у залежності від зміни концентрації H_2O_2 C , густини струму i , А/дм^2 , швидкості потоку електроліту v , см/с , температури електроліту T , $^\circ\text{C}$, які відповідно знаходяться в таких межах:

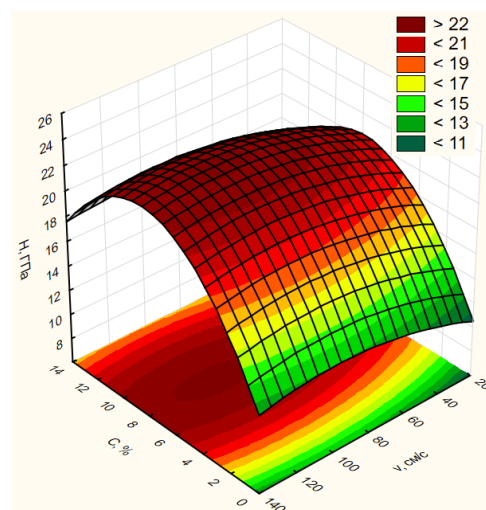
$$1,81 \leq C \leq 12,19; \quad 2 \leq i \leq 8; \quad 28,11 \leq v \leq 131,89; \quad 27,8 \leq T \leq 72,2.$$

Для дослідження впливу технологічних параметрів процесу мікродугового оксидування в проточному електроліті (змінних факторів) на параметри оптимізації (мікротвердість та знос) побудували поверхні відгуку та їх двомірні перерізи в залежності від двох змінних факторів (два інші фактори знаходились на постійному основному рівні), використавши програму Statistica 14 (TIBCO Software Inc., USA).

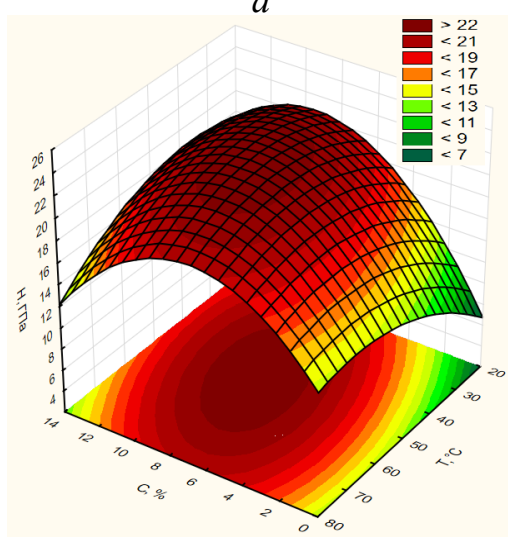
Аналіз отриманих рівнянь регресії другого порядку (4.1) – (4.2) та побудованих поверхонь відгуку (рис. 4.4 – рис 4.5.), свідчить, що величина параметрів оптимізації (мікротвердості та зносу) для оксидного покриття залежить практично від усіх технологічних параметрів процесу мікродугового оксидування.



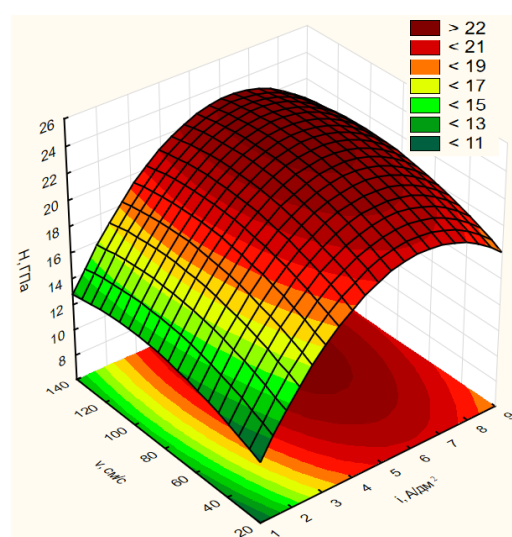
а



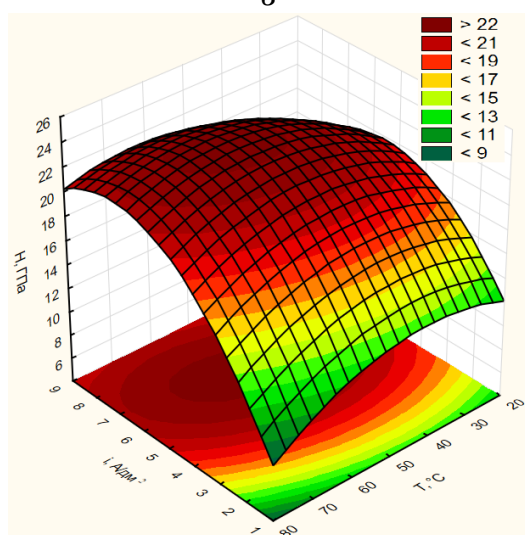
б



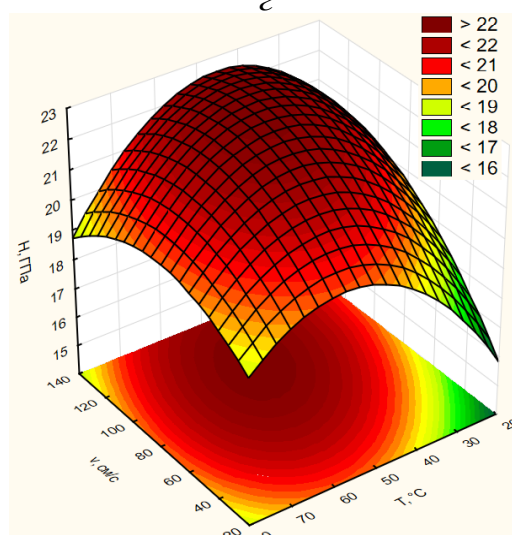
в



г



д



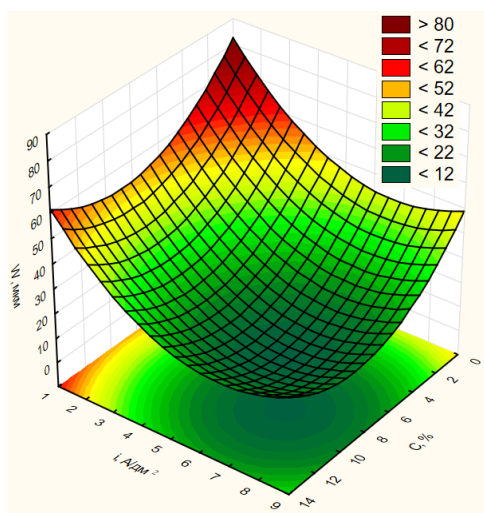
е

а – $C, i, v = 80 \text{ см/с}, T = 50^\circ \text{C}$; б – $C, v, i = 5 \text{ А/дм}^2, T = 50^\circ \text{C}$;

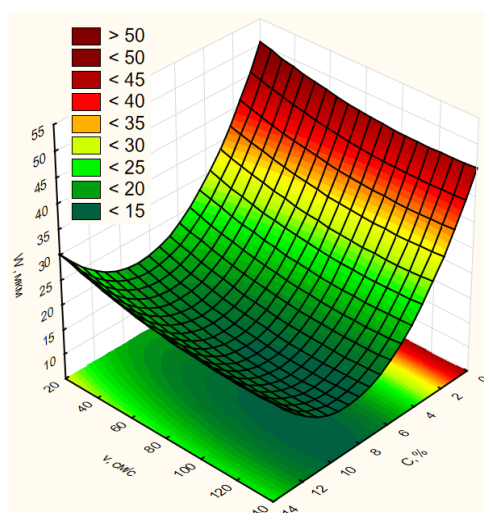
в – $C, T, i = 5 \text{ А/дм}^2, v = 80 \text{ см/с}$; г – $i, v, C = 7\%, T = 50^\circ \text{C}$;

д – $i, T, C = 7\%, v = 80 \text{ см/с}$; е – $v, T, C = 7\%, i = 5 \text{ А/дм}^2$

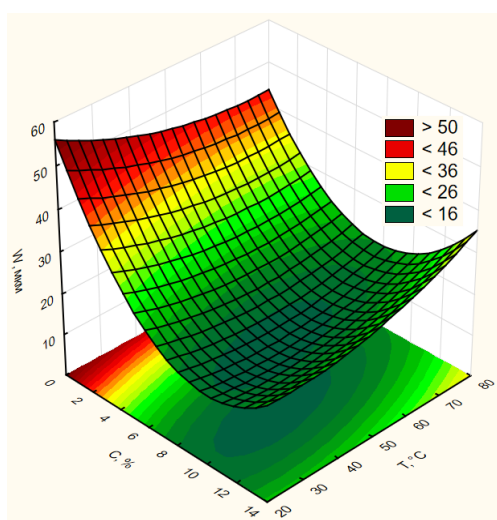
Рисунок 4.4 – Поверхні відгуку залежності величини мікротвердості покриття від технологічних параметрів процесу МДО в проточному електроліті



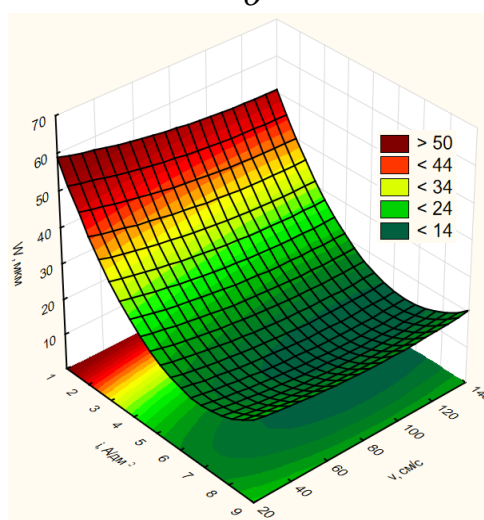
а



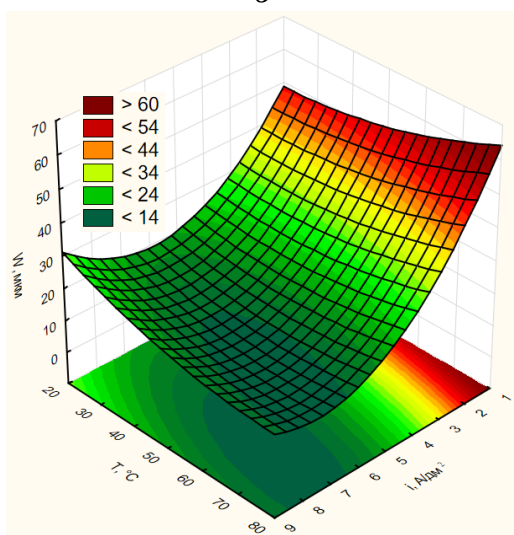
б



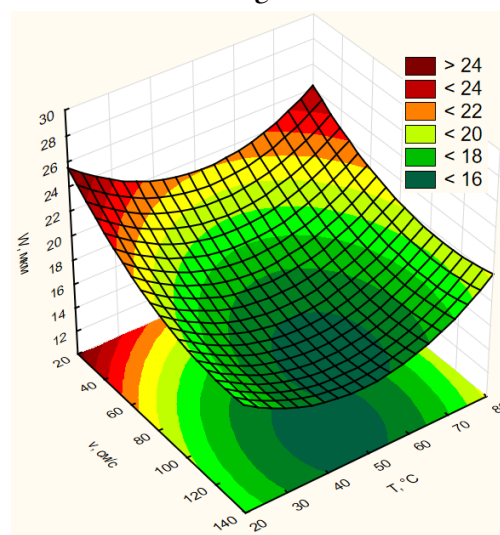
в



г



д



е

а – $C, i, v = 80 \text{ см/с}, T = 50^\circ\text{C}$; б – $C, v, i = 5 \text{ А/дм}^2, T = 50^\circ\text{C}$;
 в – $C, T, i = 5 \text{ А/дм}^2, v = 80 \text{ см/с}$; г – $i, v, C = 7\%, T = 50^\circ\text{C}$;
 д – $i, T, C = 7\%, v = 80 \text{ см/с}$; е – $v, T, C = 7\%, i = 5 \text{ А/дм}^2$

Рисунок 4.5 – Поверхні відгуку залежності величини зносу покриття від технологічних параметрів процесу МДО в проточному електроліті

Використавши програму Statistica 14 (TIBCO Software Inc., USA), знайшли оптимальні значення технологічних параметрів процесу мікродугового оксидування (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Оптимальні значення технологічних параметрів процесу мікродугового оксидування в проточному електроліті алюмінієвого сплаву Д16Т

Параметри оптимізації		Технологічні параметри			
назва, розмірність	числове значення	концентрація H_2O_2 $C, \%$	густина струму $i, \text{A/дм}^2$	швидкість потoku $v, \text{см/с}$	температура електроліту $T, ^\circ\text{C}$
		Мінімальні значення			
		1,81	2	28,11	27,8
		Оптимальні значення			
Мікротвердість $H, \text{ГПа}$	23,29264	8,7	6,5	105,52	49,22
Зношування $W, \text{г}$	10,80548	8,61	6,78	106,68	56,85
—		Максимальні значення			
		12,19	8	131,89	72,2

Слід зазначити, що за максимальної величини мікротвердості нанесеного оксидного покриття забезпечується його мінімальний знос, а оптимальні значення технологічних параметрів процесу знаходяться у межах факторного простору (табл. 4.1).

Аналіз результатів планування експерименту, наведених у табл. 4.1 свідчить, що оптимальні значення технологічних параметрів процесу мікродугового оксидування в проточному електроліті для параметрів оптимізації: мікротвердості та зносу, оптимальні значення технологічних параметрів процесу практично співпадають і знаходяться в межах діапазону

варіювання факторів. Тобто за максимальної мікротвердості забезпечується мінімальне зношування оксидного покриття.

Оскільки зносостійкість є важливою експлуатаційною характеристикою для деталей гідравлічної частини поршневих насосів двосторонньої дії, то за оптимальні значення технологічних параметрів процесу мікродугового оксидування, в проточному електроліті прийняли ті, які забезпечують отримання мінімальної величини зношування $W = 10,80548$ г; $C = 8,61$; $i = 6,78$ А/дм²; $v = 106,68$ см/с; $T = 56,85$ °С. Підставивши ці значення оптимальних технологічних параметрів у формули (4.1) отримаємо розрахункове значення величини мікротвердості $H = 23,10927$ ГПа (табл. 4.2).

Таблиця 4.2 – Розраховані величини параметрів оптимізації H за оптимальними значення технологічних параметрів процесу мікродугового оксидування за яких забезпечується мінімальний знос покриття W

Параметр оптимізації		Технологічні параметри				Відхилення параметра оптимізації, %
		концентрація H_2O_2 C , %	густина струму i , А/дм ²	швидкість потоку v , см/с	температура електроліту T , °С	
назва, розмірність	оптимальна величина	Оптимальні значення				
		8,61	6,78	106,68	56,85	
		Розраховані значення параметра оптимізації				
Мікротвердість H , ГПа	23,29264	23,10927				0,79
Зношування W , г	10,80548	10,80548				0

Відхилення параметра оптимізації розраховували за формулою

$$\Delta = \frac{Y_o - Y_p}{Y_o} 100\%$$

де Y_o , Y_p – оптимальне та розрахункове значення параметра оптимізації, відповідно.

Із табл. 4.2 видно, що розрахункова величина параметра оптимізації для мікротвердості, отримана за оптимальних значень за яких забезпечується мінімальне зношування, відрізняється від оптимальної величини на 079 %.

Таким чином, результати дослідження показали можливість спрямованого керування технологічними параметрами процесу мікродугового оксидування у проточному електроліті шляхом зміни технологічних параметрів. Отримані результати досліджень доводять можливість практичного застосування оптимальних значень технологічних параметрів процесу мікродугового оксидування в проточному електроліті для серійного виготовлення деталей на машинобудівних підприємствах.

4.3 Дослідження впливу режимів алмазного шліфування мікродугового оксидного покриття на складові величин сил різання, витрату алмазів та шорсткість поверхні

4.3.1 Експериментальні дослідження впливу режимів круглого алмазного шліфування МДО покриттів

На основі експериментальних досліджень побудовано та проаналізовано графічні залежності, які описують вплив режимів круглого алмазного шліфування МДО покриттів, нанесених на деталі з алюмінієвого сплаву Д16Т у проточному електроліті, на формування шорсткості обробленої поверхні.

На рис. 4.6 – рис. 4.11 наведено графіки залежності параметра шорсткості Ra від швидкості обертання деталі, глибини різання та поздовжньої подачі стола. У кожному з варіантів експерименту змінювали значення двох параметрів, а третій фіксувався на середньому рівні.

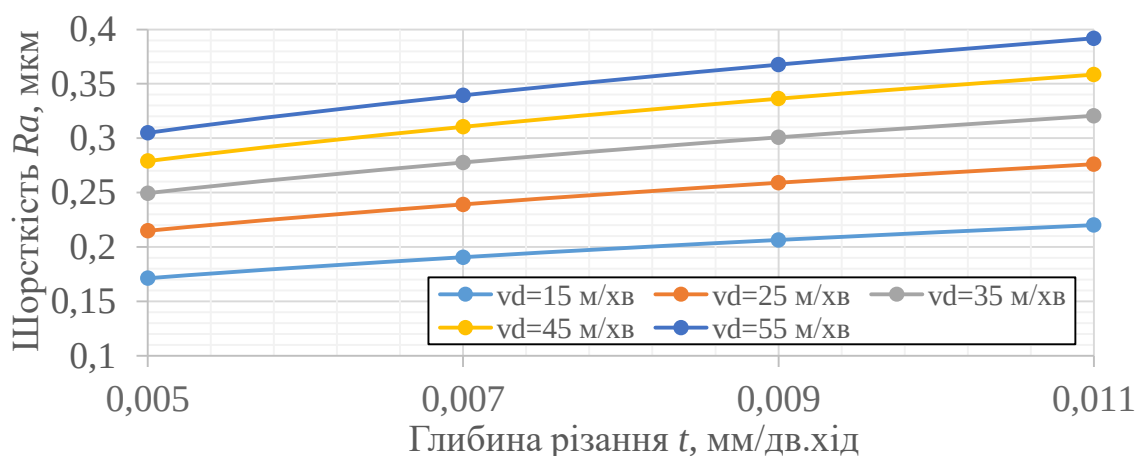


Рисунок 4.6 – Графік залежності шорсткості покриття від глибини різання за сталих значень швидкості обертання деталі та повздовжньої подачі стола на середньому рівні ($s = 3$ мм/об)

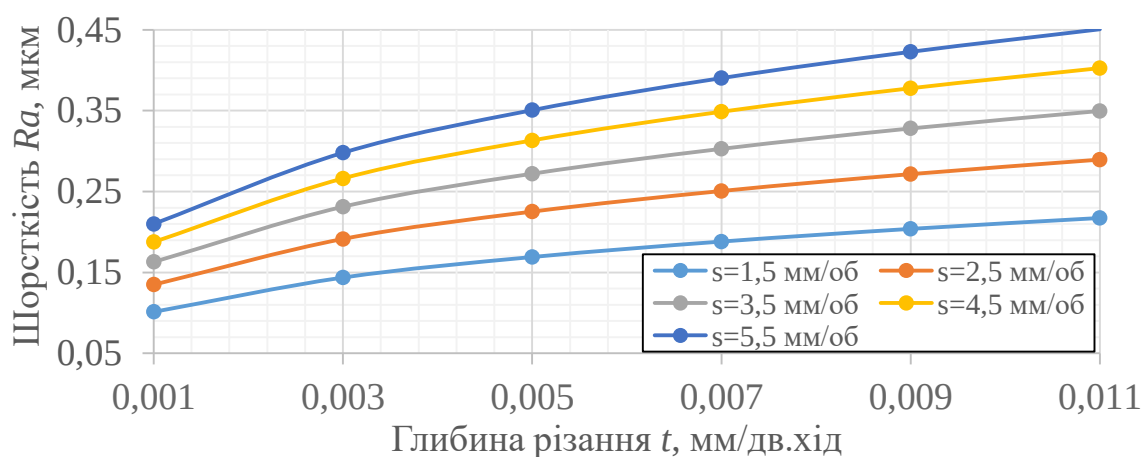


Рисунок 4.7 – Графік залежності шорсткості покриття від глибини різання за фіксованих значень повздовжньої подачі стола та швидкості обертання деталі на середньому рівні ($v_d = 35$ м/хв)

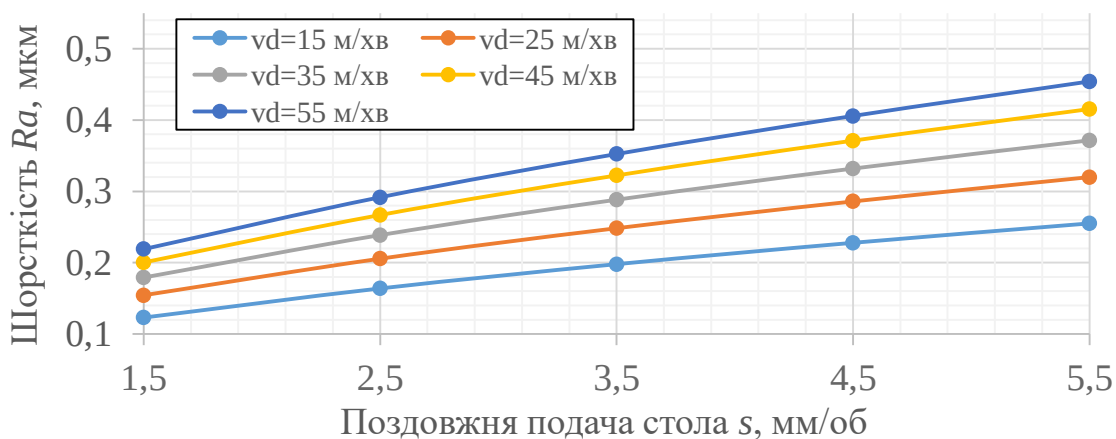


Рисунок 4.8 – Графік залежності шорсткості покриття від повздовжньої подачі стола за фіксованих значень швидкості обертання деталі та глибини різання на середньому рівні ($t = 0,006$ мм/дв.хід)

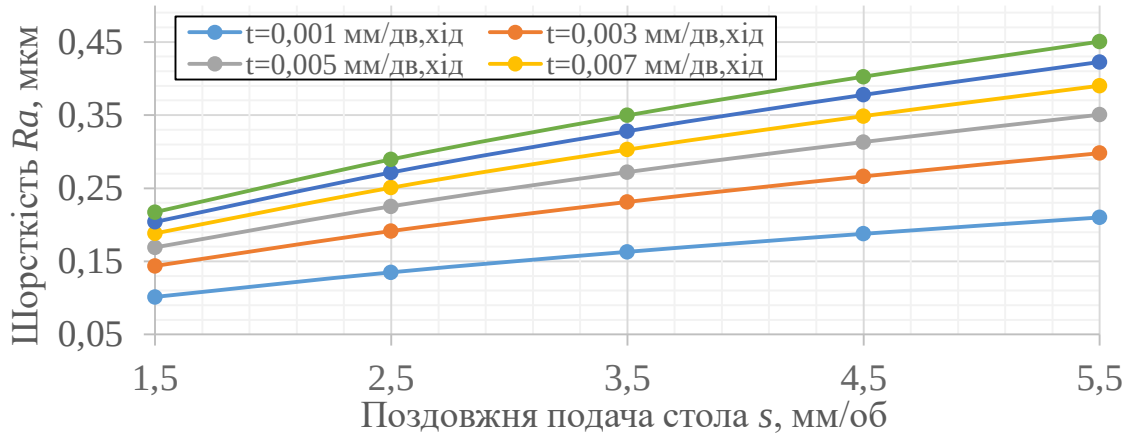


Рисунок 4.9 – Графік залежності шорсткості покриття від повздовжньої подачі стола за фіксованих значень глибини різання та швидкості обертання деталі на середньому рівні ($v_d = 35$ м/хв)

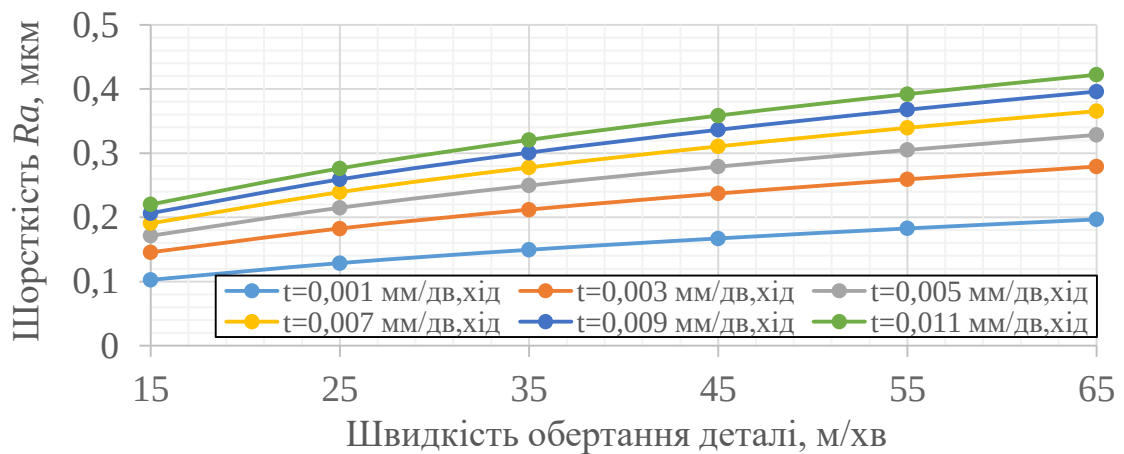


Рисунок 4.10 – Графік залежності шорсткості покриття від швидкості обертання деталі за фіксованих значень глибини різання та повздовжньої подачі стола на середньому рівні ($s = 3$ мм/об)

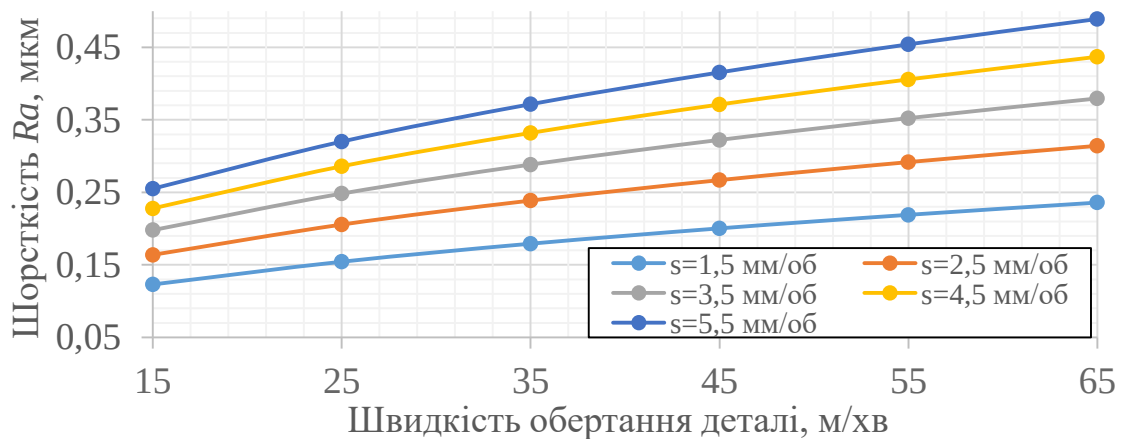


Рисунок 4.11 – Графік залежності шорсткості покриття від швидкості обертання деталі за фіксованих значень повздовжньої подачі стола та глибини різання на середньому рівні ($t = 0,006$ мм/дв.хід)

У ході проведених досліджень встановлено характер впливу основних технологічних параметрів процесу круглого алмазного шліфування на формування мікрогеометрії поверхні окисдованих деталей. Зокрема, результати експериментів показали, що зі зростанням швидкості обертання деталі, глибини різання та поздовжньої подачі відбувається збільшення параметра шорсткості.

Побудовані графіки підтверджують, що для досягнення меншої шорсткості та отримання якіснішої поверхні доцільно застосовувати знижені значення швидкості обертання та подачі. Таким чином, експериментально доведено закономірності впливу режимів різання на параметри шорсткості поверхні окисдованих деталей, що дозволяє обґрунтовано обирати оптимальні режими шліфування для забезпечення заданої якості обробки.

Аналіз кривих показав, що залежності шорсткості поверхні від глибини різання за фіксованих значень швидкості обертання і поздовжньої подачі, мають лінійний характер (рис. 4.10). Решта залежностей є квадратичними (рис. 4.8 – рис. 4.9 та рис. 4.11). При цьому криві розташовані майже паралельно, що вказує на сталий вплив технологічних параметрів у всьому досліджуваному діапазоні.

Таким чином, встановлено визначальний вплив режимів різання на формування мікрогеометрії поверхні мікродугового оксидного покриття та підтверджено необхідність оптимізації технологічних параметрів для забезпечення необхідної якості оброблених поверхонь.

4.3.2 Результати повнофакторного експерименту для вивчення колової сили різання, радіальної сили різання та питомої витрати алмазів шліфувального круга під час шліфування оксидного покриття

Нижче наведено результати повнофакторного експерименту для вивчення колової сили різання, радіальної сили різання та питомої витрати алмазів шліфувального круга під час шліфування оксидного покриття відповідно, табл. 4.3–табл. 4.5.

Застосовуючи вищезазначену методику планування експерименту та обробки результатів експерименту, ми аналогічно отримали залежності для

розрахунку значень складових сили різання та питомої витрати алмазів шліфувального круга під час алмазного шліфування керамічного оксидного покриття:

- кругова сила різання

$$P_z = 26.154t^{0.762}v^{0.469}s^{0.868}; \quad (4.3)$$

- радіальна сила різання

$$P_y = 42.487t^{0.696}v^{0.601}s^{0.504}; \quad (4.4)$$

- питома витрата алмазів для шліфувальних кругів

$$q = 9.814t^{0.581}v^{0.359}s^{0.325}. \quad (4.5)$$

Таблиця 4.3 –Результати повного факторного експерименту 23 для кругової сили різання.

№ експерименту	Значення кодованих факторів				Взаємодія кодованих фактори				Вихідний параметр, Н				
									повторюваність експериментів			середнє значення	логарифм
	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	y_{v1}	y_{v2}	y_{v3}	$\bar{y}_v$	$\bar{Y}_v$
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	1,90	1.98	1,94	1,94	0,66
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	8.77	8.79	8.75	8.77	2.17
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	31,90	31.45	31.15	31.50	3.45
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	27.00	27.33	27.00	27.11	3.30
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	17.12	17.32	17.22	17.22	2.85
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	244,29	245,00	244,78	244,69	5.50
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	20,64	21.24	21.48	21.12	3.05
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	242,79	244,69	246,59	244,69	5.50

Сталі множники та показники в рівняннях (4.2)-(4.5) породжені чисельними результатами експериментів. За умов проведення експериментів більшого розмаху можна розглядати більше число змінних параметрів, які впливають на досліджувані характеристики. Однак у отриманих рівнях (4.2)–

(4.5) всі вони перекриваються константами 0.15003, 26.154, 42.487, 9.814, відповідно.

Таблиця 4.4 – Результати повнофакторного експерименту для радіальної сили різання

№ експе- рименту	Значення кодованих факторів				Взаємодія кодованих фактори				Вихідний параметр, Н				
									повторюваність експериментів			середнє начення	лога- рифм
	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	y_{v1}	y_{v2}	y_{v3}	$\bar{y}_v$	$\bar{Y}_v$
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	10.59	11.09	9.79	10.49	2.35
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	17.11	19.11	17.21	17.81	2.88
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	52,75	51,94	51.15	51,94	3.95
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	44.70	44,76	44,66	44.70	3.80
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	6.78	6.43	6.11	6.44	1,86
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	244,79	244,59	244,69	244,69	5,50
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	57.05	57.05	58.1	57,40	4.05
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	270,64	270,54	270,84	270,64	5.60

Такими величинами можуть бути: коефіцієнт жорсткості шліфувального верстата та державки, коефіцієнт властивостей шліфувального круга (добуток коефіцієнта абразивності, коефіцієнта типу зв'язки, коефіцієнта твердості зв'язки, коефіцієнта просочення зв'язки, коефіцієнта зернистості шліфувального круга та коефіцієнта пористості шліфувального круга), коефіцієнт властивостей мастильно-охолоджувальної рідини, коефіцієнт часу шліфування (кількість ходів) та коефіцієнт часу іскроутворення (кількість ходів іскроутворення).

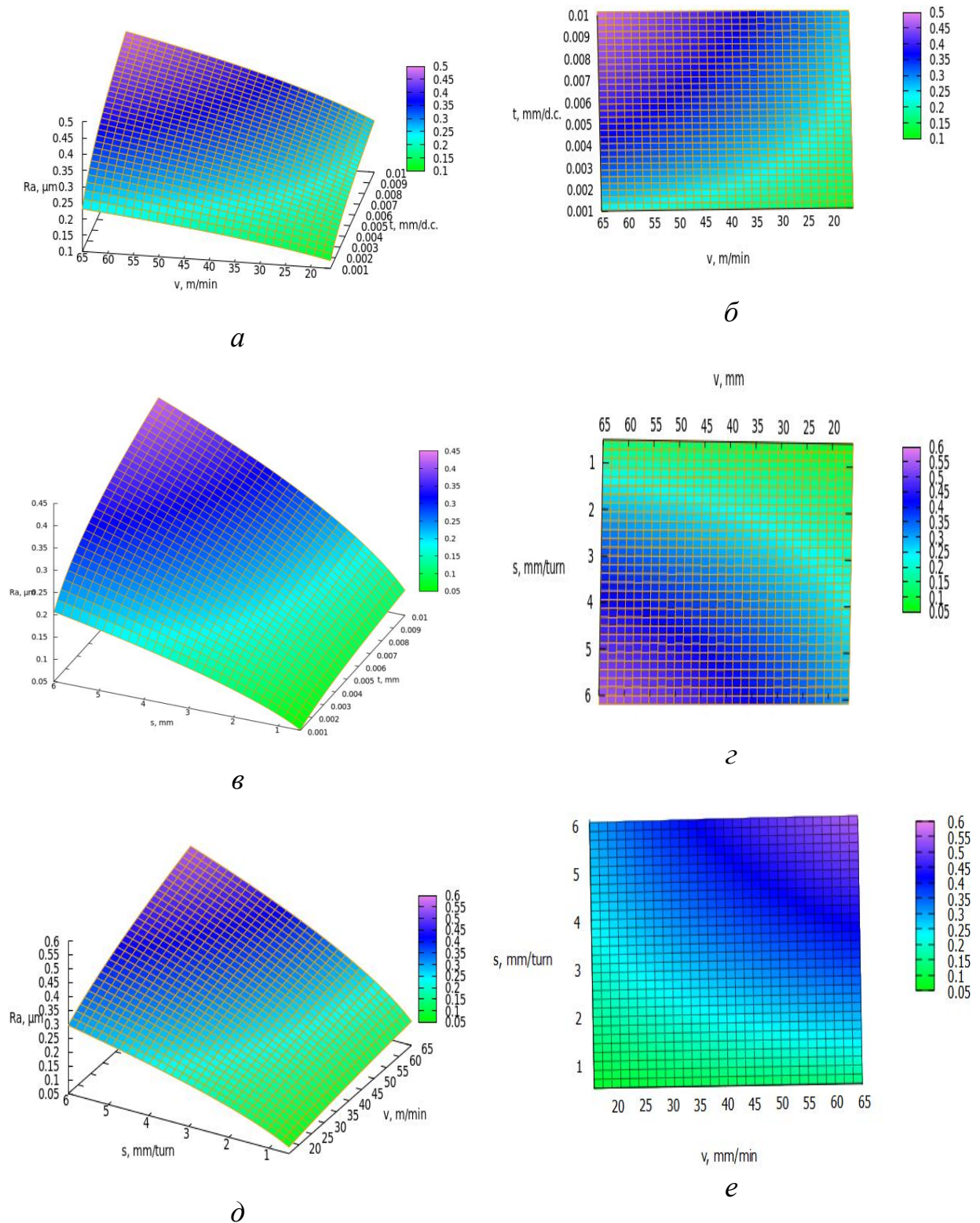
Значення параметрів умов різання мають важливішу інтерпретацію, ніж задані постійні коефіцієнти. Зокрема, рівняння (4.2) також передбачає, що на шорсткість шліфованої поверхні найбільше впливають глибина різання, поздовжня подача верстата та швидкість обертання заготовки. Якщо шліфувати дуже тверді матеріали (включаючи покриття), абразивний круг значно зношуватиметься, що призведе до зниження швидкості видалення та

виштовхування більшої кількості матеріалу. Швидкість подачі та, зокрема, врізання (хід, глибина різання) можуть бути використані для подолання деформаційних сил сил різання. Таким чином, швидкість подачі може суттєво впливати на швидкість видалення матеріалу, а також на шорсткість шліфованої поверхні.

Таблиця 4.5 – .Результати повнофакторного експерименту проведеного за матрицею плану питомої витрати алмазів у шліфувальному колі.

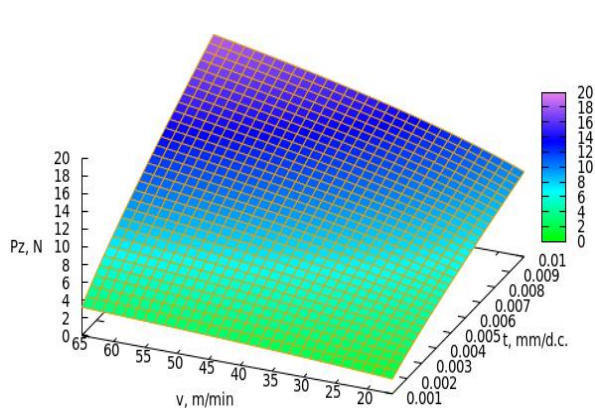
№ експерименту	Значення кодованих факторів				Взаємодія кодованих фактори				Вихідний параметр, мкг/г				
									повторюваність експериментів			середнє значення	логарифм
	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	y_{v1}	y_{v2}	y_{v3}	$\bar{y}_v$	$\bar{Y}_v$
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	1.27	1.15	1.24	1.22	-1,51
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	17,97	18.00	17.91	17,96	2.88
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	11.60	11.55	11.62	11.59	2.45
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	9.97	10.03	9.91	9.97	2.30
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	8.28	8.45	8.11	8.28	2,11
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	12.29	12.07	12.18	12.18	2.50
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	7.96	7.80	7.55	7.77	2.05
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	3.77	3.61	3.93	3.77	1.33

Використовуючи отримані залежності (4.3)–(4.4), побудували поверхні відгуку та їх лінії одного рівня відповідно для складових сили різання: колової P_z (Н) та радіальної P_y , (Н) та питомої витрати алмазів шліфувального круга q (мг/г) як функцію елементів режимів різання під час зовнішнього круглого алмазного шліфування оксидних покриттів (рис. 4.12, рис. 4.13 та рис. 4.14). Математично, у тривимірному комплексному просторі всі отримані залежності є багатозначними функціями трьох змінних. Якщо за додатковими трьома припущеннями по кожній змінній вибрати однозначну гілку, то вони стають голоморфними функціями, за винятком цих гіперплощин $t=0$, $v=0$, $s=0$. Однак відповідна область голоморфності не буде областю Рейнхардта, тобто повною кратнокруговою областю з центром у початку координат.

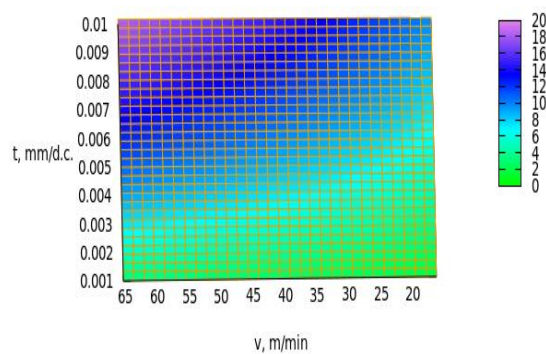


a, б – $t, v, s = 4$ мм/оберт; *в, г* – $t, s, v = 30$ м/хв; *д, е* – $v, s, t = 0,0075$ мм/оберт

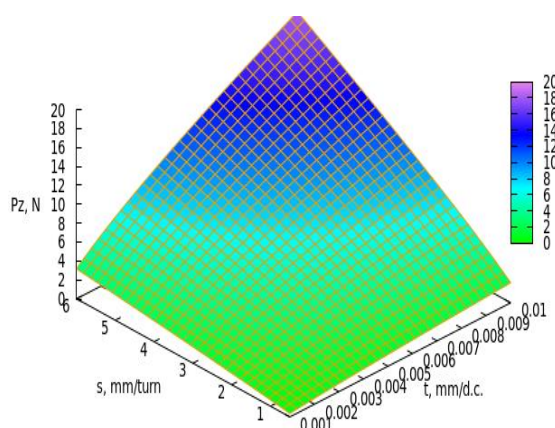
Рисунок 4.12 – Поверхні відгуку залежності шорсткості поверхні Ra під час алмазного шліфування керамічного оксидного покриття за складовими режимів різання *a, в, д* та їх лінії однакового рівня *б, г, е*



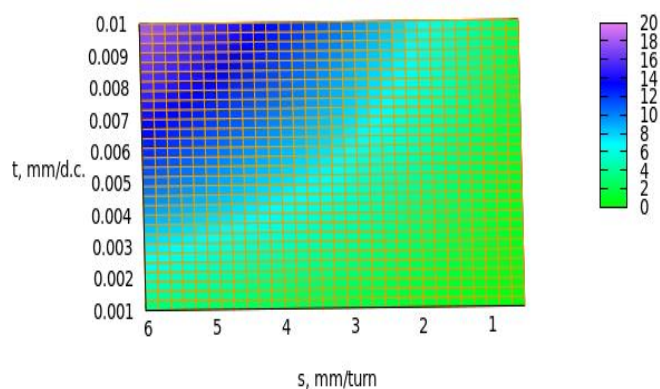
a



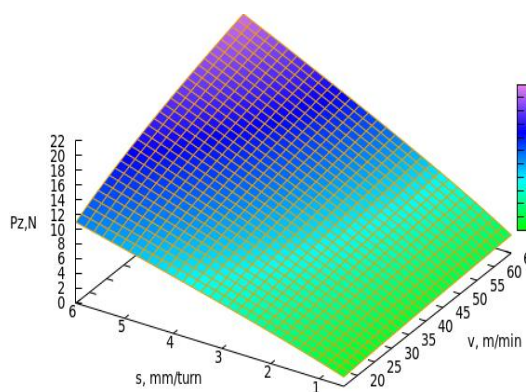
б



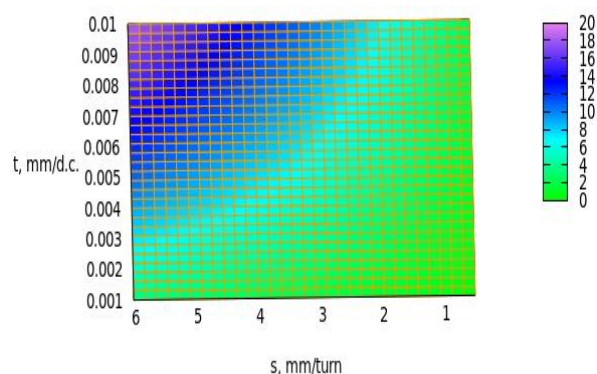
c



д



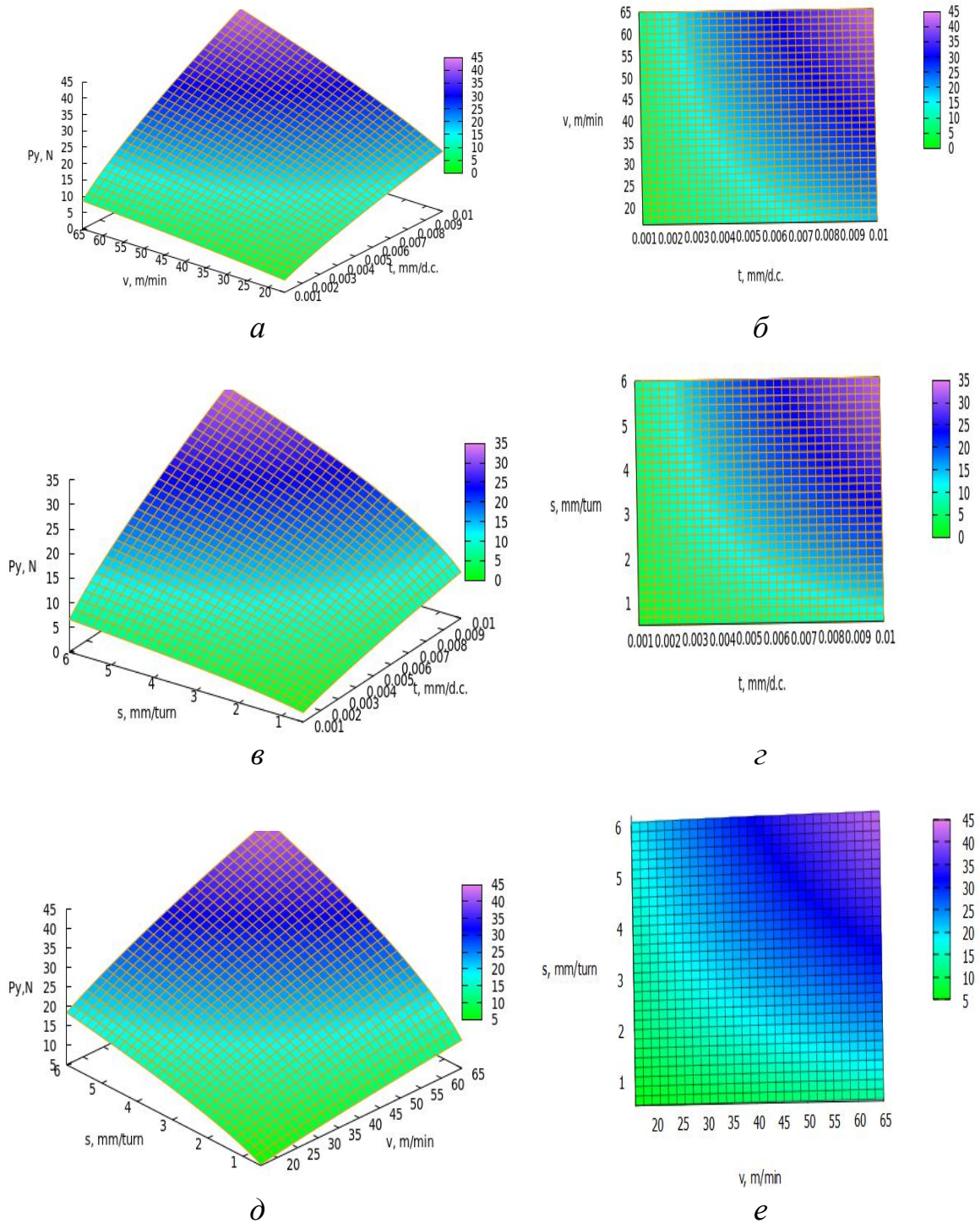
e



f

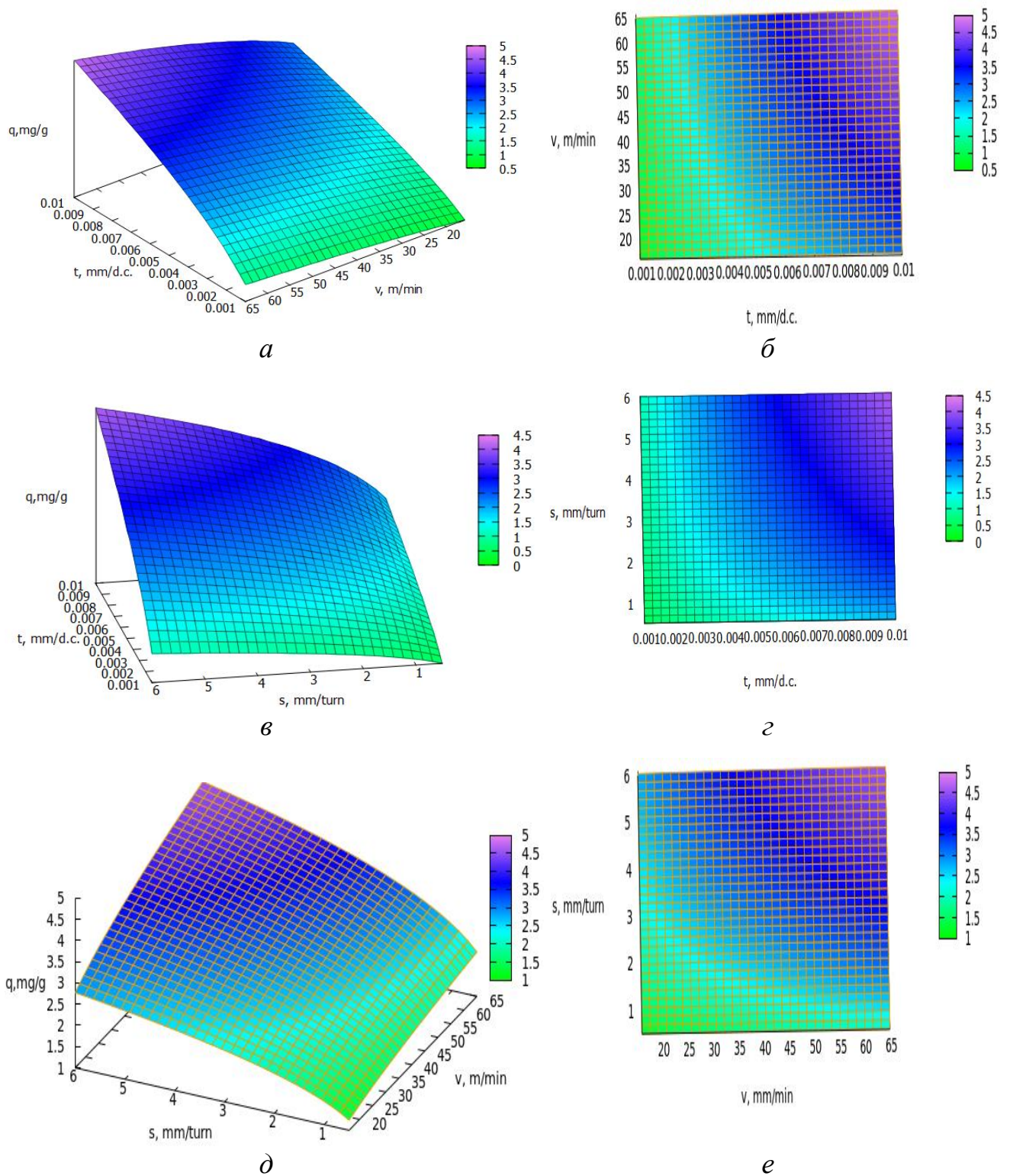
a, б – $t, v, s = 4$ мм/оберт; в, д – $t, s, v = 30$ м/хв; е, ф – $v, s, t = 0,0075$ мм/оберт

Рисунок 4.13 – Поверхні відгуку залежності кругової сили різання P_z під час алмазного шліфування керамічного оксидного покриття за складовими режимів різання *a, в, д* та їх лінії однакового рівня *б, г, е*



a, б – $t, v, s = 4$ мм/оберт; *в, г* – $t, s, v = 30$ м/хв; *д, e* – $v, s, t = 0,0075$ мм/оберт

Рисунок 4.14 – Поверхні відгуку залежності радіальної сили різання P_{ay} під час алмазного шліфування керамічного оксидного покриття за складовими режимів різання *a, в, д* та їх лінії однакового рівня *б, г, e*



a, б – $t, v, s = 4$ мм/оберт; *в, г* – $t, s, v = 30$ м/хв; *д, e* – $v, s, t = 0,0075$ мм/оберт

Рисунок 4.15 – Поверхні відгуку залежності питомої витрати алмазів шліфувального круга q під час алмазного шліфування оксидного покриття за складовими режимів різання *a, в, д* та їх лінії однакового рівня *б, г, e*

Аналіз поверхонь на рисунках 4.12 *а, в, д* засвідчує, що вони можуть бути апроксимовані поверхнями другого порядку, параметризованими кубічними сплайнами або навіть ермітовими сплайнами, що залежать від двох змінних при фіксованому значенні параметра. До того ж відповідна функція, що описує шорсткість зростає по кожній з трьох змінних при фіксованих значеннях двох інших. Навіть більше шорсткість зростає вздовж будь-якого напрямку з першої чверті, що визначається додатними значеннями параметрів близькими до бісектриси першого координатного кута. На поверхні відсутні сідлові та інші особливі точки. Водночас, на поверхні можна побачити криву перегину, що відділяє опуклу частину поверхні від увігнутої і яка, по суті, слугує межею між блакитною та синьою частиною ліній рівня.

Графічно-аналітичний аналіз поверхонь на рисунках 4.13 *а, в, д* засвідчує, що кругова сила різання може бути апроксимована поверхнями другого порядку, параметризованими кубічними сплайнами або навіть ермітовими сплайнами, що залежать від двох змінних при фіксованому значенні параметра. До того ж відповідна функція, що описує кругову силу різання, зростає по кожній з трьох змінних при фіксованих значеннях двох інших. Навіть більше ця сила зростає вздовж будь-якого напрямку з першої чверті, що визначається додатними значеннями параметрів близькими до бісектриси першого координатного кута. На поверхні відсутні сідлові та інші особливі точки. Водночас, на поверхні можна побачити криву перегину, що відділяє опуклу частину поверхні від увігнутої і яка, по суті, слугує межею між блакитною та синьою частиною ліній рівня. Це стосується рисунків 4.13 *в, д*, але на рис. 4.14 *а* поверхня є по суті гіперплощиною.

Графічно-аналітичний аналіз поверхонь на рисунках 4.14 *а, в, д* засвідчує, що радіальна сила різання може бути апроксимована поверхнями другого порядку, параметризованими кубічними сплайнами або навіть ермітовими сплайнами, що залежать від двох змінних при фіксованому значенні параметра. До того ж відповідна функція, що описує радіальну силу різання, зростає по кожній з трьох змінних при фіксованих значеннях двох інших. Навіть більше ця

сила зростає вздовж будь-якого напрямку з першої чверті, що визначається додатними значеннями параметрів близькими до бісектриси першого координатного кута. На поверхні відсутні сідлові та інші особливі точки. Водночас, на поверхні можна побачити криву перегину, що відділяє опуклу частину поверхні від увігнутої і яка, по суті, слугує межею між блакитною та синьою частиною ліній рівня.

Графічно-аналітичний аналіз поверхонь на рисунках 4.15 *а, в, д* засвідчує, що питома витрата алмазів шліфувального круга може бути апроксимована поверхнями другого порядку, параметризованими кубічними сплайнами або навіть ермітовими сплайнами, що залежать від двох змінних при фіксованому значенні параметра. До того ж відповідна функція, що описує кругову силу різання, зростає по кожній з трьох змінних при фіксованих значеннях двох інших. Навіть більше ця сила зростає вздовж будь-якого напрямку з першої чверті, що визначається додатними значеннями параметрів близькими до бісектриси першого координатного кута. На поверхні відсутні сідлові та інші особливі точки, а також крива перегину, що відділяє опуклу частину поверхні від увігнутої. По суті, ця поверхня є увігнутою у першому октанті.

Отримані результати слід враховувати при оцінці оброблюваності покриттів, відомої як мікрооброблюваність. Наразі ми можемо говорити лише про абсолютну оброблюваність за отриманою шорсткістю поверхні (абсолютна мікрогеометрична оброблюваність), оскільки ми не визначили стандартні умови, включаючи стандартний інструмент, і ми не можемо визначити відносну оброблюваність, досягнуту шліфуванням шорсткості поверхні (відносна мікрогеометрична оброблюваність шліфуванням). Якби оброблюваність шліфуванням ми називали шліфуванням, ми б говорили про абсолютну або відносну мікрогеометричну оброблюваність. Керамічні та твердосплавні покриття, отримані мікродуговим оксидуванням, мають високу шорсткість і пористість і не завжди можуть відповідати вимогам виробника до якості поверхні. Тому оксидні покриття необхідно ретельно шліфувати, щоб уникнути перегріву поверхневого шару покриття (що може призвести до тріщин) та,

можливо, щоб уникнути ймовірного відшарування покриття від підкладки та запобігти погіршенню профілю опорної кривої, що має призвести до зниження несучої здатності поверхні покриття, збільшення тертя та зносу під час можливої експлуатації деталей з покриттям.

4.3.3 Результати досліджень шорсткості поверхні оксидного покриття

Шорсткість поверхні є важливою характеристикою стану поверхні деталей тому провели дослідження поверхні оксидного покриття сформованого мікродуговим оксидуванням на алюмінієвому сплаві Д16Т у проточному електроліті на плоских призматичних зразках. Для оцінки шорсткості зразків сканування провели вздовж треків, які проходили через вибрану на точку на плоскій поверхні за допомогою 3D профілографа “MICRON-ALPHA”. На першому етапі дослідили шорсткість поверхні «тонкого» оксидного покриття, на якому тільки починав утворюватися зовнішній рихлий шар (рис. 4.16 – рис. 4.19, табл. 4.6).

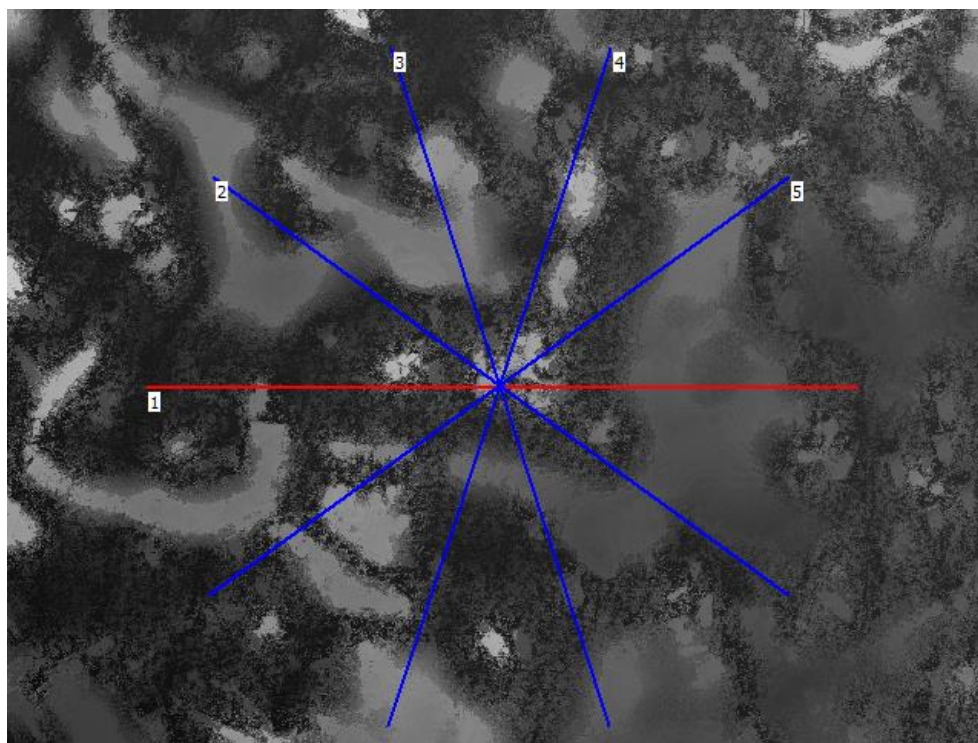
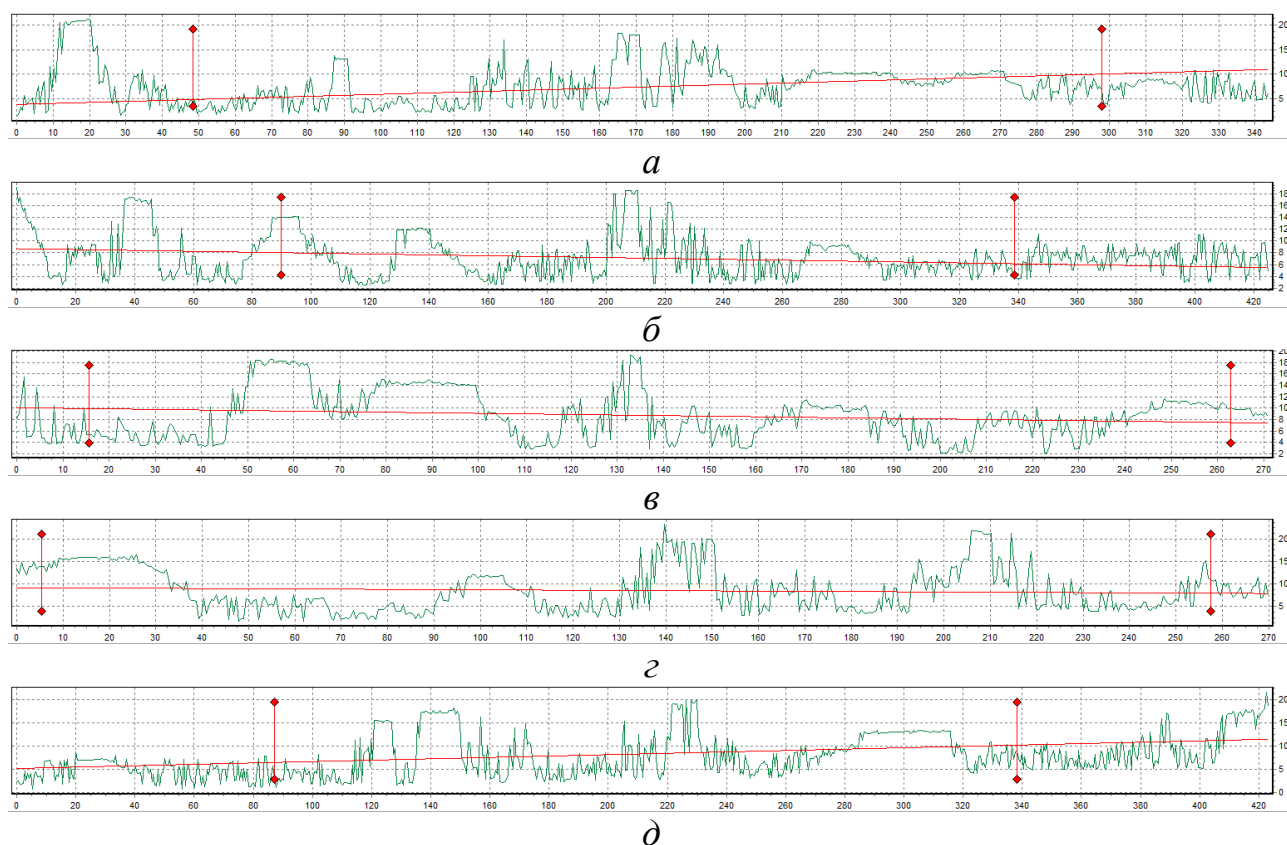


Рисунок 4.16 – Траси сканування під час дослідження параметрів шорсткості поверхні оксидного покриття сформованого у проточному електроліті (без механічної обробки)

Таблиця 4.6 – Параметри шорсткості за трасами сканування (1–5) під час дослідження поверхні оксидного покриття сформованого у проточному електроліті (без механічної обробки)

Параметр	Номер траси сканування/кут, градус					Середнє значення
	1/0	2/36	3/72	4/108	5/144	
Максимальна висота нерівностей профілю за 10 точками Rz, мкм	14,83	12,97	14,19	17,71	16,21	Rz=15,19
Середнє арифметичне відхилення профілю Ra, мкм	2,545	2,588	3,436	4,087	3,689	Ra=3,269
Шорсткість між двома попередньо визначеним опорним лініями H, мкм	11,72	10,57	14,15	16,30	15,21	H=13,59
Глибина шорсткості основи R3z, мкм	14,64	12,96	15,10	17,63	16,37	R3z=15,34
Середньоквадратична шорсткість Rq, мкм	3,380	3,407	4,157	4,927	4,562	Rq=4,087
Коефіцієнт ексцесу профілю шорсткості Rku	4,496	4,411	2,364	2,929	2,931	Rku=3,426
Максимальна висота піку профілю Rp, мкм	11,14	11,43	10,51	14,70	11,41	Rp=11,84
Максимальна глибина долини профілю Rv, мкм	-5,978	-5,237	-6,343	-7,188	-5,957	Rv=-6,141
Загальна висота Rt мкм	-5,978	-5,237	-6,343	-7,188	-5,957	Rt=17,98
Середньоквадратичне відхилення поверхні H STD						H STD=4,04414
Площа поверхні S surf, мкм ²						S surf=413484
Відношення площі поверхні до площі проекції поверхні SR surf						SR surf=4,67356
Максимальна висота SRz, мкм						SRz=16,97



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

Рисунок 4.17 – Профілі трас сканування під час дослідження параметрів шорсткості поверхні оксидного покриття сформованого у проточному електроліті (без механічної обробки)

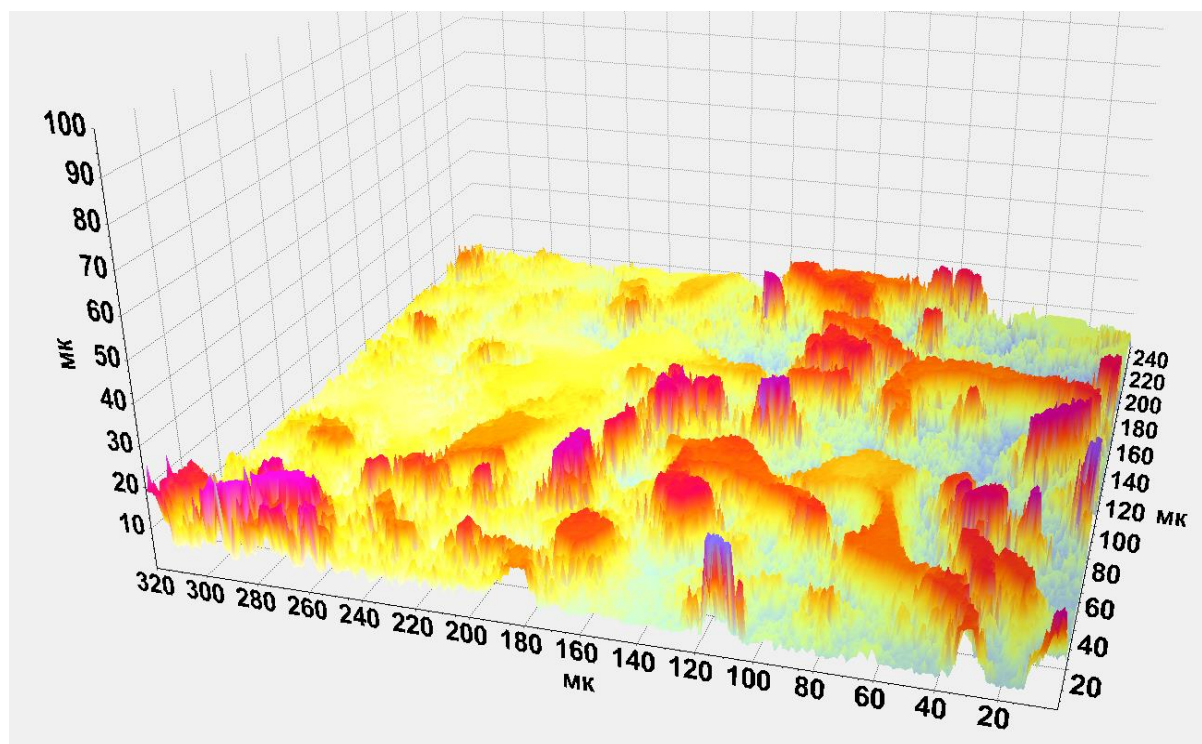
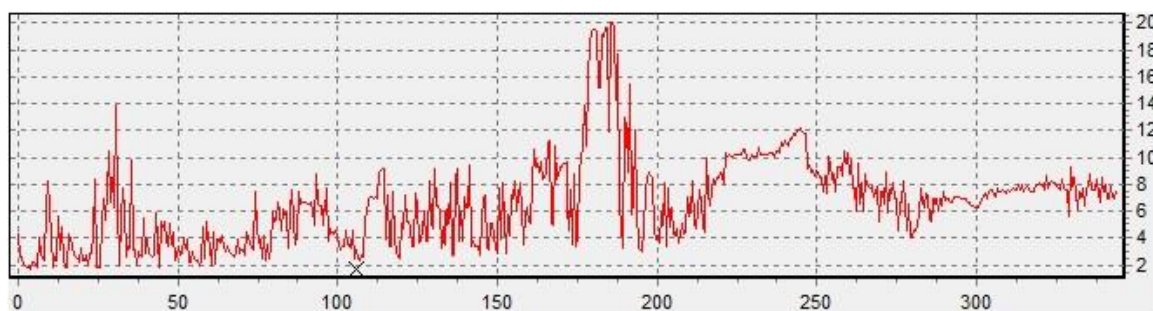
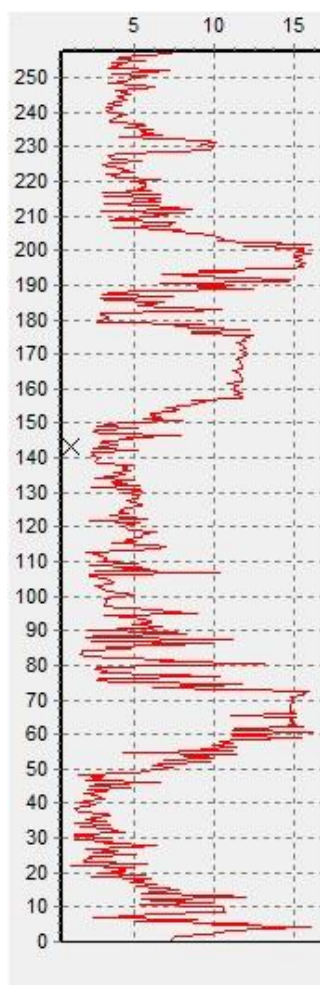


Рисунок 4.18 – 3D-зображення шорсткості поверхні оксидного покриття сформованого у проточному електроліті (без механічної обробки)



a



б

a – горизонтальна; *б* – вертикальна

Рисунок 4.19 – Профілі двох взаємно перпендикулярних трас сканування (мкм) під час дослідження параметрів шорсткості поверхні оксидного покриття сформованого у проточному електроліті (без механічної обробки)

Аналіз результатів дослідження шорсткості поверхні оксидного покриття сформованого у проточному електроліті (без механічної обробки), представлених на рис. 4.16 – 4.19, свідчить про наявність окремих піків на профілях шорсткості, що обумовлене початком утворення зародків зовнішнього рихлого шар із низькотемпературних фаз та шпінелей. Таке оксидне покриття може використовуватися для виробів до яких не ставляться особливі вимоги щодо шорсткості, які не потребують подальшої механічної обробки.

Оскільки для різноманітних деталей, які працюють у патах тертя виникає потреба у видаленні зовнішнього рихлого шар із низькотемпературних фаз і шпінелей, а також дефектного шару, то на другому етапі дослідили шорсткість «товстого» оксидного покриття на плоских зразках після видалення зовнішнього рихлого шару абразивною шкуркою та проведення алмазного шліфування (рис. 4.20 – рис. 4.23, табл. 4.7).

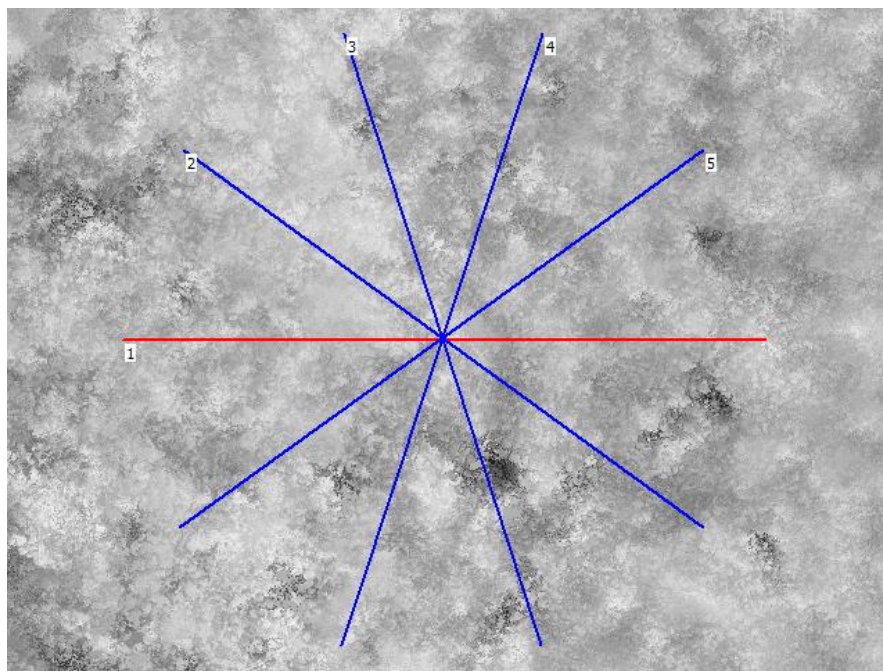
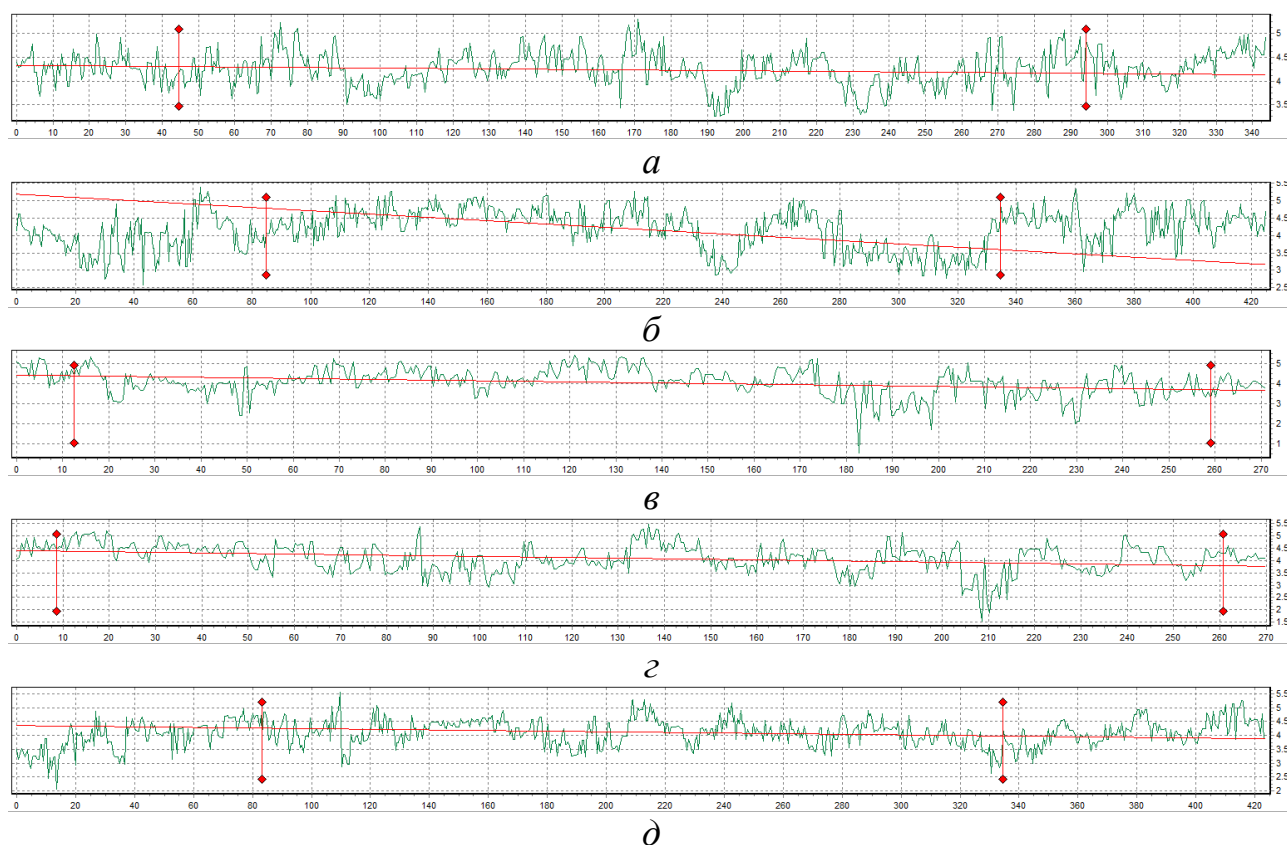


Рисунок 4.20 – Траси сканування під час дослідження параметрів шорсткості поверхні оксидного покриття сформованого у проточному електроліті (після алмазного шліфування)

Аналіз результатів дослідження шорсткості поверхні оксидного покриття сформованого у проточному електроліті після алмазного шліфування, представлених на рис. 4.9 – 4.12, свідчить про наявність рівномірного розподілу піків на профілях шорсткості, що обумовлене видаленням зовнішнього рихлого шару із низькотемпературних фаз та шпінелей на наявність інструментальних слідів (від зерен алмазного шліфувального круга). Таке оксидне покриття може використовуватися для зміцнення деталей виробів, до робочих поверхонь яких ставляться досить жорсткі вимоги щодо шорсткості та твердості, які працюють у парах тертя, наприклад, торцевих ущільненнях.

Таблиця 4.7 – Параметри шорсткості за трасами сканування (1–5) під час дослідження поверхні оксидного покриття сформованого у протічному електроліті (після алмазного шліфування)

Параметр, мкм	Номер траси сканування/кут, градус					Середнє значення
	1/0	2/36	3/72	4/108	5/144	
Максимальна висота нерівностей профілю за 10 точками Rz, мкм	1,755	1,900	3,477	2,868	2,042	Rz=2,408
Середнє арифметичне відхилення профілю Ra, мкм	0,2907	0,3988	0,4996	0,4317	0,3468	Ra=0,3935
Шорсткість між двома попередньо визначеним опорним лініями H, мкм	1,336	1,665	2,221	1,748	1,492	H=1,693
Глибина шорсткості основи R3z, мкм	1,707	1,778	3,170	2,681	1,982	R3z=2,263
Середньоквадратична шорсткість Rq, мкм	0,3715	0,4837	0,6511	0,5474	0,4382	Rq=0,4984
Коефіцієнт ексцесу профілю шорсткості Rku	3,085	2,455	4,547	3,784	3,217	Rku=3,418
Максимальна висота піку профілю Rp, мкм	1,070	1,135	1,335	1,394	1,323	Rp=1,252
Максимальна глибина долини профілю Rv, мкм	-0,9591	-1,191	-3,378	-2,374	-1,358	Rv=-1,852
Загальна висота Rt мкм	-0,9591	-1,191	-3,378	-2,374	-1,358	Rt=3,104
Середньоквадратичне відхилення поверхні H STD						H STD=0,560257
Площа поверхні S surf, мкм ²						S surf=122898
Відношення площі поверхні до площі проекції поверхні SR surf						SR surf=1,38910
Максимальна висота SRz, мкм						SRz=3,172



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

Рисунок 4.21 – Профілі трас сканування під час дослідження параметрів шорсткості поверхні оксидного покриття сформованого у протічному електроліті (після алмазного шліфування)

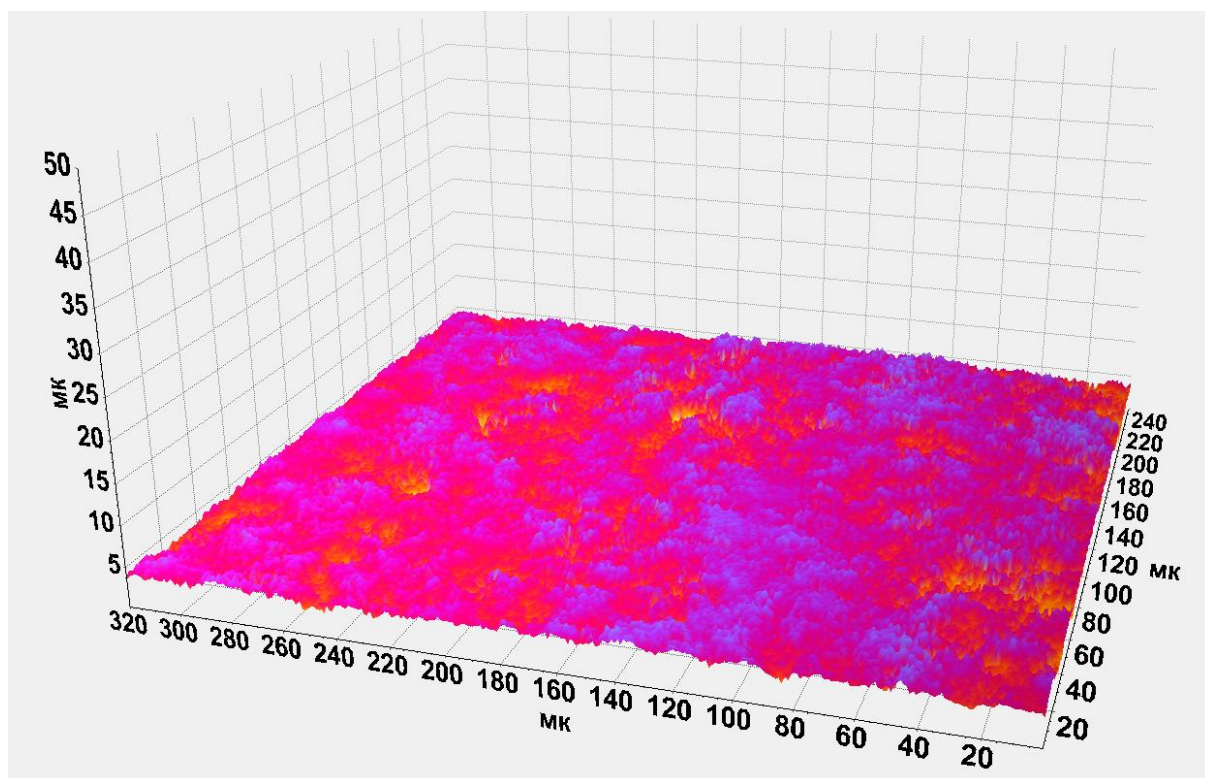
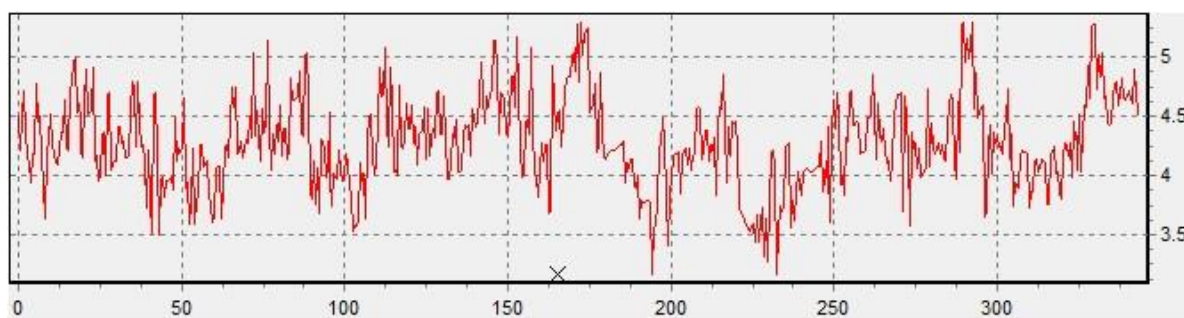
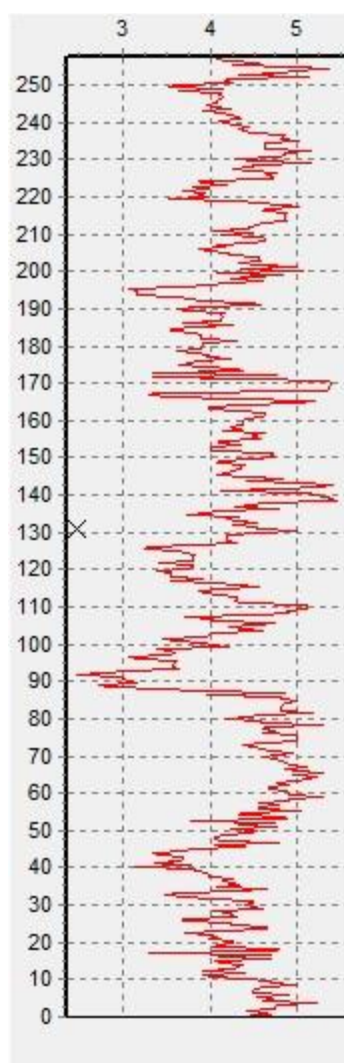


Рисунок 4.22 – 3D-зображення шорсткості поверхні оксидного покриття сформованого у протічному електроліті (після алмазного шліфування)

*a**б*

a – горизонтальна; *б* – вертикальна

Рисунок 4.23 – Профілі двох взаємно перпендикулярних трас сканування (мкм) під час дослідження параметрів шорсткості поверхні оксидного покриття сформованого у проточному електроліті (після алмазного шліфування)

4.4. Мікроскопічні дослідження оксидного покриття

Відповідно до отриманих оптимальних значень технологічних параметрів процесу мікродугового оксидування було сформовано покриття (рис. 4.24). Згідно з рис. 4.5, оксидне покриття має однорідну структуру та не мають видимих дефектів, таких як пори, мікротріщини та інші.

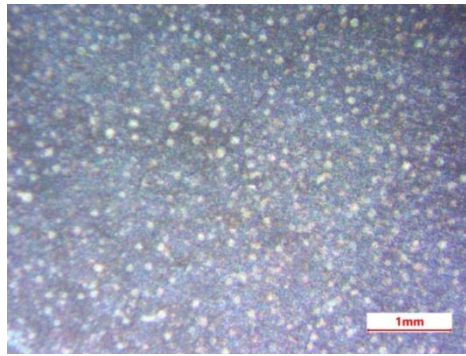
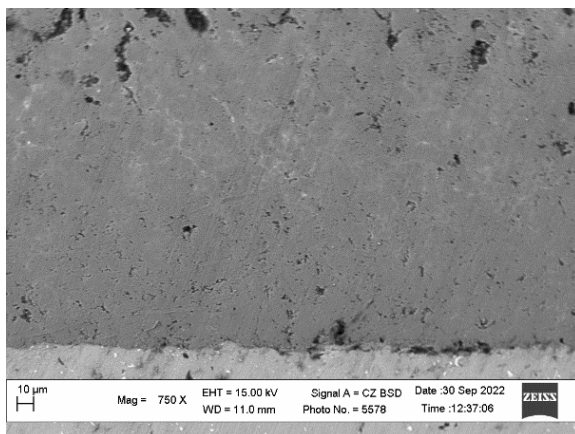
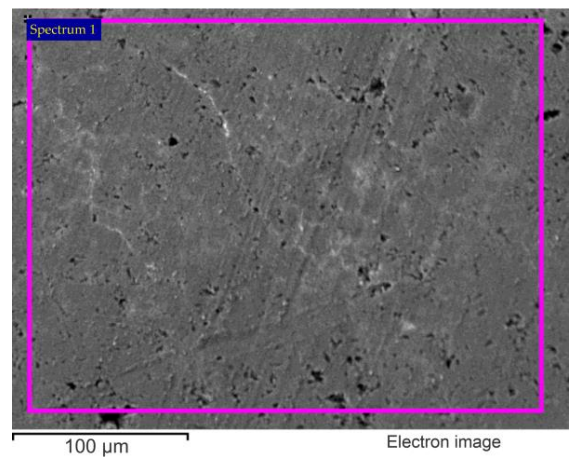


Рисунок 4.24 – Оптична мікрофотографія поверхні оксидного покриття після завершення механічної обробки з видалення зовнішнього рихлого шару

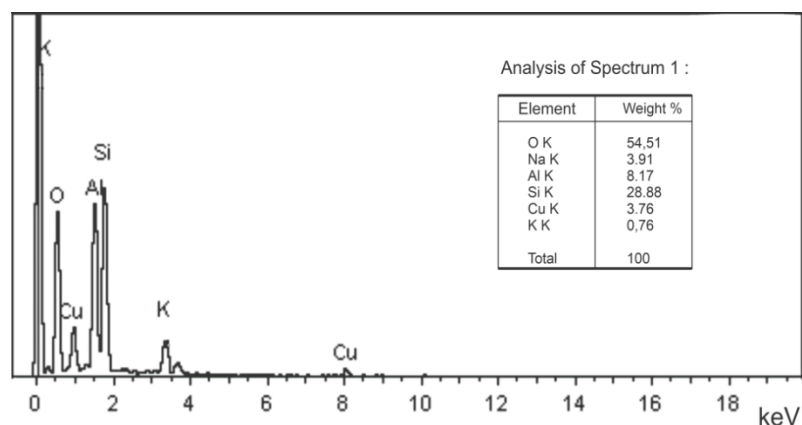
На рис. 4.14 показано результати дослідження морфології та складу МДО-покриттів методами SEM/EDS.



a



б



с

б – область EDS-аналізу; в – результуючий спектр та хімічний склад в аналізованій області покриття

Рисунок 4.24 – Мікрофотографія SEM поверхні розділу між оксидним покриттям та базовим сплавом Д16Т (а) та результати EDS-аналізу оксидного покриття

Границя розділу між основним металом (Д16Т) та оксидним покриттям показана на рис. 4.24. Як видно з рисунка, зона розділу характеризується цілісністю та відсутністю значного розшарування, що свідчить про високий рівень хімічного зв'язку оксидного шару з алюмінієвою основою. Це зумовлено прямим плазмовим синтезом оксидної фази з основного металу та хімічними елементами з електроліту під час МДО-процесу.

Як видно з рис. 4.24, б, покриття має шарувату млинцеподібну структуру, типову для МДО-покриттів. Аналіз хімічного складу робочого шару покриття вказує на наявність ключових компонентів для утворення оксиду (Al та O) та компонентів електроліту (K, Na, Si) (рис. 4.24, в). На межах зерен є багато рівномірно розподілених дрібних пор, що утворилися в результаті міграції газу в каналах під час плазмового розряду. Товщина МДО-покриттів становила 180–210 мкм, що визначає високу зносостійкість, корозійну стійкість та теплозахисні властивості оксидно-керамічних покриттів.

4.5 Роботоздатність деталей з оксидними покриттями

Для оцінки захисної дії оксидних покриттів нанесених у проточному електроліті на алюмінієвий сплав Д16Т зняли поляризаційні криві у 3 % NaCl (рис. 4.25). Як видно із рис. 4.18

Аналіз поляризаційних кривих показав, що оксидне покриття, сформоване на сплаві Д16Т, призводить до зміни нахилу ділянок Тафеля на анодній та катодній кривій, що свідчить про зниження струму корозії, та забезпечує високу корозивну тривкість алюмінію.

На основі результатів електрохімічних вимірювань встановлено, що під час випробовувань на ротягування зразків із сплаву Д16Т і АК8М із оксидними покриттями в електроліті (3 % NaCl), стрибок електродного потенціалу у від'ємну сторону спостерігався за рівня напружень біля $0,7 \sigma_{0,2}$, що свідчить про наявність в оксидному шарі залишкових напружень стиску.

У таблиці 4.8 наведено допустимі рівні напружень під час розтягування алюмінієвих зразків із оксидними покриттями.

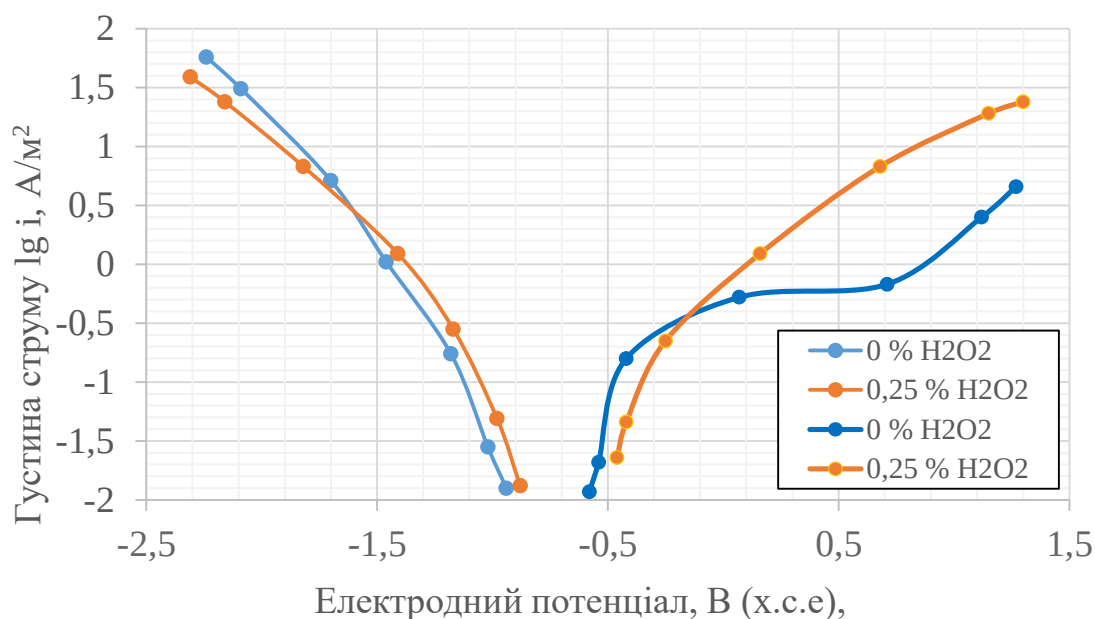


Рисунок 4.18 – Поларизаційні криві в розчині 3 % NaCl зняті для оксидного покриття сформованого в проточному електроліті на сплав Д16Т

Таблиця 4.8 – Допустимі рівні напружень під час розтягування алюмінієвих зразків із оксидними покриттями

Алюмінієвий сплав	Умовна межа плинності $\sigma_{0,2}$, МПа	Рівень напружень під час руйнування оксидного покриття, МПа
	без покриття	з оксидним покриття
Алюмінієвий деформівний сплав Д16Т	340	238
Алюмінієвий ливарний сплав АК8М	150	97

4.6 Теплозахисні властивості оксидних покриттів

Дослідили теплозахисні властивості оксидних покриттів на алюмінієвому деформівному сплаві Д16Т та алюмінієвому ливарному сплаві АК8М. За еталон обрали сталь 40ХН на машині тертя УМТ-1 під час сухого тертя за схемою «кільце–кільце» з реєстрацією температури в зоні фрикційного контакту хромель-копелевою термопарою (табл. 4.9).

Таблиця 4.9 – Залежність температури в зоні тертя (°C) від тривалості часу випробовування

Матеріал	Час, хв																	
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Сталь 40ХН	21	107	250	268	290	300	370	375	379	377	387	378	375	379	380	377	380	377
Алюмінієвий деформівний сплав Д16Т	21	50	75	105	152	160	167	180	183	187	192	193	192	197	196	194	195	197
Алюмінієвий ливарний сплав АК8М	21	50	75	105	152	160	167	180	183	187	187	189	190	191	193	192	192	194

Аналіз результатів, представлених у табл. 4.9, показав, що температура в зоні сухого тертя зразків стабілізується приблизно через 9–10 хв і досягає значень від 192 °C до 197 °C, і вже практично не змінюється при подальшому зношуванні оксидного покриття.

Під час випробуваннях зразків зі сталі 40ХН за менш короткий проміжок часу від 4 до 6 хв після початку випробувань в зоні контакту була більш висока температура, яка становила 370 °C. Це свідчить про високі теплозахисні властивості оксидного покриття. Оксиди у складі оксидного покриття забезпечують високі теплозахисні властивості композиції та захист основи з алюмінієвого сплаву від температурних впливів і зношування.

Сформовані мікродуговим оксидуванням жаростійкі покриття мають покращені теплофізичні характеристики порівняно з відомими аналогами.

Результати проведених нами експериментальних досліджень впливу технологічних параметрів процесу мікродугового оксидування (компонентного складу електроліту, струмових режимів тощо) на фізико-механічні властивості (мікротвердість, зношування) та на жаростійкість оксидних покриттів порівняно з відомими дозволять вибирати раціональні межі варіювання

технологічних параметрів процесу для оптимізації технології мікродугового оксидування алюмінієвих сплавів.

Висновки до розділу 4

1. Проведено експериментальні дослідження процесу мікродугового оксидування (МДО) в проточному електроліті, що дало змогу встановити закономірності формування оксидних покриттів на алюмінієвих деталях та їх вплив на показники точності та якості поверхні.

2. Побудовано математичну модель процесу, на основі якої встановлено, що оптимальні значення технологічних параметрів процесу оксидування для отримання максимальної мікротвердості та мінімального зношування практично співпадають.

3. Встановлено, що для забезпечення високих експлуатаційних показників деталей з оксидними покриттями оптимізацію слід проводити за мінімальним зносом $W = 10,80548$ г, який досягається за таких оптимальних технологічних параметрів процесу: концентрації H_2O_2 $C = 8,61$ %; густини струму $i = 6,78$ А/дм²; швидкості потоку електроліту у електрохімічній комірці $v = 106,68$ см/с; температури електроліту $T = 56,85$ °С.

4. Досліджено вплив режимів алмазного шліфування на властивості оксидних шарів. Встановлено, що вибір раціональних параметрів шліфування (глибина різання, швидкість подачі, швидкість кола) дозволяє знизити сили різання, зменшити питомі витрати алмазів та досягти необхідної шорсткості поверхні.

5. За результатами повнофакторного експерименту отримано математичні моделі залежності шорсткості, колової та радіальної складових сил різання, а також питомої витрати алмазів від параметрів режимів шліфування, що дає можливість обґрунтувати вибір оптимальних технологічних режимів механічної обробки МДО-покриттів.

6. Мікроскопічні дослідження оксидних покриттів показали наявність рівномірної мікроструктури з низькою пористістю та доброю адгезією шару до

основного матеріалу, що підтверджує високу якість сформованих оксидних шарів.

7. Встановлено, що деталі з оксидними покриттями, отриманими за розробленою технологією, характеризуються підвищеною роботоздатністю в умовах тертя, а також мають покращені теплозахисні властивості. Це забезпечує їх ефективне застосування у вузлах тертя та деталях, які працюють в умовах високих температур і навантажень.

Результати розділу опубліковано в працях автора [1, 3, 5, 6, 8, 9, 10, 11].

РОЗДІЛ 5

ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

5.1 Дослідження утворення розмірів алюмінієвих деталей під час зміцнення мікродуговим оксидуванням

Фазовий, хімічний склад та фізико-механічні властивості оксидного покриття змінюються за товщиною відносно межі з алюмінієвою основою. Тобто, з точки зору, експлуатаційних властивостей оксидне покриття не є рівноцінним за товщиною, зокрема, величина мікротвердість зменшується до поверхні, що обумовлено температурою у розрядних каналах під час мікродугового оксидування. До лінії розділу оксидного покриття і основного матеріалу (алюмінію), яка є уявною лінією виступів технологічної шорсткості останнього, примикає робочий шар, над яким розташовується рихлий дефектний пористий мулітний шар, що легко знімається механічною обробкою, що має шорсткість R_{zo} .

Робочий шар складається із високотемпературних твердих фаз оксиду алюмінію, а зовнішній рихлий дефектний шар (мулітний шар) – містить низькотемпературні шпінелі тощо. Поняття робочий і зовнішній рихлий дефектний шар певною мірою умовні, оскільки вони визначаються експлуатаційним призначенням деталей з оксидним покриттям. Наприклад, дефектний шар для деталей, які працюють у парах тертя є шкідливим і потребує видалення механічною обробкою, але є корисним для деталей, до яких ставляться підвищені вимоги до діелектричної міцності. У зв'язку з цим під час розрахунку припуску під механічну обробку оксидного покриття експлуатаційні параметри, що характеризують властивості покриття (мікротвердість, пористість, хімічний і фазовий склад тощо) необхідно встановлювати, виходячи з конструкторських вимог (умов експлуатації деталей).

Впровадження технології мікродугового оксидування у виробництво потребує вирішення низки технічних завдань:

1. Раціональний вибір марки алюмінієвого сплаву (вирішується на стадії конструювання виробів, зазвичай базується на забезпеченні міцності деталі);
2. Вибір способу одержання заготовки деталі;
3. Обґрунтування товщини оксидного покриття для забезпечення зміцнення деталі (наприклад, вибір товщини виходячи із заданого ресурсу роботи деталі на зношування);
4. Визначення розміру заготовки та шорсткості її поверхні, яка підлягає мікродуговому оксидуванню;
5. Призначення припуску на подальшу механічну обробку деталі з оксидним покриттям;
6. Призначення режимів механічної обробки оксидованої деталі;
7. Контроль геометричних розмірів деталі, шорсткості та товщини оксидного покриття.

Під час проєктування операції механічної обробки деталей з оксидними покриттями застосування традиційних методик призначення припусків не є можливим. Мікродугове оксидування має свої особливості формування покриття та впливає на зміну розмірів деталей. Розмір алюмінієвої деталі після мікродугового оксидування заготовки d_0 (рис. 5.1) досягає величини d_1 , тобто збільшується на величину h – товщину оксидного покриття. При цьому одна частина вказаного оксидного покриття h_b , формується відносно номінального розміру заготовки d_0 в її «тіло», а інша – його частина назовні h_z (рис. 5.1 та рис. 5.2). Позначення на вказаних рис. 5.1 та рис. 5.2: 1 – заготовка (алюмінієвий деформований/ливарного сплав); 2 – робочий шар тонкого оксидного покриття; 3 – робочий шар товстого оксидного покриття; 4 – зовнішній розпушений шар утворений на робочому товстому оксидному покритті. Товщина оксидного покриття h та її складові h_b h_z , не є константами і залежать від компонентного складу алюмінієвого сплаву, складу електроліту та технологічних режимів і тривалості процесу мікродугового оксидування, а також і від вихідного стану поверхні заготовки.

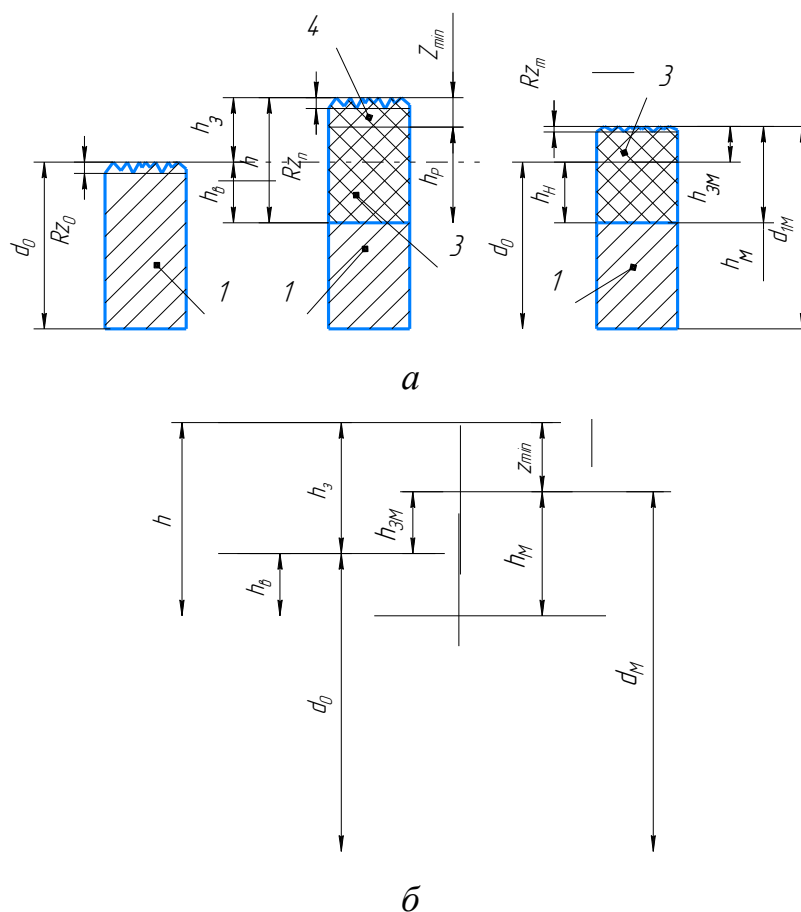


Рисунок 5.2 – Схема утворення розмірів деталі після проведення мікродугового оксидування алюмінієвої заготовки для формування товстого робочого оксидного шару (а) та розмірний ланцюг (б) для випадку застосування механічної обробки

Співвідношення об'ємів сполуки металу з окислювачем і вихідного металу можна розрахувати за відомою формулою:

$$\frac{V_{ок}}{V_{Me}} = \frac{M_{ок} \rho_{Me}}{m \rho_{ок} A_{Me}},$$

де $M_{ок}$ – молекулярна маса оксиду;

A_{Me} – молекулярна маса металу;

$\rho_{Me}, \rho_{ок}$ – густина металу та його оксиду відповідно;

m – число атомів металу в молекулі сполуки.

Загальну зміну об'єму оксидного покриття розраховували за відомим законом сумішей. Результати розрахунку зміни об'ємів оксидних покриттів та окремих їх складових для алюмінієвих сплавів наведені у табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Результати теоретичного дослідження зміни об'ємів мікродугових оксидних покриттів сформованих на алюмінієвих сплавах

Алюмінієвий сплав	Хімічний елемент	Кількість, %	Оксид	Співвідношення об'ємів оксиду і металу з якого утворився оксид $V_{ок}/V_{Me}$	Розрахована зміна об'єму оксидного покриття
Алюміній	Al	92,8	Al_2O_3	1,31	1,31
Алюмінієвий деформівний сплав Д16Т	Al	92,8	Al_2O_3	1,31	1,32
	Si	0,5	SiO_2	1,88	
	Mn	0,6	MnO	1,85	
	Cu	4,2	CuO	1,74	
	Mg	1,5	MgO	0,79	
	Fe	0,1	Fe_2O_3	2,14	
	Cr	0,1	Cr_2O_3	2,07	
	Інші	0,2	–	1,0	
Алюмінієвий ливарний сплав АК8М	Al	90,0	Al_2O_3	1,31	1,36
	Si	7,6	SiO_2	1,88	
	Mn	0,3	MnO	1,85	
	Cu	1,1	CuO	1,74	
	Mg	0,3	MgO	0,79	
	Fe	0,4	Fe_2O_3	2,14	
	Ti	0,1	TiO_2	1,25	
	Інші	0,2	–	1,0	

Результати теоретичних досліджень (табл. 5.1), показали, що співвідношення об'ємів оксиду і металу з якого утворився оксид $V_{ок}/V_{Me}$ становить відповідно 1,32 та 1,36 для алюмінієвого сплаву Д16Т та АК8М. Це свідчать про збільшення розмірів заготовок після мікродугового оксидування, формування суцільного покриття та залишкових напружень стиску.

Таблиця 5.2 – Результати експериментального дослідження зміни розмірів деталей з мікродуговими оксидними покриттями сформованих на алюмінієвих сплавах

Алюмінієвий сплав	Час МДО t , хв	Товщина			Співвідношення $\frac{h}{h_0}$
		покриття загальна h , мкм	частини покриття в «тіло» заготовки h_0 , мкм	частини покриття над тілом заготовки h_3 , мкм	
Алюміній	30	23	15	8	1,53
	300	252	193	231	1,31
Д16Т	30	25	17	8	1,47
	300	247	183	64	1,39
АК8М	30	22	14	8	1,57
	300	230	151	79	1,52

Компоненти електроліту для мікродугового оксидування К, Na, та алюмінієвих сплавів (Mg) мають відношення $V_{ок}/V_{Me} < 1$ і за умовою суцільності утворюють зовнішній розпушений шар оксидного покриття.

Експериментальні дані (табл. 5.2) свідчать, що оксидне покриття під час МДО формується як всередину «тіла» заготовки, так і назовні – по відношенню до номінального розміру заготовки, при цьому характер зміни геометричних залежить від хімічного складу алюмінієвого сплаву, електроліту і електричних режимів МДО. Одержані результати експериментальних досліджень (співвідношення) можуть використовуватися під час розроблення технологічних процесів зміцнення різних алюмінієвих деталей.

5.2 Розробка технологічної схеми отримання комбінованими методами покриттів із робочим оксидним шаром, сформованим мікродуговим оксидуванням

Робочі поверхні деталей машин пропонується зміцнювати композиційними покриттями відповідно до варіантів їхньої будови, поданих на рис.5.3. Для цього розроблено технологічну схему одержання комбінованих покриттів, у яких робочий оксидний шар формується методом мікродугового оксидування в протічному електроді. Технологія придатна як для виготовлення нових деталей, так і для відновлення зношених.

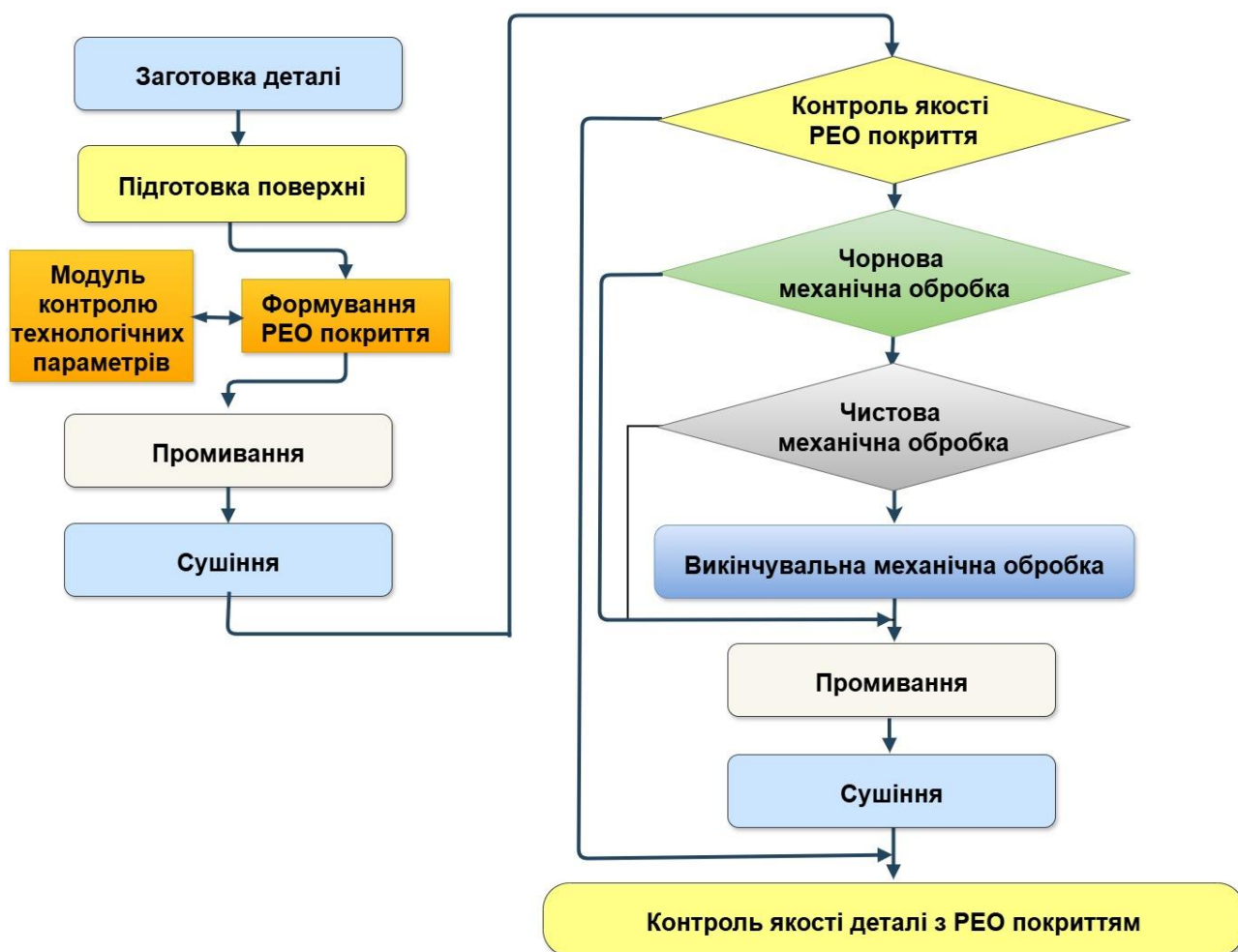


Рисунок 5.3 – Структурна схема виготовлення деталей з робочими поверхнями, зміцненими МДО-покриттями.

Упроваджені технологічні процеси побудовано як послідовний маршрут. Вибір конкретних операцій і параметрів визначається призначенням деталі,

рівнем її напруженого стану та складом агресивного середовища, у якому вона працюватиме. Відповідно підбирають раціональні способи одержання заготовок і товщину покриття. Під час розроблення технології враховано собівартість на всіх етапах: виготовлення заготовки, підготовка поверхні, процес зміцнення, а також подальша механічна обробка робочої поверхні з оксидним шаром.

Кожна стадія – від отримання заготовок у різних варіантах, через формування шарів покриття, до готової деталі – містить операції, спрямовані на покращення експлуатаційних властивостей.

Після формування оксидного шару деталей з покриттям промивають, висушують, розпушений зовнішній шар, який потрібно видалити механічними методами (наприклад, абразивною шкуркою, голкофрезою або гідроабразивною обробкою). Після формування покриття наступним спільним етапом для всіх їхніх видів є алмазне шліфування поверхні покриття для забезпечення необхідної якості.

Для практичної реалізації запропонованої технології МДО було створено та виготовлено обладнання та проведено оптимізацію технологічних параметрів процесу та розроблено обґрунтовані режими механічної обробки деталей з оксидним покриттям.

Таким чином, описана технологічна схема забезпечує кероване формування композиційних покриттів із робочим оксидним шаром, економічну доцільність процесу та гарантоване збереження точності й якості завдяки узгодженості всіх операцій у межах єдиного технологічного маршруту.

5.3 Практичні рекомендації щодо застосування технології формування оксидних покриттів на деталях мікродуговим оксидуванням

Технологія формування оксидного покриття на досліджуваних деформівних та ливарних алюмінієвих сплавах включає такі операції: приготування електроліту, підготовку деталі, оксидування, промивання та сушіння.

Як електроліт застосовували водний розчин рідкого скла та лугу з додавання перекису водню. Технічні умови на компоненти електроліту наведено в пункті 3.2. Для приготування розчину необхідно використовувати дистильовану воду. У процесі мікродугового оксидування деталей електроліт нагрівається за рахунок джоулевого тепла, тому переміщується механічною мішалкою, а гальванічна ванна охолоджується водою з водопровідної мережі, яка подається у кільцеву порожнину цієї ванни. Кількість електроліту готується з розрахунку 0,6 л на 1 А сумарного струму оксидування. Це дає змогу підтримувати температуру електроліту в межах 35–40 °С і забезпечує його роботоздатність без заміни та коригування до 2000 ампер-годин за умови формування якісного оксидного покриття.

Підготовка деталі перед оксидуванням включає видалення задирок, заокруглення гострих кромek, очищення від забруднень і знежирення або миття у мильній воді з наступним ополіскуванням чистою протічною водою. Підготовлену деталь закріплюють на струмовідводі, який вгвинчують у технологічний різьбовий отвір. Як струмопідвід доцільно застосовувати алюмінієвий дріт. Ізоляцію частини струмопідводу, що занурюється в електроліт, рекомендується виконувати фторопластовою стрічкою (ФУМ). Особливо ретельно потрібно ізолювати місце з'єднання струмопроводу з деталлю, інакше можливе його пошкодження.

Процес оксидування доцільно починати з підвищеної густини струму (1000–1500 А/м²). Такий режим скорочує час до початку іскріння й початковий ріст оксидного покриття без втрати якості поверхні. Через 30–60 хв після початку оксидування густину струму можна знизити до 500–600 А/м² і продовжити процес залежно від потрібної товщини оксидного шару протягом 2,5–3,5 год. За дотримання цих умов на алюмінієвих сплавах формується оксидний шар товщиною 100–160 мкм із високою мікротвердістю (10–13 ГПа).

На завершальному етапі, за 30 хв до закінчення процесу МДО, густину струму потрібно рівномірно знизити до ~50 А/м². Якщо застосовується змінний струм, рекомендовано, щоб співвідношення анодної та катодної напруги на

початку становило 1/9–1/10, а наприкінці процесу – 1/6–1/7. Використання конденсаторного перетворювача дає змогу підтримувати ці значення автоматичною системою керування. Основна перевага змінного струму порівняно з постійним полягає у можливості отримання оксидного покриття більшої товщини за високої якості поверхні за менший час оксидування деталі.

Під час оксидування деталей з отворами рекомендовано дотримуватися співвідношення діаметра отвору до довжини $(d/l) \geq 0,5$. Якщо оксидують глухий отвір, деталь у ванні потрібно орієнтувати таким чином, щоби газу, що утворюється під час МДО, вільно виходили, інакше можливі спалахи та навіть викиди електроліту. Для покращення конвекції електроліту та температурного режиму доцільне його постійне перемішування механічною мішалкою, барботуванням повітрям або проведення МДО в проточному електроліті із використанням спеціальних комірок

Температуру електроліту слід підтримувати на рівні 25–30 °С для забезпечення його стабільної роботоздатності. Промивання деталей після оксидування проводять у проточній воді протягом 0,5–1 год. Сушіння можна виконувати на повітрі до повного висихання або в електропечі за температури 150–160 °С упродовж 1–1,5 год. Після цього на поверхні деталі залишається пухкий осад електроліту, який необхідно видалити до твердої основи. Робочий оксидний шар, сформований за запропонованим технологічним процесом, має товщину 100–160 мкм і відзначається високою мікротвердістю та зносостійкістю.

Електроліт готували простим змішуванням компонентів у воді з розрахунку 8 г рідкого скла і 1,8 г КОН на 1 л дистильованої води. Струмopідвід виготовлявся з алюмінієвого дроту Ø4 мм і вгвинчували у різьбовий технологічний отвір втулки (торцевого кільця). Різьбовий технологічний отвір виготовляли на втулці на її торці, а на кільці на його циліндричній поверхні. Місце кріплення струмopідводу ізолювали стрічкою ФУМ, решта – полівінілхлоридною трубкою, яка щільно насаджувалася на навиту стрічку.

Оксидування деталей проводили протягом 4 годин. Початкова густина струму становила 1350 А/м^2 і підтримувалася 50 хв, після чого її поступово знижували: до 700 А/м^2 (160 хв), далі — 610 А/м^2 . Завершення процесу здійснювалося ступінчастим зниженням густини: 300 А/м^2 (5 хв), 120 А/м^2 (10 хв), 60 А/м^2 (15 хв). Після цього деталі промивали 1 год у проточній воді, сушили на повітрі добу. Технологічний шар знімали шліфувальною шкуркою (зернистість М20, ГОСТ 6471). Доводка виконувалася поліруванням на войлочному крузі з алмазною пастою (зернистість 5–7 мкм). Товщина робочого шару покриття становила 112 мкм.

Зважаючи на орієнтацію науково-технічного прогресу на безвідходні технології, заготовки деталей типу втулок і кілець доцільно одержувати методами точного литтям, проводити їх механічну обробку ($Rz \text{ } 7 \text{ мкм}$) з наступним оксидуванням є економічно вигідним.

5.4 Розроблення системи очищення відпрацьованого електроліту мікродугового оксидування алюмінію з автоматизованою системою керування

Розроблення та впровадження сучасних зелених технологій зміцнення, до яких належить мікродугове оксидування алюмінієвих сплавів, потребує зменшення шкідливого сліду виробництва. Під час мікродугового оксидування деталей із алюмінієвих сплавів практично на всіх операціях технологічного процесу (підготовчих, формування оксидних покриттів, промивання) відбувається утворення рідких та газоподібних шкідливих речовин (рис. 5.4), які можуть призводити до забруднення навколишнього середовища. Згідно з переліком виробничих процесів [149], гальванічне виробництво відноситься до такого виду господарської діяльності, за якого машинобудівне підприємство зобов'язане мати локальні очисні споруди для попереднього очищення стічних вод перед їх скиданням у систему централізованого водовідведення та подальшого очищення.

Для утилізації відходів гальванічного виробництва (відпрацьованих електролітів МДО) розроблена технологія, що включає осадження, нейтралізацію та очищення електролітів з використанням гіроциклон-

фільтра [150, 151]. На першій та другій стадії відповідно здійснюється реагентне осадження та нейтралізація електроліту, а на третій стадії – очищення та фільтрація розчину, тобто тонке його очищення (рис. 5.5).

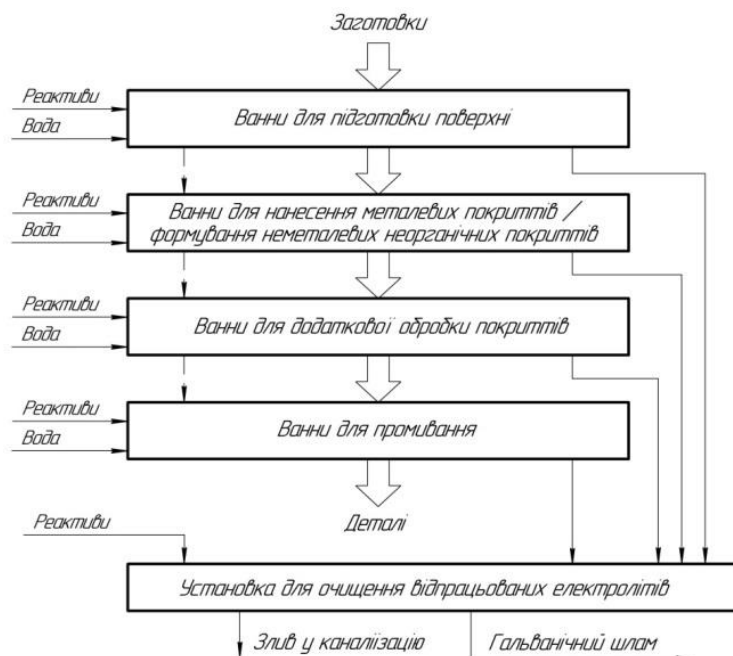


Рисунок 5.4 – Схема утворення гальванічних стоків (забруднень) та їх утилізації

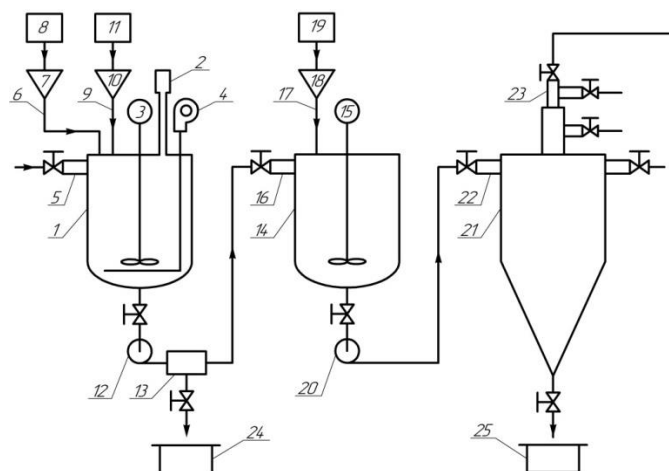


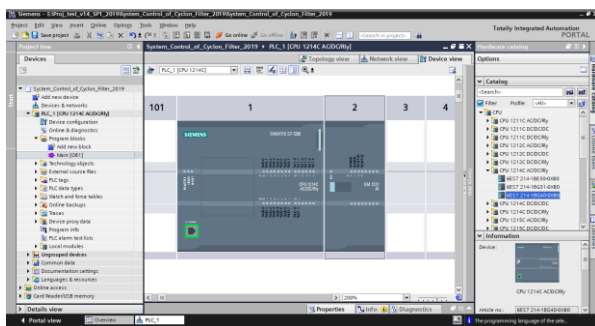
Рисунок 5.5 – Схема установки для осадження, нейтралізації та очищення гальванічних відходів МДО

Під час проектування установки для осадження, нейтралізації та очищення гальванічних відходів було використано мехатронний підхід і методи комп'ютерного моделювання. Створена установка складається з двох реакторів

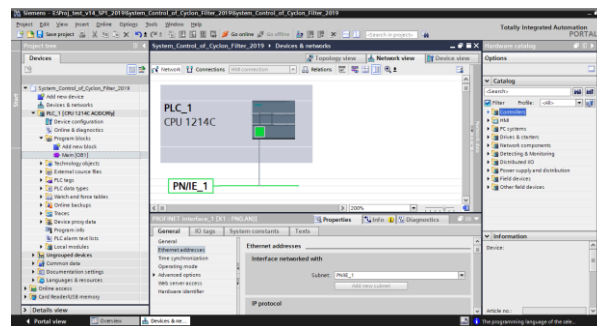
і гідроциклон-фільтра, з'єднаних трубопроводами, та обладнана насосами, датчиками рівня рідини, рН-метричними приладами й автоматизованою системою керування.

Реактор 1 оснащений випарником 2, електричною мішалкою 3, повітряним компресором із барботером 4, трубопроводом 5 для подачі розчинів, які необхідні для нейтралізації та осадження відпрацьованих компонентів електроліту МДО, трубопроводом 6, дозатором 7 та місткістю 8 для відновлювального розчину, трубопроводом 9, дозатором 10 та місткістю 11 для розчину. Насос 12 забезпечує подачу суспензії з реактора 1 через фільтр 13 у реактор 14 який споряджений електричною мішалкою 15, трубопроводом 16, трубопроводом 17, дозатором 18 та місткістю 19 для розчину. Насос 20 забезпечує подачу розчину в гідроциклон-фільтр 21 через вхідний трубопровід 22, де відбувається очищення та фільтрування цього розчину, що виходить через вихідний трубопровід 23. Місткості 24 та 25 слугують відповідно для збирання твердих продуктів утилізації.

Нейтралізація відпрацьованого електроліту МДО може здійснюватися за рахунок взаємодії гідроксиду натрію із соляною кислотою з утворенням водного розчину кухонної солі. Під час взаємодії рідкого натрієвого скла з оксидом кальцію утворюється калієве скло та нерозчинний осад у вигляді сіліцію кальцію. Для забезпечення проведення осадження, нейтралізації та очищення відпрацьованого електроліту установка споряджена автоматизованою системою керування (рис. 5.6) і функціонує наступним чином.



а



б

Рисунок 5.6 – Конфігурація апаратних засобів автоматизованої системи керування на основі ПЛК S7-1200 (а) та комунікаційне з'єднання Industrial Ethernet для програмування і обміну даними з комп'ютером

Оскільки під час твердого анодування та мікродугового оксидування металів вентиляної групи використовують різноманітні кислі, нейтральні та лужні електроліти, тому розроблена нами технологія та установка може бути адаптована для утилізації конкретного типу електроліту шляхом вибору відповідних хімічних реагентів і режимів роботи.

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.

Більш детально розглянемо послідовність автоматизованого керування гідроциклон-фільтром (рис. 5.6).

1. *Вихідні параметри контролю:* напірний тиск, КПа; низьконапірний тиск, КПа; швидкість потоку, м/с.

2. *Параметри контролю:* додатній перепад тиску між штуцером 14 і штуцером (5 або 7); додатній перепад тиску між штуцером 18 і штуцерами (5 або 7), (7 або 14); контроль заповнення гальванічним шламом кільцевого каналу шляхом зважування маси гідроциклон-фільтра (або акустичний контроль наявності шламу в кільцевому каналі).

3. *Параметри керування 1-го і 2-го етапів очищення*

- перевищення ΔP за п.1 або за п.2 (при цьому генерується сигнал «1»).

3.1 Перший етап інтенсифікації регенерації:

ввімкнення режиму регенерації засипки сітчастого фільтра та промивання; відкриття вентиля 18; закриття затвора 4; закриття вентилів 6 і 15; відкриття вентилів 8 і 19; подача чистого атмосферного повітря або рідини насосом (М_інтенсифікації); про завершення інтенсифікації регенерації свідчить зменшення та стабілізація ΔP між штуцерами 7 і 18;

3.2 Другий етап регенерації: закриття вентиля 19 і відключення насоса (М_інтенсифікації); відкриття вентиля 17 і включення насоса (М_промивання); момент завершення регенерації контролюється за станом чистого повітря або води, що виходять через штуцер 7, а також тиском між штуцерами 7 і 14;

4. Додатковий режим роботи 1-го і 2-го етапів очищення: одночасне проведення регенерації фільтрувальної зернистої засипки очищення, промивання сітчастого фільтра і промивання кільцевого каналу; контроль маси або акустичне визначення скупчення гальванічного шламу; при цьому гідроциклон-фільтр переводять в режим промивання кільцевого каналу; для цього відбувається закриття вентилів 6, 8, 15, 17 і відкриття шлюзового затвора 4 та вентиля 19;

5. Параметри керування 3-го етапу очищення: стан очищення промиванням кільцевого каналу визначається зважуванням гідроциклон-фільтра або акустично, а стан інтенсифікації регенерації фільтрувальної засипки та очищення сітчастого фільтра – за зменшенням від'ємного перепаду тиску ΔP (про це свідчить досягнення номінальної маси гідроциклон-фільтра та стабілізація від'ємного перепаду тиску ΔP між штуцерами 7 і 18); після завершення інтенсифікації регенерації фільтрувальної засипки та очищення сітчастого фільтра відбувається відключення насоса (М_інтенсифікації), закриття вентилів 8, 17 і 19, відкриття вентилів 6 і 15, часткове привідкриття шлюзового затвора 4, а гідроциклон-фільтр переходить у робочий режим.

7. Додатковий режим роботи на 3-му етапі очищення: промивання кільцевого каналу 40 та завершення регенерації насипної фільтрувальної засипки касети (п.2 2-го етапу); закриття вентиля 19, відкриття вентиля 17,

включення насоса (М_промивання) для остаточної регенерації і промивання кільцевого каналу; контроль тиску ΔP між штуцерами 7 і 14 та промивання кільцевого каналу після сигналу; зважування або акустичного контролю; закриття вентилів 8 і 7; відкриття вентилів 6 і 15; відключення насоса (М_промивання) і привідкриття шлюзового затвору.

8. Апаратні засоби автоматизованої системи керування

8.1 Первинні перетворювачі фізичних величин: датчик перепаду тиску ΔP між штуцером 14 і штуцером (5 або 7) (вимірювальний діапазон відповідно п.1 вихідних параметрів гідроциклон-фільтра); датчик перепаду тиску ΔP між штуцером 18 і штуцерами (5 або 7), (7 або 14) (вимірювальний діапазон відповідно п.1 вихідних параметрів гідроциклон-фільтра); тензоперетворювач ваги на заданий діапазон або акустичний перетворювач наявності шламу в кільцевому каналі гідроциклон-фільтра; перетворювач швидкості потоку (вимірювальний діапазон відповідно п.1 вихідних параметрів роботи гідроциклон-фільтра).

8.2 Виконавчі елементи: електроприводи для керування вентилями (18, 6, 15, 8, 19, 17); електропровід для керування затвором (4); магнітні пускачі для керування насосами (М_інтенсифікації та М_промивання).

8.3 Компоненти автоматики:

- ПЛК (Програмований Логічний Контролер) SimaticS7-1200 (забезпечує обробку 14-ти дискретних вхідних сигналів і 10-ти дискретних вихідних сигналів) [152];

- СМ (Сигнальний Модуль) вводу аналогових сигналів з перетворювачів перепаду тиску ΔP і тензоперетворювача ваги (забезпечує обробку 4-х аналогових вхідних сигналів). Таким чином, вказана конфігурація ПЛК достатня для обробки всіх вхідних та вихідних сигналів під час експлуатації гідроциклон-фільтра за вищенаведеним алгоритмом функціонування.

На рис. 5.6,а наведено конфігурацію апаратних засобів ПЛК автоматизованої системи керування гідроциклон-фільтром у програмному

середовищі TIA Portal (TotallyIntegrationAutomationPortal) виробництва концерну «Siemens» [153].

Апаратна конфігурація ПЛК включає:

- CPU (Central Processing Unit) CPU1214C (позиція 1 на рис. 5.7);
- SM (Signal Module) SM1231x4AI (позиція 2 на рис. 5.7);
- комунікаційне з'єднання Industrial Ethernet для програмування і обміну даними з комп'ютером (рис. 5.6, б).

Прикладне програмне забезпечення ПЛК виконано на мові FBD (FunctionalBlockDiagram) [152] і реалізує функції збору даних з первинних перетворювачів фізичних величин, обробку вимірювальних сигналів і формування сигналів керування на виконавчі елементи установки згідно алгоритму функціонування, зокрема і гідроциклон-фільтра. Крім того, може бути розширена функціональність системи керування установкою шляхом візуалізації процесу керування на динамічних мнемосхемах з локальним та віддаленим доступом оператора (користувача) [154].

Зростаючі вимоги щодо екологічної безпеки технологічних процесів нанесення покриттів потребують розроблення нових і вдосконалення відомих існуючих способів нейтралізації та очищення відпрацьованих електролітів гальванічних цехів для переходу до «зелених технологій».

На відміну від відомих апаратно-технологічних схем переробки відходів гальванічних виробництв у склад розробленої нами установки додатково введено гідроциклон-фільтр для покращення очищення та оснащено установку системою автоматизованого керування процесом осадження, нейтралізації та очищення відпрацьованих електролітів для нанесення покриттів.

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 Результати стендових випробовувань алюмінієвих деталей зміцнених мікродуговим оксидуванням

5.5.1 Випробовування захисних втулок вала відцентрового насоса

Стенові випробовування захисних втулок зміцнених МДО провели на експериментальному стенді (рис. 5.3), змонтованому на базі відцентрового насоса, привід якого здійснюється електродвигуном (2800 обертів на хвилину), що забезпечує йому напір біля 32 метри.

Ресурс роботи (години) зміцнених захисних втулок оцінювали за величиною критичного витікання рідини через сальникове ущільнення. Результати проведених випробовувань показали підвищення ресурсу їх роботи в 1,4 рази порівняно із серійними (чавун СЧ 28–32).



Рисунок 5.7 – Стенд для випробовування захисних втулок вала відцентрового насоса

5.6.2 Випробовування торцевих ущільнень вала відцентрового насоса

Стенові випробовування вузлів торцевих ущільнень вала відцентрового насоса провели на експериментальному стенді (рис. 5.8), змонтованому на базі машини тертя СМЦ–2 [155].



*1 – торцеве ущільнення; 2 – термopapa; 3 – індукційний датчик моменту
тертя; 4 – обертач машини СМЦ-2; 5 – мультиметр UT-78B з аналогово-
цифровим перетворювачем; 6 – блок управління машини СМЦ-2;
7 – персональний комп'ютер*

Рисунок 5.8 – Установка для досліджень кілець торцевих ущільнень вала
відцентрового насоса [Prysyazhnyuk, Pavlo та інші, 2021]

Ресурс роботи (години) зміцнених кілець торцевих ущільнень оцінювали за величиною критичного витікання рідини через торцеве ущільнення. Результати проведених випробовувань показали підвищення ресурсу їх роботи у 1,55 рази порівняно із серійними.

5.7 Практичне застосування розробленої технології мікродугового оксидування деталей

Завдяки формуванню високощільного шару оксиду алюмінію на поверхні деталей досягається суттєве підвищення їхньої твердості, зносостійкості та корозійної стійкості у складних експлуатаційних умовах. Розроблена технологія МДО дозволяє отримати покриття з контрольованими властивостями та структурою, що забезпечує збільшення ресурсу роботи обладнання, зниження енергоспоживання та підвищення надійності вузлів тертя.

Застосування МДО-покриттів на деталях, що працюють у середовищах з інтенсивними механічними та хімічними навантаженнями, зменшує ймовірність відмов обладнання та витрати на ремонт. У порівнянні з традиційними анодними плівками, сформовані оксидні шари характеризуються значно вищою

мікротвердістю, стабільністю розмірів та адгезією до основного матеріалу. Це підтверджено результатами випробувань зміцнених алюмінієвих деталей різного призначення (рис. 5.9 – рис 5.11):



a – зміцнене оксидним покриттям (гладке);

б – зміцнене оксидним покриттям (різьбове); в – бронзове (гладке)

Рисунок 5.9 – Кільця торцевих ущільнень:



Рисунок 5.10 – Вузол торцевого ущільнення зі зміцненими кільцями

Результати стендових випробувань показали, що ресурс роботи деталей, зміцнених оксидними покриттями, зріс у 1,4–1,55 рази порівняно з базовими зразками. При цьому спостерігалось зниження коефіцієнта тертя на 20–30 %, а також суттєве зменшення інтенсивності корозійного руйнування при тривалому контакті з агресивними середовищами.



Рисунок 5.11 – Захисна втулка вала відцентрового насоса

Дослідно-промислова установка для нанесення оксидних покриттів за технологією МДО включає джерело імпульсного живлення, систему охолодження електроліту, камеру з робочим електролітом, вузол кріплення деталей, а також систему автоматизованого керування технологічними параметрами. Завдяки цьому забезпечується відтворюваність властивостей покриттів та можливість обробки деталей складної геометрії.

Економічний ефект від впровадження технології МДО досягається за рахунок подовження строку служби алюмінієвих деталей, зниження частоти їх заміни та скорочення витрат на ремонт і обслуговування обладнання. Отримані результати підтверджують доцільність комплексного застосування МДО-покриттів у машинобудуванні, енергетиці, авіакосмічній техніці та медицині.

Розроблену технологію формування оксидних покриттів мікродуговим оксидуванням передано і впроваджено у виробництво в ТЗОВ «Поберезький завод пресових агрегатів», (м. Івано-Франківськ) (Додаток В). Результати досліджень також використовуються у навчальному процесі кафедри комп'ютеризованого машинобудування ІФНТУНГ (Додаток Б). Як основна і додаткова література при вивченні навчальних дисциплін використовуються такі праці [1–6].

Висновки до розділу 5

1. Досліджено вплив процесу мікродугового оксидування на формування розмірів алюмінієвих деталей. Встановлено, що оксидне покриття під час МДО

формується як всередину «тіла» заготовки, так і назовні – по відношенню до номінального розміру заготовки, при цьому характер зміни геометричних параметрів залежить від хімічного складу алюмінієвого сплаву, електроліту і технологічних режимів.

2. Розроблено технологічну схему формування комбінованих покриттів із робочим оксидним шаром, отриманим методом МДО. Така схема передбачає поєднання мікродугового оксидування з механічною та хімічною обробкою, що дозволяє забезпечити високу якість та довговічність захисних шарів.

3. Запропоновано практичні рекомендації щодо застосування технології формування оксидних покриттів на деталях з алюмінію. Вони передбачають оптимальний вибір електроліту, режимів обробки та післяопераційного шліфування, що дозволяє одержати покриття з підвищеною зносостійкістю, твердістю та теплозахисними властивостями.

4. Розроблено систему очищення відпрацьованого електроліту мікродугового оксидування з автоматизованою системою керування, яка забезпечує повторне використання електроліту, зниження експлуатаційних витрат та зменшення негативного впливу на навколишнє середовище.

5. Проведено стендові випробування алюмінієвих деталей зі зміцненими МДО-покриттями. Встановлено, що зміцнені мікродуговим оксидуванням захисні втулки та торцеві ущільнення валів відцентрових насосів, характеризуються підвищеною зносостійкістю, а саме – у 1,55 та 1,4 рази порівняно із серійними.

6. Практичне впровадження розробленої технології мікродугового оксидування у виробництво підтвердило її ефективність, що проявляється у підвищенні довговічності деталей, зниженні витрат на ремонт і обслуговування обладнання, а також у покращенні екологічних показників виробництва. Результати також впроваджено в навчальний процес на кафедрі комп'ютеризованого машинобудування Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

7. Розроблена автоматизована система керування забезпечує постійний контроль технологічних параметрів процесів нейтралізації, осадження та очищення відпрацьованого електроліту з гальванічних ванн мікродугового окисдування алюмінію

Результати розділу опубліковано в працях автора [4, 5, 6, 8, 14].

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-прикладну задачу підвищення зносостійкості, точності та теплозахисних властивостей алюмінієвих деталей шляхом розроблення технології мікродугового оксидування у проточному електроліті в поєднанні з механічною обробкою. На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень отримано такі результати:

1. Отримано аналітичне рішення задачі визначення електричного опору конічного мікроелектрода зі зрізаною похилою площиною, що дозволило встановити вплив його геометрії на електропровідність і довести ефективність такої форми для локальних електрохімічних досліджень покриттів.

2. Запропоновано нову конструкцію мікроелектрода, яка забезпечує зниження електричного опору більш ніж на 30–90 % залежно від співвідношення геометричних параметрів та кута нахилу зрізу. Це дозволило підвищити точність та відтворюваність електрохімічних вимірювань у процесі дослідження МДО-покриттів.

3. Обґрунтовано вибір матеріалів (деформованих і ливарних алюмінієвих сплавів різних систем легування) та розроблено технологію їх оброблення для забезпечення формування якісних оксидних покриттів. Розроблено установку для проведення МДО у спокійному та проточному електролітах з автоматизованою системою керування, яка забезпечує стабільність технологічних параметрів та контроль процесу формування оксидних шарів.

4. Побудовано математичні моделі процесу мікродугового оксидування, які дозволяють визначати оптимальні параметри для досягнення максимальної мікротвердості та мінімального зносу покриттів. Встановлено, що оптимізацію доцільно проводити за критерієм мінімального зношування, що забезпечує одночасне підвищення зносостійкості та мікротвердості оксидних шарів.

5. Досліджено вплив режимів алмазного шліфування на оброблюваність МДО-покриттів. Отримані математичні моделі залежності шорсткості поверхні,

сил різання та питомої витрати алмазів від параметрів режимів шліфування дозволили обґрунтувати оптимальні технологічні режими обробки.

6. Мікроструктурні дослідження підтвердили формування рівномірного, щільного та добре адгезованого до основи оксидного шару з низькою пористістю, що забезпечує високі експлуатаційні характеристики покриттів. Встановлено, що деталі з МДО-покриттями характеризуються підвищеною роботоздатністю в умовах тертя та високих температур, а також поліпшеними теплозахисними властивостями, що розширюють можливості їх застосування у відповідальних вузлах і агрегатах.

7. Запропоновано систему очищення відпрацьованого електроліту з автоматизованим керуванням процесами нейтралізації та осадження, яка забезпечує повторне використання робочих розчинів, зменшення витрат та мінімізацію впливу на довкілля.

8. Стендові випробування алюмінієвих деталей, зміцнених методом МДО, показали підвищення їх зносостійкості у 1,4–1,55 раза у порівнянні із серійними виробами, що підтвердило ефективність запропонованої технології. Розроблені технічні рішення впроваджено у виробництво та навчальний процес Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, що засвідчує їх наукову і практичну цінність.

Таким чином, у роботі комплексно вирішено задачу підвищення експлуатаційних характеристик алюмінієвих деталей шляхом удосконалення процесу мікродугового оксидування, оптимізації його технологічних параметрів, застосування раціональних режимів механічної обробки та впровадження екологічно безпечних систем обслуговування процесу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Посувайло, В.М.; Витвицький, В.С.; Романів, М.М.; Пригоровська, Т.О. Вплив технологічних параметрів процесу плазмоелектролітичного оксидування алюмінію на швидкість росту покриттів. *Прикарпатський вісник Наукового Товариства ім. Шевченка. Число* **2020**, 1(59), 165–178. [https://doi.org/10.31471/2304-7399-2020-1\(59\)-165-178](https://doi.org/10.31471/2304-7399-2020-1(59)-165-178)
2. Вольченко, Д. О.; Кіндрачук, М. В.; Скрипник, В. С.; Журавльов, Д. Ю., Романів, М. М. Дослідження водневого зносу важконавантажених металевих фрикційних елементів гальм. *Проблеми тертя та зношування* **2021**, 91(2), 37–45. (Фахове видання). [https://doi.org/10.18372/0370-2197.2\(91\).15528](https://doi.org/10.18372/0370-2197.2(91).15528)
3. 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**, 4, 83–97. (Фахове видання). <https://doi.org/10.24025/2306-4412.4.2021.253298>
4. 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), 70–80. . (Фахове видання). <https://doi.org/10.32845/msnau.2021.2.15>
5. Ropyak, L.; Shihab, T.; Velychkovych, A.; Bilinskyi, V.; Malinin, V.; Romaniv, M. Optimization of Plasma Electrolytic Oxidation Technological Parameters of Deformed Aluminum Alloy D16T in Flowing Electrolyte. *Ceramics* **2023**, 6(1), 146–167. <https://doi.org/10.3390/ceramics6010010> Scopus, WoS (Q2) <https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=21101062489&tip=sid&clean=0>
6. Роп'як, Л.; Бандура, А.; Романів, М. Дослідження властивостей жаростійких покриттів, сформованих плазмовим електролітичним оксидуванням алюмінієвих сплавів. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу* **2024**, 2(57), 15–24. . (Фахове видання). [https://doi.org/10.31471/1993-9965-2024-2\(57\)-15-24](https://doi.org/10.31471/1993-9965-2024-2(57)-15-24)

Конференції

7. Pashechko, M.; Роп'як, Л.Я.; Стрілецький, Ю.Й.; Романів, М.М. Система автоматичного контролю технологічних параметрів процесу мікродугового оксидування /М. Pashechko, Л. Я. Роп'як, Ю. Й. Стрілецький, М. М. Романів // Збірник тез IX Міжнародної науково-технічної конференції «Датчики, прилади та системи – 2021», присвяченій пам'яті професора Шарапова В.М. с. Лазурне (Херсонська обл.) з 20–24 вересня 2021 р. С. 38–39.

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

8. 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. Збірник наукових праць X міжнародної науково-технічної конференції «Прогресивні технології у машинобудуванні PTME–2022» 1–5 лютого 2022 р. Івано-Франківськ – Яремче, 2022. С. 127–129.

9. Bembenek, M.; Machnik, R.; Роп'як, Л.Я.; Романів, М.М. Дослідження режимів алмазного шліфування плазмових електролітичних оксидних покриттів. Збірник праць X Міжнародної науково-технічної конференції «Датчики, прилади та системи – 2023», присвяченої пам'яті професора Шарапова В.М. 12–14 вересня 2023, м. Черкаси. С. 107–108.

<https://er.chdtu.edu.ua/bitstream/ChSTU/4653/1/%D0%97%D0%B1%D1%96%D1%80%D0%BD%D0%B8%D0%BA%20%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B5%D1%80%D1%96%D0%B0%D0%BB%D1%96%D0%B2%20%D0%9C%D0%9D%D0%A2%D0%9A%20%D0%94%D0%9F%D0%A1-2023.pdf>

10. Barz, C.; Bembenek, M.; Paszczko, M.; Romaniv, M.; Ropyak, L. Ways to increase technology efficiency of manufacturing parts strengthened by plasma electrolytic oxidation. Збірник праць XV Міжнародної науково-технічної конференції. Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2023: матеріали науково-технічної конференції, 27–28 квітня 2023 р., м. Київ / загальна редакція Р. В. Лютий. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 407с.

11. Романів, М.М.; Роп'як, Л.Я. Особливості формування покриттів на алюмінієвих сплавах плазмовим електролітичним оксидуванням. Всеукраїнська науково-технічна конференція студентів, аспірантів і молодих учених з міжнародною участю «Молодь в авіації: нові рішення та перспективні технології» присвячується 125-річчю Національного університету «Запорізька політехніка» 95-річчю Машинобудівного факультету 20-річчю кафедри "Технології авіаційних двигунів" 80-річчю ДП «ІВЧЕНКО-ПРОГРЕС» 21–22 листопада 2024 р. м. Запоріжжя, Національний університет «Запорізька політехніка»: тези доп. 2024. С. 139-141.

12. Bandura, A.; Ropyak, L.; Romaniv, M. Calculation of the Electrical Resistance of a Cone Microelectrode for Electrochemical Studies of Coatings. In Advanced Manufacturing Processes: Book of Abstracts of the 6 th Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes, Odesa, Ukraine, September 10–13, 2024 / Volodymyr Tonkonogyi, Vitalii Ivanov (Eds.). Book of Abstracts. Sumy: IATDI, 2024. P. 63. https://tmvi.sumdu.edu.ua/docs/InterPartner-2024_Book%20of%20Abstracts.pdf

13. Величкович, А.; Роп'як, Л.; Романів, М. Аналітичне дослідження напруженого стану стержня з покриттям під час центрального розтягування чи кручення. Інженерія поверхні та реновація виробів: Матеріали 24-ї Міжнародної науково-технічної конференції, 26–27 червня 2024 р. – Київ: АТМ України, 15–19 с. https://atmu.net.ua/downloads/archive/2-24sb_compressed.pdf#page=15

14. Bandura, A.; Ropyak, L.; Romaniv, M. Calculation of the Electrical Resistance of a Cone Microelectrode for Electrochemical Studies of Coatings. Tonkonogyi V., Oborskyi G., Ivanov V., Trojanowska J. (Eds.). 6th Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes, InterPartner 2024, Odesa, Ukraine, September 10–13, 2024. Lecture Notes in Mechanical Engineering, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH (2025) pp. 375–385. https://doi.org/10.1007/978-3-031-82746-4_33 (Scopus Q4 <https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=21100431311&tip=sid&clean=0>).

15. Заявка № а202405272 на видачу патента України на винахід, МПК G01N27/333. Мікроелектрод для електрохімічних досліджень покриттів. Винахідники: Роп'як Л. Я., Бандура А. І., Романів М. М. Заявник і володілець ІФНТУНГ. Заявлено 06.11.2024. (Формальна експертиза).

<https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1826519/>

16. Михайлюк В. В., Концур І. Ф., Копей Б. В., Дейнега Р. О. Гідромашини: атлас схем та конструкцій. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2022. 27 с.

17. Герасимов Г.Г. Гідравлічні та аеродинамічні машини: Підручник. – Рівне: НУВГП, 2008, 241 с.

18. Срібнюк С.М. Насоси і насосні установки. Розрахунок, застосування і випробовування. –К.: Центр учбової літератури 2019, 312 с.

19. Lytvyniak, Ya.; Stupnytsky, V.; Yurchyshyn, I.; Lytvyniak, O. Modeling of hardening and burnishing of workpiece surfaces by toroidal impact indenter. *Archive of Mechanical Engineering* **2025**, 72(2), 293–309. <https://doi.org/10.24425/ame.2025.153741>

20. 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. *Eksplotacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* **2024**, 26(3), 187794. <https://doi.org/10.17531/ein/187794>

21. Kusyi, Y.; Stupnytsky, V.; Onysko, O.; Dragašius, E.; Baskutis, S.; Chatys R. Optimization synthesis of technological parameters during manufacturing of the parts. *Eksplotacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* **2022**, 24(4), 655–667. <https://doi.org/10.17531/ein.2022.4.6>

22. 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**, 12(5), 313. <https://doi.org/10.3390/machines12050313>

23. Kopei, V.B.; Onysko, O.; Barz, C.R.; Dašić, P.V.; Panchuk, V.G. Designing a Multi-Agent PLM System for Threaded Connections Using the Principle of

Isomorphism of Regularities of Complex Systems. *Machines* **2023**, *11*(2), 263. <https://doi.org/10.3390/machines11020263>

24. 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**, *4*(12) (124), 47–55. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.286198>

25. Dolgov N, Haukla M, Vinogradovs L. (2022) Adhesion strength evaluation for plasma-sprayed coatings based on intensity of singular stress. *Res. Eng. Struct. Mater.* **2022**, *8*(4), 695–706. <https://doi.org/10.17515/resm2022.365ma1113>

26. Korzhyk, V.; Kopei, V.B.; Stukhliak, P.D.; Kushnarova, O.; Kolisnichenko, O.V.; Totosko, O.V.; Stukhliak, D.; Ropyak, L.Y. Features of the Structure of Layered Epoxy Composite Coatings Formed on a Metal-Ceramic-Coated Aluminum Base. *Materials* **2025**, *18*(15), 3620. <https://doi.org/10.3390/ma18153620>

27. Долгов, М. А.; Рутковський, А. В. Підвищення мікротвердості конструкційної сталі після іонного азотування. *Проблеми міцності* **2022**, *5*, 68–74. <https://doi.org/10.1007/s11223-022-00458-4>

28. Prsyazhnyuk, P.; Biały, W.; Bembenek, M.; Panchuk, V.; Medvid, I.; Duriagina, Z.; Romanyshyn, T.; Vytvytskyi, V. Improving Ballistic Resistance of Armor Steel by FCAW with Hardfacing Alloys of Fe–Mo–Mn–B–C System. *Management Systems in Production Engineering* **2025**, *33*(3), 380–387. <https://doi.org/10.2478/mspe-2025-0036>

29. Bembenek, M., Kopei, V.B., Ropyak, L.Y., Levchuk, K.G. Stressed State of Chrome Parts During Diamond Burnishing. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii* **2023**, *45*(2), 239 – 250. <https://doi.org/10.15407/mfint.45.02.0239>

30. 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**, *15*, 83. <https://doi.org/10.3390/en15010083>

31. Hvozdet's'kyi, V.; Padgurskas, J.; Student, M.; Pohrelyuk, I.; Student, O.; Zadorozhna, K.; Tkachuk, O.; Rukuiža, R. The Tribological Properties of Plasma

Electrolytic Oxidation Layers Synthesized on Arc Spray Coatings on Aluminum Alloys in Contact with Various Friction Materials. *Coatings* **2024**, *14*(4), 460. <https://doi.org/10.3390/coatings14040460>

32. Songur, F.; Arslan, E.; Dikici, B. Taguchi Optimization of PEO Process Parameters for Corrosion Protection of AA7075 Alloy. *Surf. Coat. Technol.* **2022**, *434*, 128202. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128202>.

33. George, T. L.; Winter, L.; Simchen, F.; Breitfeld, T.; Lampke, T. Microstructural and Mechanical Properties of a Hard Anodic Coating Applied on an Elastically Prestrained Aluminum Substrate. *Advanced Engineering Materials* **2025**, *27*(15), 2500472. <https://doi.org/10.1002/adem.202500472>

34. Kaseem, M.; Dikici, B. Optimization of Surface Properties of Plasma Electrolytic Oxidation Coating by Organic Additives: A Review. *Coatings* **2021**, *11*, 374. <https://doi.org/10.3390/coatings11040374>.

35. Францевич, И.Н.; Пилянкевич, А.Н.; Вольфсон, А.И. Анодные оксидные покрытия на металлах и анодная защита, Киев, Украина: Наукова думка, 1985.

36. Abd-Elnaiem, A.M; Gaber, A. Parametric study on the anodization of fabricating nano-pores template. *International Journal of Electrochemical Science* **2013**, *8*, 9741-9751.

37. Paz Martínez-Viademonte, M.; Abrahami, S. T.; Hack, T.; Burchardt, M.; Terryn, H. A review on anodizing of aerospace aluminum alloys for corrosion protection. *Coatings* **2020**, *10*(11), 1106. <https://doi.org/10.3390/coatings10111106>

38. Torrescano Alvarez, J. M. Hard anodic films for aluminium alloys. Ph.D. thesis, Univ. of Manchester, Manchester, UK, 2018-

39 Student, M.M.; Pohrelyuk, I.M.; Hvozdettskyi, V.M.; Veselivska, H.H.; Zadorozhna, Kh.R.; Mardarevych, R.S.; Dzioba, Y.V. Influence of the composition of electrolyte for hard anodizing of aluminum on the characteristics of oxide layer, *Materials Science* **2021**, *57*(2), 240-247.

40. Wielage, B.; Nickel, D.; Alisch, G.; Podlesak, H.; Lampke, Th. Effects of pre-treatment on the growth rate and morphology of hard anodic films on aluminium

(EN AW-6082), *Surface and Coatings Technology* **2007**, 202(3), 569-576, <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.06.052>

41. Rokosz, K.; Hryniewicz, T.; Dudek, Ł. Phosphate Porous Coatings Enriched with Selected Elements via PEO Treatment on Titanium and Its Alloys: A Review. *Materials* **2020**, 13, 2468. <https://doi.org/10.3390/ma13112468>.

42. Lu, X.; Blawert, C.; Huang, Y.; Ovri, H.; Zheludkevich, M. L.; Kainer, K-U. Plasma electrolytic oxidation coatings on Mg alloy with addition of SiO₂ particles. *Electrochimica Acta* **2016**, 187, 20-33.

43. Pokhmurskii, V.; Nykyforchyn, H.; Student, M.; Klapkiv, M.; Pokhmurska, H.; Wielage, B.; Grund, T., Wank, A. Plasma electrolytic oxidation of arc-sprayed aluminum coatings. *Journal of Thermal Spray Technology* **2007**, 16(5-6), 998-1004

44. Klapkiv, M.D. Simulation of synthesis of oxide-ceramic coatings in discharge channels of a metal-electrolyte system. *Materials Science* **1999**, 35(2), 279-283.

45. Klapkiv, M.D.; Chuchmarev, O.S.; Sydor, P.Ya.; Posuvailo, V.M. Thermodynamics of the interaction of aluminum, magnesium and zirconium with components of an electrolytic plasma. *Materials Science* **2000**, 36(1), 66-79.

46. Posuvailo, V.M., Kulyk, V.V., Duriagina, Z.A., Koval'chuck, I.V., Student, M.M., Vasylyv, B.D. The effect of electrolyte composition on the plasma electrolyte oxidation and phase composition of oxide ceramic coatings formed on 2024 aluminium alloy. *Archives of Materials Science and Engineering* **2020**, 105(2), 49-55.

47. Student, M.M.; Veselivska, H.H.; Kalakhan, O.S.; Zadorozhna, K.R.; Sirak, Y.Y. Influence of the conditions of plasmaelectrolytic treatment of D16T aluminium alloy on its corrosion resistance in 3% NaCl solution. *Materials Science* **2021**, 56(4), 550-559.

48. Martin, J.; Leone, P.; Nominé, A.; VeysRenaux, D.; Henrion, G.; Belmonte, T. Influence of electrolyte ageing on the plasma electrolytic oxidation of aluminium. *Surface and Coatings Technology* **2015**, 269, 36-46.

49. Ivasenko, I.B.; Posuvailo, V.M.; Klapkiv, M.D.; Vynar, V.A.; Ostap'yuk, S.I. Express method for determining the presence of defects of the surface of oxide-ceramic coatings. *Materials Science* **2009**, *45*(3), 460-464.

50. Simchen, F.; Rymer, L-M.; Sieber, M.; Lampke, T. Composition of highly concentrated silicate electrolytes and ultrasound influencing the plasma electrolytic oxidation of magnesium. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 19th Chemnitz Seminar on Materials Engineering* – 19. Werkstofftechnisches Kolloquium, March 16–17, 2017. Chemnitz, Germany, **2017**, *181*, 012040.

51. Student, M.M.; Ivasenko, I.B.; Posuvailo, V.M.; Veselivs'ka, H.H.; Pokhmurs'kyi, A.Yu.; Sirak, Ya.Ya. Influence of the porosity of a plasma-electrolytic coating on the corrosion resistance of D16 alloy. *Materials Science* **2019**, *54*(6), 899-906.

52. Student, M.M.; Dovhunyk, V.M.; Posuvailo, V.M.; Koval'chuk, I.V.; Hvozdet's'kyi, V.M. Friction behavior of iron-carbon alloys in couples with plasmaelectrolytic oxide-ceramic layers synthesized on D16T alloy. *Materials Science* **2017**, *53*(3), 359-367.

53. Nykyforchyn, H.M.; Klapkiv, M.D.; Posuvailo, V.M. Properties of syntesised in electrolyte plasma oxide-ceramic coatings on aluminum alloys. *Surface and Coatings Technology* **1998**, *100-101*, 219-221.

54. Clyne, T. W., Troughton, S. C. A review of recent work on discharge characteristics during plasma electrolytic oxidation of various metals. *International Materials Reviews* **2019**, *64*(3), 127–162.
<https://doi.org/10.1080/09506608.2018.1466492>

55. Simchen, F.; Sieber, M.; Kopp, A.; Lampke, T. Introduction to Plasma Electrolytic Oxidation— An Overview of the Process and Applications. *Coatings* **2020**, *10*(7), 628. <https://doi.org/10.3390/coatings10070628>

56. Sikdar, S.; et al. Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) Process—Processing, Properties, and Applications. *Nanomaterials* **2021**, *11*(6), 1375.
<https://doi.org/10.3390/nano11061375>

57. Kaseem, M.; Fatimah, S.; Nashrah, N.; Ko, Y. G. Recent progress in surface modification of metals coated by plasma electrolytic oxidation: Principle, structure, and performance. *Progress in Materials Science* **2021**, *117*, 100735. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100735>

58. Student, M. M.; Pohrelyuk, I. M. Modification of the Surfaces of Aluminum and Titanium Alloys Aimed at the Improvement of Their Wear Resistance and Tribological Characteristics. *Materials Science* **2021**, *57*(3), 377–386. <https://doi.org/10.1007/s11003-021-00552-z>

59. Simchen, F.; et al. Dissolution Behavior of Different Alumina Phases within Plasma Electrolytic Oxidation Coatings. *Coatings* **2022**, *12*(8), 1205. <https://doi.org/10.3390/coatings12081205>

60. Hashemzadeh, M.; et al. The importance of type of Ti-based additives on the PEO process and properties of Al_2O_3 – TiO_2 coating. *Surfaces and Interfaces* **2023**, *36*, 102523. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2022.102523>

61. Gamba, M.; et al. Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) coatings on aluminum alloy 2024: A review of mechanisms, processes, and corrosion resistance enhancement. *Applied Surface Science Advances* **2025**, *26*, 100707. <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2025.100707>.

62. Shats'kyi, I. P. Integral equation of the problem of crack in a shallow shell with flexible coating. *Dop. Akad. Nauk Ukr.* **1992**, *1*, 46–48.

63. Shatskyi, I. P.; Makoviichuk, M. V.; Shcherbii, A. B. Equilibrium of Cracked Shell with Flexible Coating. *Shell Structures: Theory and Applications* **2018**, *4*, 165–168. <https://doi.org/10.1201/9781315166605-34>

64. Dutkiewicz, M.; et al. Stress Analysis in Damaged Pipeline with Composite Coating. *Appl. Sci.* **2021**, *11*(2), 10676. <https://doi.org/10.3390/app112210676>

65. Shats'kyi, I.; Makoviichuk, M.; Shcherbii, A. Influence of a flexible coating on the strength of a shallow cylindrical shell with longitudinal crack. *J. Math. Sci.* **2019**, *238*, 165–173. <https://doi.org/10.1007/s10958-019-04226-9>

66. Shatskyi, I.P.; Makoviichuk, M.V.; Shcherbii, A.B. Influence of flexible coating on the limit equilibrium of a spherical shell with meridional crack. *Mater. Sci.* **2020**, *55*(4), 484–491. <https://doi.org/10.1007/s11003-020-00329-w>
67. Bembenek, M.; et al. Optical and Mechanical Properties of Layered Infrared Interference Filters. *Sensors* **2022**, *22*(21), 8105. <https://doi.org/10.3390/s22218105>
68. Shatskyi, I.; Makoviichuk, M.; Ropyak, L.; Velychkovych, A. Analytical model of deformation of a functionally graded ceramic coating under local load. *Ceramics* **2023**, *6*(3), 1879–1893. <https://doi.org/10.3390/ceramics6030115>
69. Shatskyi, I.; Makoviichuk, M.; Ropyak, L. Plane deformation of contrast layered coating under local load. *Procedia Structural Integrity* **2024**, *59*, 407–412. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.04.058>
70. Junge, T.; et al. Methodology for soft-sensor design and in-process surface conditioning in turning of aluminum alloys, *Production Engineering* **2024**, *18*(2), 267–287. <https://doi.org/10.1007/s11740-023-01260-0>
71. Madhavi, Y.; Narasaiah, N.; Jyothirmayi, A.; Rama Krishna, L. Influence of surfaceroughness on the corrosion-fatigue behavior of MAO coated 6061-T6 Al alloy assessed in NaCl medium. *Surface and Coatings Technology* **2021**, *414*, 127102. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127102>
72. Ye, Z.; et al. Influence of combined shot peening and PEO treatment on corrosion fatigue behavior of 7A85 aluminum alloy. *Appl. Surf. Sci.* **2019**, *486*, 72–79. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.04.242>
73. Madhavi, Y.; Rama Krishna, L.; Narasaiah, N. Corrosion-Fatigue Performance of Hard Anodized and MAO-Coated 2024-T3 and 7075-T6 Aerospace Al Alloys. *Trans. Indian Inst. Met.* **2021**, *74*(9), 2231–2243. <https://doi.org/10.1007/s12666-021-02313-7>
74. An, L.; Ma, Y.; Yan, X.; Wang, S.; Wang, Z. Effects of Electrical Parameters and Their Interactions on Plasma Electrolytic Oxidation Coatings on Aluminum Substrates. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* **2020**, *30*, 883–895. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(20\)65262-1](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(20)65262-1).

75. Jadhav, P.; et al. Development of an Oxide Layer on Al 6061 Using Plasma Arc Electrolytic Oxidation in Silicate-Based Electrolyte. *Materials* **2022**, *15*(4), 1616. <https://doi.org/10.3390/ma15041616>

76. Ropyak, L.; et al. Design of a Two-Layer Al–Al₂O₃ Coating with an Oxide Layer Formed by the Plasma Electrolytic Oxidation of Al for the Corrosion and Wear Protections of Steel, *Progress in Physics of Metals* **2023**, *24*(2), 319–365. <https://doi.org/10.15407/ufm.24.02.319>

77. Chaurasiya, V.; Wakif, A.; Shah, N. A.; Singh, J. A study on cylindrical moving boundary problem with variable thermal conductivity and convection under the most realistic boundary conditions. *Int. Comm. in Heat and Mass Transfer*. **2022**, *138*, 106312. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2022.106312>

78. Bandura, A. I.; Skaskiv, O. B. Boundedness of L-index in direction of functions of the form $f(\langle z, m \rangle)$ and existence theorems. *Matematychni Studii* **2014**, *41*(1), 45–52. <http://doi.org/10.30970/ms.41.1.45-52>

79. Bandura, A.; Skaskiv, O. Functions Analytic in the Unit Ball Having Bounded L-Index in a Direction. *Rocky Mountain Journal of Mathematics* **2019**, *49*(4), 1063–1092. <https://doi.org/10.1216/RMJ-2019-49-4-1063>

80. Bandura, A.; Salo, T.; Skaskiv, O. L-Index in Joint Variables: Sum and Composition of an Entire Function with a Function With a Vanished Gradient. *Fractal and Fractional* **2023**, *7*(8), 593. <https://doi.org/10.3390/fractalfract7080593>

81. Čanić, S. Moving Boundary Problems. *Bulletin (New Series) of the American Mathematical Society*, **2021**, *58*(1), 79–106. <https://doi.org/10.1090/bull/1703>

82. Shirani, A.; et al. PEO-Chameleon as a potential protective coating on cast aluminum alloys for hightemperature applications, *Surface and Coatings Technology*, **2020**, *397*, 126016. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126016>

83. Matykina, E.; et al. Energy-efficient PEO process of aluminium alloys, *Materials Letters* **2014**, *127*, 13–16. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.04.077>

84. Kaseem, M.; Dikici, B. Optimization of Surface Properties of Plasma Electrolytic Oxidation Coating by Organic Additives: A Review, *Coatings* **2021**, *11*(4), 374. <https://doi.org/10.3390/coatings11040374>
85. Songur, F.; Arslan, E.; Dikici, B. Taguchi optimization of PEO process parameters for corrosion protection of AA7075 alloy. *Surface and Coatings Technology*, **2022**, 434, 128202. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128202>
86. Wang, S.; Liu, X.; Yin, X.; et al., Influence of electrolyte components on the microstructure and growth mechanism of plasma electrolytic oxidation coatings on 1060 aluminum alloy. *Surface & Coatings Technology* **2019**, *381*, 125214. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125214>.
87. Mohedano, M.; Lu, X.; Matykina, E.; Blawert, C.; Arrabal, R.; Zheludkevich, M.L. Plasma electrolytic oxidation (PEO) of metals and alloys. In *Encyclopedia of Interfacial Chemistry: Surface Science and Electrochemistry*; Wandelt, K., Ed.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, **2018**; 423–438. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409547-2.13398-0>.
88. Clyne, T.W.; Troughton, S.C. A review of recent work on discharge characteristics during plasma electrolytic oxidation of various metals. *Int. Mater. Rev.* **2019**, *64*, 127–162. <https://doi.org/10.1080/09506608.2018.1466492>
89. Simchen, F.; Sieber, M.; Kopp, A.; Lampke, T. Introduction to Plasma Electrolytic Oxidation—An Overview of the Process and Applications. *Coatings* **2020**, *10*, 628. <https://doi.org/10.3390/coatings10070628>
90. Sikdar, S.; Menezes, P.V.; Maccione, R.; Jacob, T.; Menezes, P.L. Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) Process—Processing, Properties, and Applications. *Nanomaterials* **2021**, *11*, 1375. <https://doi.org/10.3390/nano11061375>
91. Tang, Q.; Qiu, T.; Ni, P.; Zhai, D.; Shen, J. Soft Sparking Discharge Mechanism of Micro-Arc Oxidation Occurring on Titanium Alloys in Different Electrolytes. *Coatings* **2022**, *12*, 1191. <https://doi.org/10.3390/coatings12081191>
92. Rokosz, K.; Hryniewicz, T.; Dudek, Ł. Phosphate Porous Coatings Enriched with Selected Elements via PEO Treatment on Titanium and Its Alloys: A Review. *Materials* **2020**, *13*, 2468. <https://doi.org/10.3390/ma13112468>

93. Shi, X.; Wang, Y.; Li, H.; Zhang, S.; Zhao, R.; Li, G.; Zhang, R.; Sheng, Y.; Cao, S.; Zhao, Y.; et al. Corrosion resistance and biocompatibility of calcium-containing coatings developed in near-neutral solutions containing phytic acid and phosphoric acid on AZ31B alloy. *J. Alloy. Compd.* **2020**, *823*, 153721. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.153721>

94. Wang, Y.L.; Jiang, Z.H.; Yao, Z.P. Microstructure, bonding strength and thermal shock resistance of ceramic coatings on steels prepared by plasma electrolytic oxidation. *Appl. Surf. Sci.* **2009**, *256*, 650–656. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2009.08.036>

95. Mahmoud, E.R.I.; Algahtani, A.; Tirth, V. Study on Microstructure Characterisation of Three Different Surface Coating Techniques on 6082-T6 Aluminum Alloy. *Met. Mater. Int.* **2021**, *27*, 4002–4013. <https://doi.org/10.1007/s12540-020-00825-3>

96. Berladir, K.; Hovorun, T.; Gusak, O.; Reshetniak, Y.; Khudaybergenov, D. Influence of Modifiers-Ligatures on the Properties of Cast Aluminum Alloy AK5M2 for the Automotive Industry. In *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III*; Ivanov, V.; Trojanowska, J.; Pavlenko, I.; Zajac, J.; Peraković, D., Eds.; Lecture Notes in Mechanical Engineering; Springer: Cham, Switzerland, 2020; pp. 473–482. https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7_46.

97. Pokhmurskii, V.I.; Zin, I.M.; Vynar, V.A.; Khlopyk, O.P.; Bily, L.M. Corrosive Wear of Aluminium Alloy in Presence of Phosphate. *Corros. Eng. Sci. Technol.* **2012**, *47*, 182–187. <https://doi.org/10.1179/1743278211Y.0000000022>.

98. Vynar, V.A.; Pokhmurs'kyi, V.I.; Zin', I.M.; Vasylyv, K.B.; Khlopyk, O.P. Determination of the Mechanism of Tribocorrosion of D16T Alloy According to the Electrode Potential. *Mater. Sci.* **2018**, *53*, 717–723. <https://doi.org/10.1007/s11003-018-0128-9>.

99. Wang, Z.J.; Nie, X.Y.; Hu, H.; Hussein, R.O. In Situ Fabrication of Blue Ceramic Coatings on Wrought Al Alloy 2024 by Plasma Electrolytic Oxidation. *J. Vac. Sci. Technol. A* **2012**, *30*, 021302. <https://doi.org/10.1116/1.3675610>.

100. Melnick, A.B.; Soolshenko, V.K.; Levchuk, K.H. Thermodynamic Prediction of Phase Composition of Transition Metals High-Entropy Alloys. *Metallofiz. Noveishie Tekhnologii* **2020**, *42*, 1387–1400. <https://doi.org/10.15407/mfint.42.10.1387>.

101. Radchenko, T.M.; Tatarenko, V.A.; Zapolsky, H.; Blavette, D. Statistical-Thermodynamic Description of the Order–Disorder Transformation of D0(19)-Type Phase in Ti-Al Alloy. *J. Alloy. Compd.* **2008**, *452*, 122–126. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2006.12.149>.

102. Shihab, T.; Prysyazhnyuk, P.; Semyanyk, I.; Anrusyshyn, R.; Ivanov, O.; Troshchuk, L. Thermodynamic Approach to the Development and Selection of Hardfacing Materials in Energy Industry. *Manag. Syst. Prod. Eng.* **2020**, *28*, 84–89. <https://doi.org/10.2478/mspe-2020-0013>.

103. Prysyazhnyuk, P.; Shlapak, L.; Semyanyk, I.; Kotsyubynsky, V.; Troshchuk, L.; Korniy, S.; Artym, V. Analysis of the Effects of Alloying with Si and Cr on the Properties of Manganese Austenite Based on AB INITIO Modelling. *East.-Eur. J. Enterp. Technol.* **2020**, *6*, 28–36. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.217281>.

104. Karnaukhov, I.M.; Levchuk, K.H. Electronic Band Structure of Dirac Materials with Hubbard Interaction. *Metallofiz. Noveishie Tekhnologii* **2022**, *5*, 565–585. <https://doi.org/10.15407/mfint.44.05.0565>.

105. Wang, S.; Liu, X.; Yin, X.; Du, N. Influence of Electrolyte Components on the Microstructure and Growth Mechanism of Plasma Electrolytic Oxidation Coatings on 1060 Aluminum Alloy. *Surf. Coat. Technol.* **2020**, *381*, 125214. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125214>.

106. Lee, J.H.; Jung, K.H.; Kim, S.J. Characterization of Ceramic Oxide Coatings Prepared by Plasma Electrolytic Oxidation Using Pulsed Direct Current with Different Duty Ratio and Frequency. *Appl. Surf. Sci.* **2020**, *516*, 146049. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.146049>.

107. Li, X.-J.; Zhang, M.; Wen, S.; Mao, X.; Huo, W.-G.; Guo, Y.-Y.; Wang, Y.-X. Microstructure and Wear Resistance of Micro-Arc Oxidation Ceramic Coatings

Prepared on 2A50 Aluminum Alloys. *Surf. Coat. Technol.* **2020**, 394, 125853. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125853>.

108. Rogov, A.B.; Huang, Y.; Shore, D.; Matthews, A.; Yerokhin, A. Toward Rational Design of Ceramic Coatings Generated on Valve Metals by Plasma Electrolytic Oxidation: The Role of Cathodic Polarisation. *Ceram. Int.* **2021**, 47, 34137–34158. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.08.324>.

109. Mengesha, G.A.; Chu, J.P.; Lou, B.-S.; Lee, J.-W. Effects of Processing Parameters on the Corrosion Performance of Plasma Electrolytic Oxidation Grown Oxide on Commercially Pure Aluminum. *Metals* **2020**, 10, 394. <https://doi.org/10.3390/met10030394>.

110. Pokhmurs'kyi, V.I.; Dovhunyk, V.M.; Student, M.M.; Klapkiv, M.D.; Posuvailo, V.M.; Kytsya, A.R. Influence of Silver Nanoparticles Added to Lubricating Oil on the Tribological Behavior of Combined Metal–Oxide Ceramic Layers. *Mater. Sci.* **2013**, 48, 636–641. <https://doi.org/10.1007/s11003-013-9548-8>.

111. Student, M.M.; Dovhunyk, V.M.; Posuvailo, V.M.; Koval'chuk, I.V.; Hvozdets'kyi, V.M. Friction Behavior of Iron–Carbon Alloys in Couples with Plasma–Electrolytic Oxide–Ceramic Layers Synthesized on D16T Alloy. *Mater. Sci.* **2017**, 53, 359–367. <https://doi.org/10.1007/s11003-017-0083-x>

112. Hutsaylyuk, V.; Student, M.; Dovhunyk, V.; Posuvailo, V.; Student, O.; Maruschak, P.; Koval'chuk, I. Effect of Hydrogen on the Wear Resistance of Steels upon Contact with Plasma Electrolytic Oxidation Layers Synthesized on Aluminum Alloys. *Metals* **2019**, 9, 280. <https://doi.org/10.3390/met9030280>.

113. Shen, X.; Nie, X.; Hu, H.; Tjong, J. Effects of Coating Thickness on Thermal Conductivities of Alumina Coatings and Alumina/Aluminum Hybrid Materials Prepared Using Plasma Electrolytic Oxidation. *Surf. Coat. Technol.* **2012**, 207, 96–101. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.06.009>.

114. Akatsu, T.; Kato, T.; Shinoda, Y.; Wakai, F. Thermal Barrier Coating Made of Porous Zirconium Oxide on a Nickel-Based Single Crystal Superalloy Formed by Plasma Electrolytic Oxidation. *Surf. Coat. Technol.* **2013**, 223, 47–51. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.02.026>.

115. Curran, J.A.; Kalkanci, H.; Magurova, Yu.; Clyne, T.W. Mullite-Rich Plasma Electrolytic Oxide Coatings for Thermal Barrier Applications. *Surf. Coat. Technol.* **2006**, *201*, 8683–8687. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.06.050>.

116. Shirani, A.; Joy, T.; Rogov, A.; Lin, M.; Yerokhin, A.; Mogonye, J.-E.; Korenyi-Both, A.; Aouadi, S.M.; Voevodin, A.A.; Berman, D. PEO-Chameleon as a Potential Protective Coating on Cast Aluminum Alloys for High-Temperature Applications. *Surf. Coat. Technol.* **2020**, *397*, 126016. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126016>.

117. Shen, D.J.; Wang, Y.L.; Nash, P.; Xing, G.Z. Microstructure, Temperature Estimation and Thermal Shock Resistance of PEO Ceramic Coatings on Aluminum. *J. Mater. Process. Technol.* **2008**, *205*, 477–481. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.11.209>.

118. Dai, W.; Zhang, X.; Li, C.; Yao, G. Effect of Thermal Conductivity on Micro-Arc Oxidation Coatings. *Surf. Eng.* **2022**, *38*, 44–53. <https://doi.org/10.1080/02670844.2022.2026665>.

119. Pakseresht, A.H.; Saremi, M.; Omidvar, H.; Alizadeh, M. Micro-Structural Study and Wear Resistance of Thermal Barrier Coating Reinforced by Alumina Whisker. *Surf. Coat. Technol.* **2019**, *366*, 338–348. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.03.059>.

120. Kamalan Kirubaharan, A.M.; Kuppusami, P. Corrosion Behavior of Ceramic Nanocomposite Coatings at Nanoscale. In *Corrosion Protection at the Nanoscale*; Rajendran, S.; Nguyen, T.A.; Kakooei, S.; Yeganeh, M.; Li, Y., Eds.; Micro and Nano Technologies; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2020; pp. 295–314. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819359-4.00016-7>.

121. Matykina, E.; Arrabal, R.; Skeldon, P.; Thompson, G.E. Optimisation of the Plasma Electrolytic Oxidation Process Efficiency on Aluminium. *Surf. Interface Anal.* **2010**, *42*, 221–226. <https://doi.org/10.1002/sia.3140>.

122. Vakili-Azghandi, M.; Fattah-alhosseini, A.; Keshavarz, M.K. Optimizing the Electrolyte Chemistry Parameters of PEO Coating on 6061 Al Alloy by Corrosion

Rate Measurement: Response Surface Methodology. *Measurement* **2018**, 124, 252–259. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.04.038>.

123. Bembenek, M.; Popadyuk, O.; Shihab, T.; Ropyak, L.; Uhryński, A.; Vytvytskyi, V.; Bulbuk, O. Optimization of Technological Parameters of the Process of Forming Therapeutic Biopolymer Nanofilled Films. *Nanomaterials* **2022**, 12, 2413. <https://doi.org/10.3390/nano12142413>.

124. Pan, S.; Tu, X.; Yu, J.; Zhang, Y.; Miao, C.; Xu, Y.; Fu, R.; Li, J. Optimization of AZ31B Magnesium Alloy Anodizing Process in NaOH–Na₂SiO₃–Na₂B₄O₇ Environmental-Friendly Electrolyte. *Coatings* **2022**, 12, 578. <https://doi.org/10.3390/coatings12050578>.

125. Nykyforchyn, H.; Tsyurulnyk, O.; Zvirko, O. Electrochemical fracture analysis of in-service natural gas pipeline steels. *Procedia Structural Integrity* **2018**, 13, 1215–1220. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.12.250>

126. Vynar, V.A.; Pokhmurs'kyi, V.I.; Zin', I.M.; Vasyliv, K.B.; Khlopyk, O.P. Determination of the Mechanism of Tribocorrosion of D16T Alloy According to the Electrode Potential. *Materials Science* **2018**, 53(5), 717–723. <https://doi.org/10.1007/s11003-018-0128-9>

127. Boshkova, N.; Stoyanova, D.; Stambolova, I.; Dimitrov, O.; Simeonova, S.; Avdeev, G.; Peshova, M.; Bachvarov, V.; Smrichkova, S.; Boshkov, N. Corrosion Efficiency of Zn-Ni/ZrO₂ and Zn-Co/ZrO₂ Bi-Layer Systems: Impact of Zn-Alloy Sublayer Thickness. *Coatings* **2024**, 14(7), 792. <https://doi.org/10.3390/coatings14070792>

128. Vynar, V.A.; Dovhunyk, V.M.; Student, M.M. Methodical specific features of tribocorrosion investigations. *Materials Science* **2011**, 46(5), 633–639. <https://doi.org/10.1007/s11003-011-9334-4>

129. Amer, M.; Hayat, Q.; Janik, V.; Jennett, N.; Nottingham, J.; Bai, M. A Review on In Situ Mechanical Testing of Coatings. *Coatings* **2022**, 12(3), 299. <https://doi.org/10.3390/coatings12030299>

130. Dutkiewicz, M.; Dalyak, T.; Shatskyi, I.; Venhrynyuk, T.; Velychkovych, A. Stress Analysis in Damaged Pipeline with Composite Coating. *Appl. Sci.* **2021**, *11*(22), 10676. <https://doi.org/10.3390/app112210676>

131. Li, X.; Zhang, W.; Cai, X. Mechanical evaluation of thermal barrier coatings by indentation: A review. *Journal of Materials Research and Technology* **2024**, *30*, 5402–5416. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.04.258>

132. Dutkiewicz, M.; Velychkovych, A.; Shatskyi, I.; Shopa, V. Efficient Model of the Interaction of Elastomeric Filler with an Open Shell and a Chrome-Plated Shaft in a Dry Friction Damper. *Materials* **2022**, *15*(13), 4671. <https://doi.org/10.3390/ma15134671>

133. Shatskyi, I.P.; Makoviichuk, M.V.; Shcherbii, A.B. Influence of Flexible Coating on the Limit Equilibrium of a Spherical Shell with Meridional Crack. *Materials Science* **2020**, *55*(4), 484–491. <https://doi.org/10.1007/s11003-020-00329-w>

134. Sun, W.; Bian, G.; Jia, L.; Pai, J.; Ye, Z.; Wang, N.; Qi, J.; Li, T. Study of Trivalent Chromium Conversion Coating Formation at Solution—Metal Interface. *Metals* **2023**, *13*(1), 93. <https://doi.org/10.3390/met13010093>

135. Santana, J.J.; Izquierdo, J.; Souto, R.M. Uses of Scanning Electrochemical Microscopy (SECM) for the Characterization with Spatial and Chemical Resolution of Thin Surface Layers and Coating Systems Applied on Metals: A Review. *Coatings* **2022**, *12*(5), 637. <https://doi.org/10.3390/coatings12050637>

136. Mariani, F.; Gualandi, I.; Schuhmann, W.; Scavetta, E. Micro- and nano-devices for electrochemical sensing. *Microchim Acta* **2022**, *189*(12), 459. <https://doi.org/10.1007/s00604-022-05548-3>

137. Öchsner, A.; Makvandi, R. Plane Finite Elements for Two-Dimensional Problems: Application of the Computer Algebra System Maxima. Springer, Cham, **2021**. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-89550-1>

138. Karjanto, N.; Husain, H.S. Not Another Computer Algebra System: Highlighting wxMaxima in Calculus. *Mathematics* **2021**, *9*(12), 1317. <https://doi.org/10.3390/math9121317>

139. Ciobanu, B.-C.; Pop, F.; Popescu, P.G. A fast way to compute definite integrals. *Soft Computing* **2022**, *26*(24), 13485–13488. <https://doi.org/10.1007/s00500-022-07480-3>

140. Pejčev, A.V.; Reichel, L.; Spalević, M.M.; Spalević, S.M. A new class of quadrature rules for estimating the error in Gauss quadrature. *Applied Numerical Mathematics* **2024**, *204*, 206–221. <https://doi.org/10.1016/j.apnum.2024.06.011>

141. Маковійчук, М.В.; Остапович, В.В.; Роп'як, Л.Я. Аналітичне дослідження електричного опору мікроелектродів конічної форми, *Методи та прилади контролю якості* **2011**, *26*, 103–108.

142. Bandura, A. A Note on Meromorphic Functions with Finite Order and of Bounded l-Index. *J. Math. Sci.* **2021**, *256*(6), 727–734. <https://doi.org/10.1007/s10958-021-05456-6>

143. Bandura, A.I. Composition of entire functions and bounded L-index in direction. *Matematychni Studii* **2016**, *47*(2), 179–184. <https://doi.org/10.15330/ms.47.2.179-184>

144. Похмурський, В.І.; Антощак, І.М. Методи електрохімічних досліджень металів у високотемпературних водних середовищах. НАН України, Фіз.-механ. ін-т ім. Г. В. Карпенка. Львів: Сполом, 2010, стор. 24.

145. Патент на винахід України № 39303, G01N27/333, Мікроелектрод для електрохімічних вимірювань. Роп'як, Л.Я., Петрина, Д.Ю., Шуляр, І.О., Кустов, В.В., Гусак, В.М. Заявник і власник: Івано-Франківський державний технічний університет нафти і газу. Заявка № 2000010334 від 20.01.2000. Опубліковано 15.06.2001, бюл. № 5/2001, 4 стор. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/347847/>

146. Lee, S.-K.; Boron, W.F.; Parker, M.D. Monitoring Ion Activities In and Around Cells Using Ion-Selective Liquid-Membrane Microelectrodes. *Sensors* **2013**, *13*(1), 984–1003. <https://doi.org/10.3390/s130100984>

147. Саакян, Л.С.; Ефремов, А.П.; Бабей, Ю.И.; Стоцкий, И.М.; Роп'як, Л.Я.; Сидорук А.М., А.с. № 1179164 SU, МКИ G 01 N 17/00. Устройство для испытания материалов при сложнопнапряженном состоянии в агрессивной

среде, № 3710975/25-28; заявл. 27.12.83; опубл. 15.09.85, Бюл. № 34. – 5 с.
https://patentscope.wipo.int/search/docs2/nat/SU28064539/pdf/TbrZHk7OwRbwb0g-68g1FY6R7CqEdqmKI34garP0djlTcyHcbs6ycE8qx3gPpqE_

148. 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>

149. Наказ Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України «Про затвердження Правил приймання стічних вод до систем централізованого водовідведення та Порядку визначення розміру плати, що справляється за понаднормативні скиди стічних вод до систем централізованого водовідведення» від 01.12.2017 р. № 316 (Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 15 січня 2018 р. за № 56/31508). *Офіційний вісник України* від 02.02.2018 – 2010 р., № 10, С. 132, стаття 383, код акта 88931/2018. ULR: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0056-18#Text> (дата звернення: 07.03.2021).

150. Роп'як, Л. Я.; Малишевська, О. С. Екологічні аспекти утилізації відпрацьованого електроліту для мікродугового оксидування. *Прогресивні технології у машинобудуванні PTME-2019*: матер. доповідей VIII Міжнар. наук.-техн. конф. (4-8 лютого 2019 р.). Івано-Франківськ-Яремче : ІФНТУНГ. **2019**. С. 208–209. ULR: <http://elar.nung.edu.ua/handle/123456789/8682> (дата звернення: 07.03.2021).

151. Роп'як, Л. Я.; Малишевська, О. С.; Маковійчук, М. В.; Пригоровська, Т. О.; Величкович, А. С.; Шовкопляс, М. В. Пат. на винахід 123124 Україна, МПК B01D50/00, B04C9/00, B01D24/46, B01D29/62. Циклон-фільтр для очищення газів або рідин.– № а201909830, заявл. 16.09.2019, опубл. 17.02.2021, Бюл. № 7. 15 с. ULR: <https://sis.ukrpatent.org/uk/search/detail/1477700/> (дата звернення: 07.03.2021).

152. SIMATIC S7. S7-1200 Programmable Controller. System Manual: Siemens (A5E02486680-AK). – V4.2, 09/2016. 1614 p. ULR: <https://support.industry.siemens.com/cs/document/109741593/simatic-s7-s7-1200-programmable-controller?dti=0&lc=en-US> (дата звернення: 07.03.2021).

153. SIMATIC. STEP 7 Professional V14 SP1 System Manual: Siemens. – 04/2017. 16098 p. ULR: <https://support.industry.siemens.com/cs/document/109747136/step-7-professional-v14-sp1?dti=0&lc=en-US> (дата звернення: 07.03.2021).

154. Заміховський, Л.М.; Николайчук, М.Я.; Левицький, І.Т. Автоматизована система частотного керування насосними агрегатами з функціями диспетчеризації. *Інтелектуальний продукт вчених, винахідників і раціоналізаторів Прикарпаття: Щорічний каталог найвагоміших винаходів, корисних моделей, промислових зразків і раціоналізаторських пропозицій*. Довід. вид. / Редакційна колегія: Б. І. Середюк, Ж. П. Табанець, Л. М. Шляхтич, Л. Б. Бабій. Івано-Франківськ, **2017**, 77–81.

155. Pryszyzhnyuk P. M., Shihab T. A., Shlapak L.S., Ivanov O.O. (2021). Increasing of durability of oil and gas centrifugal pumps mechanical seals using tungsten-free cermets based on chromium carbide. Perspective trajectory of scientific research in technical sciences: Collective monograph. Riga, Latvia : “Baltija Publishing”, 408–508. DOI: 10.30525/978-9934-26-085-8-20

ДОДАТКИ

Додаток А.

Список опублікованих праць за темою дисертації

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

1. Посувайло, В.М.; Витвицький, В.С.; Романів, М.М.; Пригоровська, Т.О. Вплив технологічних параметрів процесу плазмоелектролітичного оксидування алюмінію на швидкість росту покриттів. *Прикарпатський вісник Наукового Товариства ім. Шевченка. Число* **2020**, 1(59), 165–178. [https://doi.org/10.31471/2304-7399-2020-1\(59\)-165-178](https://doi.org/10.31471/2304-7399-2020-1(59)-165-178)
2. Вольченко, Д. О.; Кіндрачук, М. В.; Скрипник, В. С.; Журавльов, Д. Ю., Романів, М. М. Дослідження водневого зносу важконавантажених металевих фрикційних елементів гальм. *Проблеми тертя та зношування* **2021**, 91(2), 37–45. (Фахове видання). [https://doi.org/10.18372/0370-2197.2\(91\).15528](https://doi.org/10.18372/0370-2197.2(91).15528)
3. 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**, 4, 83–97. (Фахове видання). <https://doi.org/10.24025/2306-4412.4.2021.253298>
4. 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), 70–80. . (Фахове видання). <https://doi.org/10.32845/msnau.2021.2.15>
5. Ropyak, L.; Shihab, T.; Velychkovych, A.; Bilinskyi, V.; Malinin, V.; Romaniv, M. Optimization of Plasma Electrolytic Oxidation Technological Parameters of Deformed Aluminum Alloy D16T in Flowing Electrolyte. *Ceramics* **2023**, 6(1), 146–167. <https://doi.org/10.3390/ceramics6010010> Scopus, WoS (Q2) <https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=21101062489&tip=sid&clean=0>
6. Роп'як, Л.; Бандура, А.; Романів, М. Дослідження властивостей жаростійких покриттів, сформованих плазмовим електролітичним оксидуванням алюмінієвих сплавів. *Науковий вісник Івано-Франківського*

національного технічного університету нафти і газу **2024**, 2(57), 15–24. .
(Фахове видання). [https://doi.org/10.31471/1993-9965-2024-2\(57\)-15-24](https://doi.org/10.31471/1993-9965-2024-2(57)-15-24)

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

7. Pashechko, M.; Роп'як, Л.Я.; Стрілецький, Ю.Й.; Романів, М.М. Система автоматичного контролю технологічних параметрів процесу мікродугового оксидування /М. Pashechko, Л. Я. Роп'як, Ю. Й. Стрілецький, М. М. Романів // Збірник тез IX Міжнародної науково-технічної конференції «Датчики, прилади та системи – 2021», присвяченій пам'яті професора Шарапова В.М. с. Лазурне (Херсонська обл.) з 20–24 вересня 2021 р. С. 38–39.

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

8. 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. Збірник наукових праць X міжнародної науково-технічної конференції «Прогресивні технології у машинобудуванні PTME–2022» 1–5 лютого 2022 р. Івано-Франківськ – Яремче, 2022. С. 127–129.

9. Bembenek, M.; Machnik, R.; Роп'як, Л.Я.; Романів, М.М. Дослідження режимів алмазного шліфування плазмових електролітичних оксидних покриттів. Збірник праць X Міжнародної науково-технічної конференції «Датчики, прилади та системи – 2023», присвяченої пам'яті професора Шарапова В.М. 12–14 вересня 2023, м. Черкаси. С. 107–108.

<https://er.chdtu.edu.ua/bitstream/ChSTU/4653/1/%D0%97%D0%B1%D1%96%D1%80%D0%BD%D0%B8%D0%BA%20%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B5%D1%80%D1%96%D0%B0%D0%BB%D1%96%D0%B2%20%D0%9C%D0%9D%D0%A2%D0%9A%20%D0%94%D0%9F%D0%A1-2023.pdf>

10. Barz, C.; Bembenek, M.; Paszeczko, M.; Romaniv, M.; Ropyak, L. Ways to increase technology efficiency of manufacturing parts strengthened by plasma electrolytic oxidation. Збірник праць XV Міжнародної науково-технічної конференції. Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2023: матеріали

науково-технічної конференції, 27–28 квітня 2023 р., м. Київ / загальна редакція Р. В. Лютий. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 407с.

11. Романів, М.М.; Роп'як, Л.Я. Особливості формування покриттів на алюмінієвих сплавах плазмовим електролітичним оксидуванням. Всеукраїнська науково-технічна конференція студентів, аспірантів і молодих учених з міжнародною участю «Молодь в авіації: нові рішення та перспективні технології» присвячується 125-річчю Національного університету «Запорізька політехніка» 95-річчю Машинобудівного факультету 20-річчю кафедри "Технології авіаційних двигунів" 80-річчю ДП «ІВЧЕНКО-ПРОГРЕС» 21–22 листопада 2024 р. м. Запоріжжя, Національний університет «Запорізька політехніка»: тези доп. 2024. С. 139-141.

12. Bandura, A.; Ropyak, L.; Romaniv, M. Calculation of the Electrical Resistance of a Cone Microelectrode for Electrochemical Studies of Coatings. In Advanced Manufacturing Processes: Book of Abstracts of the 6 th Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes, Odesa, Ukraine, September 10–13, 2024 / Volodymyr Tonkonogyi, Vitalii Ivanov (Eds.). Book of Abstracts. Sumy: IATDI, 2024. P. 63. https://tmvi.sumdu.edu.ua/docs/InterPartner-2024_Book%20of%20Abstracts.pdf

13. Величкович, А.; Роп'як, Л.; Романів, М. Аналітичне дослідження напруженого стану стержня з покриттям під час центрального розтягування чи кручення. Інженерія поверхні та реновація виробів: Матеріали 24-ї Міжнародної науково-технічної конференції, 26–27 червня 2024 р. – Київ: АТМ України, 15–19 с. https://atmu.net.ua/downloads/archive/2-24sb_compressed.pdf#page=15

14. Bandura, A.; Ropyak, L.; Romaniv, M. Calculation of the Electrical Resistance of a Cone Microelectrode for Electrochemical Studies of Coatings. Tonkonogyi V., Oborskyi G., Ivanov V., Trojanowska J. (Eds.). 6th Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes, InterPartner 2024, Odesa, Ukraine, September 10–13, 2024. Lecture Notes in Mechanical Engineering,

Springer Science and Business Media Deutschland GmbH (2025) pp. 375–385.
https://doi.org/10.1007/978-3-031-82746-4_33 (Scopus Q4).

15. Заявка № а202405272 на видачу патента України на винахід, МПК G01N27/333. Мікроелектрод для електрохімічних досліджень покриттів. Винахідники: Роп'як Л. Я., Бандура А. І., Романів М. М. Заявник і володілець ІФНТУНГ. Заявлено 06.11.2024. (Формальна експертиза).
<https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1826519/>

Додаток Б.

Зміцнювані змінні деталі відцентрового насоса

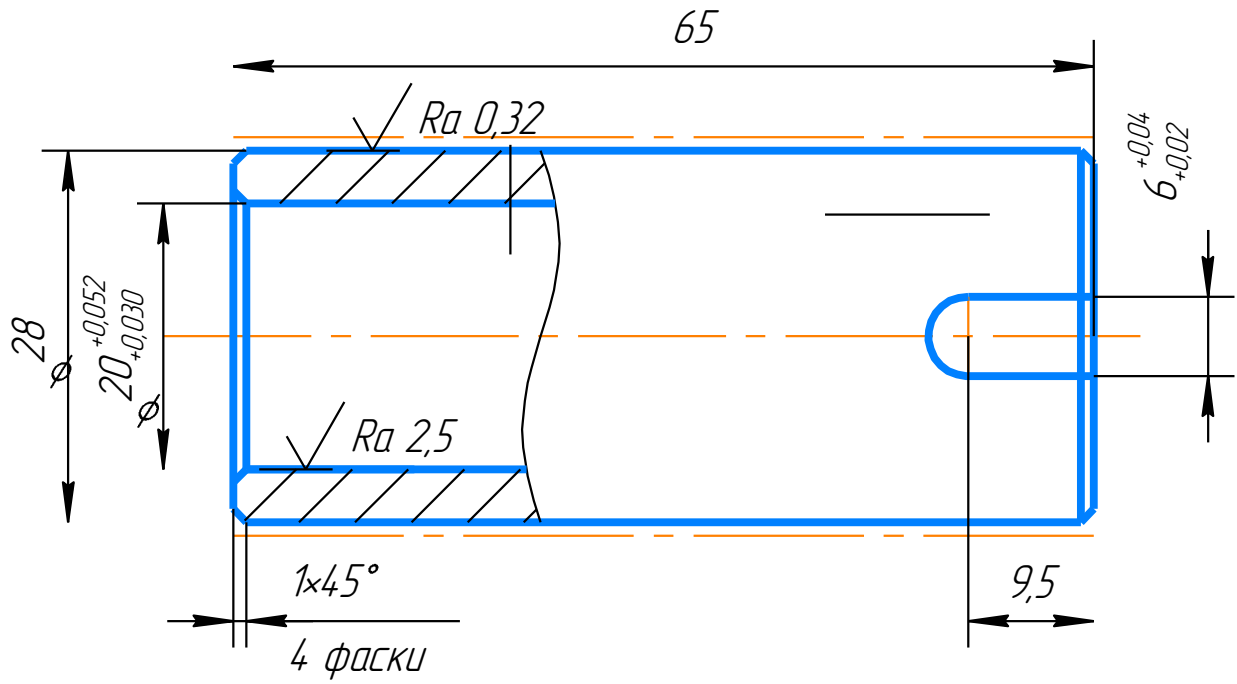


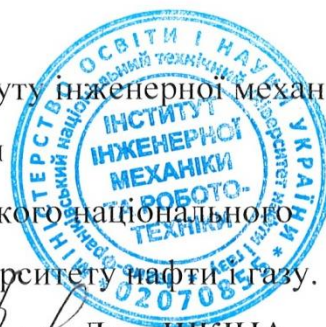
Рисунок 1 – Захисна втулка

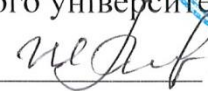
Додаток В.

Акт впровадження у навчальний процес

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор інституту інженерної механіки
та робототехніки
Івано-Франківського національного
технічного університету нафти і газу.



 Леся ШКІЦА
«18» квітня 2025 р

АКТ

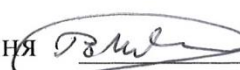
про використання результатів науково-дослідницьких робіт

Результати дисертаційного дослідження РОМАНІВА Миколи Миколайовича **«УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ФОРМУВАННЯ МІКРОДУГОВИХ ОКСИДНИХ ПОКРИТТІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ»** використовуються в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу на кафедрі «Комп'ютеризованого машинобудування» під час підготовки аспірантів за спеціальністю 131 – Прикладна механіка при вивченні дисципліни «Плазмові технології зміцнення поверхонь деталей машин». 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 РОГ'ЯК

Здобувач

 Микола РОМАНІВ

Додаток Г.

Акт впровадження у виробництво

«ЗАТВЕРДЖУЮ»



Директор
ТЗОВ «ПОБЕРЕЗЬКИЙ ЗАВОД
ПРЕСОВИХ АГРЕГАТИВ»

Мирослав БІЛЕЦЬКИЙ
2025 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційного дослідження

РОМАНІВА Миколи Миколайовича

«УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ФОРМУВАННЯ МІКРОДУГОВИХ
ОКСИДНИХ ПОКРИТТІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ПОВЕРХОНЬ
ДЕТАЛЕЙ»

1. *Детальна назва впровадження:* удосконалена технологія формування на деталях із алюмінієвих сплавів мікродугових оксидних покриттів для підвищення ресурсу деталей ущільнень відцентрових насосів

2. *Назва підприємства, де зроблено впровадження:* ТЗОВ «ПОБЕРЕЗЬКИЙ ЗАВОД ПРЕСОВИХ АГРЕГАТИВ», м. Івано-Франківськ.

3. *Основні результати впровадження:* впровадження удосконаленої технології формування на алюмінієвих сплавах мікродугових оксидних покриттів та їх подальшої механічної обробки дозволило суттєво підвищити якість і точність робочих поверхонь деталей, що забезпечує збільшення ресурсу вузлів ущільнень відцентрових насосів та підвищення надійності їхньої експлуатації.

Наукові керівники:

професор кафедри комп'ютеризованого
машинобудування ІФНТУНГ,
д.т.н., проф.

Любомир РОП'ЯК

завідувач кафедри фізико-
математичних наук ІФНТУНГ,
д.ф.-м.н., проф.

Андрій БАНДУРА

Здобувач

Микола РОМАНІВ