

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕХНОЛОГІЙ ТА
ДИЗАЙНУ

Факультет хімічних та біофармацевтичних технологій
Кафедра хімічних технологій та ресурсозбереження

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА (ПРОЄКТ)

на тему

«Проектування гальванічного цеху з розробкою технологічного процесу
цинкування з модернізованих кислотних електролітів
річною продуктивністю 12000 м²»

Спеціальність 161 Хімічні технології та інженерія

Освітня програма Технічна електрохімія та електрохімічна енергетика

Виконав: студент групи МгТЕ-22

Погребець В.С.

Науковий керівник к.б.н., доц. Кислова О.В.

Рецензент к.т.н., доц. Крюкова О.А.

Київ 2023

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ДИЗАЙНУ

Факультет хімічних та біофармацевтичних технологій
Кафедра хімічних технологій та ресурсозбереження
Спеціальність 161 Хімічні технології та інженерія
Освітня програма Технічна електрохімія та електрохімічна енергетика

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ХТР

_____ Вікторія ПЛАВАН
«_____» _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЄКТ) СТУДЕНТУ

Погребцю Владиславу Сергійовичу

1. Тема кваліфікаційної роботи (проєкту) «Проектування гальванічного цеху з розробкою технологічного процесу цинкування з модернізованих кислотних електролітів річною продуктивністю 12000 м²»

Науковий консультант Кислова Ольга Володимирівна, к.б.н., доцент
затверджені наказом КНУТД від «12» 09 2023 року № 210-уч

2. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи (проєкту) Розробка технологічної схеми гальванічного нанесення блискучого цинкового покриття річною програмою 12000 м²/рік

3. Зміст кваліфікаційної роботи (проєкту) (перелік питань, які потрібно опрацювати) За даними літератури проаналізувати особливості нанесення цинкового покриття з електролітів різного складу та обрати оптимальний склад кислотного електроліту, порівняти властивості утворених покриттів; розробити технологічну схему гальванічного процесу цинкування з застосуванням модифікованого електроліту, провести необхідні розрахунки для розробки проєкту гальванічного цеху з заданою продуктивністю, охарактеризувати систему заходів по охороні навколишнього середовища та створенню сприятливих умов праці в цеху

4. Дата видачі завдання «01» 08 2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапу кваліфікаційної роботи (проєкту)	Орієнтовний термін виконання	Примітка про виконання
1	Вступ		
2	Розділ 1		
3	Розділ 2		
4	Розділ 3		
5	Висновки		
6	Оформлення (чистовий варіант)		
7	Подача кваліфікаційної роботи (проєкту) науковому керівнику для відгуку		
8	Подача кваліфікаційної роботи (проєкту) для рецензування (за 14 днів до захисту)		
9	Перевірка кваліфікаційної роботи (проєкту) на наявність ознак плагіату та текстових співпадінь (за 10 днів до захисту)		
10	Подання кваліфікаційної роботи (проєкту) завідувачу кафедри (за 7 днів до захисту)		

З завданням ознайомлений:

Студент _____

Владислав ПОГРЕБЕЦЬ

Науковий керівник _____

Ольга КИСЛОВА

АНОТАЦІЯ

Владислав ПОГРЕБЕЦЬ. Проектування гальванічного цеху з розробкою технологічного процесу цинкування з модернізованих кислотних електролітів річною продуктивністю 12000 м².

Випускна кваліфікаційна робота (проект) на здобуття кваліфікації магістра. Київський національний університет технологій та дизайну.

Київ, 2023 р.

Робота викладена на 63 сторінках, містить 7 таблиць, 14 рисунків, 23 посилання на літературні джерела.

У даній роботі було розроблено технологію процесу цинкування з модернізованого кислого електроліту з річною програмою 12000 м². В роботі було проведено розрахунки технологічних параметрів. Цинкування було проведено у гальванічній ванні при густині струму 4 А/дм² та з товщиною покриття 20 мкм. В роботі зазначені заходи з охорони праці та техніки безпеки.

Ключові слова: процес цинкування, гальванічна ванна, корозія, захисне покриття, сульфатний електроліт, густина струму.

ABSTRACT

Vladyslav POHREBETS. Master's thesis on the topic "Design of an electroplating shop with the development of a technological process of galvanizing from modernized acid electrolytes with an annual productivity of 12,000 m²"

Masters graduation qualification work (project) for obtaining master's degree. Kyiv National University of Technology and Design. Kyiv, 2023.

The work is laid out on 63 pages, contains 7 tables, 14 figures, and 23 references to literature sources.

In this project, the technology of the galvanizing process from modernized acid electrolyte was developed with an annual program of 12,000 m². The work was carried out calculations of technological parameters. Galvanizing was carried out in galvanic baths at a current density of 4A/dm² and a coating thickness of 20 microns. Labor protection and safety measures are specified in the work.

Key words: galvanizing process, galvanic bath, corrosion, protective coating, sulfate electrolyte, current density.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 ХАРАКТЕРИСТИКА ОСНОВНИХ СТАДІЙ ГАЛЬВАНІЧНОГО НАНЕСЕННЯ ЦИНКОВОГО ПОКРИТТЯ	10
1.1 Обґрунтування вибору технологічного процесу	10
1.2 Підготовка поверхні виробів перед нанесенням гальванічного покриття.....	11
1.3 Характеристика обладнання для нанесення покриття.....	18
1.4 Вибір електроліту для нанесення гальванічного покриття.....	19
1.5 Приготування та коригування складу електроліту	28
1.6 Контроль якості гальванічного покриття.....	29
1.6.1 Контроль товщини покриття	29
1.6.2 Контроль зовнішнього вигляду покриття.....	30
1.6.3 Методи визначення пористості покриття.....	31
1.6.4 Контроль міцності зчеплення.....	31
1.6.5 Видалення недоброякісних покриттів.....	32
Висновки до розділу 1.....	32
2 ТЕХНОЛОГІЧНІ РОЗРАХУНКИ	34
2.1 Характеристика деталей, які підлягають обробці. Вибір товщини цинкового покриття	34
2.2 Технологічний процес цинкування	34
2.3 Визначення дійсного фонду часу роботи обладнання	35
2.4 Визначення виробничої програми цеху	36
2.5 Вибір виду обладнання для електрохімічного цинкування, розрахунок його кількості та габаритних розмірів.....	36
2.6 Перерахунок діючого обладнання	37
2.7 Баланс струму на ванні.....	40
2.8 Визначення напруги на ванні з підвісним пристроєм.....	40
2.9 Вибір джерела струму для живлення гальванічної ванни	42
2.10 Баланс енергії.....	43

2.11 Тепловий розрахунок гальванічних ванн.....	43
2.12 Розрахунок витрат матеріалів.....	44
2.12.1 Розрахунок витрати анодів	44
2.12.2 Розрахунок витрат хімічних реактивів	45
2.12.3 Розрахунок витрати води	46
2.13 Автоматизація процесу нанесення гальванічного покриття.....	48
Висновки до розділу 2.....	50
3 ЗАХОДИ З ОХОРОНИ ПРАЦІ ЩОДО ПОКРАЩЕННЯ УМОВРОБОТИ У ГАЛЬВАНІЧНОМУ ЦЕХУ	51
3.1 Профілактика електротравм	51
3.2 Нормалізація повітря робочої зони	52
3.3 Пожежна профілактика та вибір засобів пожежогасіння	53
3.4 Очищення стічних вод	54
Висновки до розділу 3.....	59
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	60
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	61

ВСТУП

В багатьох галузях промисловості застосовуються гальванічні покриття, саме які стали невід'ємною частиною нашого життя. Існує три типи: захисні, захисно-декоративні та функціональні. Захисні покриття використовують для деталей, які експлуатуються в жорстких умовах, аби захистити їх від корозії.

Захисно-декоративні покриття застосовуються в випадках, коли потрібні не тільки захисні властивості, але і естетичний зовнішній вигляд. Функціональні потрібні для надання поверхні виробу необхідних фізичних властивостей, таких як зносостійкість, електропровідність та інших.

Цинкові покриття широко застосовуються для захисту від корозії деталей машин, кріпильних деталей, сталевих листів, дроту, деталей широкого вжитку та інших, що знаходяться у різних кліматичних районах, в атмосфері забрудненої SO_2 , а також у приміщеннях з помірною вологістю та у приміщеннях забруднених газами та продуктами згорання. Крім того, цинкові покриття застосовуються для захисту від корозії водопровідних труб, поживних резервуарів, предметів домашнього вжитку, що стикаються з прісною водою при температурі не вище $60-70^\circ C$, а також для захисту виробів з чорного металу від бензину і масла та ін. За площею покриттів, що наносяться, цинкування складає близько 58,8%. Такого поширення цинкові покриття набули за рахунок хімічної стійкості, низької вартість цинку в порівнянні із більшістю кольорових металів, високої чистоти осадженого покриття та хороших механічних властивостей. Найбільшого застосування набула оцинкована стрічка, яка виготовляється на автоматизованих лініях гарячого цинкування методом занурення в розплавлений цинк. Такі види покриття, як розпилювання та металізація дають змогу покривати вироби будь-якого розміру. Електролітичне цинкування проводиться зазвичай у кислих та лужно-ціаністих електролітах, а спеціальні добавки дозволяють отримувати блискучі покриття.

Мета дослідження. Проаналізувати вплив складу електролітів цинкування, розробити технологію нанесення гальванічного захисного блискучого цинкового покриття з використанням модернізованих кислотних електролітів цинкування.

Завдання дослідження. Використавши сучасні літературні джерела провести аналіз сучасних електролітів цинкування, визначити недоліки та переваги роботи кожного з них. Провести необхідні розрахунки для розробки проекту цеху технологічного процесу гальванічного нанесення блискучого цинкового покриття.

Об'єкт дослідження. Процес гальванічного нанесення блискучих цинкових покриттів на сталеві вироби. Технологія нанесення блискучого цинкового покриття з застосуванням кислого електроліту покращеного складу.

Методи дослідження. Аналіз закордонних та вітчизняних літературних джерел щодо основних типів електролітів цинкування, які мають найбільш широке застосування у сучасній електрохімічній промисловості.

Елементи наукової новизни. Запропоновано технологію нанесення гальванічного блискучого цинкового покриття з використанням модернізованого складу електроліту. В даній роботі показано, що модернізований склад електроліту включає всі переваги кислого хлористого цинкування - високу катодну ефективність, декоративне покриття. З метою зменшення витрат електричної енергії на одиницю готової продукції, було виконано розрахунок технологічного обладнання з вдосконаленням розміщення деталей та електродів у ванні.

Практична значимість. Охарактеризовано електроліти цинкування різного складу та режими нанесення гальванічного покриття, обґрунтовано вибір складу ефективного та економічно вигідного електроліту для подальшого застосування цих досліджень, задля отримання якісних цинкових покриттів.

Апробація отриманих результатів. Основні положення та результати роботи були представлені на The V International Scientific and Practical Conference «Trends in science regarding the creation of new teaching methods», (October 16-18, 2023, Madrid, Spain) та на Всеукраїнській науковій конференції «Освіта для сталого майбутнього: екологічні, технологічні, економічні і соціокультурні питання» (м. Київ, 18 жовтня 2023 р.). За результатами кваліфікаційної роботи, опубліковано статтю та тези.

1 ХАРАКТЕРИСТИКА ОСНОВНИХ СТАДІЙ ГАЛЬВАНІЧНОГО НАНЕСЕННЯ ЦИНКОВОГО ПОКРИТТЯ

1.1 Обґрунтування вибору технологічного процесу

Гальванічні покриття застосовуються в багатьох галузях промисловості та стали невід'ємною частиною нашого життя. Їх поділяють на три типи: захисні, захисно-декоративні та функціональні. Захисні покриття використовують для деталей, які експлуатуються в жорстких умовах, для захисту від корозії.

Захисно-декоративні покриття застосовуються в тих випадках, коли окрім захисних властивостей потрібен естетичний зовнішній вигляд. Функціональні потрібні для надання поверхні виробу необхідних фізичних властивостей, таких як електропровідність, зносостійкість і так далі.

Гальванічні покриття отримують шляхом осадження на поверхні виробів тонкого шару металу під дією струму з розчинів електролітів, які містять однойменні іони металів. Для електрохімічного нанесення покриттів використовують такі метали, як цинк, олово, хром, срібло, нікель та інші [1].

Цинк наносять на вуглецеві сталі, з метою їх протикорозійного захисту. Головною перевагою цинкових покриттів є їх висока корозійна стійкість у поєднанні з фізико-механічними властивостями, зовнішнім виглядом, пластичністю, міцністю зчеплення з основою тощо. Цинкові покриття захищають сталь як електрохімічно, в місцях пошкодження покриттів і в порах, в яких цинк зі сталлю утворює гальванічну пару, так і механічно екрануючи від доступу зовнішнього середовища. Цинк виконує функцію анодного («жертвовного») покриття, як більш електронегативний метал. Залізо знаходиться під катодним захистом і не руйнується до тих пір, поки в корозійному процесі бере участь цинкове покриття.

Цинк належить до електронегативних металів, маючи стандартний електродний потенціал $-0,786\text{В}$. При вмісті домішок інших металів, цинк відносно легко розчиняється в розчинах лугів і кислот. Розчиняючись в них хімічно чистий цинк взаємодіє з сірчистими сполуками, утворюючи сульфіди цинку. Цинкова поверхня у вологій атмосфері та воді, що містять кисень та

діоксид вуглецю, вкривається плівкою карбонатів, яка добре захищає метал від подальшої корозії.

Швидкість корозії цинку суттєво залежить від величини рН середовища: в інтервалі рН 7 – 12 вона мінімальна і суттєво зростає при відхиленні від вказаних значень [1].

Цинкові покриття широко застосовуються для захисту від корозії деталей машин, кріпильних деталей, сталевих листів, дроту, деталей широкого вжитку та інших, що знаходяться у різних кліматичних районах в атмосфері забрудненої SO_2 , а також у закритих приміщеннях з помірною вологістю та у приміщеннях забруднених газами та продуктами згоряння.

Крім того, цинкові покриття застосовуються для захисту від корозії водопровідних труб, поживних резервуарів, предметів домашнього вжитку (з чорного металу), що стикаються з прісною водою при температурі не вище $60-70^\circ C$, а також для захисту сталевих деталей від корозії які контактують з паливними рідинами, які містять сірчисті сполуки та мастила.

1.2 Підготовка поверхні виробів перед нанесенням гальванічного покриття

Підготовка поверхні металу перед нанесенням гальванічних покриттів суттєво впливає на їх якість та необхідна для забезпечення міцного зчеплення покриття з основним металом, створення умов для зниження його пористості та покращення зовнішнього вигляду. Забруднення з поверхні деталей (мастила, шліфувальні й полірувальні пасти, окалина, іржа) необхідно видалити.

Механічна обробка поверхні

Деталі, що поступають в гальванічний цех перед нанесенням покриття найчастіше підлягають механічній обробці.

Спосіб механічної обробки деталі обирається в залежності від ступеня забруднення і необхідної жорсткості поверхні. Кожен спосіб обробки характеризується певним діапазоном отриманої шорсткості поверхонь, формою і напрямом розташування мікронерівностей.

Перед нанесенням гальванічного покриття існують такі основні операції механічної підготовки поверхні деталей як:

- шліфування;
- полірування;
- вібраційно-магнітно-абразивна обробка;
- відцентрова абразивна і струменева гідро-абразивна обробка;
- галтування та інші.

Дивлячись на стан поверхні деталі, шліфування проводять з поступовим зменшенням зерна абразиву за декілька стадій.

При шліфуванні поверхні знімається тонкий шар металу: при використанні дрібнозернистого абразиву 0,01 - 0,03 мм та 0,1 - 0,2 мм крупнозернистим абразивним матеріалом. Зазвичай це відбувається на ділянках мікровиступів, що в свою чергу призводить до вирівнювання та згладжування покриття. [1]

Абразивне шліфування застосовують щоб позбутися грубих нерівностей та шорсткості. Як абразивні матеріали використовують оксиди, феруму, хрому, оксид силіцію, віденське вапно (суміш оксиду кальцію з невеликою домішкою магнію), алюмінію (глинозем). Речовинами, які зв'язують є парафін, стеарин, віск, технічне сало, а активуючими добавками – сірка та олеїнова кислота.

Для отримання декоративного блиску поверхні застосовують полірування. Для цього використовують м'які еластичні круги, які подібні до шліфувальних кругів, але без абразивного шару, на які наносять спеціальні пасти. Полірування супроводжується перерозподілом металу по поверхні та втиранням його на ділянках мікровпадин при проходженні хімічних та термохімічних процесів, що відбуваються під дією активних компонентів полірувальних паст. Склад пасти обирається з урахуванням матеріалу полірувального кола, марки металу виробу та стану поверхні[3].

Для деталей із сталі пропонується паста складу [2,3]:

Порошки шліфувальні 3; 4; 6 - 75 кг/м³ ;

Парафін - 10 кг/м³ ;

Гліцерин - 10 кг/м³ .

Для більш тоншого полірування можна брати наступні склади полірувальних паст:

склад № 1: паста Гої

склад № 2: оксид хрому-50 кг/м³ ;

стеарин - 40 кг/м³ ;

парафін - 10 кг/м³.

Після полірування поверхня деталі повинна відповідати вимогам – мінімальна величина шорсткості 0,32 мкм.

Шліфування та полірування є головними операціями механічної обробки поверхні деталей перед нанесенням гальванічного покриття.

При шліфуванні поверхні виробів відбувається зняття тонкої стружки металу гострими гранями абразивних матеріалів. Процесом шліфування усувають подряпини, вм'ятини та інші дефекти. В результаті отримують гладку і рівну поверхню [4].

Внаслідок механічного полірування утворюється дзеркальна поверхня покриття, із-за вирівнювання дрібних нерівностей попередньо шліфованої поверхні. Це досягається шляхом використання еластичних кругів різноманітної конструкції, які виготовлені з бязі, шкіри, фланелі, волока, фетру, спеціальних тканин, гуми, пластмаси та інших матеріалів.

Хімічне та електрохімічне знежирення

Поверхня деталі, що підлягає нанесенню гальванічного покриття, вкрита плівкою жирів та мастила. Ця плівка утворюється в результаті виготовлення деталі, її попередньої обробки, а також від дотику рук. Так як вона не змочується електролітом і перешкоджає осадженню металу, тому поверхню всіх виробів перед нанесенням цинкового покриттям знежирюють.

За своєю природою жири поділяються на омилювані – тваринного і рослинного походження та неомилювані – мінерального походження. Вони

майже нерозчинні у воді і способи їх видалення з поверхні метала відрізняються в залежності від їх природи.

Жири мінерального походження (неомилювані) досить непогано видаляються з поверхні деталей в органічних розчинниках. В свою чергу, органічні розчинники поділяють на дві групи – горючі та негорючі. До першої групи відносяться ацетон, керосин, толуол та інші нафтопродукти. Вони є пожежонебезпечними речовинами, які здатні утворювати з повітрям вибухонебезпечні суміші і їх застосування є можливим лише при використанні спеціального обладнання та приміщень, що відповідають нормам пожежної безпеки.

До другої групи органічних розчинників належать хлоровані вуглеводні: чотирьоххлористий вуглець, трихлоретилен, перхлоретилен, тетрахлоретилен, хлороформ. Хлоровані вуглеводні пожежобезпечні, але достатньо токсичні і застосовувати їх можна тільки при наявності спеціального закритого обладнання із дотриманням відповідних правил техніки безпеки.

Токсичність і пожежонебезпечність більшості органічних розчинників є їх головними, серйозними недоліками, у зв'язку з цими факторами їх намагаються виключати з виробництва, замінюючи на негорючі, водорозчинні технічні миючі засоби (ТМЗ). Лужні ТМЗ (МЛ-51, МС-6, МС-8, деталан тощо) містять неорганічні солі – $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ або Na_3PO_4 , Na_2CO_3 , Na_2SiO_3 та ПАР у різних співвідношеннях.

Очистка деталей в технічних миючих засобах, як і знежирення в органічних розчинниках, є операцією, що передуює подальшій підготовці поверхні в гальванічній лінії. В лужних розчинах відбувається повне видалення жирової плівки. До складу лужних розчинів для хімічного знежирення входять луги, сода, фосфати, силікати, кальцинована сода та поверхнево-активні речовини (ПАР).

Сода та луги омилюють та розчиняють жири, а фосфати пом'якшують воду та покращують миючу здатність розчину. Також, фосфати попереджують

повторному осадженню забруднень на поверхню деталей, утримуючи їх у миючому розчині в диспергованому стані.

У лужних розчинах мінеральні мастила не омилуються і не розчиняються, але поверхневий натяг на межі «мастило - розчин» у присутності емульгаторів знижується. При утворенні емульсії, що піднімається на поверхню розчину – плівка мастила розривається, мастило формується в крапельки і відривається від поверхні металу. В якості емульгаторів, в лужних знежирюючих розчинах використовують силікати та поверхнево-активні речовини, що мають високу адсорбційну здатність.

При знежиренні у лужному розчині механічний вплив різного характеру значно прискорює знежирювальну дію. Тому, перемішування, струменева подача розчину на деталі, ультразвукове коливання тощо рекомендується застосовувати для прискорення та підвищення ефективності процесу видалення жирових забруднень з поверхні деталей.

Для видалення жирових забруднень частіше використовують електрохімічну обробку поверхні деталей, оскільки бульбашки кисню або водню, що виділяються на поверхні, сприяють відриву жирових часточок та інших забруднень. Аноди повинні бути виготовлені з нікелю або полірованого смугового заліза, краще використовувати нікельоване, із товщиною шару нікелю 0,04-0,05 мкм. Деталі варто підвісити у ванну як катод, а при завершенні процесу на 30 секунд переключити на анод. Допустимим є проводити знежирення тільки на аноді без включення на катод. Важливо не допускати підключення корпусу ванни як анод!

У таблиці 1.1 наведено склад електролітів та режими електрохімічного знежирення

Таблиця 1.1 - Склад електролітів та режими електрохімічного знежирення

Найменування операції	Склад компонентів	Хімічна формула	Конц. г/л	t, °C	i, А/дм ²	U, В	τ, хв.
Електрохімічне знежирення	Їдкий натрій	NaOH	5-15	50-70	3-10	3-12	до10
	Тринатрій фосфат	Na ₃ PO ₄	30-70				
	Сода кальцинована	Na ₂ CO ₃	20-25				
	Скло натрієве	Na ₂ SiO ₃	10-20				

Промивка в теплій воді

Для видалення з поверхні деталей залишків продуктів хімічних реакції та розчинів, які залишилися після знежирення, вони промиваються у теплій проточній воді при температурі 40-60°C. Промивку слід проводити 3-5-ти разовим зануренням деталей у ванну.

Промивка у холодній воді

Водопровідна вода, проточна без підігріву. Промивку слід проводити 3-5-ти разовим зануренням деталей у ванну. Поверхня деталей після промивки повинна бути повністю змочена водою.

Хімічне травлення

Після процесу знежирення деталь потрібно очистити від найтонших оксидних плівок, що утворюються на поверхні металу у результаті навіть короткострокового зберігання. При травленні в сірчаній кислоті є ймовірність утворення нерозчинних оксидів заліза, тому для травлення пропоную використовувати соляну кислоту. Для зменшення швидкості виділення водню та запобігання перетравлювання поверхні деталі використовують уротропін[5]

Пропонується проводити травлення в розчині наступного складу і концентрації (г/дм³): HCl – 120-200, уротропін – 40-50, Травлення проводиться при температурі 20° С, на протязі 10-ти хвилин. Після травлення деталь в обов'язковому порядку промивається в холодній проточній воді неодноразовим зануренням [5].

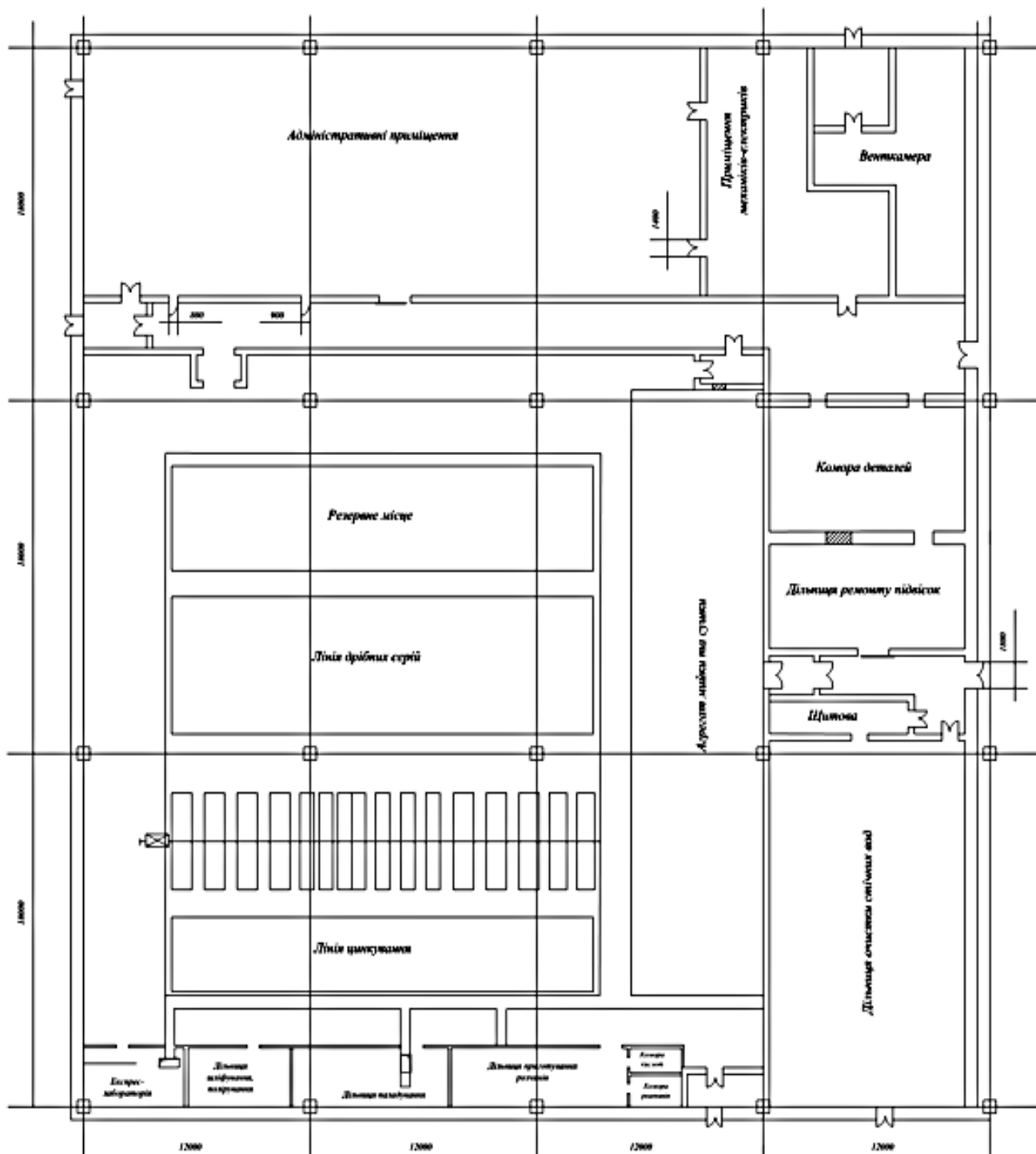


Рисунок 1 - Рекомендований проект гальванічного цеху

1.3 Характеристика обладнання для нанесення покриття

Головним типом устаткування гальванічних цехів і дільниць для нанесення покриття є гальванічні ванни, які застосовують для проведення як підготовчих, так і основних процесів нанесення покриття, а також кінцевих операцій електрохімічної або хімічної обробки поверхні деталей. Всі гальванічні ванни повинні відповідати деяким загальним вимогам: хімічна інертність матеріалу ванни до робочого розчину, герметичність, зручність і безпека обслуговування, здатність витримувати необхідний тепловий режим. Ванни для гальванічних покриттів виробляють із нержавіючої сталі та покривають внутрішню поверхню ізоляційними матеріалами різного типу. Для захисту ванн з застосуванням кислих електролітів, до прикладу, використовують вініпласт [4]. Важливим є підведення електричного струму з його рівномірним розподілом по поверхні деталей і меншими втратами електричної напруги [6]. Такі ванни встановлюють на опорних електроізоляторах. На бортах ванни у спеціальних електроізоляторах встановлюють мідні або латунні штанги для підведення електричного струму до деталей. Штанги мають прямокутний або круглий переріз, їх діаметр не менше 25 мм.

Аноди

При електроосажденні цинкових покриттів із сульфатних електролітів, зазвичай, використовують розчинні цинкові аноди марок Ц0, Ц1, Ц2. Аноди завішують на штанги за допомогою мідних, латунних або сталевих гачків. Важливим фактором є не допустити контакт мідних або латунних гачків з електролітом. Іони Zn^{2+} насичують розчин за рахунок розчинення цинкових анодів, і коли іонів цинку накопичується багато, частину цинкових анодів міняють на сталеві, щоб довести концентрацію Zn^{2+} до оптимального рівня. Вихід за струмом становить 100%, саме за рахунок розчинних анодів. При довгому знаходженні ванни в неробочому режимі відбувається накопичення іонів цинку в електроліті через хімічне розчинення анодів. Тому при простоях ванни з неї необхідно виймати цинкові аноди [7].

При експлуатації анодів слід притримуватися наступних правил:

- перед застосуванням анодів перший раз їх слід протравити. Цинкові аноди травляться у соляній кислоті;
- крюки для підвіски анодів на анодні штанги повинні бути вище рівня електроліту;
- для попередження засмічення електроліту анодним шламом їх слід зберігати в чохлах із тканин, які є стійкими до дії електролітів. Матеріалом для чохла слугують: бязь, капронова тканина, тканина фільтрувальна хлоринова та інші;
- після закінчення роботи аноди слід виймати із ванни, розчохлайти та чистити до металічного блиску стальними щітками;
- задля рівномірного покриття деталей із всіх боків повинно бути правильне розподілення анодів по штангам;
- глибина занурення анодів повинна відповідати глибині занурення підвісок з деталями;
- залишки електроду вміщують у плоску рамку із металу, нерозчинного в електроліті, для більш повного використання матеріалу аноду[8].

1.4 Вибір електроліту для нанесення гальванічного покриття

Електроліти для цинкування можна розділити на дві основні групи:

- 1) прості кислі (сірчаноокислі, хлористі, борфтористо-водневі), в яких цинк знаходиться у вигляді гідратованих іонів
- 2) складні комплексні, в яких цинк присутній у вигляді комплексних іонів, заряджених негативно (аніони) або позитивно (катіони).

З комплексних електролітів відомі лужно-ціаністі, лужно-неціаністі (цинкатні), пірофосфатні, аміакатні, амінокомплексні з різними органічними адендами та ін. У таблиці 1.2 наведено склад та режими роботи електролітів.

Таблиця 1.2 - Склад та режими роботи електролітів

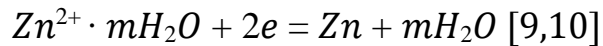
Складові компоненти	Кислі електроліти			Лужні електроліти		
		ZnSO ₄ ·7H ₂ O 200-300 г/л Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O 50-100 г/л Al ₂ (SO ₄) ₃ ·18H ₂ O 20-30 г/л Органічна добавка 8-10 г/л	Zn(BF ₄) ₂ 280-300 г/л NH ₄ BF ₄ 28-30 г/л NH ₄ Cl 28-30 г/л HBF ₄ (для створення рН)	ZnCl ₂ 40-50 г/л KCl 150-200 г/л H ₃ BO ₃ 25-30 г/л ЭКОЛ-цинк- БСК-А 30-50 г/л ЭКОЛ-цинк- БСК-Б 0,5-2,0 г/л	ZnO 40-45 г/л NaCN 80-85 г/л NaOH 40-60 г/л	ZnO 5 г/л NaOH 60 г/л Na ₂ SnO ₃ 0.3 г/л
Температура, °С	15-30	15-25	15-25	18-40	20-25	30-35
Густина струму, А/дм ²	1-4	10	0,5-3	1-4	2-3	5
Вихід за струмом, %	96-98	90	90-95	70-80	95-98	93-95
рН	3,6-4,4	1,4-2	4,5-5,5	8-8,2	8-8,4	8-8,3

Сульфатні електроліти

Головною складовою сульфатних електролітів цинкування є кристалогідрат ZnSO₄·7H₂O. Для збільшення електропровідності розчинів іноді використовують сульфат натрію.

Сульфатні електроліти мають низьку катодну поляризацію, тому осад, який сформувався має крупнокристалічну структуру. Цей є недолік, який можна виправити додаванням поверхнево-активних добавок, наприклад, декстрин. Через те, що разом із цинком на катоді виділяється водень, задля запобігання підлюговування електроліту використовують буфер - Al₂(SO₄)₃ або добавку алюмокалієвихквасців. При утворенні великої кількості гідроксиду алюмінію в об'ємі електроліту, розчин мутніє, що викликає необхідність додавання сульфатної кислоти. Розчинення анодів з сульфатного електроліту в процесі цинкування зазвичай проходить без проблем. При збільшенні температури розсіювальна здатність сульфатного електроліту зменшується.

При електролізі за густини струму вище 2 А/дм² є необхідність перемішувати та фільтрувати розчин. На катоді відбувається основна реакція:



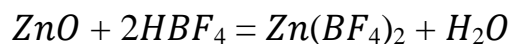
Склад електроліту вказано в таблиці 2.

Хлоридні електроліти

Порівнюючи із сульфатним, хлоридний електроліт цинкування, має більш високу розсіювальну здатність, але є досить агресивним по відношенню до обладнання через високий вміст іонів хлору. Основною складовою цього електроліту є $ZnCl_2$. Хлорид калію добавляється для збільшення електропровідності, а буферною добавкою слугує борна кислота. Для кращого зовнішнього вигляду та формування компактних покриттів були розроблені добавки для слабокислих електролітів цинкування – «ЭКОЛ-цинк-БСК-А» та «ЭКОЛ-цинк-БСК-Б».

Борфтористо-водневі електроліти

В останні роки в машинобудуванні для цинкування сталевих деталей нескладної конфігурації почали застосовувати борфтористоводневий електроліт. Основною складовою цих розчинів є $Zn(BF_4)_2$, який отримується взаємодією оксиду цинку з фторборатною кислотою:



До складу електроліту вводять HBF_4 до отримання кислотності $pH = 1 \div 2$. Цей електроліт забезпечує високу інтенсифікацію процесу цинкування. Світле, дрібнокристалічне щільне покриття отримують при режимі:

$$t_{ел} = 35 \div 40^\circ C \text{ і } D_k = 40 \div 50 \text{ А/дм}^2 .$$

Основними недоліками фторборатних електролітів є їх досить низька розсіювальна здатність, через що їх використовують для цинкування простих деталей; висока отруйність та агресивність через наявність іонів фтору, та досить висока вартість.

Ціанідні електроліти

Лужно-ціанідні електроліти цинкування мають досить високу розсіювальну здатність, що сприяє отриманню цинкових покриттів високої якості за рахунок утворення розчинних комплексів ціаніду натрію та NaOH, що забезпечує стабільність розчинів та постійність складу ціанідного електроліту.

Основною складовою ціанідних електролітів цинкування є комплексна сіль $\text{Na}_2[\text{Zn}(\text{CN})_4]$. Осадження цинку з ціанідного електроліту потребує великої енергії активації, що призводить до високої поляризації. Через це формуються рівномірний та дрібнокристалічний осад.

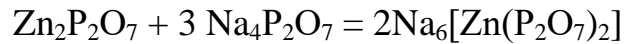
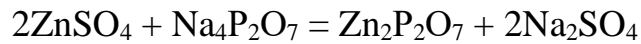
Недоліком процесу цинкування з ціанідних електролітів є низький вихід за струмом металу, висока токсичність розчинів, пасивація поверхні анодів, висока чутливість до присутності домішок в об'ємі електроліту, видалення яких пов'язане з рядом труднощів.

Цинкатні електроліти

Основним компонентом цинкатного електроліту є комплексна сіль цинку $\text{K}_2[\text{Zn}(\text{OH})_4]$ або $\text{Na}_2[\text{Zn}(\text{OH})_4]$ та відповідний луг. Цинк у даному електроліті присутній у вигляді іонів $\text{Zn}(\text{OH})_4^{2-}$. Цинкатні, електроліти на відміну від ціаністих нетоксичні й більш прості й стійкі, ніж ціаністи. Катодна поляризація в цинкатних електролітах без спеціальних добавок виражається невеликою величиною й мало залежить від концентрації Zn й лугу. Вихід за струмом в інтервалі припустимих густин струму практично не змінюється й дорівнює приблизно 95-98%. Покращення осадів із цинкатних електролітів досягається введенням в об'єм невеликої кількості солей ртуті, свинцю або олова. Їх наявність сприяє підвищенню розсіювальної здатності електролітів. Все це разом з його дешевизною робить цей електроліт найбільш зручним у застосуванні для нанесення покриттів.

Пірофосфатні електроліти цинкування

Основною складовою електроліту є комплексна сполука, що утворюється при взаємодії цинк сульфату з пірофосфатом натрію або калію. Спочатку випадає драглистий осад $\text{Zn}_2\text{P}_2\text{O}_7$, який потім у надлишку пірофосфату натрію розчиняється з утворенням комплексної сполуки цинку:



Процес осадження цинку з пірофосфатних електролітів проходить при підвищеній катодній поляризації, що зумовлено дифузійними обмеженнями.

Позитивний вплив на якість катодних осадів та кінетику катодного процесу мають органічні речовини–добавки: анісовий альдегід, сахарі, декстрин, тіокарбамід, фурфурол та інші.

Найкращі за якістю осади отримуються при температурі $T=50^\circ\text{C}$. Блискучі осади отримують за температури $T=30\text{--}35^\circ\text{C}$ в присутності фурфуролу або декстрину. При зростанні температури електроліту під час осадження блиск покриття зникає. Цинкові аноди є схильними до пасивації. В якості депасиваторів в розчинах використовують сегнетову сіль, цитрат або хлорид амонію. При додаванні депасиваторів площа анодів має бути у 2 – 3 рази більшою, ніж катодна.

Склад пірофосфатного електроліту цинкування:

$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 90-95 г/л

$\text{K}_4\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 350-370 г/л

NH_4Cl 75-85 г/л

Декстрин 2 г/л

Якість осадів і швидкість осадження залежать від складу і природи електролітів, які визначаються характером і ступенем зміни катодних потенціалів. Чим більша катодна поляризація, тим більш дрібнозернисті й рівномірні за товщиною покриття осаджуються на деталі. У кислих електролітах без спеціальних добавок катодна поляризація невелика, хоча осади з кислих електролітів задовільні за структурою, але менш рівномірні по товщині шару, ніж із ціаністих і інших комплексних електролітів. Найбільш ефективними є борфтористоводневі електроліти, тому що вони мають високі буферні властивості. Кислі електроліти здебільшого застосовуються для цинкування виробів простої форми (листи, стрічки, дріт, стержні, пластини та ін.).[11,12,13] Порівнюючи електролітичні розчини з екологічної точки зору, можна зробити

висновок, що слабокислі електроліти небезпечніші ціанідних. Це пояснюється проблемою утилізації і нейтралізації технологічних відходів виробничих процесів.

Обґрунтування вибору електроліту цинкування

Найбільшого застосування серед електролітів цинкування сталевих виробів не складної конфігурації набув сульфатний електроліт з додаванням різних органічних добавок. Крім того, такі електроліти все більше застосовуються для нарощування на сталь саме товстих шарів цинку.

В даній роботі за прототип було обрано стандартний промисловий сульфатний електроліт цинкування, застосування якого дозволяє отримувати рівномірні, гладкі, світлі осадки з виходом за струмом 94–95% в широкому діапазоні густин струму.

При нанесенні покриття з сульфатного електроліту більш рівномірні та щільні покриття світлого кольору були отримані при густині струму $i = 4 \text{ А/дм}^2$. Це доводять фото осадків (рис. 1.1) та знімки, отримані за допомогою металографічного мікроскопа (рис. 1.2).

Склад електроліту №1:

$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 215 г/л

$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ – 30 г/л

$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ – 50 г/л

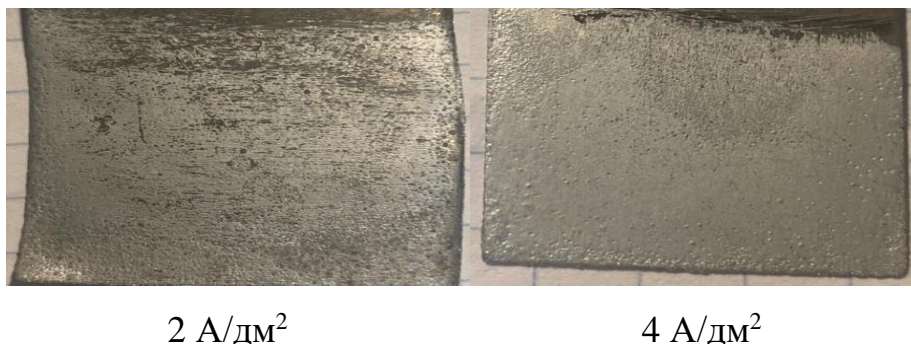
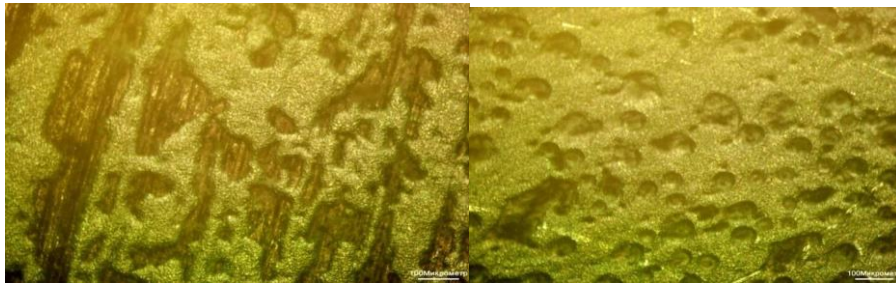


Рисунок 1.1 – Зовнішній вигляд осадків цинку, осаджених з електроліту № 1



2 А/дм²

4 А/дм²

Рисунок 1.2 – Фото осадів цинку, осаджених з електроліту № 1, отримані за допомогою металографічного мікроскопа

Введення нафталіну та динатрієвої солі призводить до покращення зовнішнього вигляду та структури покриття. Як і з розчину електроліту без добавок, якісніші шари цинкового покриття отримано при густині струму $i = 4 \text{ А/дм}^2$ (рис.1.3 та рис. 1.4).

Склад електроліту №2:

$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 215 г/л

$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ – 30 г/л

$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ – 50 г/л

Нафталін – 1,5 г/л

Дисульфокислий - 1 г/л

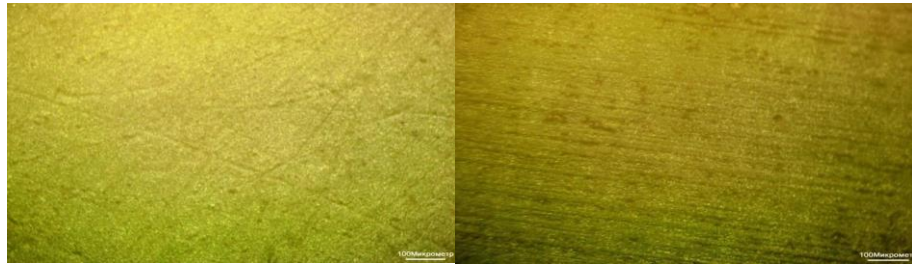
Динатрієва сіль – 1 г/л



2 А/дм²

4 А/дм²

Рисунок 1.3 – Зовнішній вигляд осадів цинку, осаджених з електроліту № 2



2 А/дм²

4 А/дм²

Рисунок 1.4 – Фото осадів цинку, осаджених з електроліту № 2, отримані за допомогою металографічного мікроскопу

Проаналізувавши якість даних покриттів, величини виходу цинку за струмом та швидкість осадження шарів, було встановлено, що оптимальним в данному випадку буде застосування сульфатного електроліту з використанням органічної добавки.

В якості такої добавки обрано лимонну кислоту, яка впливає на розсіювальну здатність електроліту і спрєє отриманню гладеньких щільних осадів.

На фото осаді при густині струму 2 та 4 А/дм² та при концентраціях лимонної кислоти 2 та 20 г/л. (рис. 1.5 та рис.1 б)

Склад електроліту №3:

ZnSO₄· 7H₂O – 215 г/л

Al₂(SO₄)₃· 18H₂O – 30 г/л

Na₂SO₄· 10H₂O – 50 г/л

Лимонна кислота – 2 г/л

Склад електроліту №4:

ZnSO₄· 7H₂O – 215 г/л

Al₂(SO₄)₃· 18H₂O – 30 г/л

Na₂SO₄· 10H₂O – 50 г/л

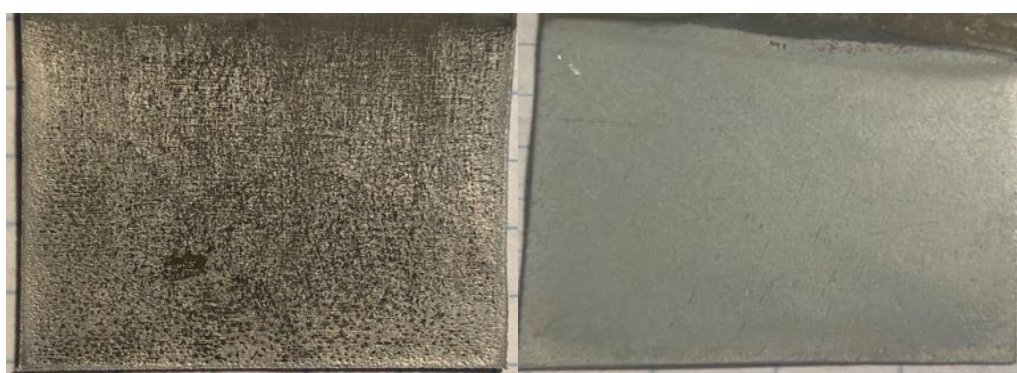
Лимонна кислота – 20 г/л



2 А/дм²

4 А/дм²

Рисунок 1.5 – Зовнішній вигляд осадів цинку, осаджених з електроліту № 3

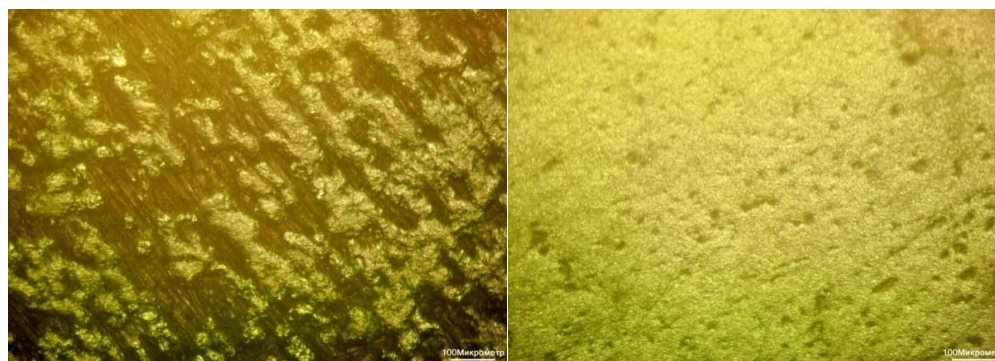


2 А/дм²

4 А/дм²

Рисунок 1.6 – Зовнішній вигляд осадів цинку, осаджених з електроліту № 4

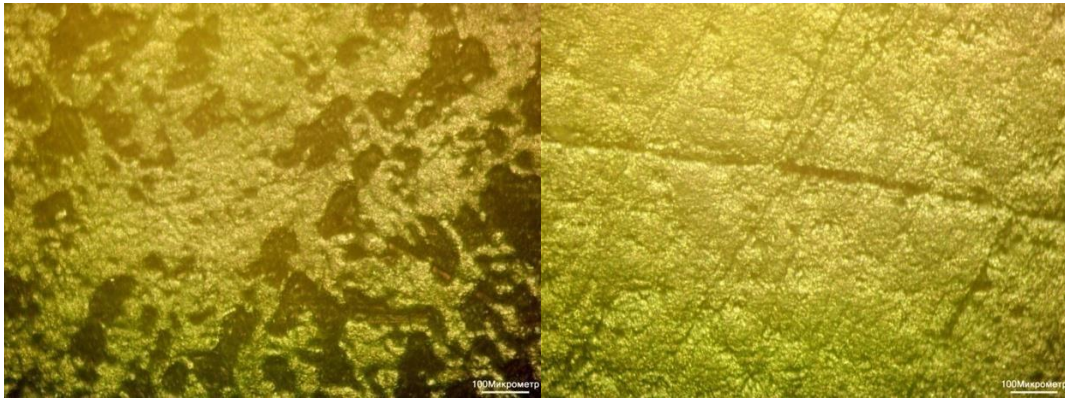
Менша пористість та більша рівномірність цинкового шару також чітко видно на знімках зроблених за допомогою металографічного мікроскопа (рис.1.7 та рис. 1.8).



2 А/дм²

4 А/дм²

Рисунок 1.7 – Фото осадів цинку, осаджених з електроліту № 3, отримані за допомогою металографічного мікроскопу



2 А/дм²

4 А/дм²

Рисунок 1.8 – Фото осадів цинку, осаджених з електроліту № 4, отримані за допомогою металографічного мікроскопу

Вибір сульфатного електроліту також обумовлено його більш низькою вартістю в порівнянні з цинкатним електролітом, стабільністю при роботі та екологічною безпечністю, тобто легкістю утилізації перед скиданням в загальну каналізацію. В даній роботі досліджено кислотні електроліти цинкування. З результатів досліджень видно, що застосування сульфатного електроліту цинкування дозволяє отримувати рівномірні, гладкі, світлі осади з виходом за струмом 94–95 %. При додаванні органічних добавок, а саме лимонної кислоти з вмістом її 20 г/л, шари цинку є найбільш щільні, рівномірні за структурою та кольором. Також визначено оптимальну густину струму осадження, яка становить $i=4$ А/дм² і дозволяє формувати задовільні покриття на сталевих поверхнях.

1.5 Приготування та коригування складу електроліту

Щоб приготувати сульфатний електроліт всі компоненти потрібно розчинити в окремих ємкостях з водою, нагрітою до температури 50 – 60 °С. Після того як розчин відстоявся та відфільтрувався його зливають в робочу ванну і доливають води до заданого об'єму. Перевіривши рН електроліт корегують 2 – 3 % - вим розчином сульфатної кислоти або натрій гідроксиду та пропускають струм з тимчасовими катодами при напрузі 1, 0 – 1,5 В та густині струму 0, 5 – 0,8 А/дм² до одержання світлих гладких покриттів, після цих дій приступають до нанесення покриття [14]. Розвівши декстрин в холодній воді

його додають в електроліт, який завчасно підігріли до 70 °С. За даними хімічного аналізу корегують електроліт, додаючи окремі компоненти до заданого складу. Раз на місяць електроліт підлягає фільтрації, а робоча ванна очищенню. Викачавши із ванни приготування електроліт, його піддають корегуванню. Ванну чистять від осаду і деталей, миють і сушать. Аноди зачищають до блиску, миють і поміщають в спеціальні бязеві чохла. Дивляться, чи немає тріщин у футеруванні. Якщо спостерігаються тріщини їх негайно потрібно заварити. Електроліт з ванни приготування фільтрують і заповнюють робочу ванну. На завчасно вичищених штангах завішують у ванни аноди. Аналіз електроліту на вміст іонів цинку проводиться два рази на тиждень, корегувати електроліт треба за даними проведеного хімічного аналізу. Задля збереження постійної концентрації цинку в електроліті проводиться регулювання анодного розчинення цинку [14].

1.6 Контроль якості гальванічного покриття

Цинкові покриття мають відповідати певним вимогам, які пред'являються до зовнішнього вигляду, товщини, пористості й міцності зчеплення основи з металом. Від якості металу основи істотно залежить і якість осадженого покриття, саме через цей фактор контролю слід піддавати не тільки покриття, а й основу на яку проходить осадження цинку. Під час контролю металу основи перед самим процесом покриття, потрібно провести аналіз шорсткості поверхні та наявність дефектів.

1.6.1 Контроль товщини покриття

Для контролю товщини покриття рекомендовано використовувати один з методів: метод струменя, металографічним, метод краплі.

Для контролю місцевої товщини покриття при товщині 3-30 мкм на поверхні 0,3 см² слід застосовувати метод струменя. Цей метод полягає у визначенні часу розчинення покриття під дією струменя розчину, який подають з капіляра з певною швидкістю під кутом до поверхні або за об'ємом розчину, що використовували на руйнування [4,1].

Металографічний метод потрібно застосовувати під час налагодження процесу, як арбітражний. Для цього методу робиться розріз деталі із покриттям, потім на цьому зрізі готують металографічний шліф і використовують різні оптичні прилади, вимірюють товщину утвореного покриття.

Так як у дипломному проєкті цинкове покриття наноситься на листи металу, то для контролю товщини покриття слід застосувати метод краплі.

Для вимірювання місцевої товщини покриття застосовується метод краплі. На поверхню покриття за допомогою краплинної установки наносять краплі розчину, які спроможні розчинити металічне покриття. Час дії краплі на поверхні виробу сталий. Опісля краплю прибирають та наносять наступну до того стану, поки все покриття не буде зруйновано. Товщину покриття встановлюють по калібрувальному графіку, залежно від кількості крапель, які використали на повне руйнування покриття [15].

Краплинний метод не використовують задля вимірювання товщини покриття на складнопрофільованих та дрібних деталях, через те що крапля розчину не може затриматися необхідний час на досліджувальній ділянці.

1.6.2 Контроль зовнішнього вигляду покриття

Контроль зовнішнього вигляду покриття проводять на 100 % деталей візуально або за допомогою мікроскопа у добре освітленому приміщенні на відстані 25 см від контрольованої поверхні для виявлення можливих дефектів: шорсткості покриття, наростів на кутах виробів, наявності сторонніх часток та плям, місць відшаровування та непокритих ділянок [16].

На вигляд покриття повинно задовольняти:

- колір покриття, отриманого з процесу цинкування повинно бути від яскраво-сірого з блакитним відливом (при безбарвній пасивації) і до темно-сірого;

- на поверхні покритих деталей можуть допускатися: сліди від механічної обробки, прокату та інші відхилення, що дозволено стандартами або технічними умовами на метал основни, плями або темні смуги у важкодоступних для зачистки отворах;

- на поверхні деталей, які покриті осадом металу не є браком наступні ознаки: нерівномірність блиску, сліди від стікання води, «зони засвітлення», що утворилися при контролі вимірювальними інструментами та приладами [4,1].

1.6.3 Методи визначення пористості покриття

Для того щоб визначити пористість покриття відбирають з кожної партії від 0,1 до 10 % деталей, але не менше 3 штук. Використовують методи накладання фільтрувального паперу або паст.

Метод накладання фільтрувального паперу застосовують для визначення пористості катодних металічних покриттів на деталі простої форми зі сталі, міді та її сплавів, тоді як для деталей будь-якої форми та розмірів, зазвичай, використовують метод нанесення паст спеціального складу [6].

1.6.4 Контроль міцності зчеплення

Для контролю адгезії (міцності зчеплення) покриття до металу основи найчастіше використовують один з наступних методів: метод крацювання; метод нанесення сітки подряпин; метод гідрофобізування.

При застосуванні методу крацювання поверхню покриття крацюють латунними щітками з діаметром дроту 0,3 мм протягом 15 сек. На якісно нанесеному покритті не повинно утворюватись здуття та відшаровування покриття.

При використанні методу нанесення сітки подряпин на поверхню досліджуваного покриття, які завтовшки не більше 20 мкм, стальним вістрям наносять 4-6 паралельних ліній глибиною до металу основи та на відстані 2,0-3,0 мм один від одного і 4-6 перпендикулярних до них ліній. Лінії повинні проводитися в одному напрямку. На поверхні, яку перевіряють не повинно бути відшарування та здуття покриття [17].

Здійснювати контроль міцності зчеплення можна також методом нагрівання покриття до температури $T = 200$ °C та витримувати протягом 1 години з подальшим візуальним оглядом поверхні покриття. На досліджуваній поверхні не повинно спостерігатися здуття або відшаровування покриття [18].

1.6.5 Видалення недоброякісних покриттів

На поверхні покритої цинком деталі не є браком наступні ознаки: нерівномірність блиску й кольору; сліди від стікання води; відсутність покриття в місцях контакту деталі з кріпленням, що перебуває на неробочій поверхні деталі; зміна яскравості кольору після нагрівання [19].

Видалення недоброякісного цинкового покриття з поверхні сталевих виробів здійснюють за допомогою розчину наступного складу:

- 5- 10% - вий розчин соляної кислоти кімнатної температури;
- окис або хлорид сурми (3-5 г/л) додають для зменшення розчинення сталі;
- також для розчинення цинку можна використати 10-15%-вий розчин лугу.

Висновки до розділу 1

Для отримання якісного цинкового покриття потрібно ретельно підготувати поверхню деталей шляхом здійснення ряду наступних операцій: механічна обробка початкового зразка, хімічне та електрохімічне знежирення, травлення.

Головними вимогами щодо електролітів, які застосовуються для осадження цинкового покриття, є задані декоративні, фізико-хімічні та механічні властивості осаду, висока швидкість осадження та рівномірний розподіл металу, стабільність електроліту.

Для цинкування сталевих виробів не складної конфігурації найбільшого застосування набув сульфатний електроліт з додаванням різних органічних добавок. Такі електроліти все більше знаходять застосування для нарощування на сталь саме товстих шарів цинку.

Провівши аналіз літературних джерел, було з'ясовано, що використання стандартного промислового сульфатного електроліту цинкування (табл. 1, без декстрину) дозволяє отримувати рівномірні, гладкі, світлі осадки з виходом за струмом 94–95% в широкому діапазоні густин струму. Більш рівномірні щільні покриття світлого кольору отримують при густині струму $i = 4 \text{ А/дм}^2$.

При додаванні органічних речовин формується менш пористий рівномірний осад за рахунок підвищення поляризації та зростання розсіювальної здатності розчину. Крім цього цинкове покриття здобуває світло-сіре забарвлення з малопомітним світло-блакитним відтінком.

Для покращення властивостей покриття було обрано добавку лимонна кислота, яка впливає на розсіювальну здатність електроліту і сприяє отриманню гладеньких щільних осадів. Використовуючи електроліт з вмістом лимонної кислоти 10-20 г/л, шари осажденного цинку виходять найбільш щільні, рівномірні за структурою та кольором.

Також вибір сульфатного електроліту зумовлено його більш низькою вартістю порівнюючи з цинкатним електролітом, стабільністю при роботі та екологічною безпечністю, а саме легкістю та дешевизною утилізації перед скиданням в загальну каналізацію [20].

Виходячи з вищесказаного запропоновано наступний склад електроліту:

$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 215 г/л

$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ – 30 г/л

$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ – 50 г/л

Лимонна кислота – 20 г/л

При густині струму $i = 4 \text{ А/дм}^2$

2 ТЕХНОЛОГІЧНІ РОЗРАХУНКИ

2.1 Характеристика деталей, які підлягають обробці. Вибір товщини цинкового покриття

В гальванічному цеху здійснюють електрохімічне нанесення цинкового покриття на заздалегідь підготовлені сталеві поверхні або відновлення деталей електролітичним осадженням металу.

Для нанесення цинкового покриття в даному проекті обрали куток L-подібний, який застосовується в будівництві як захисний елемент. Основними вимогами до даної деталі є висока механічна міцність, корозійна стійкість та зносостійкість. Вона виготовлена зі сталі 40, маса деталі становить 0.5 кг, площа поверхні, що покривається, складає 0.42 дм². Схему деталі наведено на рисунку 2.1.

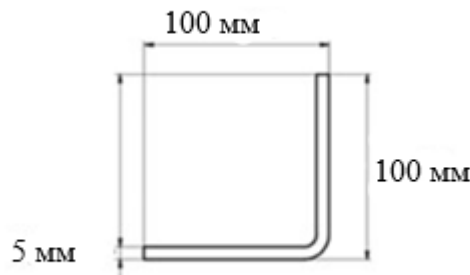


Рисунок 2.1 - . Схема деталі

2.2 Технологічний процес цинкування

У таблиці 2.1 наведено Технологічна карта процесу цинкування

Таблиця 2.1 - Технологічна карта процесу цинкування

Найменування операції, зміст та час (хв)	Обладнання	Реагенти	Концентрація, г/л	Температура, °С	Густина струму, А/дм ²
1	2	3	4	5	6
2. Електрохімічне знежирення (катодне) (3-5 хв)	Ванна стаціонарна	Натрій гідроксид Натрій карбонат Натрій ортофосфат Скло натрієве	30-40 20-30 50-60 10-20	70-90	2-10
2. Електрохімічне знежирення (катодне) (3-5 хв)	Ванна стаціонарна	Натрій гідроксид Натрій карбонат Натрій ортофосфат Скло натрієве	30-40 20-30 50-60 10-20	70-90	2-10

продовження таблиці 2.1

1	2	3	4	5	6
3. Промивка в гарячій воді (1 – 2 хв)	Ванна стаціонарна	Вода водопровідна	-	70-90	-
4. Промивка в холодній воді (0,5 – 1 хв)	Ванна стаціонарна	Вода водопровідна	-	15-25	-
5. Травлення (10 хв)	Ванна стаціонарна	Хлоридна кислота Уротропін	120-200 40-50	15-25	-
6. Промивка в холодній воді (1 – 2 хв)	Ванна стаціонарна	Вода водопровідна	-	15 – 25	-
7. Цинкування (18,6 хв) рН=3,5-4	Ванна стаціонарна	ZnSO ₄ · 7H ₂ O Al ₂ (SO ₄) ₃ · 18H ₂ O Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O Лимонна кислота	215 30 50 10-20	15-18	4
8. Вловлювання (1– 2 хв)	Ванна стаціонарна	Вода водопровідна		15 – 25	
9. Промивка в холодній воді (1 – 2 хв)	Ванна стаціонарна	Вода водопровідна		15-25	
10. Сушка (10 хв)	Сушильна шафа			80 – 90	

2.3 Визначення дійсного фонду часу роботи обладнання

Час роботи обладнання залежить від режиму роботи підприємства, технологічної схеми процесу та особливостей технологічного обладнання [11].

Номінальний фонд часу роботи обладнання T_n за рік обчислюють з врахуванням кількості календарних днів (365) без вихідних (104) та святкових (10) днів. Тому при однозмінній роботі та п'ятиденному робочому тижні тривалістю 40 год номінальний фонд часу роботи обладнання складає приблизно

$$T_n = \{ [365 - (104 + 10)] 40 / 5 - 6 \} = 2002 \text{ год}$$

Враховують ще скорочені передсвяткові дні (6 год)

Дійсний річний фонд часу роботи обладнання T_d (год) визначають з урахуванням T_n та загальних річних витрат часу на можливі простої обладнання ($K_{пр}$). При роботі автоматизованого обладнання в одну зміну $K_{пр}$ складає 8 %, тобто

$$T_d = T_n - K_{пр} \cdot T_n$$

$$T_d = 2002 - 0,08 \cdot 2002 = 1842 \text{ год}$$

2.4 Визначення виробничої програми цеху

Для визначення річної виробничої програми P_p загальну площу покриття $P_z=12000$ необхідно збільшити на величину виправного браку виробів, який складає зазвичай 0,5 – 3 % річного обсягу (m^2)

$$P_p = P_z + K_{бр} \cdot P_z$$

$$P_p = 12000 + 0,03 \cdot 12000 = 12360 \text{ м}^2/\text{рік}$$

Добова виробнича програма складає:

$$P_{доб} = P_z / T_{доб},$$

де $T_{доб}$ – кількість робочих діб у році.

$$P_{доб} = 12360 / 251 = 49.2 \text{ м}^2/\text{доб}$$

Годинна виробнича програма $P_{год}$

$$P_{год} = P_p / T_d$$

$$P_{год} = 12360 / 1842 = 6,7 \text{ м}^2/\text{год}$$

2.5 Вибір виду обладнання для електрохімічного цинкування, розрахунок його кількості та габаритних розмірів

Вихідними даними для проведення розрахунку є:

Обсяг річної виробничої програми — 12360 m^2 /рік

Габаритні розміри деталі – 100 мм × 100 мм

Товщина покриття δ_n — 20 мкм

Час обробки однієї завантажувальної одиниці τ складається із двох величин

$$\tau = \tau_m + \tau_{об},$$

де τ_m – час обробки деталей у ванні, хв.

$$\tau_m = \frac{\delta_n \cdot d_m \cdot 60}{B_c \cdot K_e \cdot i_k},$$

$$\tau_m = \frac{20 \times 7,13 \times 60 \times 10^{-2}}{0,95 \times 1,21 \times 4} = 18,6$$

де $\delta_n = 20$ – товщина покриття, мкм;

$d_m = 7,13$ – густина металу покриття, г/см³ ;

$B_c = 0,95$ – катодний вихід за струмом;

$K_e = 1,21$ – електрохімічний еквівалент, г/А. год;

$i_k = 4$ – середня катодна густина струму, А/дм² .

$\tau_{об}$ – час обслуговування, який необхідний для завантажування деталей у ванну та їх вивантаження. Прийmemo

$\tau_{об} = 3$ хв.

$$\tau = \tau_m + \tau_{об} = 18,6 + 3 = 21,6 \text{ хв}$$

Витрати часу на початковий запуск обладнання, кінцеве вивантаження ванн, на допоміжні операції враховуємо за допомогою коефіцієнта $K_{обл}$: для роботи в 1 зміну – 1,03 [21].

Виходячи з річної виробничої програми P_p визначаємо сумарний час обробки усіх завантажень, год:

$$\tau_c = P_p \cdot \tau \cdot K_{обл} / 60,$$

$$\tau_c = 12360 \times 21,6 \times 1,03 / 60 = 4583 \text{ год}$$

Розраховуємо кількість одночасних завантажень усіх ванн, м²

$$Y_c = \tau_c / T_d$$

$$Y_c = 4583 / 1842 = 2,5 \text{ м}^2$$

2.6 Перерахунок діючого обладнання

Вибираємо ванну, яка призначена для гальванічного нанесення цинкового покриття, з наступними внутрішніми розмірами:

довжина $l = 1400$ мм,

ширина $b = 800$ мм,

висота $h = 1000$ мм.

Визначаємо, виходячи із габаритних розмірів ванни, довжину l_n та висоту h_n підвісного пристрою, (м):

$$l_n = l - 2l_1,$$

$$l_n = 1,4 - 2 \cdot 0,1 = 1,2 \text{ м},$$

де l – внутрішня довжина ванни, м;

$l_1 = 0,1$ м – відстань від краю підвіски до стінки ванни.

$$h_n = h - h_1 - h_2 - h_3,$$

$$h_n = 1,0 - 0,15 - 0,05 - 0,15 = 0,6 \text{ м},$$

де h – внутрішня висота ванни, м;

$h_1 = 0,15$ м – відстань від дна ванни до нижнього краю підвіски;

$h_2 = 0,05$ м – відстань від верхнього краю підвіски до дзеркала електроліту;

$h_3 = 0,15$ м – відстань від дзеркала електроліту до верхнього краю ванни.

На одній підвісці розміщується 70 деталей

$$S_n = S_d \cdot n_d,$$

$$S_n = 0,035 \times 70 = 2,45 \text{ м}^2$$

де S_d – поверхня однієї деталі, м^2 ;

n_d – кількість деталей на підвісці.

Визначають площу поверхні одноразового завантаження у ванну S_{03} , м^2 :

$$S_{03} = S_n \cdot N_n,$$

$$S_{03} = 2,45 \cdot 1 = 2,45 \text{ м}^2$$

де N_n – кількість підвісок, які одночасно завантажують у ванну.

На рисунку 2.2. наведено схему розташування деталей на підвісці

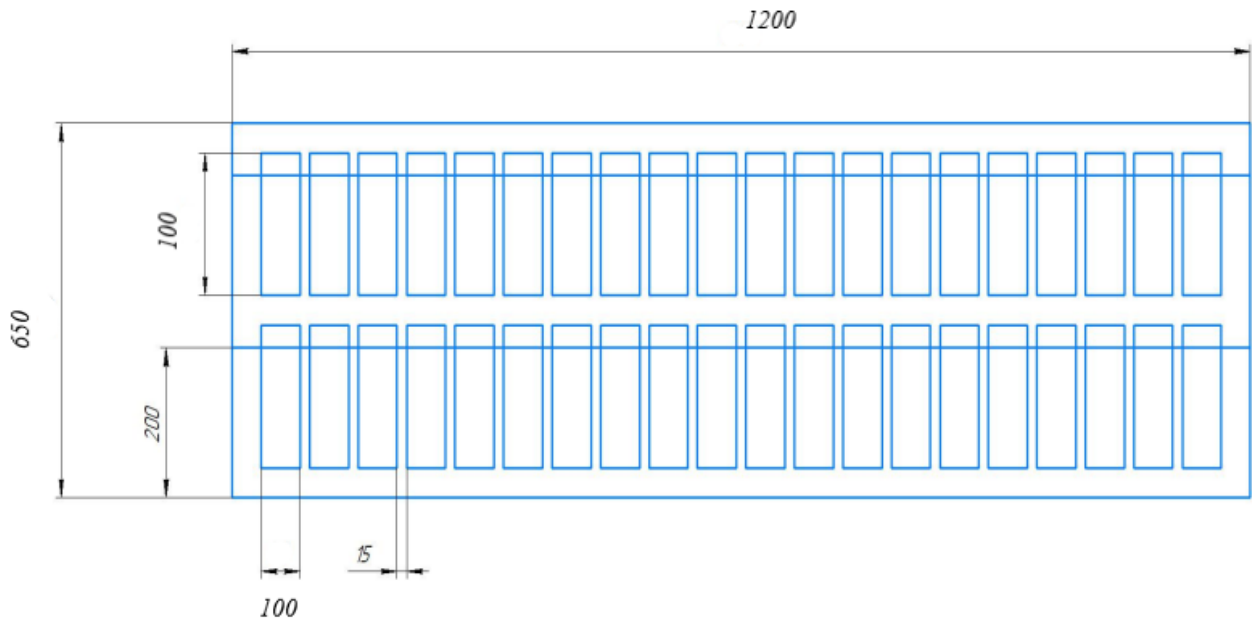


Рисунок 2.2 - . Схема розташування деталей на підвісі

Відстань між анодом і ближнім краєм підвіски з деталями l_{a-k} , (м):

$$l_{a-k} = (B - B_n - 2B_a - 2B_1) / 2,$$

$$l_{a-k} = (0,8 - 0,14 - 2 \times 0,01 - 2 \times 0,1) / 2 = 0,22 \text{ м},$$

де $B = 0,8$ м – внутрішня ширина ванни;

$B_n = 0,14$ м – товщина підвіски з деталями;

$B_a = 0,01$ м – товщина анодів;

$B_1 = 0,1$ м – відстань між анодом і боковою стінкою ванни.

Кількість ванн, необхідних для виконання річної виробничої програми:

$$П_v = Y_c / S_{oz}$$

$$П_v = 2,5 / 2,45 \approx 1 \text{ ванни}$$

Виходячи з визначеної кількості ванн, розраховуємо річну продуктивність вибраного обладнання:

$$P_p = S_{oz} \times П_v \times T_d \times 60 / \tau \times K_{obl}$$

$$P_p = 2,45 \times 1 \times 1842 \times 60 / 21,6 \times 1,0 = 12535 \text{ м}^2$$

$$K_{obl} = 1,0.$$

Коефіцієнт завантаження обладнання:

$$K_{зав} = P_p / P_p$$

$$K_{\text{зав}} = 12360 / 12535 = 98 \text{ або } 98\%$$

2.7 Баланс струму на ванні

Для подальшого вибору джерела живлення постійним струмом проводимо розрахунок сили струму на ванні [22].

$$I = K_1 \times i_k \times S_{03}$$

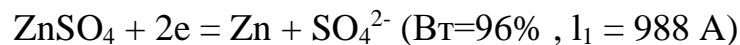
$$I = 1,1 \times 400 \times 2,45 = 1029 \text{ А.}$$

де i_k – катодна густина струму $3 \text{ А/дм}^2 = 300 \text{ А/м}^2$, $K = 1,1$

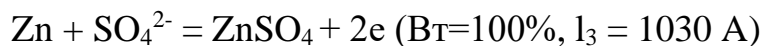
На електродах протікають наступні електрохімічні процеси:

К: (–)

А: (+)



А: (+)



Баланс кількості електрики наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 - Баланс електрики ванни цинкування

Надходження	Q, год	А· %	Витрати	Q, год	А· %
На катоді: від зовнішнього джерела струму	1029	100	Відновлення Zn^{2+} до Zn Відновлення водню	988 41	96 4
Разом	1029	100	Разом	1029	100
На аноді: від зовнішнього джерела струму	1029	100	Окислення Zn до Zn^{2+}	1029	100
Разом	1029	100	Разом	1029	100

2.8 Визначення напруги на ванні з підвісним пристроєм

Робоча напруга при заданій густині струму U_i визначає мінімальну величину напруги на джерелі струму $U_{\text{дс}}$. Визначаємо електричну потужність, яка витрачається на електроліз.

Напруга на ванні U складається із різниці електродних потенціалів анода і катода під струмом $E_a - E_k$, омичного падіння напруги в електроліті $\Delta U_{ом}$, у провідниках першого роду (електродах, струмопідводах у ванні, штангах) ΔU_I та в контактах ΔU_k :

$$U = E_a - E_k + \Delta U_{ом} + \Delta U_I + \Delta U_k ,$$

$$E_a - E_k = -0,88 - \langle -1,35 \rangle = 0,47 \text{ В}$$

Омичне падіння напруги в електроліті $\Delta U_{ом}$, В:

$$\Delta U_{ом} = \frac{(i_{ср} \cdot l_{a-k})}{\chi} \text{ або}$$

$$\Delta U_e = i_{ср} \times R_c \times l_{a-k}$$

де $i_{ср}$ – середня густина струму в міжелектродному просторі, A/m^2 , розраховується за формулою :

$$i_{ср} = \sqrt{i_k \times i_a} = \sqrt{400 \times 200} = 282,84 \text{ A/m}^2$$

$i_k=400 \text{ A/m}^2$ – середня катодна густина струму;

$i_a=200 \text{ A/m}^2$ – середня анодна густина;

E_k – потенціал катода;

E_a – потенціал анода;

χ – питома електропровідність електроліту, $30 \text{ См} \cdot \text{м}^{-1}$

$l_{a-k} = 0,22 \text{ м}$ – відстань між анодом і краєм підвіски з деталями;

$$\Delta U_{ом} = \frac{(282,84 \cdot 0,22)}{30} = 2,06 \text{ В}$$

Сума падіння напруги в електродах, провідниках 1 – го роду та в контактах ванни $\Delta U_I + \Delta U_k$ не перевищує 10 % загальної напруги на ванні U , В:

$$U = \frac{E_a - E_k + \Delta U_{OM}}{0,9}$$

$$U = \frac{0,47 + 2,06}{0,9} = 2,82 \text{ В}$$

Сума падіння напруги на електродах, провідниках і контактах ванни:

$$\Delta U_I + \Delta U_k = 0,1 \cdot U = 0,1 \cdot 2,82 = 0,282 \text{ В}$$

Мінімальна напруга джерела струму для ванни цинкування становить:

$$U_{дс} = 1,1 \cdot U_i = 1,1 \cdot 2,78 = 3,1 \text{ В}$$

Баланс напруги на ванні цинкування занесено в таблицю 2.3.

Таблиця 2.3 - Баланс напруги на ванні цинкування

Надходження	В	%	Витрати	В	%
Напруга на ванні	2,82	100	Різниця потенціалів під струмом $E_a - (-E_k)$	0,47	16,6
			Падіння напруги в електроліті $\Delta U_{ом}$	2,06	73,4
			Падіння напруги в електродах, контактах і провідниках $\Delta U_I + \Delta U_k$	0,282	10
Разом	2,82	100	Разом	2,82	100

2.9 Вибір джерела струму для живлення гальванічної ванни

Враховуємо силу струму на ванні $I_1 = 1029 \text{ А}$ та напругу $U = 2,82 \text{ В}$, було обрано в якості джерела постійного струму «ГИТ15К-1200Ч123-380-В3», що має характеристики [23].

Вихідна напруга – 1 – 12 В;

• Діапазон струму – 30 – 1200 А.

Потужність, необхідна для виконання програми:

$$N_{дс} = U \cdot I \cdot 10^{-3} = 2,82 \cdot 1029 = 2901 \text{ Вт} = 2,9 \text{ кВт}$$

Паспортна потужність:

$$N_{пасп} = U \cdot I = 12 \cdot 1200 = 14400 \text{ Вт} = 14,4 \text{ кВт}$$

Коефіцієнт завантаження:

$$K = N_{\text{ДС}} / N_{\text{пасп}} = 2901 / 14400 = 0,2$$

2.10 Баланс енергії

Електрична енергія $W_{\text{заг}}$, яка підводиться до електролізера, перетворюється в хімічну енергію $W_{\text{хім}}$ і в теплову енергію (джоулеву теплоту) $W_{\text{дж}}$.

$$W_{\text{заг}} = W_{\text{хім}} + W_{\text{дж}}.$$

Електричну енергію, яка витрачається на перебіг процесу в ванні, визначаємо за формулою:

$$W_{\text{заг}} = U \cdot I \cdot \tau \cdot 3600 \cdot 10^{-3}, \text{ кДж},$$

Баланс енергії складаємо на одну годину роботи ванни.

Електрична енергія, яка витрачається на перебіг процесу в одній ванні складає:

$$W_{\text{заг}} = (2,82 \cdot 1029 \cdot 18,6 \cdot 3600 \cdot 10^{-3}) / 60 = 3238 \text{ кДж}$$

Так як аноди розчині та вихід за струмом 90%, то:

$$W_{\text{заг}} \approx W_{\text{дж}}.$$

Загальні дані щодо балансу енергії на ванні цинкування наведено в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 - Баланс енергії на ванні цинкування.

Надходження	кДж	%	Витрати	кДж	%
Електрична енергія від джерела струму	3238	100	Джоулева теплота	3238	100
Разом	3238	100	Разом	3238	100

2.11 Тепловий розрахунок гальванічних ванн

Тепловий розрахунок ванн здійснюють для визначення кількості теплоти, яку необхідно підводити до ванни як для розігріву, так і для підтримки робочої температури. Використовуючи отримані дані визначають параметри нагрівального пристрою та витрати теплоносія [11]. Завданням розрахунку є визначення максимальної температури, до якої можливий розігрів ванни за одну

годину роботи. При цьому є можливим, що вся джоулева теплота витрачається тільки на розігрів ванни і не втрачається у навколишнє середовище.

Максимальну температуру розігріву ванни t_k °С визначається за формулою:

$$T_K = 293 + \frac{W_{\text{дж}}}{V_1 \cdot C_1 \cdot d_1 + C_2 \cdot m_2 + C_3 \cdot m_3}$$

$$T_K = 293 + \frac{3238}{0,96 \cdot 3920 \cdot 1140 + 1630 \cdot 27,6 + 385,2 \cdot 41,07} = 293,0007 \text{ K} = 20 \text{ °C}$$

де 293 – температура навколишнього середовища, К, прийнята за 20 °С,

V_1, C_1, d_1 – відповідно об'єм, питома масова теплоємність і густина електроліту;

C_2 – теплоємність матеріалу футеровки (для вініпласт 1630 Дж/(кг·К));

m_2 – маса футеровки;

C_3 – теплоємність матеріалу анодів;

m_3 – маса анодів у ванні [21].

Додаткове охолодження ванни не потрібно.

2.12 Розрахунок витрат матеріалів

Розрахунки потрібні для визначення річних потреб виробництва у вихідній сировині для осадження даного виду покриття [22]. До таких матеріалів належать аноди, реагенти для приготування електроліту.

2.12.1 Розрахунок витрати анодів

Витрати розчинних анодів на запуск обладнання $G_{\text{АЗ}}$ (кг) визначаються наступним чином:

$$G_{\text{АЗ}} = K_1 \cdot K_2 \cdot n_{\text{аш}} \cdot l_{\text{в}} \cdot h_{\text{в}} \cdot \delta_{\text{а}} \cdot d_{\text{м}} \cdot n_{\text{в}} = 0,48 \cdot n_{\text{аш}} \cdot l_{\text{в}} \cdot h_{\text{в}} \cdot \delta_{\text{а}} \cdot d_{\text{м}},$$

де K_1 – коефіцієнт, який враховує співвідношення сумарної ширини анодів до довжини ванни (приймають $K_1 = 0,6$);

K_2 – коефіцієнт, який враховує співвідношення анодів та висоти ванни (приймають $K_2 = 0,8$);

$n_{\text{аш}} = 2$ – кількість анодних штанг у ванні;

$l_{\text{в}} = 1,2$ м – внутрішня довжина ванни;

$d_m = 7130 \text{ кг/м}^3$ – густина матеріалу анодів;

$\delta_a = 0,01 \text{ м}$ – товщина анодів;

$n_b = 1$ – кількість ванн даного типу.

$$G_{AZ} = 0,6 \cdot 0,8 \cdot 2 \cdot 1,2 \cdot 1 \cdot 7130 \cdot 0,01 \cdot 1 = 82,1 \text{ кг}$$

Витрати розчинних анодів на виконання річної програми

Витрата розчинних анодів на виконання виробничої програми, кг:

$$G_{AP} = S \cdot A_p \cdot \delta_{II}$$

де S – сумарна площа нанесеного покриття, м^2 ;

$\delta_{II} = 20 \text{ мкм}$ – товщина покриття;

A_p – норма витрати розчинних анодів для осадження покриття товщиною 1 мкм , кг/м^2

A_p визначають за формулою:

$$A_p = d_m \cdot (1 + 0,06),$$

$$A_p = 7130 \cdot (1 + 0,06) = 7558$$

$$G_{ap} = 12360 \cdot 7558 \cdot 9 \cdot 10^{-6} = 841 \text{ кг.}$$

2.12.2 Розрахунок витрат хімічних реактивів

Сумарні витрати хімічних матеріалів на проведення процесу цинкування включають в себе кількість матеріалів, що необхідні для приготування електроліту на перший запуск обладнання та витрати матеріалів необхідних для виконання річної програми.

Витрати реактивів на початковий запуск обладнання

Витрати кожного компонента електроліту G_i (кг) розраховуємо за формулою:

$$G_i = C_i \cdot V_b \cdot K_{зап} \cdot n_b$$

де C_i – концентрація відповідного компонента електроліту, кг/м^3 ;

$V_b = 1,4 \cdot 0,8 \cdot 1,0 = 1,12 \text{ м}^3$ – об'єм ванни;

$K_{зап}$ – коефіцієнт заповнення ванни, $K_{зап} = 0,83$;

$n_b = 1$ – кількість ванн.

$G_i (\text{ZnSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}) = 215 \cdot 1,12 \cdot 0,83 \cdot 1 = 199,86 \text{ кг,}$

$$G_1 (\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3) = 30 \cdot 1,12 \cdot 0,83 \cdot 1 = 27,9 \text{ кг},$$

$$G_1 (\text{Na}_2\text{SO}_4) = 15 \cdot 1,12 \cdot 0,83 \cdot 1 = 14 \text{ кг},$$

$$G_1 (\text{лимонна к-та}) = 10 \cdot 1,12 \cdot 0,83 \cdot 1 = 9,3 \text{ кг}.$$

Витрати хімічних реактивів на виконання річної програми

Витрат реактивів на виконання виробничої програми розраховуємо за формулою:

$$G_1 = C_i \cdot V_{\text{вт}}, \text{ кг}$$

де $V_{\text{вт}}$ – об'єм електроліту, який виноситься із ванни при виконанні річної програми, м^3 :

$$V_{\text{вт}} = 1,15 \cdot S \cdot A_e,$$

$$V_{\text{вт}} = 1,15 \cdot 12360 \cdot 0,12 \cdot 10^{-3} = 1,7 \text{ м}^3$$

де S – сумарна поверхня деталей, яка обробляється за рік, м^2 ;

1,15 – коефіцієнт враховує площу занурюваної частини підвісок;

$A_e = 0,12$ – норма витрат електроліту, що виноситься з деталями простої форми, $\text{м}^3 / \text{м}^2$.

Витрати кожного реактиву становлять:

$$G_1 (\text{ZnSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}) = 215 \cdot 1,7 = 365,5 \text{ кг},$$

$$G_1 (\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3) = 30 \cdot 1,7 = 51 \text{ кг},$$

$$G_1 (\text{Na}_2\text{SO}_4) = 15 \cdot 1,7 = 25,5 \text{ кг},$$

$$G_1 (\text{лимонна к-та}) = 10 \cdot 1,7 = 17 \text{ кг}.$$

Сумарна витрата реактивів:

$$G_1 (\text{ZnSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}) = 199,86 + 365,5 = 565,36 \text{ кг},$$

$$G_1 (\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3) = 27,9 + 51 = 78,9 \text{ кг},$$

$$G_1 (\text{Na}_2\text{SO}_4) = 14 + 25,5 = 39,5 \text{ кг},$$

$$G_1 (\text{лимонна к-та}) = 9,3 + 17 = 26,3 \text{ кг}.$$

2.12.3 Розрахунок витрати води

Вода витрачається для приготування електроліту, на випаровування з поверхні електроліту, на протікання побічного процесу розкладу води при електролізі та на промивні операції.

Витрати води на приготування електроліту

$$G'_{H_2O} = C_{H_2O} \cdot V_{заг} ,$$

де C_{H_2O} – вміст води в одному m^3 електроліту, $кг/m^3$;

$V_{заг}$ – загальні витрати електроліту на виконання річної програми.

C_{H_2O} розраховуємо за формулою: $C_{H_2O} = d_{ел} - (C_1 + C_2 + C_3)$,

де $d_{ел}$ – густина електроліту, $1140 кг/m^3$; $C_1, C_2 \dots C_n$ – вміст компонентів в електроліті, $кг/m^3$.

$$C_{H_2O} = 1140 - (215 + 50 + 30 + 10) = 835 кг/m^3$$

Сумарні витрати електроліту знаходять за формулою:

$$V_{заг} = V_B \cdot K_{зап} \cdot n_B + V_{вт} = 1,12 \cdot 0,83 \cdot 1 + 1,7 = 2,63 m^3$$

де V_B – об'єм ванни, m^3 ;

$K_{зап}$ – коефіцієнт заповнення ванни ($K_{зап} = 0,7 \dots 0,9$);

n_B – кількість ванн;

$V_{вт}$ – об'єм електроліту, винесеного деталями.

$$G'_{H_2O} = 835 \cdot 2,63 = 2196 кг$$

Витрати води на випаровування з поверхні електроліту

$$C^{IV} = T_d \cdot S_e \cdot q_{H_2O} \cdot n_B = 1842 \cdot 1,12 \cdot 0,3 \cdot 1 = 619 л або 0,62 m^3 ,$$

де S_e – поверхня дзеркала розчину, m^2 ;

n_B – кількість ванн даного типу;

q_{H_2O} – швидкість випаровування води за 1 годину при відповідній температурі.

На промивні операції

При підготовці поверхні деталей і подальшого нанесення металу погана промивка деталей може спричинити збільшенню браку. З іншої точки зору, екологічна безпека разом з економічною складовою вимагають раціонального використання води. Використовуючи ванни уловлювання, двох ступеневі каскадні промивки дозволяє значно зменшити витрати води на технологічні потреби.

Формула для двох ступеневої каскадної промивки має вигляд:

$$V_{год} = A_e \cdot P_r \cdot \sqrt{K} = 0,12 \cdot 6,7 \cdot \sqrt{1075} = 26,36 m^3$$

де A_e – норми виносу розчину із ванни поверхнею деталей, $дм^3 /m^2$;

P_r – годинна виробнича програма ванни, m^2 /год;

K – критерій остаточної промивки деталей. Його визначають за співвідношенням:

$$K = C_0/C_k = \frac{215}{0.02} = 1075$$

де $C_0 = 215$ г/л – концентрація основного компонента у ванні;

$C_k = 0,02$ г/л – гранично допустима концентрація основного компонента у воді після промивки.

Сумарні витрати води на промивні операції становлять:

$$V_{\text{сум}} = V_{\text{год}} \cdot T_d \cdot 1,5 = 26,36 \cdot 1842 \cdot 1,5 = 72835 \text{ м}^3 = 72,8 \text{ дм}^3,$$

де коефіцієнт 1,5 враховує можливе падіння тиску води у водопровідній мережі.

2.13 Автоматизація процесу нанесення гальванічного покриття

Для інтенсифікації процесу під час нанесення покриттів, потрібна автоматизація процесу. Даний процес дозволяє скоротити персонал, понизити собівартість, також пришвидшує процес та виключає утворення помилок, як людського фактору.

Об'єкт керування в системах автоматизації є устаткування, як основне так і допоміжне з вмонтованими запірними та регулювальними органам, я також таких матеріалів, як енергія та сировина, які саме визначаються особливостями технологій.

Для створення систем автоматизації, що буде ефективним, це потребує поглибленого вивчення процесу та технології.

Під час розроблення схеми автоматизації потрібно забезпечити процес:

- знання про стан технологічного процесу, мати всю інформацію для автоматизації устаткування;
- мати вплив та керувати технологічним процесом ;
- усі технологічні параметри зробити стабілізованими;
- для устаткування контролю технологічних параметрів мати контроль та реєстрацію стану;

Автоматизація виробництва – процесу цинкування.

Основні вимоги:

1. Дотримання до регламенту витрат електроліту;
2. Використання концентрації компонентів прописаних в технологічному регламенті;
3. Проходження електролізу узгодженого до технологічного регламенту;

Основні технологічні параметри до регламенту: рН електроліту, сила струму, напруга у гальванічній ванні, рівень електроліту.

У таблиці 2.5 наведено параметри регулювання та контролю процесу нанесення цинкового покриття.

Таблиця 2.5 - Параметри регулювання та контролю процесу нанесення нікелевого покриття

Параметр, що контролюється чи регулюється	Технологічний діапазон параметру	Вимоги до схеми автоматизації	Специфікація устаткування
Сила струму напруга		Контроль	Агрегат випрямний для гальванічних ванн, $I_{\max}=1200$ А, $U_{\max} = 12$ В. Пульт дистанційного керування для випрямного агрегату ГИТ15К-1200×12Р-380-ВЗ
Температура електроліту	30	вимірювання, регулювання, реєстрація	Нагрівач електричний, $U_{\text{роб}} = 220$ В, $P_{\max} = 12$ кВт, ТЕН, ОО. Автоматичний показувальний і реєструвальний вторинний прилад з функцією перетворення електричного сигналу в пневматичний}; вхідні сигнали: 0...50 мВ, 0...100 мВ, 0...5 В, 0...10 В, 0...5 мА, 4...20 мА; НСХ перетворювачів: термоелектричних – В, К, L, S, опору – 50 П, 100 П, 50 М, 100 М
Рівень електроліту	0,7м	вимірювання, регулювання, реєстрація	Поплавковий датчик рівня. Вихідний сигнал: 4...20 мА Межа похибки: 0,7-2,5%. Діапазон температур -60 ... +125 °С
рН	4-4,5	вимірювання, регулювання, реєстрація	Чутливий елемент рН-метра заглибного виконання з електродами скляними ЕСП31-06 і регулятором тиску РДС-1

Висновки до розділу 2

В даній роботі було проведено розрахунки основних технологічних параметрів для проведення цинкування. Товщина покриття становить 20 мкм, процес цинкування відбувається за 18,6 хвилини при температурі 30 °С та густині катодного струму 4 А/дм².

Розраховано енергетичний баланс, витрати реагентів та води на всіх стадіях технологічного процесу. При застосуванні автоматичного регулювання, в технологічному процесі передбачені такі параметри: температура проведення різних операцій; значення рН електроліту, а також його рівень у ванній; струм та напруга, що подаються на гальванічну ванну.

3 ЗАХОДИ З ОХОРОНИ ПРАЦІ ЩОДО ПОКРАЩЕННЯ УМОВРОБОТИ У ГАЛЬВАНІЧНОМУ ЦЕХУ

3.1 Профілактика електротравм

Розглянемо головні причини ураження струмом, а саме: прямий контакт зі струмооснащеними частинами обладнань, котрі під напругою, через порушення ізоляції. Обладнання отримує електро-живлення від трьохфазної електромережі змінного струму, під напругою 380В-220В з частотою 50Гц, та заземленою нейтраллю. [22]

Розрахунок сили струму, що проходить через людину при торканні однофазного електричного ланцюга:

$$I_{л} = \frac{U_{\phi}}{R_{л} + R_0} \cdot 10^3, \text{ мА}; \quad I_{л} = \frac{220}{4000 + 4} \cdot 10^3 = 54,9 \text{ мА};$$

де $U_{\phi} = 220$ - фазова напруга у вольтах;

$R_{л} = 4000$ - опір тіла людини у омах;

$R_0 = 4$ - опір заземлення у омах.

Згідно вимог ГОСТ упрі нормальному режимі статичної роботи електрообладнання $I_{л} = 0.3$ мА, $U_{д} = 2$ В, а при аварійному режимі – $I_{л} = 6$ мА, $U_{д} = 36$ В.

Напруга дотику складе:

$$U_{л} = I_{л} \cdot R_{л} = 54.9 \cdot 4000 \cdot 10^{-3} = 220 \text{ В}$$

Виходячи з цього, ми розуміємо, що на гальванічному виробництві можливі травми при порушенні вимог ПУЕ.

У гальванічному цеху електрообладнання не має бути закрите чи вибухозахисне. [22]

Струмоведачі частини повинні бути захищені, а саме спеціальними кожухами. Ізоляція провідників, основний захист від ураження електричним струмом ($R_{із} = 0.5$ МОм).

В даній роботі для запобігання ураження електричним струмом пропонується:

- встановлення захисного аварійного відключення електроустановок;
- для струмоведучих частин використання подвійної ізоляції;
- для подачі живлення електричних інструментів застосування невеликої напруги
- спеціальні захисні засоби для робітників;
- проводити ревізійні огляди ізоляційних частин, для виявлення пошкоджень;
- проведення зборів для ознайомлення з правилами роботи та технікою безпеки;

Металічні частини обладнання повинні бути заземлені для запобігання ураження електрострумом. [23]

Ванни повинні мати сигнальні лампочки. Червоний колір- для попередження про постачання напруги в ванну. Зелений колір – зняття напруги.

3.2 Нормалізація повітря робочої зони

У гальванічному цеху запроектовані та вмонтовані вентиляційні витяжки: механічна та припливна. Розрахунок кратності повітрообміну в цеху не менше п'яти.

Для гальванічного цеху повітряний баланс цинкування менший на 10-15%.

Згідно з ДСТУ 12.1.005-88 оптимальна вологість повітря у цеху - 40-60 %.

До ДСТУ 12.1.005-88 вміст шкідливих речовин у повітрі може підтримуватися за рахунок загальнообмінної, місцевої чи аварійної вентиляції. А також, зі шкідливими виділеннями гальванічні ванни мають бортові відсмоктувачі. Для надання нормальних умов роботи в цеху повинна бути присутня пропонується центральна система опалення відповідно, до СНиП 2.04.05-84 з нижньою підводкою з температурою води до 70°C та однотрубна [22].

Цех має повітряне обладнання калориферів, яке суміщається з припливною вентиляцією. Для того, щоб мати нормальну температуру у цеху на опалювальний період. Щоб запобігти захворюваності та переохолодження при вході до цеху встановлені повітряні засіви.

Щоб зменшити виділення шкідливих речовин в повітря в робочій зоні пропонується:

- проводити приготування розчинів для ванн при місцевій вентиляції.
- за можливості змінити шкідливі речовини, на менш токсичні;
- під час процесу приготування травильних розчинів, вводити кислоту тонким струмнем у прохолодну воду та паралельно інтенсивно перемішувати.

У склад електrolіту потрібно вводити присадки, інгібітори та поверхнево-активні речовини.

3.3 Пожежна профілактика та вибір засобів пожежогасіння

Приміщення гальванічного цеху належить до категорії В спираючись на всі характеристики за пожежною небезпекою. [22,23].

У цеху присутні порошковий вогнегасник (ВП-6), який повинен використовуватися для гасіння пожеж класу В (під час горіння рідких речовин, але є виключення, а саме ті речовини, що горять без доступу кисню повітря), а також електричних установок, що знаходяться під напругою до 1000 В.

Персонал гальванічного цеху, повинен, що до правил з техніки безпеки, на регулярній основі проходити навчання з правил користування засобами пожежогасіння та основними правилами запобігання виникнення пожежно-небезпечних ситуацій у гальванічному цеху.

Розглянемо принцип роботи вогнегасників, що полягає у створенні надлишкового тиску у корпусі, а також викиданні під цією дією вогнегасної речовини у центр пожежі [23].

Такий принцип роботи вогнегасників є в різних моделях, але кожна має індивідуальні особливості.

У гальванічному цеху, що був спроектований буде використовуватися порошковий вогнегасник ВП6.

Вогнегасник приводиться у дію в декілька етапів:

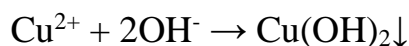
- зняття запобіжної чеки;
- рукав спрямовується у центр вогнище пожежі;

- натиснувши на важіль для управління при подачі вогнегасної речовини, що під дією надлишкового тиску по сифонній трубці, а потім через рукав-насадку буде подаватися у вогнище пожежі;
- щоб зупинити подачу вогнегасної речовини потрібно відпустити важіль.

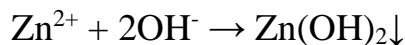
3.4 Очищення стічних вод

Аналіз існуючих методів очищення гальванічних стоків показав, що на сьогоднішній день масово застосовуються іонообмінні, сорбційні, мембранні, електрохімічні методи, але найпопулярнішим залишається реагентний метод.

Очищення стічних вод від іонів важких металів реагентним методом здійснюється шляхом переведення іонів важких металів у малорозчинні сполуки (гідроксиди або основні карбонати) при нейтралізації стічних вод за допомогою різних лужних реагентів (гідроксидів кальцію, натрію, магнію, оксидів кальцію, карбонатів натрію, кальцію, магнію) [2,4].



Цинк та хром є амфотерними металами, гідроксиди яких розчиняються в надлишку лугу з утворенням комплексних сполук. Тому осадження слід проводити при рН = 8-9, тоді як при значеннях рН вищих за 12 утворюються розчинні гідроксокомплекси:



Практикою очищення стічних вод встановлено також, що при спільному осадженні гідроксидів двох або кількох металів при однаковому значенні рН досягаються кращі результати, ніж при роздільному осадженні кожного з металів.

При локальному знешкодженні стоків, що містять цинк, кадмій та нікель, в якості лужного реагенту рекомендується використовувати вапно (краще

третього сорту, що містить CaCO_3). При цьому витрата вапна на 1 вагову частину (в. ч.) становить: для сполук кадмію – 0,5 в. ч. CaO , нікелю – 0,8 в. ч. CaO , цинку – 1,2 в. ч. CaO .

На рисунку 3.1 подано принципову схему реагентного очищення стічних вод від іонів важких металів. При обсягах стічних вод до $30 \text{ м}^3 / \text{год}$ зазвичай рекомендується періодична схема очищення, а при вищих – змішана або безперервна.

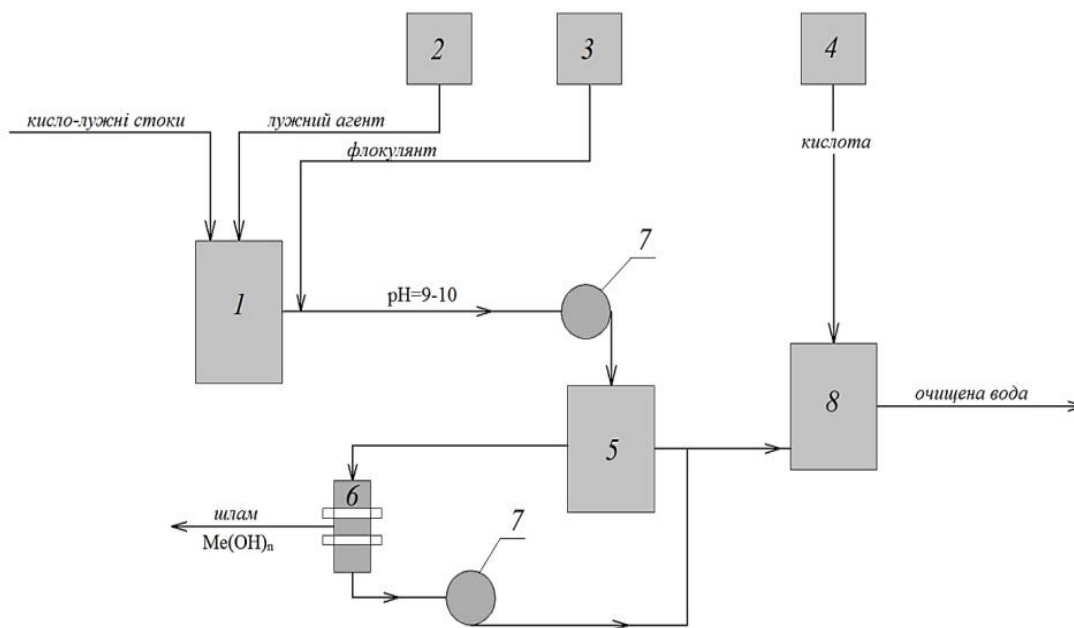


Рисунок 3.1 – Принципова схема реагентного очищення стічних вод від іонів важких металів:

- 1 – реактор-нейтралізатор кисло-лужних стоків; 2 – дозатор лужного агента;
 3 – дозатор флокулянта; 4 – дозатор розчину кислоти; 5 – відстійник;
 6 – механічний фільтр; 7 – насос; 8 – нейтралізатор очищеної води.

Осадження нерозчинних сполук, що утворюються в процесі реагентної обробки, здійснюється у відстійниках (переважно вертикальних з низхідним або висхідним рухом води або в тонкошарових поличних відстійниках). Число відстійників становить не менше двох, а тривалість відстоювання понад дві години.

Для прискорення освітлення нейтралізованих стічних вод рекомендується додавати до них синтетичний флокулянт поліакриламід в кількості 2–5 г на 1 м^3 стічних вод залежно від вмісту іонів металів. Чим меншою є сумарна

концентрація іонів металів, тим більшою повинна бути доза флокулянта. Додавання поліакриламідів до стічних вод проводять перед їх надходженням у відстійник.

Вологість осаду після відстійників становить 98–99,5 %. Для зниження вологості осаду до 95–97 % рекомендується додаткове відстоювання протягом 3–5 діб в шламоуцільнювачі. В подальшому осад подається на вузол зневоднення, де здійснюють такі операції як вакуум-фільтрацію, центрифугування, фільтрпресування. Вологість осаду після вакуум-фільтру становить 80–85 %, після центрифугування – 72–79 %, після фільтрпресу – 65–70 %.

Більш перспективною в порівнянні з зазначеним методом є переробка стічної води методом феритизації. Суть феритного методу полягає у створенні в забрудненій воді передумов, які сприяють швидкому формуванню дисперсних речовин з магнітними властивостями в присутності іонів феруму, які зазвичай містяться у рідких відходах гальванічних виробництв. Ця технологія дає можливість повторного використання як сполук важких металів, так і очищеної води на виробництві.

При феритизації формуються хімічно стійкі осади в основному з кристалічною феритною структурою, які майже не містять кристалізаційної чи адсорбованої води. Зокрема осади, утворені в результаті очищення стічних вод ліній цинкування методом феритизації, зазвичай, мають складний фазовий склад і містять наступні сполуки: оксиди, оксогідрати та ферити заліза і цинку різних модифікацій.

Оптимальні умови для проведення основних технологічних операцій процесу феритизації:

- рН – 10...10,5;
- рівень вихідних концентрацій іонів важких металів, $C_{\text{вих. заг.}} \leq 20$ г/л;
- співвідношення концентрацій іонів $\text{Fe}^{2+}/\text{Zn}^{2+}$ - 5/1;
- час процесу – 15...20 хв;

– температура середовища – 70 °С.

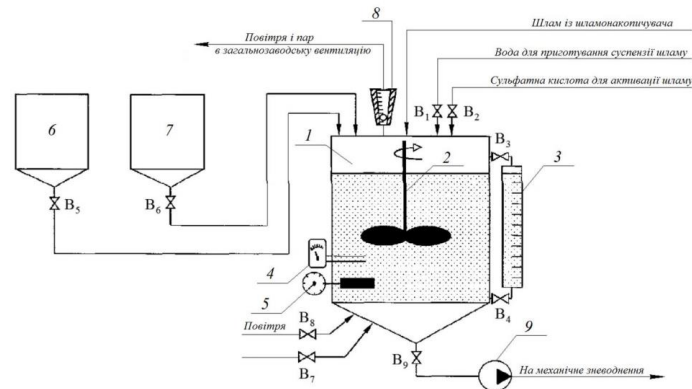
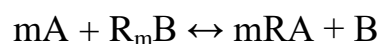


Рисунок 3.2 – Технологічна схема феритного процесу:

1 – реактор феритизації; 2 – мішалка; 3 – скло для вимірювання рівню;
4 – рН-метр; 5 – термометр; 6, 7 – ємності з розчинами сульфату заліза (II) та
їдкого натру; 8 – ротаметр; 9 – насос; V1...V9 – вентиля.

При іонообмінному очищенні з стічних вод електрохімічних виробництв видаляють солі важких, лужних і лужноземельних металів, вільні мінеральні кислоти і луги, а також деякі органічні речовини. Очищення стічних вод проводять за допомогою синтетичних іонообмінних смол (іонітів). Це практично нерозчинні в воді полімерні матеріали, що випускаються у вигляді гранул величиною 0,2–2 мм. У складі молекули іоніту є рухливий іон (катіон або аніон), здатний у певних умовах вступати в реакцію обміну з іонами аналогічного знаку заряду, що знаходяться у водному розчині (стічній воді). Іонний обмін відбувається в еквівалентних відношеннях та в більшості випадків є оборотним. Реакції іонного обміну перебігають внаслідок різниці хімічних потенціалів іонів, що обмінюються між собою. У загальному вигляді ці реакції можна представити таким чином:



Реакція перебігає до встановлення іонообмінної рівноваги. Швидкість встановлення рівноваги залежить від зовнішніх і внутрішніх факторів: гідродинамічного режиму рідини, концентрації іонів, що обмінюються між собою, структури зерен іоніту, його проникності для іонів.

Іонообмінне очищення стічних вод зазвичай здійснюють шляхом послідовного фільтрування через катіоніти (в H^+ - формі) та аніоніти (в OH^- - формі). У деяких випадках для очищення водних розчинів застосовують іони в сольовій формі (наприклад, катіоніти в Na^+ - формі, аніоніти в Cl^- - формі). При наявності у воді аніонів сильних і слабких кислот аніоніювання ведуть в дві ступені, вилучаючи спочатку аніони сильних кислот на слабоосновних аніонітах, а потім – аніони слабких кислот на сильноосновних аніонітах.

На рисунку 3.3 подано принципову схему очищення промивних і стічних вод іонообмінним методом при початковій концентрації іонів важких металів до 300 мг/л.

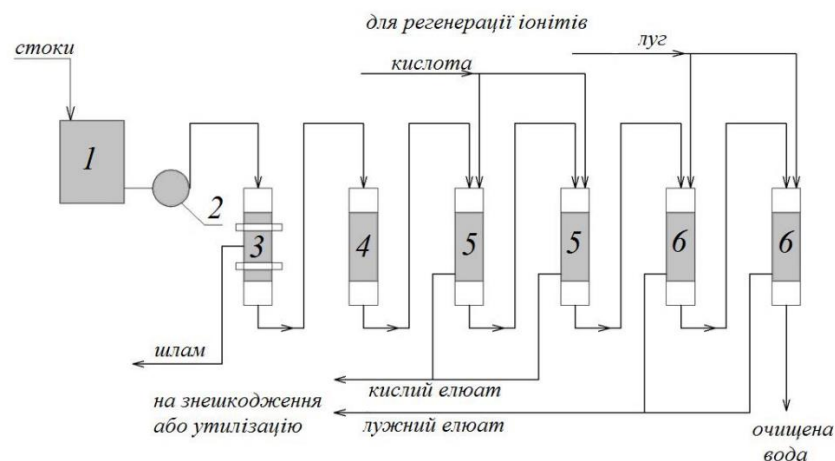


Рисунок 3.3 – Принципова схема очищення промивних і стічних вод іонообмінним методом: 1 – накопичувач стоків; 2 – насос; 3 – механічний фільтр; 4 – сорбційний фільтр; 5 – катіонітні фільтри; 6 – аніонітні фільтри.

Принципово можливі три варіанти іонообмінного очищення стічних вод електрохімічних виробництв:

- 1) очищення стічних вод, що утворюються в окремих технологічних процесах – локальне очищення;
- 2) очищення загального стоку окремого цеху або ділянки;
- 3) очищення стічних вод, підданих попередньому знешкодженню за допомогою хімічних реагентів для видалення з них мінеральних солей.

З економічної точки зору найбільш доцільним є іонообмінне очищення не загального стоку цеху, а локальна очистка. В цьому випадку переробка і

повернення у виробництво концентрованих розчинів, що утворюються при регенерації іонітів і містять різні хімічні продукти, викликає найменші труднощі. Перспективною також є розробка енергоефективних та екологічно безпечних технологій очищення стоків, які дають змогу повторно використовувати не тільки очищені води для гальванічного виробництва, але й концентрувати відходи кольорових металів для подальшого застосування.

Висновки до розділу 3

Нанесення гальванічного цинкового покриття відноситься до небезпечних для навколишнього середовища виробництв, що вимагають додаткових заходів щодо забезпечення належних умов праці та очищення стічних вод.

Серед шкідливих факторів, що призводять до зростання травматизму і виникнення професійних захворювань є шум і вібрація при експлуатації обладнання, забруднення повітря пилом, парами електролітів органічних розчинників; надлишок вологи, робота з електричним струмом.

Для очищення стічних вод запропоновано використати недорогий реагентний метод. Перероблені продукти використовуються в якості вторинної сировини або захоронюють у вигляді шламу.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Для процесу нанесення цинкового покриття обрано сульфатний електроліт наступного складу: $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (215 г/л), $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ (30 г/л), $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (50 г/л), Лимонна кислота $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ (20 г/л). Його перевагами є здатність отримувати рівномірні, гладкі, світлі осади з виходом за струмом 94–95%. Також вибір сульфатного електроліту зумовлено його більш низькою вартістю порівнюючи з цинкатним електролітом, стабільністю при роботі та екологічною безпечністю, а саме легкістю та дешевизною утилізації перед скиданням в загальну каналізацію

2. Розраховано основні технологічні параметри для осадження цинку. Товщина покриття становить 20 мкм, процес цинкування відбувається за 18,6 хвилини при температурі 30 °C та густині катодного струму 4 А/дм².

3. Здійснено перерахунок діючого обладнання та визначено енергетичний баланс, витрати реагентів та води на всіх стадіях технологічного процесу.

4. Передбачено застосування автоматичного регулювання наступних параметрів технологічного процесу: температури проведення різних операцій; значення рН електроліту та його рівня в ванні; струму та напруги, які подаються на гальванічну ванну.

5. Передбачено систему заходів по оптимізації умов праці в гальванічному цеху.

6. Запропоновано недорогий реагентний метод для очищення стічних вод після електрохімічного нанесення цинкового покриття. Продукти утилізації відходів можуть застосовуватись як вторинна сировина або підлягати захороненню як шлам.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Миронюк І.Ф., Микитин І.М. Електрохімія та її практичні аспекти: Навч. посіб./ Ів.-Франк.: ПНУ ім.В.Стефаника, 2016. – 174 с.
2. Якименко Г. Я., Харченко Е. П. Алгоритми і програми розрахунків в технічній електрохімії. Ч.1. Гальванічні виробництва. – Харків: НТУ «ХП», 2002. – 234 с.
3. Bo Gao, Liyang Dong, Guanglin Zhu, Chao Gao, Ganfeng Tu. Effect of Corrosion Inhibitors on Chromate-free Passivation of Hot-Dip Galvanized Steel // Materials Science. 2018. Vol. 24, No. 3, P. 265 - 270.
4. Якименко Г.Я., Артеменко В.М. Технічна електрохімія. Ч.ІІІ. Гальванічні виробництва: Підручник /За ред.. Б.І.Байрачного. – Харків: НТУ"ХП", 2006. – 272 с.
5. Sandu A.V., Coddet C., Bejaniury C. A Comparative Study on Surface Structure of Thin Zinc Phosphates Layers Obtained Using Different Deposition Procedures on Steel// ResearchGate.- 2012.P.401-405
6. Технічна електрохімія: підручник в 5 ч.- ч.5: Сучасні хімічні джерела струму, електроліз розплавів, електросинтез хімічних речовин / Б.І.Байрачний, Г.Г.Тульський, І.А.Токарев; за ред. Б.І.Байрачного . – Х.: НТУ(ХП), 2016. – 272 с.
7. Frolenkova, S.V., Vorobyova, V.I., Overchenko, T.A., Skiba, M.I. Ecologically safe modified solutions for deposition of conversion coatings on steel // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2018, (6).
8. H. Ashassi-Sorkhabi, D. Seifzadeh , H. Harrafi. Phosphatation of iron powder metallurgical samples for corrosion protection // Journal of the Iranian Chemical Society. 2007., №4,
9. ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ЕЛЕКТРОЛІТУ І РОЗРАХУНОК РЕЖИМУ МАТОВОГО ЦИНКУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ НЕСКЛАДНОГО ПРОФІЛЮ: Бабюк Н.В., Барсуков В.З. [Електронний ресурс] - https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/18611/1/Promising_2019_P076-086.pdf.

10. ПРОГРЕСИВНІ ЕЛЕКТРОЛІТИ ЦИНКУВАННЯ: Власенко Т. М., Крюкова О. А. [Електронний ресурс] - https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/12725/1/td_2019_N1_16.pdf.
11. Анга, Р. Корозія і захист від корозії: пер з англ. / Р.Ангал.-Долгопрудний: Інтелект, 2013. – 344 с.
12. Константинов В. М. Антикорові цинкові покриття на сталевих виробках: перспективи термодифузійного покриттів / В. М. Константинов, Н. І. Іваницький, Л. А. Астрейко // Лиття і металургія. - 2013. - № 4 (73). - С. 107-110.
13. Проскуркин Є. В. Захисні цинкові покриття: порівняльний аналіз властивостей, раціональні області застосування. Ч.1 / Є. В. Проскуркин // Устаткування. - 2005. - №3. - С. 66-71.
14. Антропов Л. И. // Теоретична електрохімія. Учеб. для хім. - технолог. спец. вузів. - 4 -е изд., перераб і доп. - М.: Высш. шк., 1984.
15. Покриття термодифузійно цинкові. Загальні вимоги та методи контролю. ГОСТ Р 9.316-2006 // Зміцнюючі технології та покриття. - 2008. - № 2. - С. 54-56.
16. Вайнер Я. В., Дасоян М. А. // Устаткування гальванічних цехів. - М. - Л.: Машинобудування. 1971. - 296
17. Frolenkova,S., Overchenko, T., Motronyuk, T., Miroshnychenko, I., Panchenko, M. Passivating anions effect on the anodic behavior of steel in a converting acetate solution// Journal of Chemical Technology and Metallurgy, 2019.
18. .Екологічна безпека гальванотехніки. Стічні води. Механічна та сорбційна очистка [Електронний ресурс] : підручник для студ. кваліфікації 2146.2 – інженер – технолог (хімічні технології) та 2149.2 – інженер – дослідник (хімічні технології) спеціалізації «Електрохімічні технології неорганічних та органічних матеріалів» / М.І. Донченко, С.В. Фроленкова, Т.І. Мотронюк ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 14,89 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 202 с.
19. Методичні вказівки до виконання дипломного проекту з гальванотехніки освітньо-кваліфікаційного пілля «бакалавр». Напрям 6.091600

«Хімічна технологія та інженерія». Професійна спрямованість «Технічна електрохімія». / Уклад. Л.А. Яцюк, В.П. Чвірук, В.Ф.Панасенко, Т.І. Мотронюк, О.В. Лінючева, М.І. Донченко, О.І. Букет. – К: НТУУ «КПІ», 2006. – 66с

20. Яцюк Л.А. Основи проектування хімічних виробництв. Будова обладнання та конструкції підвісних пристроїв для нанесення гальванічних покриттів: навч. посіб. / Л.А. Яцюк, О.І. Букет, Г.С. Васильєв – К.: НТУУ «КПІ», 2016. 85с.

21. Гальванотехніка: Методичні вказівки до дипломного проектування для студентів спеціальності «Технологія електрохімічних виробництв» всіх форм навчання / Сост. 58 Вржосек Г. Г., Игнатенко Е. Х., Кондрашова Н.В. і дру. - К.: КПИ, 1988

22. Метод. вказівки до викон. розділу «Охорона праці» в дипломних проектах лекцій [Електронний ресурс] : навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за спеціальніст: 161 Хімічні технології та інженерія» / Ю. О. Полукаров, Н. А. Праховнік Л.О. Мітюк, О.В. Землянська. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, – Електронні текстові данні (1 файл: 0,30 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020.

23. Довідник по охороні праці на промисловому підприємстві / Ткачук К. Н., Іванчук Д. Ф., Сабарно Р. В., Степанов А. Г.- К.: Техніка, 1991.-285с