

**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 для процесу твердого хромування сталевих
деталей річною програмою 8500 м²»

Спеціальність 161 Хімічні технології та інженерія
Освітня програма Технічна електрохімія та електрохімічна енергетика

Виконав: студент групи МГТЕ-22

Іжик В.М.

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

Іжику Володимиру Михайловичу

1. Тема кваліфікаційної роботи (проєкту) «Проектування гальванічного цеху для процесу твердого хромування сталевих деталей річною програмою 8500 м²»

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

2. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи (проєкту) Розробити проєкт гальванічного цеху та технологічний процес по нанесенню твердого хромового покриття на сталеві деталі продуктивністю 8500 м² на рік

3. Зміст кваліфікаційної роботи (проєкту) (перелік питань, які потрібно опрацювати). Всебічний аналіз властивостей та особливостей нанесення твердого хромового покриття; порівняльна характеристика сучасних електролітів хромування; обґрунтування вибору оптимального складу електроліту, розробка технологічної схеми процесу твердого хромування та проведення необхідних розрахунків для проєктування цеху з заданою річною програмою, розробка комплексу природоохоронних заходів та заходів по охороні праці в умовах шкідливого гальванічного хромування.

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапу кваліфікаційної роботи (проекту)	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 (проекту) науковому керівнику для відгуку		
8	Подача кваліфікаційної роботи (проекту) для рецензування (за 14 днів до захисту)		
9	Перевірка кваліфікаційної роботи (проекту) на наявність ознак плагіату та текстових співпадінь (за 10 днів до захисту)		
10	Подання кваліфікаційної роботи (проекту) завідувачу кафедри (за 7 днів до захисту)		

З завданням ознайомлений:

Студент _____

Володимир ІЖИК

Науковий керівник _____

Ольга КИСЛОВА

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота (проєкт): Іжик В.М. «Проєктування гальванічного цеху для процесу твердого хромування сталевих деталей річною програмою 8500 м²». Київ: КНУТД, 2023.

Робота освітньо-кваліфікаційного рівня «магістр», кількість сторінок – 72, таблиць – 10, малюнків – 4.

У роботі розроблено технологію нанесення твердого хромового покриття з застосуванням модернізованого енергоефективного розбавленого електроліту з вмістом йонів Cr(III), склад якого легко коригується, описано зв'язок між структурою покриття та умовами його осадження, зроблено перерахунок діючого обладнання та розрахунок витрати реагентів на проведення різних стадій процесу.

Висвітлено заходи з охорони праці в гальванічному цеху, описано основні шляхи очищення стічних вод електрохімічного хромування.

Ключові слова: тверде хромування, електроліт, гальванічна ванна, анод, катод, знежирення.

ANNOTATION

Qualification work (project): Izhik V.M. "Design of an electroplating shop for the process of hard chrome plating of steel details with an annual program of 8500 m²"
Kyiv: KNUTD, 2023.

The work of the educational and qualification level "master", the number of pages - 72, tables - 10, figures - 4.

This work developed a technology for applying a hard chromium coating using a modernized energy-efficient diluted electrolyte, which contains ions Cr(III), the composition of which can be easily adjusted. In project was described the relationship between the structure of the coating and its deposition conditions, recalculated the operating equipment and calculated the consumption of reagents for the various stages of the process.

Labor protection measures in the electroplating shop are highlighted, the main methods of wastewater treatment of electrochemical chromium plating are described.

Key words: hard chromium plating, electrolyte, galvanic bath, anode, cathode, degreasing.

Зміст

ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1. РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ НАНЕСЕННЯ ТВЕРДОГО ХРОМОВОГО ПОКРИТТЯ	9
1.1 Вимоги до стану поверхні деталей	13
1.2 Режими нанесення хромових покриттів	14
1.3 Технічні умови на обробку деталей	16
1.4 Технічні умови на готову продукцію.	17
Вимоги до зовнішнього вигляду після нанесення покриття	
1.5 Порівняльна характеристика електролітів хромування та властивості утворених покриттів	18
1.6 Розробка технологічної схеми нанесення покриття	24
1.7 Характеристика та склад електроліту хромування	27
1.8 Приготування робочих розчинів	28
1.9 Очищення ванн і електролітів	30
1.10 Проблеми в роботі ванн хромування	30
Висновки	33
РОЗДІЛ 2. ТЕХНОЛОГІЧНІ РОЗРАХУНКИ	34
2.1 Характеристика та параметри деталей, які підлягають обробці.	
Вибір виду покриття	34
2.2 Особливості процесу хромування	35
2.3 Вибір і розрахунок обладнання для нанесення твердого хромового покриття	36
2.4 Розрахунок виробничої програми обладнання	36
2.5 Перерахунок діючого обладнання	38
2.6 Обґрунтування вибору технологічного процесу	40
2.7 Розрахунок сили струму на гальванічній ванні	43
2.8 Розрахунок балансу напруги на гальванічній ванні	44
2.9 Баланс енергії	46
2.10 Тепловий розрахунок гальванічних ванн	47

2.11 Витрати теплоти на підтримання робочої температури ванни	49
2.12 Розрахунок витрат матеріалів	50
2.12.1 Визначення витрат анодів	50
2.12.2 Розрахунок витрат хімічних реагентів	50
2.13 Розрахунок витрати води	52
2.14 Контроль виробництва	55
2.14.1 Контроль якості покриттів	55
2.14.2 Методи контролю якості покриттів	57
2.15 Автоматичне регулювання параметрів процесу нанесення твердого хромового покриття	57
Висновки	60
РОЗДІЛ 3. ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ В ЦЕХУ ХРОМУВАННЯ. ПРИРОДООХОРОННІ ЗАХОДИ	61
3.1 Аналіз шкідливих та небезпечних виробничих факторів	61
3.2 Очищення стічних вод хромового виробництва	65
Висновки	68
ВИСНОВКИ	69
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	70

ВСТУП

Захист металевих конструкцій та виробів від корозії є однією з нагальних проблем промисловості, оскільки щорічне руйнування металів призводить до значних збитків і економічних втрат. Щорічно через корозію стає непридатним для користування близько 33% усього виробленого металу. Проте приблизно 60% кородованого металу використовується для повторної переробки в металургійній промисловості. Тому кінцеві втрати металу становлять близько 10% від усього виробленого металу. Для зниження втрат металу і захисту виробів від окисного руйнування поряд з використанням спеціальних корозійностійких марок сталей широко застосовуються різні види захисних покриттів: лакофарбові, металеві, оксидні та ряд інших. Ці заходи можуть допомогти знизити руйнівний вплив корозії і зберегти металеві матеріали в гарному стані протягом тривалого часу.

Гальванічні покриття отримують шляхом осадження на поверхні деталей тонкого шару металу під дією струму з електролітів, до складу якого входять іони даного металу. Такі покриття можуть застосовуватися не тільки для захисту деталей від корозії, а й для надання їм поверхні ряду цінних спеціальних якостей: підвищеної поверхневої твердості, зносостійкості, поліпшених антифрикційних властивостей, високої відбивної здатності, красивого зовнішнього вигляду і т.д.

Перевагами осадження покриття електрохімічним методом є :

- 1) регулювання товщини шару шляхом зміни тривалості процесу та густини струму;
- 2) зменшення витрати кольорових металів на покриття поверхні.

Електролітичне хромування є ефективним способом підвищення зносостійкості деталей, що піддаються значним механічним навантаженням, захисту їх від корозії, а також способом захисно-декоративної обробки. Процес хромування широко застосовується в автомобілебудуванні, приладобудуванні, сільському господарстві, для відновлення зношених деталей і для нанесення декоративного покриття. Перевагами цього процесу є

можливість наносити покриття як на необроблені, так і на термічно оброблені деталі без порушення структури основного металу, утворення надійного захисного шару на поверхні металу, який запобігає контакту металу з агресивними середовищами, включаючи кислоти, луки і розчинники, має високу міцність та зносостійкість, гарний естетичний вигляд. Проте варто відзначити, що процес хромування є достатньо дорогим та екологічно небезпечним через використання отруйних хімікатів.

Незважаючи на високу хімічну стійкість хромових покриттів, вони мають високу пористість і без додаткового безпористого шару з іншого металу (як правило нікелю) не забезпечують надійного захисту металу основи від корозії. Для забезпечення високої зносостійкості та корозійної стійкості хромові покриття осаджують на попередньо нанесені шари міді товщиною 10-30 мкм і нікелю товщиною 10-15 мкм. Хромове покриття, нанесене на поверхню блискучих мідних і нікелевих покриттів, незважаючи на малу товщину шару, значно підвищує їх корозійну стійкість і додає поверхні виробів гарного блискучого зовнішнього вигляду. Залежно від призначення виробів товщина хромового покриття знаходиться в діапазоні від 5 мкм до 350 мкм і більше.

Тверде хромування значно підвищує довговічність, твердість, корозійну стійкість металевих компонентів. Перевагами такого методу покриття є:

- 1) значна твердість утвореного покриття, яка перевищує більшість промислових абразивів та металевих покриттів. Декоративне хромове покриття є також достатньо твердим, проте його товщина значно менша і не забезпечує підвищеної зносостійкості виробам;
- 2) за рахунок великої товщини таке покриття здатне захищати деталі від зношування не тільки під час нормальної експлуатації, але і в більш екстремальних умовах, зокрема дії агресивних хімічних речовин;
- 3) низька температура осадження покриття значно знижує енерговитрати, забезпечує збереження фізичних та механічних властивостей основного металу;

- 4) високий рівень адгезії з багатьма металевими основами та мінімальною можливістю відшарування. З метою подальшого покращення адгезії перед нанесенням покриття компоненти ретельно очищаються від усіх забруднень, за необхідності деталі обробляються хімічними розчинами;
- 5) висока зносостійкість покриття забезпечує тривалий термін експлуатації виробів;
- 6) корозійна стійкість обумовлює значну стійкість виробів до окиснення, навіть у агресивних середовищах;
- 7) можливість наносити покриття як на сирі, так і на термічно оброблені деталі без порушення структури основного металу.

До недоліків хромування слід віднести:

- 1) тривалість процесу й складність підготовчих операцій;
- 2) можливість відновлення деталей з відносно невеликим зношенням, тому що більші по товщині напилення хрому (понад 0,3–0,4 мм) є менш зносостійкими й дорогими;
- 3) низький коефіцієнт корисної дії хромових ванн;
- 4) відносно висока вартість хромування.

Хоча механізм електролітичного осадження хрому повністю не з'ясований, але відомо, що склад електроліту та режим процесу суттєво впливає на структуру, якість та захисно-декоративні властивості утвореного покриття.

Мета дослідження. Знайти залежність між складом електроліту та умовами нанесення твердого хромового покриття електрохімічним методом та властивостями утвореного покриття. Узагальнити результати досліджень щодо впливу компонентів електроліту на умови проведення гальванічного хромування, на структуру та якість електроосадженого хрому.

Завдання дослідження. На основі аналізу сучасних джерел літератури проаналізувати переваги та недоліки існуючих методів одержання хромового покриття. Обґрунтування вибору оптимального складу електроліту, розробка

технологічної схеми процесу твердого хромування та проведення необхідних розрахунків для проєктування цеху з заданою річною програмою, розробка комплексу природоохоронних заходів та заходів по охороні праці в умовах шкідливого гальванічного хромування.

Об'єкт дослідження. Об'єктом дослідження є склад електролітів хромування, вплив окремих компонентів на якість утвореного покриття, а також розробка технологічної схеми нанесення твердого хромового покриття з застосуванням модернізованого електроліту.

Методи дослідження. Аналіз літературних даних щодо специфіки твердого хромування, умов нанесення даного типу покриття, залежності його властивостей від умов проведення гальванічного процесу, складу електролітів хромування.

Практична цінність. Було проаналізовано електроліти хромування різного складу та режими нанесення гальванічного покриття з їх застосуванням. Для процесу твердого хромування обрано найбільш ефективний та економічно вигідний електроліт.

Елементи наукової новизни. Розроблено технологічну схему нанесення твердого хромового покриття з застосуванням розбавленого електроліту, який містить йони Cr(III), введення яких в розчин електроліту дає можливість збільшити вихід за струмом та швидкість осадження хрому. Автоматичне регулювання температури, рівня електроліту у ванні, значень напруги та струму, співвідношення концентрацій компонентів розчину в умовах промислового гальванічного хромування дає можливість покращити якість продукції, а також збільшити продуктивність процесу. Запропоновано недорогий та ефективний метод очищення стічних вод та утилізації відходів.

За результатами кваліфікаційної роботи було опубліковано наукову статтю та проведено апробацію роботи на студентській конференції з публікацією тез.

РОЗДІЛ 1. РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ НАНЕСЕННЯ ТВЕРДОГО ХРОМОВОГО ПОКРИТТЯ

1.1 Вимоги до стану поверхні деталей

Перед початком гальванування велику увагу приділяють обробці поверхні деталей, оскільки це є запорукою отримання якісного покриття з необхідною структурою та властивостями [1].

Поверхня деталей після проведення всіх підготовчих операцій не повинна містити:

- розшарувань і тріщин, які можуть виникнути після травлення, полірування та шліфування;
- задирки та можливі області – результат неоднорідності прокату;
- пори та раковини, розміри яких перевищують граничні відхилення.

Деталі повинні бути очищені від травильного шламу, продуктів корозії основного металу та інших забруднень.

Отже, поверхня деталей, які надходять на хромування, повинна забезпечувати одержання якісних покриттів. Тому згідно з Держстандартом 9.301-78 «Покриття металеві і неметалеві неорганічні. Технічні вимоги» передбачені наступні вимоги до робочої поверхні:

- 1) чітко регламентований рівень шорсткості поверхні основного металу;
- 2) не містити видимого прошарку мастила, емульсії, задирок, пилу та продуктів корозії, металевої стружки;
- 3) гострі елементи деталей повинні бути округлені (радіус понад 0,3 мм);
- 4) поверхня деталей після абразивної обробки не повинна містити продуктів корозії і задирок;
- 5) поверхня шліфованих деталей повинна бути без дефектів від рихтувального інструменту, забоїн, вм'ятин, припалів, задирок;
- 6) шви на зварних і паяних деталях повинні бути без зазорів та ретельно зачищені, переривчасті шви попередньо герметизують. Покриття

негерметичних швів можливе у випадках, які передбачені Держстандартом 9.305-84.

Інші вимоги до основного металу за узгодженням із замовником можуть враховуватись в конструкторській документації.

1.2 Режими нанесення хромових покриттів

Залежно від режиму нанесення гальванопокриття можуть бути отримані хромові покриття з різними властивостями:

- 1) при температурі 65-80° С і порівняно невисоких густинах струму (15-25 А/дм²) осідає еластичне і безпористе покриття з невисокою твердістю - молочний хром;
- 2) при температурі 45-60°С і середніх значеннях густин струму (30-100 А/дм²) хромове покриття має дзеркальний блиск і найвищу твердість і зносостійкість - блискучий хром;
- 3) при низьких температурах (до 40°С) і високій густині струму відбувається осадження хромових покриттів сірого кольору, що характеризуються високою твердістю і крихкістю - твердий хром [2].

Нанесення покриттів проводиться електрохімічним шляхом в гальванічних ваннах. Технологічний ланцюжок нанесення покриття може включати понад 10 ванн.

Крім низького виходу за струмом, процес хромування відрізняється від інших електролітичних процесів, наприклад обміднення й нікелювання, ще й іншими особливостями, до яких належать:

1. Застосування нерозчинних анодів.
2. Висока густина струму (сила струму, віднесена до одному квадратному дециметру поверхні, що покривається).
3. Погана розсіювальна здатність. Процес хромування виконують із застосуванням свинцевих анодів, причому для стійкості свинцю проти роз'їдання до нього додають 5–10 % сурми. При хромуванні застосовують вищу густина струму, ніж при обмідненні або нікелюванні, де густина струму

змінюється в межах $0,3-5 \text{ A/дм}^2$. При такій густині струму хром зовсім не осаджується на деталі, при невеликій густині струму вихід за струмом дуже низький, і процес осадження хрому на деталі істотно збільшується в часі [3].

Велика твердість і особлива гладкість хромових покриттів обумовлюють їх хороші антифрикційні властивості: низький коефіцієнт тертя і високу зносостійкість. Низький коефіцієнт тертя і висока твердість хрому дозволяють з успіхом застосовувати його для виключення задирів при терті в'язких, схильних до схоплювання матеріалів (нержавіючих сталей, титанових сплавів та ін.). Цими ж властивостями визначається висока зносостійкість хромового покриття, яка залежить від режиму хромування і умов роботи тертьових пар. При правильно обраних умовах хромування та експлуатації хромованих деталей зносостійкість сталевих деталей після хромування зростає в три - п'ять разів [5].

Осадження металевого хрому починається при досягненні певної оптимальної густини струму. При низьких значеннях густин струму на катоді відбувається відновлення йонів хрому Cr^{6+} до йонів хрому Cr^{3+} . При високих значеннях густин струму паралельно відбувається декілька реакцій: поряд з реакцією $\text{Cr}^{6+} + 3e \rightarrow \text{Cr}^{3+}$ відновлюється також газоподібний водень та металевий хром. Значення оптимальної густини струму, при якій починається електроосадження хрому, залежить від виду й концентрації сульфат-аніону і температури електроліту.

Найпоширеніші режими електролізу лежать у інтервалі густин струму $30-70 \text{ A/дм}^2$ і температур $40-70 \text{ }^\circ\text{C}$. Електроосадження хрому проходить з низьким виходом за струмом. До 15% зі всього струму використовується на осадження покриття, а інша частина - на побічні процеси. Вихід за струмом зростає, якщо збільшується густина струму і знижується температура [6].

Низька розсіювальна здатність електроліту та значна поруватість покриття є іншими суттєвими недоліками процесу хромування. При незначних порушеннях технології хромування можливий розвиток корозії та зниження механічних властивостей основного металу [2].

1.3 Технічні умови на обробку деталей

Підготовка поверхні деталі до захисно-декоративного та зносостійкого твердого покриття хромом має багато спільного [2].

Послідовність технологічних операцій наступна:

- 1) механічна обробка поверхні (шліфування або полірування);
- 2) промивка органічними розчинниками для видалення жирових забруднень і протирання тканиною;
- 3) закладання отворів та ізоляція ділянок поверхні деталі, що не підлягають хромуванню;
- 4) монтаж підвіски;
- 5) обезжирення;
- 6) промивка у воді;
- 7) декапірування.

Вимоги до механічної підготовки поверхні деталей. Перед покриттям поверхню деталі обробляють до необхідного класу чистоти.

Після механічної обробки на поверхні деталі не повинно бути неметалічних включень, а також раковин, тріщин, тому що хромове покриття добре відтворює всі ці дефекти.

Ізоляція поверхні. Отвори на поверхні виробу перед хромуванням повинні бути закриті свинцем або іншим стійким до хромової кислоти матеріалом. Після закінчення ізоляції поверхні ділянки, які підлягають хромуванню, необхідно ретельно очистити від забруднення лаком та зачищають наждачним папером.

Монтаж підвіски. При монтажі деталей на підвіски необхідно простежити за тим, щоб деталі не закривали одна одну і всі ділянки їх поверхні, по можливості, були розташовані від поверхні анода на однаковій відстані.

Знежирення. При видаленні з поверхні деталей жирових забруднень, що потрібно брати до уваги, що сталеві загартовані тонкостінні деталі, які

експлуатуються при значних питомих навантаженнях, не можна знежирювати на катоді; в цьому випадку застосовується анодне знежирення або знежирення хімічним способом.

Декапірування. Перед хромуванням сталеві деталі піддаються анодному декапіруванню протягом 30-90 сек при густині струму 25-40 А/дм².

1.4 Технічні умови на готову продукцію

Вимоги до зовнішнього вигляду після нанесення покриття

Після проходження всіх встановлених процесів деталі надходять на пункт контролю за наступними критеріями [7].

1. Перевірка зовнішнього виду покриття. Зовнішній вигляд покриття, його колір, рівномірність і якість полірування повинні відповідати технічним умовам, зазначеним в інструкціях. Зовнішній огляд деталей проводиться за допомогою лупи.

Контроль якості покриття також полягає у виявленні відсутності підгару на деталях, непокритих місць, кольору пасивування.

2. Перевірка міцності зчеплення покриття з основним металом деталі здійснюється шляхом нанесення на деталь сталевим вістря двох пересічних подряпин глибиною до основного металу або підшару. Якщо в місцях перетину подряпин не відбувається відшаровування хрому, міцність зчеплення вважають достатньою.

3. Перевірка товщини покриття.

Товщина покриття визначається згідно з вимогами конструкторської документації.

1. Деталі повинні мати захисну поверхню, без здуття, розшарувань, точок, непокритих зон.

2. Деталі повинні мати корозійну стійкість. Покриття повинно мати суцільний шар хромового покриття, пористу, дрібнокристалічну структуру.

3. Колір твердого (зносостійкого) покриття світло-сірий з синюватим або молочно-матовим відтінком.

Контроль товщини покриття відбувається хімічними і фізичними методами. До хімічних методів належать метод струменя і крапельний метод. Для цього на покриття наносять спеціальний розчин, який розчиняє метал покриття до основного металу. Тривалість розчинення металу покриття визначає його товщину [6].

Не допускаються:

- 1) відсутність покриття, за винятком спеціальних місць, позначених на кресленні і місць контакту деталі з підвіскою;
- 2) дендритоподібні нарости і шорсткість (за винятком незначної на гострих гранях рельєфних деталей);
- 3) темні смуги і плями; нерівномірність блиску, отриманого при поліруванні; бульбашки, відшарування і лущення покриття; залишки невідмитих солей.

1.5 Порівняльна характеристика електролітів хромування та властивості утворених покриттів

В гальванопарі з залізом хром є менш електрохімічно активним металом, тому у випадку руйнування хромового покриття залізо є анодом і буде інтенсивно окислюватись [7].

Нанесення хромового покриття здійснюють переважно з електроліту, основними компонентами якого є хромовий ангідрид CrO_3 та сульфатна кислота [2]. Склад стандартного електроліту хромування та режими нанесення покриття наведено в табл.1.

Таблиця 1

Склад стандартного електроліту хромування та режим нанесення

Найменування	Хім. формула	Концентр. г/л	pH	Температура, °C	Густина струму, А/дм ²	Вихід за струмом, %
Хром (VI) оксид	CrO_3	150-350	1,5	40-70	15-55	до 15
Сульфатна Кислота	H_2SO_4	1,5 - 3,5				

Залежно від режиму нанесення можуть бути отримані хромові покриття з різними властивостями:

- 1) при температурі 65-70° С і порівняно невисоких густинах струму (15-25 А/дм²) осідає еластичне і безпористе покриття з невисокою твердістю - молочний хром;
- 2) при температурі 45-60°С і середніх значеннях густин струму (30-55 А/дм²) хромове покриття має дзеркальний блиск і найвищу твердість і зносостійкість - блискучий хром;
- 3) при низьких температурах (до 40°С) і високій густині струму відбувається осадження хромових покриттів сірого кольору, що характеризуються високою твердістю і крихкістю - твердий хром [2].

При гальванічному хромуванні на поверхні катоду утворюються продукти неповного відновлення йонів Хрому (VI) у вигляді тонкої райдужної плівки та інтенсивно виділяється водень, який частково проникає в структуру утвореного покриття і впливає на нього. Переважна кількість водню, адсорбована хромом, міститься в мікротріщинах та вздовж границь зерен. Його можна відносно легко видалити при нагріванні. Якщо ж водень знаходиться в кристалічній ґратці хрому, його можна видалити тільки в більш жорстких умовах при нагріванні до температури рекристалізації [3].

Молочні осадки хрому характеризуються малою поруватістю, їх осаджують безпосередньо на сталь, без нанесення додаткових шарів міді та нікелю. Електроліти та режими гальванічного осадження наведено в таблиці 2.

Таблиця 2

Склад електролітів молочного хромування та режими нанесення

Найменування	Хімічна формула	Концентр. г/л	Температура, °С	Катодна густина струму, А/дм ²	Вихід за струмом, %
Електроліт 1					
Хром (VI) оксид	CrO ₃	220-250	70	25-35	13
Сульфатна кислота	H ₂ SO ₄	2,2-2,5			

Електроліт 2					
Хром (VI) оксид	CrO ₃	350-370	55	20-25	13
Сульфатна кислота	H ₂ SO ₄	2,5			

При низьких температурах електролізу утворюються матові осади, які, мають гексагональну ґратку, яка перетворюється в кубічну після досягнення кристалами критичних розмірів. При підвищеній температурі електролізу стійкість гексагональної модифікації знижується і відбувається періодичний розпад його кристалів, що призводить до утворення блискучих осадів. При подальшому підвищенні температури електролізу одночасно утворюються зародки обох модифікацій хрому, а при подальшому підвищенні – кристали кубічного хрому. Проте структурні перетворення не відбуваються, осади не мають тріщин та шарів, твердість їх менша – утворюються молочні осади [8].

Відмінною властивістю блискучого хромового покриття, нанесеного електрохімічним методом, є його висока твердість, яка обумовлена утворенням кристалів з надзвичайно малим розміром та просторово-центрованою кубічною ґраткою. Згідно даних рентгенівських досліджень розміри кристалів складають $8 \cdot 10^{-7}$ - $14 \cdot 10^{-7}$ см і, відповідно, знаходяться в нанометровому діапазоні. Режим електролізу, зокрема температура та густина струму, значно впливають на ступінь дисперсності. Внаслідок високого ступеня дисперсності блискучих осадів хрому деформація кристалів ускладнюється, що призводить до утворення покриття з підвищеною твердістю [9].

Незважаючи на високу хімічну стійкість хромових покриттів, вони мають високу пористість і без додаткового безпористого шару з іншого металу (як правило нікелю) не забезпечують надійного захисту металу основи від корозії. Коли разом з підвищеною зносостійкістю виріб повинен мати також і захист від корозії, хромові покриття осаджують на попередньо нанесені шари міді товщиною 10-30 мкм і нікелю 10-15 мкм. Нанесений на поверхню блискучих мідних і нікелевих покриттів хром, незважаючи на малу товщину шару, значно підвищує їх корозійну стійкість і додає поверхні виробів гарного

блискучого зовнішнього вигляду. Блискучі хромові покриття можуть бути отримані безпосередньо з електроліту лише при умові осадження їх на полірованій поверхні.

Накопичення іонів Cr^{3+} у великій кількості приводить до звуження границь, у яких отримують блискучі осади, і до збільшення напруги на електролізері. Для підтримання концентрації Cr^{3+} у нормальних межах необхідно, щоб швидкість окиснення хрому на аноді наближалася б до швидкості відновлення його до Cr^{3+} на катоді. Для цього слід підтримувати відношення між катодною і анодною поверхнями у межах від 2:1 до 3:2 [6, 10].

В останні роки стали широко використовувати мікропористе хромування для захисно-декоративних цілей. Мікропористе хромове покриття здійснюється шляхом осадження між блискучим нікелем і хромом спеціального проміжного шару нікелю, який містить струмонепровідні мікрочасточки. При електролітичному покритті такого шару хромом із стандартних хромове покриття на мікрочасточках не осідає, і утворюється мікропориста хромова плівка. Мікропористі хромові покриття зазвичай мають товщину 0.2 - 0.3 мкм і вміщують від сотень тисяч до мільйону мікропор на 1 cm^2 поверхні. Завдяки значній кількості пор корозія попереднього шару нікелю в утворених мікрогальванічних елементах Ni/Cr (нікель - анод, хром - катод) протікає рівномірно по всій поверхні, що уповільнює її проникнення вглиб. Корозійна стійкість покриттів мідь - нікель - хром при поєднанні мікропористого хромування з двох - і трьохшаровим нікелюванням підвищується від 8 до 12 разів, у порівнянні з одношаровим нікелевим покриттям тієї ж товщини [11].

Комбіновані двошарові покриття хромом - молочним і блискучим - використовують для виробів, які експлуатуються в умовах високої вологості. Хромування проводиться послідовно у двох ваннах з однаковим складом електроліту: CrO_3 - 250 г/л, H_2SO_4 - 2,5 г/л. Спочатку осаджується шар молочного хрому при 70 °С і катодній густині струму 30А/дм². Потім виріб

переміщують в іншу ванну, де осаджується блискучий хром при 50°C і катодній густині струму 30 - 50 А/дм² [12].

Нанесення хромового покриття можна проводити з холодних електролітів, що містять іони фтору. Це значно знижує витрати енергії на проведення процесу. Склад електроліту та умови хромування наведено в таблиці 3. Нестійкість є найбільшим недоліком холодних електролітів хромування [13]. У процесі електролізу є потреба в коригуванні вмісту натрій фториду, оскільки концентрація солі в електроліті знижується.

Таблиця 3

Склад електроліту для холодного хромування та режим нанесення

Найменування	Хім. формула	Концентр. г/л	pH	Температура, °C	Густина струму, А/дм ²	Вихід за струмом, %
Хром (VI) оксид	CrO ₃	150	1,5	18-25	5-10	10-16
Сульфатна Кислота	H ₂ SO ₄	0,6				
Натрій фторид	NaF	10.0				

Якісні покриття можна отримати тільки в тонких шарах. Аноди рекомендується виготовляти зі сплаву, що містить 93% свинцю та 7% миш'яку [14].

Склад електроліту для нанесення чорного хромового покриття, яке характеризується низьким коефіцієнтом відбивання світла та не містить залишків сульфатів, наведено нижче (табл. 4).

Таблиця 4

Склад електроліту чорного хромування та режим нанесення

Найменування	Хімічна формула	Концентр. г/л	Температура, °C	Катодна густина струму, А/дм ²	Вихід за струмом, %
Хром (VI) оксид	CrO ₃	250	20	50	13
Натрій нітрат	NaNO ₃	2,5			

Замість натрій нітрату в складі електроліту можна використати різні кислоти: HBF₄, CH₃COOH чи H₂SeO₃. За припущенням, сторонні аніони (сульфатні, фторидні, гексафторосилікатні, селенітні та інші) або активують

поверхню катоду, яка пасивується хромовими кислотами, або полегшують відновлення хромових кислот за рахунок утворення проміжних сполук [15].

Покриття сірого кольору з невисокою мікротвердістю, яке потребує додаткового полірування, осаджуються із тетрахроматного електроліту, склад якого та умови хромування наведено в таблиці 5.

Для нормального протікання процесу, необхідна наявність у електроліті також іонів Cr^{3+} . З цією метою у розчин вводять відновники (сахарозу, глюкозу) [16].

Таблиця 5

Склад тетрахроматного електроліту та режим нанесення

Найменування	Хімічна формула	Концентр. г/л	Температура, °С	Густина струму, А/дм ²	Вихід за струмом, %
Хром (VI) оксид	CrO_3	350 – 400	18-20	10-80	35-40
Сульфатна Кислота	H_2SO_4	2,5			
Натрій гідроксид	$NaOH$	40-60			
Сахароза		1-2			

Перевагою тетрахроматного електроліту є порівняно високий вихід за струмом та гарна покривна здатність. Проте сірі хромові покриття мають низькі фізико-хімічні властивості. Зокрема, мікротвердість цих покриттів становить 350 - 400 кгс/мм², тому у випадках, коли необхідна підвищена твердість хромових покриттів, тетрахроматні електроліти непридатні і не знаходять широкого практичного застосування [17].

Хромові покриття, осаджені електрохімічним методом, погано змочується маслом, що обумовлює виникнення сухого чи напівсухого тертя та передчасний вихід із ладу деталей, які труться в процесі експлуатації. Досягти покращених умов змащення можна з використанням поруватого хромування, який є різновидом зносостійкого хромування. Для створення на деталі більшої кількості пор та каналів її поверхню піддають додатковій анодній обробці. Покриття поруватим хромом широко застосовується для деяких типів підшипників ковзання, циліндрів і поршневих кілець двигунів [10].

Саморегулюючий електроліт крім компонентів універсального електроліту містить малорозчинні солі, такі як сульфат стронцію і гексафторосилікат калію в кількостях, які утворюють пересичені розчини. Тому концентрація аніонів SO_4^{2-} і SiF_6^{2-} є практично постійною. Цей електроліт досить стабільний у часі, інтервалі температур і густин струму, має вищу електропровідність та розсіювальну здатність, ніж стандартний електроліт, а вихід за струмом досягає 18%. Проте його недоліком є підвищена хімічна активність. Це викликає необхідність застосовувати спеціальні заходи захисту від корозії деталей, футерівки електролізера (використовують вініпласт), матеріалу аноду (сплав свинцю з оловом (5-10 %)). Частина виробу, на яких не відбувається осадження хрому, необхідно ізолювати від електроліту [18].

1.6 Розробка технологічної схеми нанесення покриття

Оскільки для твердого хромування товщина покриттів може досягати 300 мкм, тому підшар міді та нікелю не наносить. Найчастіше такому зносостійкому хромуванню підлягають сталеві та чавунні деталі інструментів та машин, які в процесі експлуатації значно зношуються в результаті механічної взаємодії [19].

Нанесення гальванічного хромового покриття передбачає проведення ряду технологічних операцій [20].

Промивання органічними розчинниками. За наявності на деталях великої кількості мастила або полірованої поверхні деталі при необхідності занурюються у ванну з бензином. Деталі промиваються по одній штуці. Перехід повторюється ще один раз у ванні з чистим бензином.

Обдування стисненим повітрям. Деталі з усіх сторін обдуваються стисненим повітрям (1,5-2 атм) для видалення залишків вологи.

Монтаж деталей. Деталі монтується на мідний дріт (0,8-1 мм) або спеціальний ланцюжковий пристрій. Відстань між деталями повинна бути 1-3 см.

Знежирення електрохімічне (крім деталей з полірованою поверхнею).
Всі струмонесучі штанги попередньо зачищаються від оксидів і ретельно промиваються водою.

Використовують сталеві аноди, покриті нікелем. Їх попередньо чистять і декапірують в розчині хлоридної кислоти з концентрацією 50-100 г/л, промивають у воді.

Деталі на штангу завішують так, щоб вони не екранували одна одну щодо аноду. Нижня деталь на підвісці повинна бути вище нижнього краю анода на 50 мм; від площини або грані деталі до анода відстань має бути 100-150 мм.

Значну увагу також приділяють кріпленням для фіксування деталей в електролізері. Вони мають забезпечувати гарний контакт як з виробом, так і з катодною штангою.

Деталі з внутрішніми порожнинами або отворами (діаметром більше 12 мм і довжиною більше 20 мм) покриваються з додатковими анодами, які завішуються всередину цих порожнин або отворів так, щоб анод не торкався деталі. Анод має вигляд стрижня потрібного розміру або пластини.

Для зменшення нерівномірності товщини покриття використовують аноди спеціальної форми, додаткові екрани, ізоляцію частини поверхні.

Аноди чистять, промивають водою і декапірують в хлоридній кислоті. Аноди поміщаються в мішки з хлорину і завішують на спеціальні гачки так, щоб вони не торкались розчині електроліту.

Промивання проточною гарячою водою. Деталі промиваються у ванні з водою методом занурення.

Промивання проточною холодною водою. Деталі промиваються у ванні з водою методом занурення.

Активація (декапірування). Деталі декапірують у ванні з розчином шляхом занурення і похитування їх там.

Обдування стисненим повітрям. Деталі обдуваються стисненим повітрям для видалення залишків вологи. Тиск повітря становить 1,5-2 атм.

Сушка. Деталі завішуються в шафу і просушуються при температурі 70-110°C, де циркулює повітря.

Демонтаж. Деталі знімаються та складаються в тару.

Шліфування. Деталі відшліфовуються з метою усунення можливих нерівностей.

Ізоляція місць, що не підлягають покриттю. Використовують емаль, яку наносять на місця, що не піддаються хромуванню за допомогою пензлика. Щоб зняти ізоляційний шар, деталі поміщаються у ванну з гарячою водою. Вийнявши деталі з води, ізоляцію знімають за допомогою скальпеля.

Сушіння. Деталі сушаться на повітрі до повного висихання емалі.

Таблиця 6

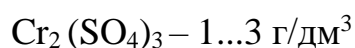
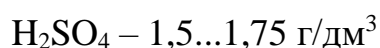
Технологічна карта процесу

№ п/п	Процес	Режим обробки
1	Шліфування сталевих деталей	
2	Монтаж деталей на підвісні пристрої	
3	Знежирення хімічне	Використовують органічний розчинник у випадку наявності значного забруднення поверхні деталей мастильно-охолоджуючими рідинами
4	Знежирення електрохімічне на катоді	Склад розчину: Na_3PO_4 – 30...70 (г/дм ³), Na_2CO_3 – 20...25 (г/дм ³), NaOH – 5...15 (г/дм ³), Na_2SiO_3 – 10...20 (г/дм ³); 3-7 хв при анодній густині струму 2-10 А/дм ² та температурі 60-80 °С
5	Знежирення електрохімічне на аноді	Склад розчину: Na_3PO_4 – 30...70 (г/дм ³), Na_2CO_3 – 20...25 (г/дм ³), NaOH – 5...15 (г/дм ³), Na_2SiO_3 – 10...20 (г/дм ³); 1-3 хв при анодній густині струму 2-10 А/дм ² та температурі 60-80 °С
6	Промивання тепле в ванні вловлювання	у непроточній воді протягом 30-60 сек при температурі 40-60 °С
7	Промивання холодне	у проточній воді протягом 30-60 сек при цеховій температурі

8	Травлення хімічне	Склад розчину: HCl – 100...125 (г/дм ³), уротропін – 3...5 (г/дм ³) (інгібітор травлення заліза). Видалення оксидних плівок з поверхні деталей здійснюється протягом 10-20 хв при цеховій температурі
9	Активація анодна	у ванні хромування у розчині складу, (г/дм ³): CrO ₃ – 150...175, H ₂ SO ₄ – 1,5...1,75; 0,5-2 хв при анодній густині струму 35-45 А/дм ² та температурі 50...60 °С. Перед ввімкненням струму протягом 2...5 хв деталі прогрівають у розчині для запобігання розтріскування покриття.
10	Нанесення покриття	
11	Промивання тепле в ванні вловлювання	у непроточній воді протягом 30-60 сек при температурі 40-60 °С
12	Промивання холодне	у проточній воді протягом 30-60 сек при цеховій температурі
13	Висушування	при температурі 80-90 °С
14	Демонтаж деталей	
15	Шліфування покриття	
16	Технічний контроль товщини та якості покриття	

1.7 Характеристика та склад електроліту хромування

Для зносостійкого твердого хромування в даному проєкті запропоновано електроліт наступного складу:



Оскільки менш концентровані електроліти характеризуються більшим виходом за струмом, тому доцільно вести процес з застосуванням розбавленого електроліту. Введення йонів Cr(III) в розчин електроліту дає можливість збільшити вихід за струмом та швидкість осадження хрому.

Швидкість осадження при густині струму 15 А/дм^2 становить 1 мкм за 7 хв , при густині струму 35 А/дм^2 становить 1 мкм за 3 хв .

Гальванічне осадження проводять при катодній густині струму $40 \pm 5 \text{ А/дм}^2$, анодна густина струму $15 \pm 5 \text{ А/дм}^2$, температура $40 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$. Протягом перших 30 секунд надається поштовх струму густиною $80\text{...}90 \text{ А/дм}^2$, який використовується для утворення значної кількості центрів кристалізації хрому та обумовлює збільшення покривної здатності електроліту. Зменшення катодної густини струму до робочої відбувається протягом $1\text{-}1,5 \text{ хв}$. Хромові покриття, осаджені з даного електроліту, мають найбільшу твердість та зносостійкість.

В електроліті такого ж складу здійснюють і анодне травлення. Проте в ході цієї операції електроліт швидко забруднюється залізом, тому анодне травлення доцільно проводити в окремому електролізері.

Для зниження втрат електроліту його поверхню закривають поплавками із поліетилену або додають домішки суміші фторованих вуглеводнів, які знижують поверхневий натяг.

1.8 Приготування робочих розчинів

Розчини електрохімічного знежирення

Готують послідовним розчиненням всіх компонентів в теплій воді: Na_3PO_4 , Na_2CO_3 , NaOH , Na_2SiO_3 . Твердий натрій гідроксид розчиняють в герметично закритому спеціальному апараті. За необхідності у приготовлений розчин додають різні поверхнево-активні речовини. Коригування розчинів проводять не рідше одного разу на тиждень за даними хімічного аналізу на вміст NaOH , натрій ортофосфату та інших компонентів [2].

Чистка ванни здійснюється один раз на місяць згідно з розробленим графіком. Розчин зливається через зливний вентиль і направляється на станцію нейтралізації. Стінки, анод і дно ванни промиваються водою зі шланга. Деталі складаються в спеціальну сітку, промиваються у ванні промивання і відправляються на візку на склад для розбракування. Стінки

ванни чистять капроною щіткою. Перевіряють придатність анодів. Очищають анодні штанги шліфувальною шкуркою. Після проведення всіх робіт промивають водою всі елементи ванни.

Розчин активації

Отриману концентровану хлоридну кислоту розчиняють у воді до концентрації 100 г/л. При приготуванні розчину потрібно кислоту доливати до води, коригування здійснюють не рідше одного разу на тиждень.

Чистку ванни здійснюють 1 раз на місяць згідно з графіком. Розчин зливається через зливний патрубков і спрямовується на нейтралізацію. Чистка ванни активації аналогічна чищенню ванни знежирення.

Електроліт хромування

Для приготування електроліту розраховану кількість хромового ангідриду ділять на невеликі порції, завантажують в ванну хромування і заливають для кращого розчинення водою, підігрітою до 60-80 °С. При цьому можна використовувати водопровідну воду, не забруднену залізом. Проте, в районах з твердою водопровідною водою використовують очищену або дистильовану воду. Розчинення хромового ангідриду відбувається при постійному перемішуванні. Для нормального осадження хрому рекомендується додавати в електроліт невелику кількість Cr^{3+} (близько 2-4 г/дм³). У готовому електроліті проводять пробне хромування.

Заміна електроліту хромування проводиться через 1-2 роки і залежить від інтенсивності експлуатації ванни і забруднення її домішками. При експлуатації ванни слід враховувати, що в ході електролізу концентрація солі хрому (III) в електроліті змінюється в залежності від конфігурації деталей. Так, при хромуванні деталей, площа покриття яких більша площі анода, наприклад, при хромуванні внутрішньої поверхні циліндра, концентрація тривалентного хрому в електроліті поступово зростає. Якщо ж площа деталі катода значно менша площі анода, що має місце при хромуванні зовнішніх циліндричних поверхонь, вміст тривалентного хрому в електроліті знижується.

Коригування складу електроліту

Для підтримки постійної концентрації CrO_3 і H_2SO_4 склад електроліту періодично коригують шляхом введення до нього нових порцій хромового ангідриду і сульфатної кислоти. Кількість хромового ангідриду, що додається у ванну, визначається на підставі питомої ваги електроліту або за результатами аналізу. Додавання у ванну CrO_3 здійснюється щодня. Коригування вмісту в електроліті сульфатної кислоти здійснюється значно рідше. Один раз на 7-10 днів електроліт піддають аналізу на вміст сполук трьох- і шестивалентного хрому і сульфатної кислоти.

За результатами аналізу розраховують необхідну кількість H_2SO_4 і вводять її в електроліт. Після цього електроліт ретельно перемішують і дають йому відстоятися. Тому сульфатну кислоту рекомендується вводити у ванну під час перерв у роботі.

1.9 Очищення ванн і електролітів

1. На всіх ваннах не рідше одного разу на тиждень чистять штанги і аноди залізною щіткою і водою.

2. Промивні води чистять у міру забруднення, але не рідше одного разу на місяць.

3. Електроліти фільтрують через бязь у міру забруднення, але не рідше одного разу на місяць.

4. Якщо електроліти не підлягають коригуванню, їх необхідно міняти у міру забруднення та виснаження.

Електроліт знежирення замінюють при забрудненні та виснаженні, але не рідше одного разу на місяць.

1.10 Проблеми в роботі ванн хромування

Дотримання режиму електролізу і своєчасне коригування електроліту є запорукою отримання якісного хромового покриття. Нижче наведено основні причини відхилень в роботі ванн хромування та способи їх усунення (табл. 7).

Причини відхилень в роботі ванн хромування та способи їх усунення

Характер неполадок	Причини виникнення	Усунення неполадок
Відшарування покриття	а) погана механічна або хімічна підготовка поверхні виробу перед покриттям; б) деталь перед хромуванням недостатньо прогрілася в електроліті. Різко знизилася температура електроліту, зокрема внаслідок додавання холодної води під час електролізу. Значно збільшилася густина струму; в) перебої струму в процесі хромування.	а) поліпшити підготовку, перевірити час анодного декапірування б) запобігти можливість перерв струму в) перед початком нанесення покриття прогріти деталі
Матові осади	а) низька температура; б) недостатній прогрів деталей перед включенням струму.	а) підвищити температуру електролізу; б) поліпшити прогрів деталей.
Пригар на краях	велика густина струму на краях	Встановити екрани, закруглити краї
Надмірно висока напруга на штангах ванни	а) утворення хроматної плівки на свинцевих анодах; б) надмірна кількість в електроліті сполук хрому (III) (більше ніж 10 г/л); в) накопичення в електроліті йонів заліза (більше ніж 10 г/л); г) неякісний контакт підвіски або аноду зі штангою	а) аноди зачистити сталевими щітками; б) обробити електроліт при анодній густині струму, яка в 4 рази менша за катодну; в) замінити електроліт; г) забезпечити якісні контакти
Низька швидкість осадження хромового покриття	а) низька катодна густина струму; б) поганий контакт підвіски зі штангою або деталей з підвіскою; в) висока концентрація хромового ангідриду або сульфатної кислоти; г) висока температура електроліту при даній густині струму	а) збільшити катодну густина струму до робочої; б) перевірити та підправити контакти; в) коригувати склад електроліту; г) встановити температуру, яка відповідає робочій густині струму
Коричневі плями	а) домішки заліза; б) високий вміст хрому(III); в) недостатній вміст сульфатної кислоти.	а) замінити частину електроліту; б) окиснити хром(III); в) додати сульфатну кислоту.

Райдужні плями	а) недостатній вміст сульфатної кислоти; б) окиснення підшару.	а) додати сульфатну кислоту; б) покращити декапірування перед хромуванням.
Сіре покриття з дрібними чорними цятками на поверхні	нестача сульфатної кислоти в електроліті	коригувати склад електроліту
Наявність ділянок без покриття	а) погане знежирення; б) залишки оксидів; в) наявність отворів у деталях; г) зіткнення деталей між собою.	а) покращити знежирення; б) покращити травлення і декапірування; в) закласти отвори свинцевими корками; г) перевірити розташування деталей у ванні.
Наявність окремих точок і пор на хромованій поверхні	а) пори і раковини в металі; б) бульбашки водню затримуються на поверхні деталі.	а) поліпшити механічну підготовку деталей; б) удосконалити підвищення деталей, періодично їх струшувати.
Видимі тріщини в шарі хрому і сталі	наявність гартівних напруг в сталі	прогріти деталі перед хромуванням при 150 - 180 °С. Проводити хромування при низькій температурі і густині струму.
Нерівномірний розподіл хрому по товщині	а) занадто товсте нашарування хрому з непрофільованими анодами; б) утворення плівки на анодах.	а) підібрати аноди відповідної форми б) зачистити аноди
Утворення темних осадів, припинення осадження хрому, розчинення свинцевої футеровки	наявність домішки нітратної кислоти в електроліті	замінити електроліт
Значне утворення дендритів на поверхні товстих хромових покриттів	а) при даній густині струму низька температура електроліту; б) при максимальній концентрації сульфатної кислоти відсутність сполук хрому (III) в електроліті	а) обрати необхідну температуру, яка відповідає робочій густині струму. б) проробити електроліт при катодній густині струму, яка в 4 рази менша за анодну
Неякісне покриття хрому на верхніх деталях на підвісці	невелика відстань від верхнього краю підвіски до рівня електроліту	відрегулювати правильну відстань від верхнього краю підвіски до рівня електроліту ($\approx 0,05$ м)
Сіре покриття на нижній частині деталі	мала відстань між нижньою частиною деталі і дном ванни.	нормальна відстань між деталлю і дном ванни повинна становити не менше 70 - 100 мм

Висновки

Умови проведення електрохімічного осадження хромового покриття, зокрема температура та густина струму, значно впливають на його внутрішню структуру та захисно-декоративні властивості. Висока твердість, низький коефіцієнт тертя, жаростійкість і висока хімічна стійкість обумовлені високим ступенем дисперсності та особливостями кристалічної ґратки. Хромові покриття рекомендується застосовувати для захисту від корозії деталей зі сталі, міді та її сплавів, для підвищення поверхневої твердості та зносостійкості деталей, а також у декоративних цілях.

Найпоширеніші режими електролізу лежать у інтервалі густин струму 30 -70 А/дм² і температур 40 - 70 °С.

Недоліки процесу хромування:

- 1) низький вихід за струмом низький;
- 2) низька розсіювальна здатність електроліту;
- 3) значна поруватість покриття;
- 4) висока ймовірність розвитку корозії та зниження механічних властивостей основного металу при незначних порушеннях технології хромування.

Охарактеризовано основні недоліки та можливі порушення процесу хромування, розроблено технологічну схему нанесення твердого хромового покриття з застосуванням розбавленого електроліту наступного складу:

CrO_3 – 150...175 г/дм³

H_2SO_4 – 1,5...1,75 г/дм³

$\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$ – 1...3 г/дм³

Введення йонів Cr(III) в розчин електроліту дає можливість збільшити вихід за струмом та швидкість осадження хрому. Гальванічне осадження проводять при катодній густині струму 40 ± 5 А/дм², анодна густина струму 15 ± 5 А/дм², температура 40 ± 2 °С.

РОЗДІЛ 2. ТЕХНОЛОГІЧНІ РОЗРАХУНКИ

2.1 Характеристика та параметри деталей, які підлягають обробці.

Вибір виду покриття

Для нанесення захисного хромового покриття обрали запчастину для трактора, схема якої наведена нижче (рис.1).

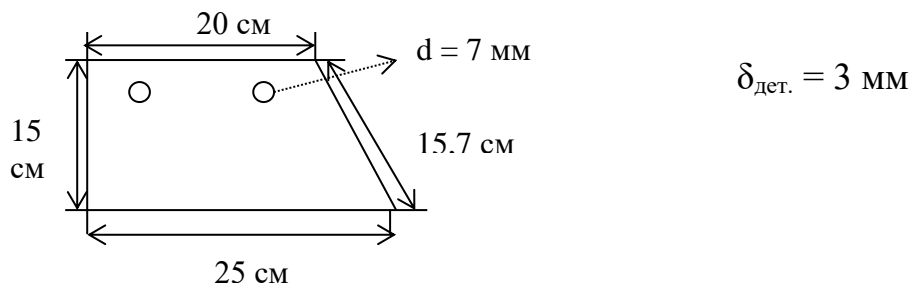


Рис.1. Креслення деталі

Дана деталь буде експлуатуватись в умовах, які потребують підвищеної зносостійкості та твердості виробу, в температурному діапазоні $-20 \text{ }^{\circ}\text{C} \dots +50 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Також можливий контакт з хімічними агресивними речовинами. Тому рекомендується обрати покриття з твердого хрому, яке потребує додаткової обробки лаками або маслами на завершальному етапі.

Товщина покриття повинна забезпечувати захисну здатність та функціональні властивості протягом експлуатації деталей з нанесеним захисним покриттям згідно Держстандарту 15150-69 з врахуванням кліматичних умов. Вид і товщину електрохімічного покриття обирають відповідно до Держстандарту 9.303-84 "Покриття металеві і неметалеві неорганічні. Загальні вимоги до виробу" та Держстандарту 9.073-77 "Види, ряди товщин і позначення", який визначає мінімальні значення товщин покриттів на поверхні деталей або виробів.

Хромові покриття використовують в якості захисно-декоративного та корозійно-стійкого покриття, якщо деталь підлягає дії значних сил тертя. Хромові покриття в атмосферних умовах вкриваються тонкою і міцною захисною оксидною плівкою. Це надає їм додаткову корозійну стійкість ($E_{\text{scr}} \rightarrow 0,2 \text{ В}$) і тривалий час зберігає колір і блиск. Хромові покриття не

окиснюються на повітрі та зберігають свої властивості навіть при нагріванні до 450...500 °С. Оскільки обрана деталь буде використовуватись не як декоративна, а як елемент кріплення, тому прийнято рішення нанесення хромового покриття товщиною 25 мкм. Проміжних покриттів з міді та нікелю нанесено не буде, велика товщина виробу дає можливість зарощувати усі пори. Отримане глянцеове гладеньке покриття не буде затримувати мікрокраплини агресивних речовин та не дозволить їм проникати у глибину покриття. Деталі, що піддаються обробці перед нанесенням покриття, повинні відповідати вимогам, наведеним у ГОСТ 9.301 та у ГОСТ 2789-73.

2.2 Особливості процесу хромування

Деталі завішуються у ванну на катодну штангу під струмом при напрузі 6-12 В. При хромуванні сталевих деталей вмикають зворотний струм заданої густини протягом 30 с. При перемиканні деталей з анода на катод дають «поштовх» струму (густина струму в цей момент повинна в 2 рази перевищувати робочу) протягом 15-30 с.

Надалі осадження ведуть у описаному за технологічною схемою режимі. Товщина покриття в отворах, порожнинах, вирізах може бути зменшена до 60% від товщини покриття, визначеної для виробу. У вузьких або глибоких отворах шириною або діаметром до 12 мм, якщо глибина більше однієї ширини або діаметра, а також у вузьких наскрізних отворах шириною або діаметром до 6 мм на тій же глибині електролітичного покриття практично не буде.

Основними причинами виникнення дефектів покриття є низька якість підготовки поверхні деталей і недотримання встановленої технології, зокрема порушення температурного режиму, складу електроліту (неефективне співвідношення між компонентами), проблеми з подачею струму та нерівномірною його густиною, накопичення сторонніх йонів в електроліті.

2.3 Вибір і розрахунок обладнання для нанесення твердого хромового покриття

Час роботи обладнання визначається режимом роботи підприємства, особливостями обладнання та технологічною схемою.

Номінальний річний фонд часу роботи T_n при переривчастому виробництві розраховується з кількості календарних днів у році T_k без вихідних T_v та святкових T_c днів. Для п'ятиденного 41 - годинного робочого тижня і двозмінній роботі [20].

$$T_n = \{ [365 - (104 + 11)] \cdot 40 / 5 - 10 \} \cdot 2 = 3980 \text{ год}$$

Дійсний річний фонд часу роботи обладнання T_d розраховують виходячи з номінального річного часу роботи T_n , враховуючи загальні річні втрати часу на простої обладнання, що в гальванічному виробництві складають 2 - 10 % ($K_{пр} = 0,02 - 0,1$), тобто

$$T_d = T_n - K_{пр} \cdot T_n$$

$$\text{Приймаємо } K_{пр} \sim 0,05$$

$$T_d = 3980 - 0,05 \cdot 3980 = 3781 \text{ год}$$

2.4 Розрахунок виробничої програми обладнання

При визначення річної виробничої програми P_d річне виробниче завдання P_z потрібно збільшити на величину виправного браку виробів, що складає зазвичай до 2 % (беремо $K_{бр} = 0,01$) від P_z в одиницях, які прийняті для даного виду продукції (m^2)

$$P_p = P_z + K_{бр} \cdot P_z$$

$$P_p = 8500 + 0,01 \cdot 8500 = 8585 \text{ м}^2 / \text{рік}$$

Добова виробнича програма складає $P_{доб} = P_p / T_{доб}$ де ,

$T_{доб}$ - кількість робочих днів у році

$$P_{доб} = 8585 / 250 = 34,3 \text{ м}^2 / \text{доб}$$

Годинна виробнича програма складає $P_{год} = P_p / T_d$

$$P_{год} = 8585 / 3781 = 2,27 \text{ м}^2 / \text{год}$$

Розраховуємо сумарну поверхню деталей S_p , які завантажуються у ванну

на одній підвісці, якщо

товщина покриття — 25 мкм

площа поверхні однієї деталі — 0,068 м²

Середня товщина покриття для розрахунків:

$$\delta_{\text{п}} = \delta \cdot k$$

$$\delta_{\text{п}} = 25 \cdot 1,2 = 30 \text{ мкм}$$

де δ – обрана товщина хромового покриття, мкм; k – коефіцієнт, який враховує нерівномірність товщини покриття по поверхні деталі.

Час обробки завантажувальної одиниці τ

$$\tau = \tau_m + \tau_{\text{об}},$$

де τ_m – час обробки деталей у ванні, хв.

$$\tau_m = \frac{\delta_{\text{п}} \cdot d_{\text{м}} \cdot 60 \cdot 10^{-2}}{V_{\text{с}} \cdot K_{\text{е}} \cdot i_{\text{к}}}$$

$$\tau_m = \frac{30 \times 7,0 \times 60 \times 10^{-2}}{0,18 \times 0,323 \times 40} = 54,2 \text{ (хв)}$$

де δ – товщина покриття, мкм;

d – густина хрому, 7,0 г/см³ ;

$V_{\text{с}}$ – катодний вихід за струмом, 18%;

$K_{\text{е}} = 0,323$ г/А. год – електрохімічний еквівалент;

$i_{\text{к}}$ – середня катодна густина струму 40 А/дм² ;

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

$$\tau_{\text{об}} = 2 \text{ хв}$$

$$\tau = 54,2 + 2 = 56,2 \text{ хв}$$

Витрати часу на початковий запуск обладнання, кінцеве вивантаження ванн, на допоміжні операції враховуємо за допомогою коефіцієнта $K_{\text{обл}}$: для роботи в 2 зміни – 1,06–1,1.

Кількість оброблюваних завантажень

$$n = \frac{T_d \cdot 60}{\tau \cdot K_{об}}$$

$$n = \frac{3781 \times 60}{56,2 \times 1,04} = 3881,4$$

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

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

$$\tau_c = 8585 \cdot 56,2 \cdot 1,04 / 60 = 8363 \text{ год}$$

Розраховуємо кількість одночасних завантажень усіх ванн, m^2

$$Y_c = \tau_c / T_d$$

$$Y_c = 8363 / 3781 = 2,21 \text{ м}^2$$

2.5 Перерахунок діючого обладнання

Обираємо ванну для гальванічного нанесення хромового покриття з наступними внутрішніми розмірами:

довжина $l = 1500\text{мм}$,

ширина $b = 800\text{мм}$,

висота $h = 1000\text{мм}$.

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

$$l_n = l - 2l_1,$$

$$l_n = 1,5 - 2 \cdot 0,1 = 1,3 \text{ м},$$

де l – внутрішня довжина ванни, м; $l_1 = 0,1$ м – відстань від краю підвіски до стінки ванни.

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

$$h_n = 1,0 - 0,15 - 0,05 - 0,15 = 0,65 \text{ м},$$

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.

Визначивши габаритні розміри підвіски та знаючи габаритні розміри деталей, розраховуємо кількість деталей n_d на одній підвісці. Враховуємо розміри деталі та необхідні відстані між ними по 2 см. Ескіз підвіски з деталями наведено на рис. 2.

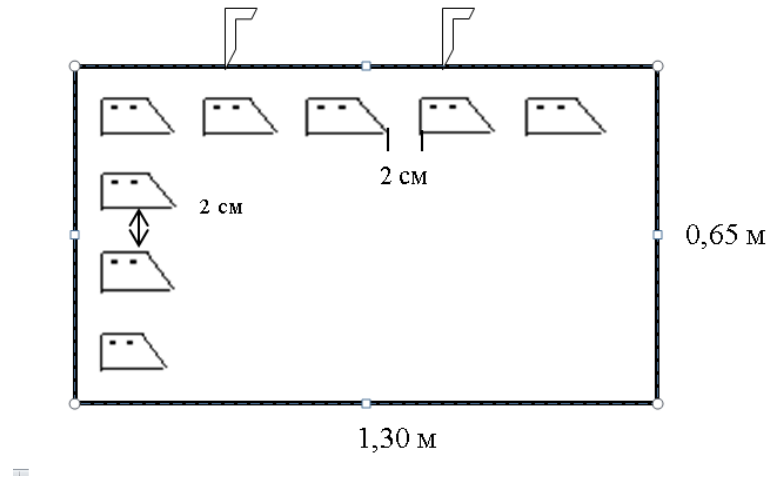


Рис.2. Схема підвіски з деталями

Отже, на одній підвісці можна розмістити 20 деталей

$$S_n = S_d \cdot n_d,$$

$$S_n = 6,8 \cdot 10^{-2} \cdot 20 = 1,36 \text{ м}^2$$

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):

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

$$S_{03} = 1,36 \cdot 2 = 2,72 \text{ м}^2$$

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

Відстань між анодами та краєм підвіски повинна відповідати нормативному значенню, яке складає від 0,1 до 0,5 м. Це необхідно для осадження рівномірного покриття. Для двопозиційної ванни

$$l(a-k) = B - B_p - 2 \cdot B_a - 2 \cdot B_{1/2},$$

де B - внутрішня ширина ванни, м

B_p - товщина підвіски з деталями, м

B_a - товщина анодів, м

B_1 - відстань між анодом та боковими стінками ванни, приймають 0,07.

$$l(a-k) = (1 - 0,14 - 2 \cdot 0,01 - 2 \cdot 0,1) / 2 = 0,320 \text{ м}$$

Знайдена величина $l(a-k)$ відповідає унормованому значенню. Беручи визначену величину одноразового завантаження ванни S_{oz} , рахуємо кількість ванн, потрібних для виконання річної виробничої програми.

$$P_B = Y_c / S_{oz}$$

$$P_B = 2,21 / 1,36 = 1,63 \approx 2$$

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

$$P_{p1} = S_{oz} \cdot P_B \cdot T_d \cdot 60 / \tau \cdot K_{obl}$$

$$P_p = 1,36 \cdot 2 \cdot 3781 \cdot 60 / 56,2 \cdot 1,04 = 10557,4 \text{ м}^2$$

Тоді коефіцієнт завантаження обладнання:

$$K_{зав} = P_p / P_{p1}$$

$$K_{зав} = 8585 / 10557,4 = 0.81$$

2.6 Обґрунтування вибору технологічного процесу

Враховуючи тип і розміри оброблюваних деталей, обсяг виробничої програми, специфіку нанесення хромового покриття, обираємо основні операції технологічного процесу.

Для підготовки площі поверхні деталей використовуємо хімічне та електрохімічне знежирення, процес травлення. Обов'язковою операцією є промивання деталей після кожного етапу обробки поверхні.

Для зносостійкого твердого хромування в даному проєкті запропоновано електроліт наступного складу: CrO_3 – 150...175 г/дм³, H_2SO_4 – 1,5...1,75 г/дм³, $Cr_2(SO_4)_3$ – 1...3 г/дм³.

Електролітичне осадження покриття проводять з застосуванням розбавленого електроліту. Введення іонів Cr(III) в розчин електроліту дає можливість збільшити вихід за струмом та швидкість осадження хрому. Гальванічне осадження проводять при катодній густині струму 40 ± 5 А/дм², анодна густина струму 15 ± 5 А/дм², температура 40 ± 2 °С.

Отримуємо наступну технологічну схему для нанесення твердого хромового покриття:

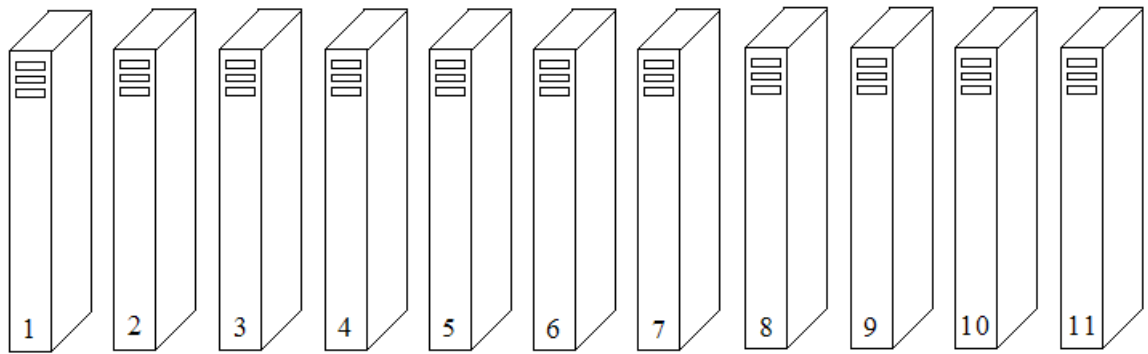


Рис. 3 Технологічна схема для нанесення твердого хромового покриття

1. Ванна хімічного знежирення

Використовують органічний розчинник у випадку наявності значного забруднення поверхні деталей мастильно-охолоджуючими рідинами

2. Ванна реверсного електрохімічного знежирення;

Беремо сталеві аноди покриті шаром нікелю.

У ванні електрохімічного знежирювання є вентиляція, нагрів, футеровку корпусу, перемішування, теплоізоляцію.

3. ванна каскадного промивання;

4. ванна травлення;

Процес травлення відбувається у ванні, яка має пластикатову або вінілпластову футерівку, барботер, бортову вентиляцію.

5. ванна холодного промивання;

6. ванна каскадного промивання;

7. ванна хромування;

8. ванна вловлювання;

9. ванна холодної промивки;

10. ванна гарячої промивки;

11. сушка

Склад електроліту та режими роботи гальванічних ванн наведенні у таблиці 8.

Таблиця 8

Склад електролітів та режими роботи гальванічних ванн

Операція	Склад розчину і концентрація		Режим обробки		
	Найменування компонентів, хімічна формула	г/дм ³	Час обробки, хв.	Температура, °С	Густина струму, А/дм ²
Монтаж деталей на підвіску			3		
Електрохімічне знежирення	Натрій гідроксид, NaOH;	20-40	Катод 5-7	65-85	3-5
	Кальцинована сода; Na ₂ CO ₃	15-35	Анод 0,5-2		
	Натрій ортофосфат, Na ₃ PO ₄	20-35			
	Синтанол ДС-10	3-5			
Каскадна промивка у гарячій воді			2-4	60-70	
Каскадна промивка у холодній воді			2-4	Кімн.	
Травлення	Хлоридна кислота HCl	50-100	10	Кімн.	
Промивка у холодній воді			2-4	Кімн.	
Каскадна промивка у холодній воді			2-4	Кімн.	
Каскадна промивка у гарячій воді			2-4	60-70	
Хромування	CrO ₃ 150...175 г/дм ³ H ₂ SO ₄ 1,5...1,75 г/дм ³ Cr ₂ (SO ₄) ₃ 1...3 г/дм ³	150-175 1,5-1,75 1-3	56	40	40

Вловлювання	Не проточна вода		1-2	Кімн.	
Промивка у холодній воді			1-2	Кімн.	
Промивка у гарячій воді			1-2	70-80	
Сушка			1-2	80-90	
Демонтаж деталей з підвіски			3		

2.7 Розрахунок сили струму на гальванічній ванні

Силу струму визначаємо на ваннах хромування та електрохімічного знежирювання.

Сила струму обраної ванни розраховується як добуток величини густини струму на катоді i_k , А/дм² та площі деталей одноразового завантаження S_{oz} , дм²

$$I = K \cdot i_k \cdot S_{oz} = 1,03 \cdot 40 \cdot 272 = 5603 \text{ A,}$$

коли $i_k = 40 \text{ А/дм}^2$ - катодна густина струму;

$S_{oz} = 272 \text{ дм}^2$ - площа деталей у ванні;

$K = 1,03 - 1,15$ (прийmemo $K = 1,03$) – коефіцієнт, що враховує втрати електрики на відновні процеси на контактах підвісного пристрою.

В процесі хромування із сульфатного електроліту на електродах перебігають наступні реакції:

на катоді:

- 1) осадження хрому I_1 з виходом за струмом 18 %;
- 2) відновлення дихромат-аніону до йону хрому (III) I_2 з виходом за струмом 5 %;
- 3) виділення водню I_3 з виходом за струмом 77 %;

на аноді:

- 1) виділення кисню I_4 з виходом за струмом 95 %;
- 2) окиснення йону хрому (III) I_5 з виходом за струмом 5 %.

Сила струму, яка витрачається на кожну реакцію:

на катоді:

$$I_1 = I \cdot V_{c1} = 5603 \cdot 0,18 = 1008,54 \text{ A}$$

$$I_2 = I \cdot V_{c2} = 5603 \cdot 0,05 = 280,15 \text{ A}$$

$$I_3 = I \cdot V_{c3} = 5603 \cdot 0,77 = 4314,31 \text{ A}$$

на аноді:

$$I_4 = I \cdot V_{a4} = 5603 \cdot 0,95 = 5322,85 \text{ A}$$

$$I_5 = I \cdot V_{a5} = 5603 \cdot 0,05 = 280,15 \text{ A}$$

Отримані результати подано в таблиці 9.

Таблиця 9

Баланс струму ванни хромування

Надходження	Q, А· год	%	Витрати	Q, А· год	%
На катоді: від зовнішнього джерела струму	5603	100	На осадження хрому I ₁ На утворення хрому (III) I ₂ На виділення водню I ₃	1008,54 280,15 4314,31	18 5 77
Разом	5603	100	Разом	5603	100
На аноді: від зовнішнього джерела струму	5603	100	На виділення кисню I ₄ На окиснення хрому (III) I ₅	5322,85 280,15	95 5
Разом	5603	100	Разом	5603	100

2.8 Розрахунок балансу напруги на гальванічній ванні

Напруга на ванні (U_b) розраховується за формулою, В:

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

де : $E_a - E_k$ - різниця потенціалів під дією струму анода й катода;

ΔU - омичне падіння напруги у електроліта;

$\Delta U_1 + \Delta U_k$ зменшення напруги у провідниках першого роду

(електродах, штангах) та контактах.

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

$$\Delta U_e = \frac{i_{cp} \cdot l_{a-k}}{\chi},$$

або

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

де i_{cp} – середня густина струму в міжелектродному просторі, А/дм², розраховується за формулою : $i_{cp} = \sqrt{i_k \cdot i_a}$:

$$i_{cp} = \sqrt{40 \times 15} = 24,49 \text{ А/дм}^2;$$

$i_k=40$ А/дм² – середня катодна густина струму;

$i_a=15$ А/дм² – середня анодна густина:

E_k – потенціал катода;

E_a – потенціал анода;

χ – питома електропровідність електроліту

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

$R_c = 1,62$ Ом·м – питомий електричний опір електроліту.

$$\Delta U_e = 24,49 \cdot 1,62 \cdot 0,220 = 8,73 \text{ В.}$$

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:

$$U_i = \frac{E_a - E_k + \Delta U_e}{0,9},$$

$$U_i = \frac{1,8 - (-0,8) + 8,73}{0,9} = 12,59 \text{ В}$$

Сума падіння напруги на електродах, провідниках і контактах ванни:

$$\Delta U_i + \Delta U_k = 0,1 \times U_i = 0,1 \times 12,59 = 1,26 \text{ В.}$$

Напруга джерела струму для живлення ванни нікелювання:

$$U_{dc} = U_i / 0,9 = 12,59 / 0,9 = 13,99 \text{ В.}$$

Баланс напруги на ванні хромування наведено в таблиці 10.

Таблиця 10

Баланс напруги на ванні хромування

Надходження	В	%	Витрати	В	%
Напруга на Ванні	12,59	100	Різниця потенціалів під струмом $E_a - (-E_k)$	2,6	20,7
			Падіння напруги в електроліті ΔU_e	8,73	69,3
			Падіння напруги в електродах, контактах і провідниках $\Delta U_1 + \Delta U_k$	1,26	10
Разом	12,59	100	Разом	12,59	100

Беручи в основу підрахунки сили струму й напруги, обираємо джерело струму - випрямний агрегат серії ВАКР - 6300-12У4.

2.9 Баланс енергії

Електрична енергія $W_{\text{заг}}$ в процесі електролізу переходить в хімічну енергію $W_{\text{хім}}$ та в теплову енергію (джоулеву теплоту) $W_{\text{дж}}$:

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

Хімічна енергія $W_{\text{хім}}$ характеризує зміни, які відбуваються в результаті перебігу електрохімічних реакцій.

Сумарні електрохімічні процеси, які протікають у ванні хромування:

1. $\text{CrO}_3 \rightarrow \text{Cr} + 1,5\text{O}_2$ ($\text{BC}_1 = 18\%$);
2. $\text{Cr}^{6+} + 3e \leftrightarrow \text{Cr}^{3+}$ ($\text{BC}_2 = 5\%$);
3. $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + 0,5\text{O}_2$ ($\text{BC}_3 = 77\%$).

Теплова енергія $W_{\text{дж}}$ використовується на нагрівання електроліту.

Кількість електричної енергії, яка використовується на перебіг процесу в ванні, визначаємо за наступною формулою:

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

Час роботи ванни під струмом $\tau = 54,2 \text{ хв} / 56,2 \text{ хв} = 0,964$

$$W_{заг} = 12,59 \cdot 5603 \cdot 0,964 \cdot 3600 \cdot 10^{-3} = 243792 \text{ кДж},$$

де I – струм на ванні, А; U_i – напруга на ванні, В;

$W_{хім} = 0$, а $W_{заг} \approx W_{дж} \approx 243792 \text{ кДж}$.

2.10 Тепловий розрахунок гальванічних ванн

Тепловий розрахунок ванн дає змогу визначити кількість теплоти, яку необхідно підводити до ванни як для розігріву, так і для підтримки робочої температури. За допомогою отриманих даних визначають параметри нагрівального пристрою та витрати теплоносія.

Визначення витрат теплоти на розігрів ванни

Кількість теплоти $Q_{роз}$ для розігріву ванни є сумою витрат теплоти Q_1 на розігрів електроліту та ванни, анодів, а також витрат теплоти $Q_2/2$ на компенсацію втрат у навколишнє середовище.

Q_2 – теплові втрати ванни при робочій температурі (приймають, що в процесі розігріву теплові втрати приблизно у 2 рази нижчі).

$$Q_{роз} = Q_1 + Q_2/2,$$

$$Q_1 = (V_1 C_1 d_1 + C_2 m_2 + C_3 m_3 + C_4 m_4) \cdot (t_k - t_n)$$

$$V_1 = NBLK_{зав} = 1,5 \cdot 0,8 \cdot 1,0 \cdot 0,81 = 0,97 \text{ м}^3,$$

де $V_1 C_1 d_1$ – відповідно об'єм, питома масова теплоємність і густина електроліту, що нагрівається $d_1 = 1170 \text{ кг/м}^3$, $C_1 = 3060 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$, $V_1 = 0,97 \text{ м}^3$;

C_2 – теплоємність матеріалу корпусу ванни (для сталі близько $500 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$);

$m_2 = 465 \text{ кг}$ – маса ванни;

C_3 – теплоємність матеріалу футеровки (для вініпласту – близько $1630 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$);

$m_3 = 34 \text{ кг}$ – маса футеровки;

C_4 – теплоємність матеріалу анодів, $C_4 = 448 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$;

m_4 – маса анодів у ванні, $m_4 = 112$ кг;

$t_k - t_H = 40 - 20$ – кінцева та початкова температура електроліту.

$$Q_1 = (0,97 \cdot 3060 \cdot 1170 + 500 \cdot 465 + 34 \cdot 1630 + 448 \cdot 112) \cdot (40 - 20) = \\ = 3810890 \text{ кДж.}$$

Кількість теплоти на компенсацію теплових втрат у навколишнє середовище Q_2 є сумою втрат теплоти нагрітим електролітом через стінки ванни Q_3 та втрат теплоти через дзеркало електроліту Q_4 ;

$$Q_2 = Q_3 + Q_4,$$

Q_3 і Q_4 знаходимо за такими формулами:

$$Q_3 = q_3 \cdot F_k \cdot \tau_p,$$

$$Q_4 = q_4 \cdot F_3 \cdot \tau_p,$$

де F_k – площа поверхні корпусу ванни, m^2 ;

$$F_k = LB + 2LN + 2BH = 1,5 \cdot 0,8 + 2 \cdot 1,5 \cdot 1,0 + 2 \cdot 0,8 \cdot 1,0 = 5,8 \text{ м}^2,$$

F_3 – площа поверхні дзеркала електроліту, m^2 ;

$$F_3 = LB = 1,5 \cdot 0,8 = 1,2 \text{ м}^2$$

τ_p – час розігрівання ванни (приймаємо 3600 сек);

q_3 – величина питомих витрат теплоти через стінки ванни ($Вт/м^2$).

$$q_3 = b_0 + b_1 \cdot t.$$

$b_0 = -40,54$; $b_1 = 2,435$ – значення відповідних коефіцієнтів при товщині стінки 25 мм

$$q_3 = -40,54 + 2,435 \cdot 40 = 56,86 \text{ Вт/м}^2,$$

За наведеним нижче емпіричним рівнянням можна розрахувати величину питомих витрат теплоти q_4 ($Вт/м^2$) через дзеркало електроліту:

$$q_4 = 82 + 0,0115 \cdot t^3 = 82 + 0,0115 \cdot 40^3 = 818 \text{ Вт/м}^2,$$

$$Q_3 = 56,86 \cdot 5,8 \cdot 3600 \cdot 10^{-3} = 1187 \text{ кДж,}$$

$$Q_4 = 818 \cdot 1,2 \cdot 3600 \cdot 10^{-3} = 3533,8 \text{ кДж,}$$

$$Q_2 = 1187 + 3533,8 = 4720,8 \text{ кДж}$$

$$Q_{\text{роз}} = 3810890 + \frac{4720,8}{2} = 3813250,4 \text{ кДж,}$$

2.11 Витрати теплоти на підтримання робочої температури ванни

Кількість теплоти $Q_{\text{роб}}$ для підтримання робочої температури в ванні електрохімічного гальванування є сумою витрат теплоти на компенсацію теплових втрат у доквілля Q_2 і витрат теплоти Q_5 на підігрів підвісок з деталями, що періодично поступають у ванну.

З цієї величини вираховують значення джоулевої теплоти $Q_{\text{дж}}$, яка виділяється при електролізі

$$Q_{\text{роб}} = Q_2 + Q_5 - Q_{\text{дж}}$$

Розрахунок величини $Q_{\text{роб}}$ здійснюємо на одну годину роботи ванни. Використовуємо значення величини Q_2 з попередніх розрахунків.

Величину Q_5 можна визначити за формулою:

$$Q_5 = (C_5 \cdot M_5 + C_6 \cdot M_6)(t_k - t_n)n_{03}$$

де C_5 і C_6 – питомі масові теплоємності матеріалу підвіски та оброблюваних деталей відповідно, Дж/(кг·К);

M_5 і M_6 – маси підвісочного пристрою та деталей, оброблюваних на одній підвісці, кг;

n_{03} – кількість підвісок з деталями, які обробляються у ванні за одну годину.

Величину n_{03} можна визначити як $60/\tau$, де $\tau = \tau_r + \tau_{об} = 56,2$ хв.

$$n_{03} = 60 / 56,2 \approx 1$$

Величина $Q_{\text{дж}}$ відповідає $W_{\text{дж}}$

Визначаємо масу підвіски та масу деталей:

$$m = V_{\text{п}} \cdot \rho_{\text{Cu}} = (1,3 \cdot 0,05 \cdot 0,05) \cdot 8960 = 29,12 \text{ кг},$$

$$m = V_{\text{д}} \cdot \rho_{\text{ст}} \cdot n_{\text{д}} = 0,04 \cdot 0,0025 \cdot 7850 \cdot 12 = 9,6 \text{ кг}.$$

$$Q_5 = (383,5 \cdot 20,4 + 500 \cdot 9,6)(40 - 20) \cdot 60 / 56,2 = 269539 \text{ кДж}$$

Тому

$$Q_{\text{роб}} = 4720,8 + 269539 - 3813250,4 = -3538991 \text{ кДж}$$

2.12 Розрахунок витрат матеріалів

2.12.1 Визначення витрат анодів

Визначення витрат анодів на початковий запуск обладнання.

Витрати анодів при запуску обладнання (кг) визначаються за формулою:

$$G_{\text{аз}} = K_1 \cdot K_2 \cdot n_{\text{аш}} \cdot l_{\text{в}} \cdot h_{\text{в}} \cdot \delta_{\text{а}} \cdot d_{\text{м}} \cdot n_{\text{в}}$$

K_1 — коефіцієнт, який враховує співвідношення загальної ширини анодів до довжини ванни ($K_1 = 0,6$);

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

$n_{\text{аш}}$ - кількість анодних штанг ванни;

$l_{\text{в}}$ - внутрішня довжина ванни, м;

$h_{\text{в}}$ - внутрішня висота ванни, м;

$\delta_{\text{а}}$ - товщина анодів, м;

$d_{\text{м}}$ - густина матеріалу анода, кг/м^3

$n_{\text{в}}$ - кількість ванн.

$$G_{\text{аз}} = 0,6 \cdot 0,8 \cdot 1,5 \cdot 0,05 \cdot 11340 \cdot 2 = 816,5 \text{ кг.}$$

Витрати нерозчинних анодів при виконанні річної виробничої програми $G_{\text{ар}}$, кг розраховуємо за формулою:

$$G_{\text{ар}} = S \cdot A_{\text{р}}, \text{ кг}$$

S – площа поверхні нанесеного покриття при виконанні річної програми, м^2 ,

$A_{\text{р}}$ – витрати нерозчинних анодів для нанесення покриття товщиною 1,6, г/м^2 ;

$$G_{\text{ар}} = 8585 \cdot 1,6 \cdot 10^{-3} = 13,7 \text{ кг.}$$

2.12.2 Розрахунок витрат хімічних реагентів

1) Розраховуємо витрати хімічних реагентів на перший запуск устаткування.
Витрати кожного з компонентів електроліту G_i (кг) знаходимо за формулою:

$$G_i = C_i \cdot V_B \cdot K_{\text{зап}} \cdot n_B,$$

де C_i – концентрація компонента електроліту, кг/м³;

V_B – об'єм ванни, м³ ($V_B = 1,2$ м³);

$K_{\text{зап}} = 0,81$ – коефіцієнт завантаження ванни;

$n_B = 2$ – кількість ванн даного типу.

Об'єм ванни розраховуємо за формулою:

$$V_B = L \cdot B \cdot H,$$

де $L = 1,5$ м; $B = 0,8$ м; $H = 1$ м.

$$V_B = 1,5 \cdot 0,8 \cdot 1 = 1,2 \text{ м}^3.$$

Електроліт хромування містить наступні компоненти

CrO_3 150...175 г/дм³,

H_2SO_4 1,5...1,75 г/дм³,

$\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$ 1...3 г/дм³.

Розраховуємо витрату реагентів на перший запуск устаткування, виходячи з таких концентрацій:

$$C(\text{CrO}_3) = 170 \text{ кг/м}^3, C(\text{H}_2\text{SO}_4) = 1,7 \text{ кг/м}^3, C(\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3) = 3 \text{ кг/м}^3$$

$$G(\text{CrO}_3) = 170 \cdot 1,2 \cdot 0,81 \cdot 2 = 330,5 \text{ кг};$$

$$G(\text{H}_2\text{SO}_4) = 1,7 \cdot 1,2 \cdot 0,81 \cdot 2 = 3,3 \text{ кг};$$

$$G(\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3) = 3 \cdot 1,2 \cdot 0,81 \cdot 2 = 5,8 \text{ кг}.$$

Розраховуємо витрати хімічних реактивів на виконання річної виробничої програми за формулою:

$$G_i = C_i \cdot V_{\text{вт}},$$

де $V_{\text{вт}}$ – об'єм електроліту, який витрачається на виконання виробничої програми, м³.

Величину $V_{\text{вт}}$ розраховуємо за формулою:

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

де S – площа поверхні деталей за рік, м²;

1,15 – коефіцієнт, що враховує площу тієї частини, що занурюється;

$A_B = 0,2 \cdot 10^{-3}$, $\text{м}^3/\text{м}^2$ – норма витрати електроліту.

$$V_{\text{вт}} = 1,15 \cdot 8585 \cdot 0,2 \cdot 10^{-3} = 1,97 \text{ м}^3.$$

Отже,

$$G(\text{CrO}_3) = 170 \cdot 1,97 = 334,9 \text{ кг};$$

$$G(\text{H}_2\text{SO}_4) = 1,7 \cdot 1,97 = 3,35 \text{ кг};$$

$$G(\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3) = 3 \cdot 1,97 = 5,91 \text{ кг}.$$

Також потрібно враховувати витрати CrO_3 на осадження хромового покриття на катоді за такими даними: на 1 м^2 площі поверхні витрачають $13,3 \cdot 10^{-3}$ кг CrO_3 для нанесення шару хрому товщиною 1 мкм.

В даному проєкті товщина нанесення хрому складає 30 мкм, тому:
 $G(\text{CrO}_3) = 13,3 \cdot 10^{-3} \cdot 8585 \cdot 30 = 3425,4 \text{ кг}.$

2.13 Розрахунок витрати води

Вода використовується для приготування електроліту, в процесі електролізу внаслідок її розкладу, для винесення газами та випаровування з поверхні електроліту. Проте основна кількість води використовується на промивні операції.

Витрата води для приготування електроліту, кг:

$$G_{\text{вод}} = C_{\text{вод}} \cdot V_{\text{заг}}$$

де C - вміст води в розчині $\text{кг}/\text{м}^3$.

$$C_{\text{вод}} = d_{\text{ел}} - (C_1 + C_2 + C_3) = 1330 - (170 + 1,7 + 3) = 1155,3 \text{ кг}/\text{м}^3,$$

де $d_{\text{ел}}$ - густина електроліту ($1330 \text{ кг}/\text{м}^3$);

$$C(\text{CrO}_3) = 170 \text{ кг}/\text{м}^3, C(\text{H}_2\text{SO}_4) = 1,7 \text{ кг}/\text{м}^3, C(\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3) = 3 \text{ кг}/\text{м}^3$$

$V_{\text{заг}}$ - річна витрата електроліту – розраховується за формулою:

$$V_{\text{заг}} = V_{\text{в}} \cdot K_{\text{зап}} \cdot n_{\text{в}} + V_{\text{вт}},$$

де $V_{\text{в}}$ - об'єм ванни, $1,2 \text{ м}^3$;

$K_{\text{зап}}$ - коефіцієнт наповнення ванни ($K_{\text{зап}} = 0,81$);

$n_{\text{в}}$ - кількість ванн (2);

$V_{\text{вт}}$ - об'єм електроліту, винесеного деталями ($1,97 \text{ м}^3$).

$$V_{\text{заг}} = V_{\text{в}} \cdot K_{\text{зап}} \cdot n_{\text{в}} + V_{\text{вт}} = 1,2 \cdot 0,81 \cdot 2 + 1,97 = 3,91 \text{ (м}^3\text{)},$$

Тому

$$G_{\text{вод}} = C_{\text{вод}} \cdot V_{\text{заг}} = 1155,3 \cdot 3,91 = 4517,2 \text{ кг}$$

Використання води на електрохімічний розклад при електролізі розраховуємо наступним чином:

$$G_{\text{H}_2\text{O}} = I \cdot 18 \cdot T_{\text{д}} \cdot V_{\text{с1}} \cdot n_{\text{в}} \cdot 10^{-5} / (2 \cdot 26,8),$$

де $V_{\text{с1}}$ – вихід за струмом для побічного процесу електролізу, %.

$$G_{\text{води2}} = 5603 \cdot 18 \cdot 3781 \cdot 77 \cdot 2 \cdot 10^{-5} / (2 \cdot 26,8) = 10956 \text{ кг.}$$

Витрати води на винесення з газами:

При електролізі на катоді виділяється водень, а на аноді – кисень.

Розраховуємо об'єми газів.

$$G_{\text{H}_2\text{O}} = g_{\text{H}_2\text{O}} \cdot V_{\text{газу}} \cdot n_{\text{в}}$$

$$C_{\text{води3}} = 0,805 \cdot P_{\text{води}} / (P_{\text{б}} - P_{\text{води}}),$$

де $P_{\text{води}}$ – парціальний тиск водяної пари за температури електролізу ($P_{\text{води}} \approx 16 \text{ кПа}$);

$P_{\text{б}}$ – загальний тиск парогазової суміші, кПа.

$$C_{\text{води3}} = 0,805 \cdot 16 / (101,3 - 16) = 0,15 \text{ кг/м}^3.$$

$V_{\text{г0}}$ обчислюють для об'ємів кисню та водню, що приведені до нормальних умов:

$$V_{\text{H}_2} = 0,418 \cdot I \cdot T_{\text{д}} \cdot V_{\text{с1}} \cdot n_{\text{в}} \cdot 10^{-5} = 0,418 \cdot 5603 \cdot 3781 \cdot 77 \cdot 2 \cdot 10^{-5} = 13637 \text{ м}^3,$$

$$V_{\text{O}_2} = 0,209 \cdot I \cdot T_{\text{д}} \cdot V_{\text{с1}} \cdot n_{\text{в}} \cdot 10^{-5} = 0,209 \cdot 5603 \cdot 3781 \cdot 95 \cdot 2 \cdot 10^{-5} = 8412,5 \text{ м}^3.$$

Сума об'ємів цих газів становить:

$$V_{\text{г0}} = V_{\text{H}_2} + V_{\text{O}_2} = 13637 + 8412,5 = 22049,5 \text{ м}^3.$$

Розраховуємо об'єм вологого газу при температурі електролізу:

$$V_{\text{г1}} = (V_{\text{г0}} \cdot P_{\text{б}} \cdot (273 + t_{\text{ел}})) / (273 \cdot (P_{\text{б}} - P_{\text{води}})),$$

де $t_{\text{ел}}$ – температура електролізу ($t_{\text{ел}} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$)

$$V_{\text{г1}} = (22049,5 \cdot 101,3 \cdot (273 + 40)) / (273 \cdot (101,3 - 16)) = 30022 \text{ м}^3,$$

Тоді

$$G_{\text{води3}} = 0,15 \cdot 30022 = 4503 \text{ кг.}$$

Витрати води на випаровування з поверхні електроліту розраховуємо за формулою:

$$G_{\text{води4}} = 45,6 \cdot K_{\text{в}} \cdot S_{\text{ел}} \cdot (P_{\text{води}} - P_{\text{п}}) \cdot T_{\text{д}} \cdot n_{\text{в}} / P_{\text{б}},$$

де 45,6 – коефіцієнт пропорційності, кг/(м² · год);

$K_{\text{в}}$ – коефіцієнт, що залежить від швидкості руху повітря над поверхнею дзеркала електроліту ($K_{\text{в}} = 0,86$);

$S_{\text{ел}}$ – поверхня дзеркала електроліту ($S_{\text{ел}} = 1,2 \text{ м}^2$);

$P_{\text{п}}$ – парціальний тиск водяної пари при температурі та вологості навколишнього середовища, Па.

Значення $P_{\text{п}}$ знаходимо з формули:

$P_{\text{п}} = P_{\text{с}} \cdot \varphi / 100$, де $P_{\text{с}}$ – тиск насиченої водяної пари при температурі навколишнього середовища, Па ($P_{\text{с}} = 2337 \text{ Па}$);

φ – вологість повітря в цеху (в середньому $\varphi = 70 \%$).

Тому

$$P_{\text{п}} = 2337 \cdot 70 / 100 = 1636 \text{ Па} \approx 1,6 \text{ кПа.}$$

Отже,

$$G_{\text{води4}} = 45,6 \cdot 0,86 \cdot 1,2 \cdot (16 - 1,6) \cdot 3781 \cdot 2 / 101,3 = 50586 \text{ кг.}$$

Витрати води на промивку. При проведенні електролізу значна кількість води витрачається на промивку деталей, як при підготовці їх поверхні до процесу нанесення покриття, так і після різних стадій самого процесу. Недостатня промивка деталей призводить до поганої адгезії нанесеного покриття до металу основи, можливого виникнення дефектів на покритті.

Для розрахунку беремо триступеневу промивку та визначаємо погодинну витрату води при промивці способом занурення:

$$V_{\text{год3}} = A_{\text{в}} \cdot \sqrt[3]{K \cdot P_{\text{год}}}, \text{ дм}^3/\text{год},$$

де $A_{\text{в}}$ – норми виносу води з поверхні деталей, дм³/год ($A_{\text{в}} = 0,2 \text{ дм}^3/\text{год}$);

$P_{\text{год}}$ – виробнича програма ванни за годину, м²/год ($P_{\text{год}} = 2,27 \text{ м}^2/\text{год}$);

K – критерій остаточної промивки деталей, що визначається за співвідношенням: $K = C_0/C_k$.

Спочатку знаходимо концентрацію хромового ангідриду в перерахунку на Cr^{6+} у ванні обробки, після якої відбувається промивка:

$$C_0(CrO_3) = C(CrO_3)/M(CrO_3) \cdot A(Cr),$$

$$C_0(CrO_3) = 170/100 \cdot 52 = 88,4 \text{ г/дм}^3.$$

Гранично допустима концентрація CrO_3 у воді після промивки становить $C_k = 0,01 \text{ г/дм}^3$. В даному процесі гальванічного нанесення хрому передбачено уловлювання електроліту, тому для визначення рівня остаточної промивки необхідно застосувати коефіцієнт 0,4.

$$K = C_0/C_k \cdot 0,4 = 88,4/0,01 \cdot 0,4 = 3536;$$

$$V_{\text{год}^3} = 0,2 \cdot \sqrt[3]{3536 \cdot 2,27} = 6,73 \text{ дм}^3/\text{год}.$$

Загальні витрати води на промивку при здійсненні виробничої річної програми розраховуються за формулою:

$V_{\text{сум}} = V_{\text{год}} \cdot T_{\text{д}} \cdot 1,5$, де 1,5 – коефіцієнт, що враховує допустиме падіння тиску води у водопровідній мережі.

$$V_{\text{сум}} = 6,73 \cdot 3781 \cdot 1,5 = 38,2 \text{ м}^3.$$

2.14 Контроль виробництва

2.14.1 Контроль якості покриттів

Якість промислової продукції - це сукупність її властивостей, що визначають здатність цієї продукції до успішної експлуатації з високими техніко-економічними показниками. Вимоги, яким має задовольняти якість продукції, встановлюються державними стандартами та технічними умовами.

Основним показником якості технічних виробів є їх надійність. Вона визначається ймовірністю безвідмовної роботи протягом певного терміну часу в заданих умовах експлуатації.

Для підвищення якості виробів на заводах впроваджують заходи щодо вдосконалення їх конструкції, технології виготовлення та організації виробничого процесу, підвищення кваліфікації робітників, вдосконалення

організації технічного контролю за якістю готової продукції. У сучасних умовах відділ технічного контролю на виробництві є контролюючою організацією, яка запобігає випуску продукції, що не відповідає стандартам, кресленням і технічним умовам.

Основна увага відділу технічного контролю зосереджена на контролі якості та випробуванні готової продукції підприємства, аналізу наявних недоліків у виробах, виявлених при їх виготовленні, випробуваннях та експлуатації, розробкою заходів та контролем за усуненням цих недоліків.

У цехах нанесення гальванічних покриттів застосовуються наступні типи контролю:

- 1) попередній огляд деталей перед покриттям;
- 2) контроль за процесом покриття;
- 3) контроль за якістю покриття деталей;
- 4) контроль за станом обладнання, приладів та приміщення.

Попередньому огляду перед покриттям піддаються тільки ті деталі, для яких це передбачено технологією контролю. Його проводять з профілактичною метою для виявлення поверхневих дефектів, що не допускають передачу деталей на покриття. Огляд деталей здійснюється за допомогою лупи.

Якщо дефекти незначні, деталі передаються на виправлення. Якщо деталі не підлягають корекції, вони ізолюються і оформляються в установленому порядку.

Систематично мають контролюватись дотримання виконання всіх операцій технологічного процесу; перевіряють знежирення деталей, склад розчинів, монтаж деталей на підвісках, промивку перед покриттям, температуру ванн, густину струму, напругу, час витримки деталей в ванні, промивку деталей після покриття, коригують склад електроліту хромування.

Після проходження всіх технологічних процесів деталі надходять на контрольний пункт.

Склад ванн перевіряється періодично за графіком працівниками хімічної

лабораторії. Результати всіх перевірок записуються в журнали.

Всі види виробничих і контрольних процесів, склади ванн, їх аналіз та технологічні режими в гальванічних цехах повинні відповідати затвердженими інструкціями.

2.14.2 Методи контролю якості покриттів

Контроль зовнішнього вигляду покриттів

Метод заснований на виявленні дефектів поверхні покриття зовнішнім оглядом. Його можна застосовувати для деталей будь-якої форми та габаритних розмірів.

Контроль проводять оглядом деталей неозброєним оком в приміщенні з освітленням не менше 300 лк на відстані 25 см від поверхні виробу. Необхідність застосування оптичних приладів із зазначенням кратності збільшення повинна бути обумовлена в технічній документації на виріб.

Контроль міцності зчеплення покриттів

Метод нанесення сітки подряпин застосовують для визначення міцності зчеплення покриттів, товщиною не більше 20 мкм. На поверхні контрольованого покриття сталевим вістрям наносять 4-6 паралельних ліній глибиною до підшару металу на відстані від 2.0 до 3.0 мм один від одного і 4-6 паралельних ліній, перпендикулярних до них.

Лінії проводять в одному напрямку. На контрольованій поверхні не повинно спостерігатися відшаровування покриття.

2.15 Автоматичне регулювання параметрів процесу нанесення твердого хромового покриття

Процес гальванічного хромування з розбавленого хроматного електроліту протікає зі зміною складу розчину в процесі електролізу. Для отримання якісного покриття необхідно постійно підтримувати технологічний режим. В умовах промислового гальванічного хромування доцільно

автоматизувати певні операції для покращення якості продукції, а також для збільшення продуктивності [21,22].

Згідно технологічної схеми процесу необхідно підтримувати наступні параметри:

1. температура - 40 °С;
2. рівень електроліту у ванні - 0,84 м;
3. напруга та струм ванні (12,59 В, 5603 А);
4. співвідношення концентрацій компонентів розчину

CrO_3 150...175 г/дм³

H_2SO_4 1,5...1,75 г/дм³

$\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$ 1...3 г/дм³.

Температура. Для автоматичного регулювання температури можна використовувати 2 контури:

- 1) для розігріву ванни ТЕНОм до робочої температури;
- 2) для підтримання необхідної температури в процесі електролізу за допомогою змійовиків.

До складу контурів входять:

1) термоперетворювач опору платиновий НСХ 100П з діапазоном вимірювання (-50)...+60 °С, допустимий тиск $P = 0,4$ МПа (модель ТСП1288, виробник НВО «Електротермія», м. Луцьк) (застосовується в електролітичній ванні);

2) регулятор електронний інтегральний ($I_{\text{вих}} = 0-5$ мА) (модель РП2-Т, виробник Підприємство «МІКРОЛ», м. Івано-Франківськ) (використовується на щиті керування);

3) Тиристорний підсилювач для керування електронагрівачем У13Н (виробник НВО «Електротермія», м. Луцьк) (застосовується в електролітичній ванні).;

4) Регулятор тиску прямої дії У13Н (НВО «Електротермія», м. Луцьк) (застосовується в електролітичній ванні).

Рівень електроліту в ванні підтримується за допомогою третього контуру. Для вимірювання рівня електроліту у ванні використовують наступні прилади:

- 1) Рівнемір буйковий з пневматичним вихідним сигналом; $P_{вих} = 0,02 - 0,1$ МПа; діапазон температур: $(-50) \dots +100^\circ\text{C}$ діапазон вимірювання: від 0,02 до 1 м, клас точності 1 (застосовується в електролітичній ванні) (застосовується в електролітичній ванні);
- 2) Прилад вторинний пневматичний, показувальний, реєструвальний зі станцією керування, $P_{вих} = 0,02 - 0,1$ МПа (використовується на щиті керування);
- 3) Регулятор пневматичний, пропорційноінтегральний, $P_{вих} = 0,02 - 0,1$ МПа, модель ФР 0091 (використовується на щиті керування);
- 4) Пневмопривід мембранний, $P_{вих} = 0,02 - 0,1$ МПа, модель В26-41 (застосовується в електролітичній ванні).

Напруга та струм на ванні регулюються за допомогою контуру, який складається з вольтметра та амперметра, покази від яких передаються на автоматично регулюючий прилад на щиті керування.

Для цього використовуються наступні прилади:

- 1) Агрегат випрямний для гальванічних ванн, $I_{max} = 12500$ А, $U_{max} = 24$ В, модель ВАКР12500- 24 У4 (застосовується в електролітичній ванні);
- 2) Пульти дистанційного керування для випрямного агрегату ВАКР-12500- 24 У4, модель ПДУ ВАК (використовується на щиті керування);

Співвідношення концентрацій автоматично підтримується за допомогою контуру, в складі якого місцевий амперметр електролітичної ванни після кожної години роботи передає покази на щит керування. Програмний контролер регулює клапан на трубопроводі від баку з розчином для поповнення необхідної кількості хромового ангідриду. Для цього використовують:

- 1) Електричний виконавчий механізм (клапан) GEVAX 1801 (застосовується в електролітичній ванні);

2) Програмований контролер ОВЕН, модель ПЛК154 (використовується на щиті керування).

Висновки

В даному розділі проведено розрахунки основних технологічних параметри для нанесення твердого хромового покриття заданою річною програмою.

Товщина покриття становить 30 мкм, процес відбувається протягом 56,2 хвилин при температурі 40 °С та густині катодного струму 40 А/дм².

Електроліт в гальванічній ванні має наступний склад:

CrO_3 150...175 г/дм³

H_2SO_4 1,5...1,75 г/дм³

$\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$ 1...3 г/дм³

Розраховано баланс струму та напруги на гальванічній ванні, визначено енергетичний баланс, витрати реагентів та води на всіх стадіях технологічного процесу.

Описано методи контролю якості утвореного покриття, міцності його зчеплення з основним металом.

Наведено перелік приладів, необхідних для автоматичного регулювання параметрів процесу нанесення твердого хромового покриття. Автоматичне регулювання температури, рівня електроліту у ванні, значень напруги та струму, співвідношення концентрацій компонентів розчину в умовах промислового гальванічного хромування дає можливість покращити якість продукції, а також збільшити продуктивність процесу.

РОЗДІЛ 3. ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ В ЦЕХУ ХРОМУВАННЯ.

ПРИРОДООХОРОННІ ЗАХОДИ

Технологічний процес нанесення твердого хромового покриття передбачає використання шкідливих, хімічно агресивних, вибухонебезпечних та легкозаймистих матеріалів. Гальванічне хромування потребує значних витрат електричної та теплової енергій. Тому чітке дотримання вимог охорони праці є актуальним завданням. В процесі роботи над проєктом було розроблено низку заходів для оптимізації умов праці.

3.1 Аналіз шкідливих та небезпечних виробничих факторів

Повітря робочої зони

Технологічна схема передбачає проведення процесу нанесення твердого хромового покриття у ваннах хімічного та електрохімічного знежирення, травлення та хромування. На кожному з цих етапів технологічного процесу у складі розчинів застосовуються шкідливі компоненти. Також ванни оснащені джерелами постійного струму та нагрівачами.

Для хімічного знежирення у випадку наявності значного забруднення поверхні деталей мастильно-охолоджуючими рідинами використовують органічні розчинники, які є леткими і токсичними

Лужний розчин електрохімічного знежирення, який застосовують при підвищеній температурі (до 80 °С) та з використанням струму, випаровуються через дзеркало розчину та подразнюють шкіру, очі, призводять до сильних хімічних опіків. У разі потрапляння такого лужного розчину на шкіру, її необхідно промити великою кількістю води та нейтралізувати розчином оцтової кислоти з масовою часткою 5% . Працівники повинні мати захисні окуляри, гумові рукавички, спеціальний хімічностійкий одяг [23].

Видалення оксидних плівок з поверхні деталей здійснюється у ванні хімічного травлення. Основний компонент розчину - хлоридна кислота, яка має високу леткість, подразнює слизові оболонки дихальних шляхів та

викликає хімічні опіки. Для знезараження шкіру необхідно промити великою кількістю води та розчином соди з масовою часткою 2%. Робітники цеху повинні мати респіратор класу А, захисні окуляри та халат [24].

Ванна хромування наповнюється електролітом із найбільш небезпечним компонентами – хромовим ангідридом та сульфатною кислотою. При потраплянні парів цього розчину на шкіру понокають подразнення та опіки, можливе ураження верхніх дихальних шляхів. Для індивідуального захисту необхідно мати респіратор, халат, гумові рукавиці та спеціальні захисні окуляри. Уражену ділянку необхідно промити великою кількістю води.

Для запобігання впливу шкідливих речовин бортики кожної ванни оснащені бортовими відсмоктувачами, за допомогою яких здійснюється видалення випаровувань з поверхні розчинів [23].

Також в цеху передбачена загальна вентиляція для видалення шкідливих речовин з повітря та подання чистого повітря.

Для зменшення викидів шкідливих речовин у повітря цеху потрібно дотримуватись наступних вимог [23]:

1) вмикати бортову вентиляцію при приготуванні та коригуванні робочих розчинів;

2) під час приготування та коригування електроліту хромування, сульфатну кислоту необхідно вливати тонким струменем в оходжену воду або розчин при обережному перемішуванні, щоб запобігти її розбризкуванню;

3) при вивантаженні деталей з ванни необхідно протягом декількох секунд потримати підвіску з деталями над ванною для зменшення виносу електроліту;

4) між ваннами на бортах розміщують козирки з фторопласту для запобігання розливання розчину.

Освітленість виробничої площі. В гальванічному цеху використовуються різні системи освітлення: штучне робоче, аварійне, евакуаційне, охоронне. Освітлення гальванічного цеху здійснюється за допомогою люмінесцентних ламп (40 та 60 Вт). Перевірка рівня освіленості

цеху проводиться раз на рік. Мінімальне значення аварійної освітленості становить 5 % від нормованої, але не менше 2 лк. Природне освітлення є комбінованим та залучає верхнє та бічне освітлення [24].

Виробничий шум і вібрація. Електродвигуни та механізми переміщення автооператорів є основними джерелами вібрації та шуму в цеху. Рівень шуму в цеху не повинен перевищувати 65 дБА згідно ДСН 3.3.6.037-99 (80 дБА) [24].

Для зменшення шуму застосовують спеціальні глушники, звукоізоляційні та звукопоглинаючі перегородки та кожухи. Для індивідуального захисту використовують беруші та навушники [23].

Електробезпека. Гальванічні процеси супроводжуються застосуванням джерел струму та струмоведучих елементів устаткування. Оскільки корпуси ванн виготовлені з струмонепровідного матеріалу поліпропілену, ураження струмом через струми витoku при дотриманні правил техніки безпеки стає неможливим. Проте існує можливість отримати удар струмом внаслідок контакту з мідними штангами, які підводять струм до ванн знежирення і хромування. Електричні прилади працюють від трифазної чотирьохпровідної електричної мережі змінного струму з напругою 380/220 В із глухозаземленою нейтраллю.

При порушенні правил експлуатації електроустаткування в цеху можуть бути травми з важкими наслідками. Травмування найчастіше відбувається при однофазному дотику людини до мережі змінного струму [24].

Для підвищення електробезпеки передбачено наступні заходи:

- 1) занулення електрообладнання;
- 2) захисне відключення установок;
- 3) мала напруга живлення ручних електроінструментів;
- 4) ізоляція струмоведучих частин;
- 5) використання огорожувальних пристроїв;
- 6) маркування знаками безпеки та попередження.

Також передбачено використання ряду захисних засобів: діелектричні

гумові рукавички, гумові ізолюючі підставки, інструмент з ізолюючими рукоятками і струмошукачі.

Безпека технологічних процесів. Значна кількість технологічних операцій відбувається при нагріванні та пропусканні струму через гальванічні ванни. Під час обслуговування таких ванн особливу небезпеку становлять високі температури та напруга. У випадку застосування автоматичної лінії можливе травмування при необережному поводженні з механізмами, які мають відкриті обертові частини. Відмова автоматики також може призвести до аварійного стану [22].

Небезпека при роботі з реагентами. Внаслідок розливу розчинів електролітів існує можливість отримання хімічних опіків [23]. Для уникнення таких ситуацій здійснюються заходи, спрямовані на усунення безпосереднього контакту працівників зі шкідливими речовинами шляхом дистанційного керування процесами, застосування засобів механізації на стадіях завантаження, вивантаження і транспортування підвісних пристроїв з деталями. Застосовують огорожувальні пристрої, що перешкоджають переміщенню людини в небезпечну зону; прилади, які сигналізують про роботу устаткування, про виникнення аварійних ділянок і при необхідності автоматично їх відключають.

Усі вантажопідйомні механізми повинні періодично проходити технічний огляд; швидкість руху транспортних засобів у цеху не перевищує 5 км/год.

Пожезна безпека. Внаслідок перевантаження електроустаткування, короткого замикання, утворення легкозаймистих побічних продуктів окиснення або вибухонебезпечної суміші водню з повітрям можливе виникнення джерел загоряння.

Причинами загоряння також можуть бути:

- 1) коротке замикання між електродами та штангами ванн знежирення і хромування, внаслідок пошкодження електроізоляції дротів;
- 2) розряди статичної електрики у ванні з органічним розчинником;

3) механічні пошкодження обладнання і електропроводу.

Агресивною є дія хімічно активних речовин на дроти. Для захисту ізоляції струмовідводу від дії хімічних речовин застосовують фторопластове захисне покриття. Щоб запобігти перевантаженням в електричних мережах, застосовують запобіжники і спеціальні автомати, включені в мережу послідовно. Попередження перегріву проводів від перехідних опорів досягається застосуванням пружних контактів та збільшенням площі опору контактів, [24].

Робочі місця обладнуються протипожежними щитами з набором засобів пожежогасіння, вогнегасниками, ящиками з піском. Виробничі приміщення та склади додатково обладнанні внутрішніми пожежними кранами. Між виробничими будинками передбачені пожежні розриви 10 м. Для попередження вибухів газопроводів їх періодично перевіряють на герметичність.

3.2 Очищення стічних вод хромового виробництва

Утилізація відходів гальванічного виробництва - трудомісткий і досить складний процес, що вимагає професіоналізму від працівників і наявність спеціального обладнання, оскільки у відпрацьованих матеріалах присутні у високих концентраціях шкідливі для людини і навколишнього середовища речовини.

Очищення стічних вод здійснюють з застосуванням хімічних та фізико-хімічних методів. Для знешкодження стічних вод хромування найбільш поширеними є реагентні методи нейтралізації та виділення забруднюючих речовин у вигляді малорозчинних осадів. Після хімічного очищення та відстоювання стічні води подаються в систему оборотного водопостачання або спускаються водоймище чи міську каналізаційну мережу. Для повнішого очищення стічні води також в подальшому можуть проходити біологічні або фізико-хімічні методи очищення [25].

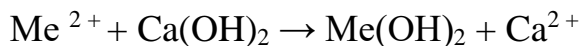
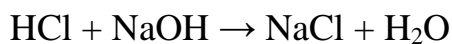
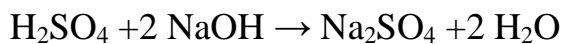
Для видалення сполук нікелю з стічних вод в даний час найбільш поширеними є реагентні методи очищення, які засновані на осадженні розчинних у воді речовин додаванням різних реагентів з подальшим відокремленням їх у вигляді осадів.

Для очищення токсичних промислових стоків передбачено комплекс очисних споруд, на які з гальваноцеху надходять стічні води з вмістом кислот та хромовмісних сполук.

Стічні води після ванн електрохімічного знежирення і після ванн травлення гальванічного цеху забруднені кислотами, лугами і солями важких металів. Вони очищаються хімічним способом на заводських очисних спорудах.

Метод обробки кислотно-лужних стоків враховує можливу наявність в таких стічних водах домішок важких металів. В основі знешкодження кислотно-лужних стоків лежить їх нейтралізація розчином лугу і осадження розчинених йонів металів у вигляді гідроксидів розчином гашеного вапна [26].

Хімічні реакції процесу нейтралізації наступні:



Витрата хімічних реактивів для нейтралізації кислотно-лужних стічних вод залежить від величини рН. Станція очищення розрахована на очищення промислових стоків до рівня, що дозволяє скидати їх на міські очисні споруди. Тому кислотно-лужні стоки повністю нейтралізуються (рН = 7,8).

Знешкодження хромовмісних стоків

Стандартна схема очищення починається з механічного очищення води на сучасних очисних станціях. Ця стадія застосовується для видалення зі стічних вод нерозчинних мінеральних та органічних домішок.

Під час механічного очищення відбувається проціджування через ґрати, пісковловлювання, відстоювання та фільтрування. На деяких підприємствах для покращення процесу механічного очищення застосовують такі пристрої, як преаератори, біокоагулятори, освітлювачі, нафтові пастки та смоловідстійники, гідро циклони [25].

Для очищення стічних вод від дрібнодисперсних забруднень використовують осаджувальні центрифуги та рідинні сепаратори. Це дає можливість видалити до 95% нерозчинних сполук.

Для осадження нерозчинних сполук Cr(III) необхідні наступні реагенти:

Сульфатна кислота ДСТУ 2184 -77

Тіосульфат натрію ДСТУ 244 -76

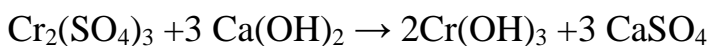
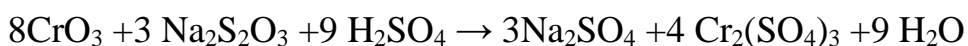
Вапно 60% ДСТУ 9179 -77

Поліакриламін ТУ6 -01 -1049 -92

Утилізація хромовмісних стоків реагентним методом здійснюється в 2 стадії:

- 1) відновлення йонів Cr(VI) до трьохвалентного стану в кислому середовищі за допомогою розчину натрій тіосульфату з масовою часткою 10 %;
- 2) осадження розчинних сполук Cr(III) у вигляді гідроксиду хрому під дією розчину вапняного молока з масовою часткою 3 %.

Ці процеси відбуваються за наступними рівняннями:



Перевагами реагентного методу очищення стічних вод є його універсальність, застосування недорогих реагентів, простота виконання, можливість одночасної обробки концентрованих розчинів та промивних вод, широкий інтервал початкових концентрацій іонів.

Серед недоліків методу слід виділити значну витрату реагентів, неповне вилучення іонів металів, необхідність створення спеціальних місць зберігання

утворених осадів, складні методи вилучення осаджених сполук важких металів зі шламу для подальшої утилізації.

Схема очищення стічних вод гальванічного хромування реагентним методом наведена на рис. 4.

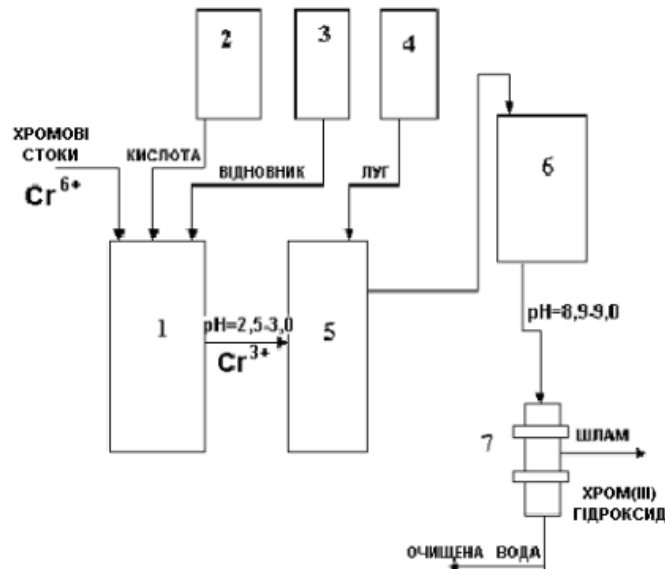


Рис. 4. Схема очищення хромовмісних стічних вод реагентним методом:

1 - реактор-накопичувач хромових стоків; 2 - дозатор кислоти; 3 - дозатор відновника; 4 - дозатор луку; 5 - реактор-нейтралізатор; 6 – відстійник;
7 - механічний фільтр

Частина підприємств здійснює утилізацію осадів шляхом використання їх як добавки при виробництві будівельних матеріалів [26].

Висновки.

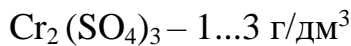
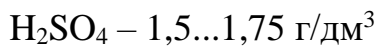
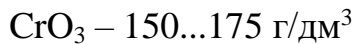
Гальванічне хромування належить до небезпечних виробництв. В роботі проаналізовано найбільш небезпечні фактори виробництва, що мають негативний вплив як на здоров'я працівників, так і на навколишнє середовище. Охарактеризовано необхідні заходи для зменшення їх негативного впливу або усунення. Запропоновано недорогий та ефективний реагентний метод очищення стічних вод та утилізації відходів.

ВИСНОВКИ

Електролітичне хромування є ефективним способом захисно-декоративної обробки деталей та підвищення їх зносостійкості, твердості, поліпшених антифрикційних властивостей, високої відбивної здатності.

На основі аналізу літературних даних охарактеризовано технологічні особливості нанесення твердого хромового покриття, визначено основні недоліки та причини порушень процесу хромування, проаналізовано дані щодо складу електролітів хромування, їх переваг та недоліків.

Розроблено технологічну схему нанесення твердого хромового покриття з застосуванням розбавленого електроліту наступного складу:



Гальванічне осадження проводять при катодній густині струму $40 \pm 5 \text{ А/дм}^2$, анодна густина струму $15 \pm 5 \text{ А/дм}^2$, температура $40 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.

Проведено розрахунки основних технологічних параметрів для нанесення твердого хромового покриття заданою річною програмою. Розраховано баланс струму та напруги на гальванічній ванні, визначено енергетичний баланс, витрати реагентів та води на всіх стадіях технологічного процесу.

Автоматичне регулювання температури, рівня електроліту у ванні, значень напруги та струму, співвідношення концентрацій компонентів розчину в умовах промислового гальванічного хромування дає можливість покращити якість продукції, а також збільшити продуктивність процесу.

Проаналізовано найбільш небезпечні фактори виробництва, що мають негативний вплив як на здоров'я працівників, так і на навколишнє середовище. Охарактеризовано необхідні заходи для зменшення або усунення їх негативного впливу. Запропоновано недорогий та ефективний метод очищення стічних вод та утилізації відходів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Антикорозійні та декоративні гальванічні покриття. Електронний ресурс. Режим доступу: <http://topmetal.com.ua/nikelyuvannya>. Дата звернення: 20.09.2023.
2. Якименко Г.Я., Артеменко В.М. Технічна електрохімія. Ч.ІІІ. Гальванічні виробництва: Підручник /За ред. Б.І.Байрачного.- Харків: НТУ"ХП", 2006.- 272с.
3. Jiang Y., Yang J. F., Fang Q. F. Effect of chromium content on microstructure and corrosion behavior of W–Cr–C coatings prepared on tungsten substrate // *Frontiers of Materials Science*. 2015. V.9. P.77–84. 124.
4. Алімов В.І., Дурягіна З.А. Корозія та захист металів від корозії // Донецьк-Львів: ТОВ «Східний видавн. дім». – 2012. – 328 с.
5. Миронюк І.Ф., Микитин І.М. Електрохімія та її практичні аспекти: Навч. посіб./ Ів.-Франк.: ПНУ ім.В.Стефаника, 2016.-174 с.
6. Li B. S., Lin A. Study of hard chromium plating from trivalent chromium electrolyte // *Key Engineering Materials*. 2008. V.373–374. P.200–203.
7. Кислова О. В. Основи електрохімії : навч. посіб. / О. В. Кислова, І. С. Макеєва. – К. : КНУТД, 2017. – 128 с.
8. 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.Токареєв; за ред. Б.І.Байрачного .- Х.: НТУ (ХП), 2016.– 272 с.
9. Антропов Л.І. Теоретична електрохімія. Підручник.- К.: Либідь, 1993.- 544с.
- 10.Zeng Z., Sun Y., Zhang J. The electrochemical reduction mechanism of trivalent chromium in the presence of formic acid // *Electrochem. Commun.* 2009. V.11. P.331–334.
- 11.Phuong N. V., Kwon S. Ch., Lee J. Yu., Shin J., Huy B. Th., Lee Y. I. Mechanistic study on the effect of PEG molecules in a trivalent chromium electrodeposition process // *Microchem. J.* 2011. V.99. P.7 14.

12. Гальванічне хромування. Електронний ресурс. Режим доступу:
<https://yakukremont.ru/rizne/4036-galvanichne-hromuvannja.html>
13. Гальванічні покриття. Електронний ресурс. Режим доступу:
<https://uadoc.zavantag.com/text/7353/index-1.html?page=10>
14. Особливості покриття хромом. Електронний ресурс. Режим доступу:
<http://farbateka.com.ua/specialni-materiali/inshi-pokrittja/osoblivosti-pokrittja-hromom-riznih-pidstav.html>.
15. Mandich N. V., Snyder D. L. Electrodeposition of chromium, in: M. Schlesinger, M. Paunovic (Eds.). *Modern Electroplating*. Fifth Edition.: John Wiley & Sons Inc. Hoboken, NJ, USA. – 2010. – P.205–248.
16. Fedrizzi L., Rossi S., Bellei F., Deflorian F., *Wear–Corrosion Mechanism of Hard Chromium Coatings // Wear*. – 2002. – 253 (11). – P.1173-1181.
17. Tharamani C. N., Hoor F. S., Begun N. S. Microstructure, surface and electrochemical studies of electroless Cr–P coatings tailored for methanol oxidative fuel cell // *J Solid State Electrochem*. – 2005. – V.9. – P.476–482.
18. Survilene S., Nivinskiene O., Cesuniene O., Selskis A. Effect of Cr(III) solution chemistry on electrodeposition of chromium // *J. Appl. Electrochem*. – 2006. – V. 36. – P. 649–654.
19. R. Schmidt, K.O. Thiel, F. Von Horsten, et al/ Towards the mechanism of the accelerated corrosion of decorative nickel-chromium coatings in the presence of metals and their salts // *Mater. Corros*. – 2014. – V.65. – P. 959–967.
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. Лукінюк М. В. Контроль і керування хіміко-технологічними процесами [у 2 кн.]. Кн. 1. Методи та технічні засоби автоматичного контролю хіміко-технологічних процесів [Електронний ресурс] : навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за напрямом підготовки «Хімічна технологія та інженерія» / М. В.

- Лукінюк. – М-во освіти і науки, молоді та спорту України, НТУУ «КПІ». – Київ : Політехніка, 2012. – 336 с.
22. Лукінюк М. В. Контроль і керування хіміко-технологічними процесами [у 2 кн.]. Кн. 2. Керування хіміко-технологічними процесами [Електронний ресурс] : навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за напрямом підготовки «Хімічна технологія та інженерія» / М. В. Лукінюк. – М-во освіти і науки, молоді та спорту України, НТУУ «КПІ». – Київ : Політехніка, 2012. – 336 с.
23. 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. Міт'юк, О.В. Землянська. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, – Електронні текстові данні (1 файл: 0,30 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 28 с.
24. Нестеров О.В. Методичні вказівки до виконання розділу «Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях» в магістерських дипломних роботах усіх форм навчання / О.В. Нестеров – Запоріжжя: Каф. ОП і НС. НУ «Запорізька політехніка», 2020 – 31 стор.
- 25.Макеєва І.С., Кислова О.В., Андрейцева.М.В. Електрохімічна екологія та її застосування [Текст] : навч. посіб. - Київ :КНУТД, 2018. - 216 с.
- 26.Фізико-хімічні основи технології очищення стічних вод: підручник/ А.К.Запольский, Н.А.Мішкова-Клименко, І.М.Астрелін та ін. – К.: Лібра, 2000. – 552 с.