МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет будівництва, архітектури та дизайну
(повне найменування факультету)

Кафедра композиційних матеріалів, хімії та технологій
(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проєкту (роботи)
бакалавра
(ступінь вищої освіти)

Дослідження корозії сплавів, що використовуються у харчовій промисловості
(назва теми)

Виконала: студентка 4 курсу, групи БАДз-212

Спеціальності 132 – «Матеріалознавство»
(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація):
«Композиційні та порошкові матеріали, покриття»
Батюта Ю.О.
(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

Керівник Петруша Ю.Ю.
(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

Рецензент Ткач Д.В.
(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

2026

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет Будівництва, архітектури та дизайну
Кафедра «Композиційні матеріали, хімія та технології»
Ступінь вищої освіти бакалавр
Спеціальність 132 «Матеріалознавство»
(код і найменування)
Освітня програма (спеціалізація) «Композиційні та порошкові матеріали, покриття»
(назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ
В.о. завідувача кафедри КМХТ
Іван АКІМОВ
«20» квітня 2026 року

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТКИ

Батюти Юлії Олександрівни
(прізвище, ім'я, по батькові)

1.Тема проєкту (роботи) «Дослідження корозії сплавів, що використовуються у харчовій промисловості»

керівник проекту (роботи) ПЕТРУША Юлія, к.б.н., доцент,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом закладу вищої освіти від «17» квітня 2026 року № 173
2.Строк подання студентом проекту (роботи) 20 травня 2026 р.
3.Вихідні дані до проєкту (роботи) вихідні характеристики сталі 12х18н10т; обладнання та устаткування

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Корозія обладнання харчових виробництв. Характеристика сталі 12х18н10т. Дослідження сталі 12х18н10т. Матеріали та методики дослідження. Обробка результатів експерименту. Висновки.

5.Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Презентація

6.Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	ПРІЗВИЩЕ, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Прийняв виконане завдання
1	ПЕТРУША Ю.Ю., к.б.н., доц.	10.04.26	28.04.26
2	ПЕТРУША Ю.Ю., к.б.н., доц.	28.04.26	05.05.26
3	ПЕТРУША Ю.Ю., к.б.н., доц.	05.05.26	15.05.26
Нормоконтроль	ПЕТРУША Ю.Ю., к.б.н., доц.		

7.Дата видачі завдання « 10 » квітня 2026 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Вступ, розділ 1	28.04.2026	вик.
2	Розділ 2	05.05.2026	вик.
3	Розділ 3	15.05.2026	вик.
4	Попередній захист	22.05.2026	вик.

Студентка _____ (Юлія БАТЮТА)
(підпис) (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник проєкту (роботи) _____ (Юлія ПЕТРУША)
(підпис) (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної кваліфікаційної роботи бакалавра: 31 с., 3 табл., 8 рис., 11 джерел.

СТАЛЬ 12Х18Н10Т, ХАРЧОВА ПРОМИСЛОВІСТЬ, КОРОЗІЯ, КОРА ДУБУ, КОРІННЯ КУЛЬБАБИ, АНАЛІЗ ШВИДКОСТІ КОРОЗІЇ ГРАВІМЕТРИЧНИМ МЕТОДОМ.

Мета роботи – дослідження процесу корозії сталі марки 12х18н10т в розчинах лимонної кислоти, винної кислоти, їх суміші та у присутності рослинних витяжок (з кори дубу та коріння кульбаби). Було опрацьовано фахову літератури за темою експерименту, здійснено приготування водних вилучень та зважування зразків, проведено аналіз швидкості корозії гравіметричним методом.

Було проаналізовано корозійну стійкість сталі 12х18н10т в 3-х корозійноактивних середовищах (лимонна кислота, винна кислота, суміш винної та лимонної кислот). Водне вилучення з кори дубу є перспективним природним інгібітором для захисту сталі 12х18н10т у змішаних кислотних середовищах, тоді як водне вилучення з коріння кульбаби продемонструвало ефективність лише у винній кислоті.

Використання результатів проведеної роботи може бути корисним для подальшої розробки «зелених» інгібіторів корозії, що є критично важливим для харчової промисловості, оскільки вони одночасно захищають обладнання від руйнування та запобігають ризику забруднення продуктів токсичними речовинами. Це дозволяє поєднати ефективність антикорозійного захисту з безпечністю для споживачів і довкілля.

ЗМІСТ

Вступ.....6
1 Корозія та захист матеріалів харчового обладнання (на прикладі сталі 12Х18Н10Т) 8
1.1 Корозія обладнання харчових виробництв 8
1.2 Характеристика та досвід застосування конструкційних сплавів 10
1.3 Характеристика та дослідження сталі 12х18н10т 12
2 Матеріали та методики дослідження.....17
2.1 Вибір зразків сплавів та рослинної сировини.....17
2.2 Приготування водних вилучень.....19
2.3 Схема дослідження.....19
2.4 Аналіз швидкості корозії гравіметричним методом 20
3 Корозійна стійкість сталі 12х18н10т в розчинах органічних кислот.....23
3.1 Обробка результатів експерименту.....23
Висновки.....29
Перелік джерел посилань.....30

ВСТУП

У сучасному виробництві особливого значення набуває проблема забезпечення довговічності та стабільної роботи машин і технологічних систем. Витрати на підтримання їхньої працездатності постійно зростають, а в окремих галузях ремонтні витрати можуть у кілька разів перевищувати ціну нового обладнання. Дослідження у харчовій промисловості свідчать, що близько 80% коштів спрямовується на ліквідацію наслідків корозії, яка щороку призводить до втрат матеріалів на рівні мільйонів тон. Наприклад, лише світова виноробна галузь щорічно втрачає близько 15 млн тон продукції через руйнівну дію корозійних процесів.

Обладнання харчової промисловості функціонує у безпосередньому контакті з різноманітними середовищами – від кислотних і сольових розчинів до органічних сполук природного походження. У виробничих процесах широко застосовуються методи, які потребують використання кислот, лугів, хлоридів, амоніаку та спиртів. Наприклад, хлібопекарське обладнання піддається впливу продуктів бродіння, які містять органічні кислоти, альдегіди та жири. У спиртовій промисловості етанол і його похідні агресивно діють на чорні метали, а у пивоварінні сусло та готове пиво спричиняють корозію металевих елементів, що негативно позначається на якості продукції.

Такі умови експлуатації значно прискорюють руйнування матеріалів, знижуючи надійність і термін служби обладнання. Висока корозійна стійкість конструкцій є ключовою для дотримання санітарних норм, адже вона запобігає потраплянню іонів металів у харчові продукти. Тому контроль та захист від корозії – необхідна умова стабільної роботи апаратів, трубопроводів і металоконструкцій.

Одним із найефективніших методів є використання інгібіторів, які останнім часом стали невід’ємною частиною систем захисту. Вони змінили склад традиційних мастил, полімерних і хімічних покриттів, а в окремих

випадках зробили можливим застосування сильних окисників чи холодоносіїв у виробничих процесах.

Для харчової промисловості особливе значення мають доступні та економічні інгібітори, оскільки обладнання працює в умовах високих температур, різких перепадів, агресивних середовищ і значних механічних навантажень. Саме вони забезпечують довговічність технічних систем і стабільність виробничих процесів.

Метою дипломного проєкту є дослідження процесу корозії сталі марки 12х18н10т в розчинах лимонної кислоти, винної кислоти, їх суміші та у присутності рослинних витяжок (з кори дубу та коріння кульбаби).

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

1) опрацювати наукову літературу з обраної теми дослідження та детально ознайомитися з особливостями корозії обладнання харчових виробництв;

2) провести аналіз швидкості корозії сталі марки 12х18н10т гравіметричним методом без інгібітора;

3) провести аналіз швидкості корозії сталі марки 12х18н10т гравіметричним методом в присутності «зелених» інгібіторів корозії.

Об’єктом дослідження є зразки сталі марки 12х18н10т.

Предметом дослідження є стандартні розрахункові показники гальмування швидкості корозії.

Використання результатів проведеної роботи може бути корисним для подальшої розробки «зелених» інгібіторів корозії, що є критично важливим для харчової промисловості, оскільки вони одночасно захищають обладнання від руйнування та запобігають ризику забруднення продуктів токсичними речовинами. Це дозволяє поєднати ефективність антикорозійного захисту з безпечністю для споживачів і довкілля.

Апробацію роботи здійснено на щорічній науково-практичній конференції викладачів, науковців, здобувачів вищої освіти та молодих учених «Тиждень науки-2026».

1 КОРОЗІЯ ТА ЗАХИСТ МАТЕРІАЛІВ ХАРЧОВОГО ОБЛАДНАННЯ (НА ПРИКЛАДІ СТАЛІ 12Х18Н10Т)

1.1 Корозія обладнання харчових виробництв

Сьогодні в агропромисловому комплексі однією з найбільш гострих проблем є проблема забезпечення експлуатаційної надійності та тривалого терміну служби технологічного устаткування підприємств харчової та переробної промисловості. У харчовому виробництві матеріали апаратів постійно піддаються безперервному впливу багатокомпонентних робочих середовищ, які характеризуються високою корозійною та хімічною активністю.

Згідно літературних даних у харчовій галузі витрати на ліквідацію наслідків від корозії технологічних вузлів та апаратів досягають 80 % від загальних затрат на ремонт обладнання. Це пов’язано з наявністю деструктивних процесів безпосередньо в зонах контакту металу з технологічними середовищами. В цих місцях механічне руйнування поверхні супроводжується інтенсивним фізико-хімічним впливом рідкого або газоподібного середовища. На закономірності та швидкість перебігу корозійних процесів впливають внутрішні та зовнішні чинники. Внутрішні – це структура та хімічний склад сплавів. Зовнішні фактори – це хімічна природа середовища, наявність деполяризаторів (наприклад, розчиненого кисню), значення pH, температура та гідродинамічні умови (інтенсивність перемішування, швидкість руху потоків тощо) [1].

Обладнання харчових виробництв в технологічних процесах пошкоджується за рахунок корозійної ерозії і кавітації (насоси, котли); корозійно-механічного зносу (подрібнювачі, центрифуги, мішалки, трубопроводи); загальної корозії (преси, тара, апарати холодильно-компресорних установок); біокорозії (бродильні чани); атмосферної корозії (дозатори, ваги); газової корозії (печі).

За хімічним складом харчові середовища є дуже різноманітними: слабколужні, нейтральні водні системи; високоагресивні розчини органічних та мінеральних кислот; концентровані електроліти (солі), що містять активатори місцевої корозії, зокрема хлорид-іони (Cl^-). Особливу небезпеку для більшості залізних, цинкових, магнієвих та алюмінієвих сплавів становлять середовища з pH < 7. В них процеси руйнування протікають із водневою або змішаною деполяризацією. Лужні середовища, хоча і є відносно пасивними для заліза, викликають швидку деструкцію амфотерних елементів (алюмінію, цинку). Треба також враховувати жорсткі санітарно-гігієнічні вимоги. Продукти корозійного розчинення металів можуть погіршувати якість, органолептичні властивості (смак, запах, колір тощо) та сортність харчових продуктів, а також можуть становити загрозу для здоров'я споживачів.

В залежності від конкретного технологічного циклу харчового підприємства активність корозійних середовищ відрізняється.

Наприклад, у хлібопекарському та кондитерському виробництві як основні напівпродукти та технологічні компоненти використовуються рідкі дріжджі, житні та пшеничні закваски, опари, тісто, затори та різноманітні добавки. Молочнокислі бактерії та дріжджі в процесі своєї життєдіяльності виділяють продукти бродіння в робочі об'єми. Це етиловий спирт, складні ефіри, а також комплекс органічних кислот (молочна, оцтова, яблучна, лимонна, пропіонова, мурашина, щавлева та винна). Наявність цих кислот суттєво знижує pH середовища, створюючи умови для корозії металевих діжок, місильних апаратів та дозувальних систем.

У спиртовій, лікеро-горілчаній та бродильній промисловості технологічні процеси (особливо у дріжджових, бродильних і ректифікаційних відділеннях) відбуваються за значних температурних коливань (до 80-100 ^{0}C) та при pH = 4,2-5,5. В цих умовах швидкість корозії зростає. У пивоварінні та винному виробництві додатковим чинником для виникнення корозії є

постійний контакт обладнання з суслом, CO_2 та мийними й дезінфікувальними засобами [1].

У виробництві морозива, на молочних комбінатах, м'ясопереробних заводах, пивоварнях та броварнях широко застосовуються холодильні та розсільні (ропні) системи. В них як холодоносії використовуються концентровані водні розчини солей, зазвичай NaCl та $CaCl_2$. Висока концентрація Cl^- може руйнувати захисні пасивні плівки на поверхнях металів. Це призводить до розвитку піттингової (точкової) корозії, виразкового ураження та корозійного розтріскування. Якщо у ропі є розчинений атмосферний кисень, то він виконує роль деполяризатора, збільшуючи швидкість деструкції вуглецевих сталей та чавунів.

У виробництві харчових кислот (наприклад, лимонної) при упарюванні робочих розчинів кислоти до високих концентрацій (приблизно 85%) за підвищеної температури теплообмінне обладнання піддається сильному зносу. Часто нагрівальні труби випарних апаратів виходять з ладу вже за 6 місяців експлуатації. Це відбувається за рахунок суцільної та міжкристалітної корозії [2, 3].

1.2 Характеристика та досвід застосування конструкційних сплавів

Для виготовлення обладнання харчових виробництв використовується широкий спектр металевих матеріалів, кожен з яких має свої обмеження та специфічні особливості.

Вуглецеві сталі звичайного розряду (наприклад, Ст3, Ст4, Сталь 10, Сталь 20) залишаються базовими та економічно доступними конструкційними матеріалами для масивних елементів. З них виготовляють корпуси випарників, трубні батареї ропних систем, закриті резервуари та комунікації промислового водопостачання. Але у кислому або хлоридвмісному середовищі ці сталі

мають незадовільну стійкість. Вони схильні до швидкої загальної корозії та потребують обов’язкового введення інгібіторів корозії або нанесення захисного покриття.

Сірі чавуни (наприклад, СЧ20) традиційно застосовуються для відливання складних деталей рухомих вузлів, зокрема частин насосів, що перекачують технологічні рідини та соляні розчини. Але в умовах гідродинамічного впливу ропи деталі з чавуну піддаються корозійно-механічному зношуванню. Включення з графіту в чавуні діють як катодні ділянки мікрогальванічних пар. Вони прискорюють анодне розчинення феритної основи. Це призводить до глибокого виразкового руйнування.

Високолеговані (нержавіючі) хромисті та хромонікелеві сталі:

– сталь 12х18н10т (та її аналоги типу 12х18н9т) є класичним «золотим стандартом» для харчової апаратури завдяки здатності до самопасивації та утворення стійкого поверхневого оксидного шару. Вона демонструє високу стійкість у багатьох органічних середовищах та спиртових розчинах. Але вона також має недоліки. Це схильність до інтенсивної точкової (піттингової) корозії в зоні зварних швів. А також це висока чутливість до корозійного розтріскування під напругою в гарячих розсолах;

– економнолеговані та безнікелеві сталі (типу 10х13, 10х17, 10х21н5т) застосовуються як замінники дефіцитних і дорогих хромонікелевих сталей. Вони достатньо стійкі у слабкокислому та нейтральному діапазоні pH. Але у жорстких температурних умовах спиртового чи кислотного виробництва їхня стійкість є нижчою, ніж у сталей типу 12х18н10т.

Історично для виготовлення ректифікаційних та бражних колон, кубів та теплообмінників спиртової промисловості використовувалася червона мідь та лужена мідь. Це пов’язано було з тим, що вони мають чудову теплопровідність. Але у гарячих кислих бражках мідь поступово піддається розчиненню, а продукти її деградації можуть забруднювати кінцевий продукт. Луження (покриття міді шаром олова) тимчасово вирішує проблему. Але механічне стирання шару призводить до виникнення макрогальванічних пар

«мідь-олово», де олово або основа починають руйнуватися з підвищеною швидкістю.

Титанові сплави (зокрема, технічний титан ВТ1-0) представляють собою найбільш перспективні та корозійно інертні матеріали для застосування в умовах харчової індустрії. Титан має найвищу стійкість в умовах випаровування концентрованих органічних кислот та дії потоків агресивних рідин. Це виключає ризик точкового чи міжкристалітного руйнування. Титанове устаткування повільно впроваджується через високу вартість та складність технологічної обробки [1].

З вищенаведеного видно, що простий підбір сталей не здатний повністю ліквідувати загрозу виникнення корозії. Сучасна практика вимагає комплексного підходу. Потрібна модернізація робочих вузлів, нанесення захисних покриттів (хромування, нікелювання, хіміко-термічна обробка, полімерні шари) та активне впровадження методів інгібіторного захисту середовищ.

Таким чином, враховуючи суворі екологічні норми на підприємствах харчової галузі, пріоритет зміщується в бік розробки нетоксичних «зелених» інгібіторів та композицій на основі природних речовин. Вони здатні ефективно гальмувати процеси корозії та є економічно вигідними, і піддаються беззалишковій утилізації.

1.3 Характеристика та дослідження сталі 12х18н10т

Сталь 12х18н10т – це хромонікелева високолегована сталь аустенітного класу. Є одним з найбільш затребуваних конструкційних матеріалів у хімічному, нафтохімічному та харчовому машинобудуванні. Популярність цієї марки обумовлена комплексом експлуатаційних властивостей: помірною

міцністю, високою пластичністю, холодостійкістю та здатністю до самопасивації у багатьох окиснювальних середовищах.

Основу сталі 12х18н10т складає залізо (до 68 %). Можуть бути домішки (марганець, кремній, фосфор, сірка) у мінімальних кількостях. Розшифровка маркування сталі 12х18н10т:

– 12 – масова частка вуглецю (0,12 %);
– Х18 – вміст хрому (17-19 %);
– Н10 – вміст нікелю близько (9-11 %);
– Т – легування титаном (до 0,8 %).

У загартованому стані основою структури сталі 12х18н10т є однорідний стабільний аустеніт. Для запобігання міжкристалітної корозії сталь додатково стабілізують титаном. Титан зв’язує вільний вуглець у стійкі карбіди титану (TiC), що не дозволяє йому утворювати карбіди хрому.

Але під впливом тривалих термічних та механічних навантажень аустенітна структура сталі 12х18н10т схильна до метастабільності. Структурно-фазовий стан металу змінюється в процесі термічного старіння та високотемпературного нагріву (наприклад, при зварюванні). Науковцями були зафіксовані коливання мікротвердості та границі міцності при випробуваннях зразків після різних режимів відпалу. Ц може бути пов’язано з перерозподілом легувальних елементів та зміною розміру зерна [4].

При дуже низьких температурах (до -190 ^{0}C) у поєднанні з циклічним навантаженням особливо проявляється метастабільність аустеніту. За таких умов в основному металі та зоні термічного впливу зварних з’єднань відбуваються незворотні фазові перетворення. Це супроводжується накопиченням дислокацій та подрібненням кристалічної структури. Внаслідок фазового наклепу та деградації границь зерен «стара» сталь набуває підвищеної схильності до крихкого руйнування та утворення тріщин. Тріщини зароджуються на дефектах зварювання і потім поширюються по границях зерен під дією втоми [4].

Найбільш небезпечним видом деструкції нержавіючих сталей є міжкристалітна корозія. На її частку припадає приблизно 12 % усіх випадків виходу з ладу обладнання. Сутність цього явища полягає у збідненні границь зерен хромом. При нагріванні сталі за температури 500-800 ^{0}C відбувається дифузія вуглецю до границь зерен, де він взаємодіє з хромом, утворюючи карбіди. В результаті прикордонні зони збіднюються хромом нижче критичного рівня (менше 11,7%), втрачають пасивність і швидко розчиняються в електроліті.

Сучасні дослідження міжкристалітної корозії сталі 12х18н10т встановили залежності між хімічним складом сталі та корозійними втратами. Було доведено, що стійкість сталі залежить від співвідношення концентрації таких елементів, як титан, вуглець, хром та нікель. Коли реальний вміст титану є недостатнім для повного зв'язування вуглецю, швидкість міжкристалітного руйнування збільшується. Крім того, навіть стабілізована сталь 12х18н10т у зонах термічного впливу зварних швів може піддаватися так званій «ножовій корозії» (локалізованому виду міжкристалітної корозії у вигляді вузьких смуг або ліній на металі). Це відбувається через розчинення карбідів титану при високих температурах та подальшого виділення карбідів хрому при охолодженні [5].

У нейтральних водних розчинах, які містять активатори корозії (зокрема, хлорид-іони Cl^- у концентрації від 300 мг/л і вище), сталь 12х18н10т схильна до місцевого (локального) ураження – піттингоутворення.

Пасивація та руйнування пасивного шару сталі 12х18н10т у хлоридних розчинах залежать від показника pH (pH = 6-8), структурної гетерогенності металу та коливань легування. Процес відбувається у декілька етапів:

– на слабких ділянках захисної оксидної плівки (наприклад, навколо неметалевих включень – сульфідів хрому чи марганцю) відбувається адсорбція іонів Cl^-;

– далі відбувається місцеве руйнування плівки, активація розчинення заліза та утворення гальванічної мікропари «пасивна поверхня (катод) – активний піттинг (анод)»;

– триває розвиток та поглиблення піттингу (відбувається автокаталітичний процес у закритому об’ємі виразки, де накопичуються іони H^+ та Cl^-).

З літератури відомо, що незважаючи на мінімальні втрати за загальною масою, лінійна швидкість поглиблення окремих піттингів може досягати критичних значень. Це створює загрозу наскрізного свищевого пробиття тонкостінного теплообмінного обладнання [6].

Є дослідження стійкості сталі 12х18н10т у розчинах мінеральних та органічних кислот (зокрема, у сульфатній кислоті 30%-вої концентрацій). Встановлено, що у чистих розчинах сульфатної кислоти за підвищеної температури (наприклад, 60 ^{0}C) сталь знаходиться в активно-пасивному стані та піддається інтенсивному суцільному розчиненню, тобто є абсолютно нестійкою.

Для того, щоб перевести сталь у стійкий стан використовують технологічні інгібітори корозії. Наприклад, це може бути бензотріазол або синергетичні композиції. Додавання бензотріазолу знижує швидкість корозії сталі 12х18н10т до 5000 разів. І переводить її до групи стійких матеріалів. Це відбувається завдяки утворенню щільних захисних шарів на поверхні металу.

Озон (O_3) часто використовується як окиснювач для інтенсифікації процесів. Автори [7] досліджували вплив озону на локальні види корозії сталі 12х18н10т. Було встановлено, що введення озону в кисле середовище, де міститься інгібітор бензотріазол, дещо знижує загальну ефективність інгібітору. Можливо, це відбувається через часткове окиснення органічних молекул. Але сталь все одно зберігає високу стійкість. Наявність озону також діє як потужний фактор пасивації. Він знижує ймовірність виникнення піттингової та виразкової корозії у кислих розчинах і в сумішах органічних

кислот. Це обумовлено тим, що озон сприяє швидкому виправленню дефектів в оксидній плівці (Cr_2O_3), блокуючи перші стадії зародження піттингів [7].

У жорстких умовах експлуатації природної пасивності сталі 12х18н10т часто буває недостатньо. Тому в сучасному матеріалознавстві активно розвиваються методи модифікації її поверхні. Одним із найбільш ефективних та перспективних методів є хромоалітування (комплексне насичення поверхні хромом та алюмінієм). Створення на поверхні сталі 12х18н10т комплексного хромоалітованого покриття сильно змінює поверхневі властивості. Особливо у поєднанні з попередньо нанесеним бар'єрним шаром нітриду титану. В результаті отримують багатошарову структуру з високим вмістом інтерметалідів та оксидів Cr й Al. Така обробка дозволяє підвищити корозійну стійкість модифікованої сталі в агресивних органічних середовищах (наприклад, у розчинах оцтової кислоти різних концентрацій) у 4,3-5,3 рази. А також збільшити стійкість у водних содових середовищах у 3,2 рази. І сформувати високу твердість та зносостійкість поверхні. Відповідно такі покриття будуть надзвичайно перспективними для вузлів та арматури, яка працює в умовах одночасного впливу корозії, високих температур та абразивного або ерозійного зносу [8].

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Вибір зразків сплавів та рослинної сировини

Для експериментів було обрано прямокутні зразки сталі 12х18н10т (рис. 2.1). Сталь марки 12х18н10т – високолегована, жароміцна аустенітна нержавіюча сталь. З неї виготовляють обладнання для харчових комбінатів та лікеро-горілчаних заводів, трубопроводи, вихлопні колектори, різноманітні комплектуючі у машинобудуванні, кріогенну техніку (муфелі, теплообмінники, трубопроводи високого тиску), нержавіючий лист, дріт, ковані заготовки тощо. Сталь 12х18н10т є аналогом AISI 321, одного з найбільш затребуваних нержавіючих сплавів у США. В інших країнах світу також є аналоги цієї сталі, які переважно використовуються на внутрішньому ринку. Наприклад, у країнах ЄС це сплави 1.4541 та 1.4878, у Японії – SUS321, у Великій Британії – 321S31, а у Південній Кореї – STS321.



Рисунок 2.1 – Зразки сталі 12х18н10т

Для дослідження корозійної стійкості сталі 12х18н10т було обрано 2 види рослинної сировини (рис. 2.2): кора дубу (виробник ПрАТ «Ліктрави», м. Житомир) та коріння кульбаби лікарської (виробник ТОВ «НВО Фітобіотехнології», м. Київ).



Рисунок 2.2 – Рослинна сировина: «Дуба кора», «Кульбаба»

Цей вибір рослинної сировини для дослідження обумовлений тим фактом, що вище названі лікарські рослини вже продемонстрували високий рівень антикорозійного захисту в наших попередніх експериментах [9, 10].

Середня вага та площа поверхні металевих пластинок для дослідження наведена в таблиці 2.1. Кожний дослід повторювали троєкратно.

Таблиця 2.1 – Середня вага та площа поверхні металевих пластинок

№ зразка	12х18н10т	
	m_1, г	S, $см^2$
1	2	3
1	31,4294	19,8686
2	31,3150	19,9671
3	31,1947	20,3655
4	31,0919	18,7023
5	32,4059	20,7569
6	31,8625	20,5514
7	30,5124	19,8213
8	31,3442	20,1245
9	32,6237	20,8695

2.2 Приготування водних вилучень

При виконанні роботи готували водні вилучення з кори дубу та коріння кульбаби лікарської.

Рослинну сировину заливали водою (температура 100 ℃), потім настоювали за температури 18-20 °С протягом доби. Після цього водні вилучення фільтрували для подальшого використання.

Отримані водні вилучення з рослинної сировини далі досліджували в активних корозійних середовищах на зразках сталі 12х18н10т.

2.3 Схема дослідження

Для експериментальної частини роботи були обрані органічні кислоти (винна, лимонна), які широко використовуються в харчовій промисловості (лимонна кислота – універсальний регулятор кислотності, консервант та підсилювач смаку; винна кислота застосовується як підкислювач, антиоксидант та стабілізатор, особливо у виробництві напоїв, кондитерських виробів і консервів), і з якими постійно контактує обладнання харчових виробництв. Також ці кислоти входять до складу фруктів та овочів: лимонна кислота (лимон, грейпфрут, журавлина, гранат, ананас); винна кислота (виноград, яблука, чорна смородина, аґрус, брусниця, вишня, айва, цитрусові). Зразки витримували в розчинах (1%-вий розчин) протягом 1 години.

Водні вилучення з рослин додавали безпосередньо у ємності з кислотами. Контрольні зразки занурювали у чисті розчини лимонної та винної кислот без додавання рослинних витяжок.

Хімічний склад дослідних розчинів наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Хімічний склад дослідних розчинів

№	Хімічний склад розчину
1	лимонна кислота 75 мл + 25 мл H_2O (контроль)
2	винна кислота 75 мл + 25 мл H_2O (контроль)
3	(лимонна кислота + винна кислота в пропорції 1:1) 75 мл + 25 мл H_2O (контроль)
4	лимонна кислота 75 мл + витяжка кори дубу 25 мл
5	винна кислота 75 мл + витяжка кори дубу 25 мл
6	(лимонна кислота + винна кислота в пропорції 1:1) 75 мл + витяжка кори дубу 25 мл
7	лимонна кислота 75 мл + витяжка коренів кульбаби 25 мл
8	винна кислота 75 мл + витяжка коренів кульбаби 25 мл
9	(лимонна кислота + винна кислота в пропорції 1:1) 75 мл + витяжка коренів кульбаби 25 мл

Досліди проводили троєкратно для підвищення достовірності результатів.

2.4 Аналіз швидкості корозії гравіметричним методом

Гравіметричний метод застосовують для визначення швидкості корозії з метою контролю її перебігу та оцінки ефективності інгібіторів. Його принцип полягає у вимірюванні зміни маси металевих зразків до та після перебування в агресивному середовищі [11].

Спочатку проводили зважування зразків сталі 12х18н10т на аналітичних вагах RADWAG AS220.R2 з точністю до 0,0001 г (рис. 2.3). Розміри сталевих пластинок вимірювали штангенциркулем з точністю до 0,1 мм, і розраховували площу поверхні, з урахуванням площі отвору. Після

знежирення та просушення пластинки занурювали до хімічних стаканів з розчинами лимонної кислоти, винної кислоти, їх суміші та у присутності рослинних вилучень.



Рисунок 2.3 – Зважування сталевих зразків на аналітичних вагах RADWAG AS220.R2

Металеві зразки підвішували у стаканчиках за допомогою фторопластових гачків, які є хімічно інертними в розчинах кислот. Після закінчення часу експозиції (1 година) зразки виймали, промивали, просушували та проводили повторне зважування на аналітичних терезах.

Далі проводили розрахунки і визначали стандартні показники. Ваговий (масовий) показник швидкості корозії ($К_m$) розраховували за формулою 2.1.

$$К_m = \frac{m_1 - m_2}{S * t} \qquad (2.1)$$

де K_m – ваговий показник швидкості корозії (г/(м^2 · добу);

m_1 – маса вихідного зразка;

m_2 – маса зразка в кінці експерименту;

S – площа поверхні зразка;

t – час випробовування (1 година).

Коефіцієнт гальмування швидкості корозії (γ) визначали за формулою 2.2.

$$\gamma = \frac{K_0}{K_1} \quad (2.2)$$

де K_0 – ваговий показник без інгібітору;

K_1 – ваговий показник з використанням інгібітору.

Ступінь інгібіторного захисту (Z) визначали за формулою 2.3.

$$Z = \frac{K_0 - K_1}{K_0} \cdot 100\% \quad (2.3)$$

де K_0 – ваговий показник без інгібітору;

K_1 – ваговий показник з використанням інгібітору;

Глибинний показник швидкості корозії визначали за формулою 2.4.

$$П = 8{,}76 * \frac{K_m}{\rho} \quad (2.4)$$

де П – глибинний показник швидкості корозії, П, мм/рік;

8,76 – коефіцієнт для переходу від вимірювання вагового показника швидкості корозії з розрахунку на 1 год. до глибинного показника з розрахунку на 1 рік (24 год * 360 = 8760 год);

K_m – ваговий показник швидкості корозії з інгібітором;

ρ = 7,920 г/см^3.

3 КОРОЗІЙНА СТІЙКІСТЬ СТАЛІ 12Х18Н10Т В РОЗЧИНАХ ОРГАНІЧНИХ КИСЛОТ

3.1 Обробка результатів експерименту

Розрахунки стандартних показників швидкості корозійних процесів для сталі 12х18н10т в розчинах органічних кислот наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Параметри швидкості корозійних процесів для сталі 12х18н10т в розчинах органічних кислот

№	Показник	m_1, г	m_2, г	S, см²	K_m, г/(м²·год)	П, мм/рік	γ	Z, %
1	Лимонна кислота (контроль)	31,4294	31,4269	19,8686	1,26	13,9	–	–
2	Винна кислота (контроль)	31,3150	31,3144	19,9671	0,30	3,3	–	–
3	Лимонна+винна (контроль)	31,1947	31,1938	20,3655	0,44	4,9	–	–
4	Лимонна + кора дубу	31,0919	31,0908	18,7023	0,59	6,5	2,14	53,2
5	Винна + кора дубу	32,4059	32,4051	20,7569	0,39	4,3	0,78	-30,0
6	Лимонна+винна + кора дубу	31,8625	31,8624	20,5514	0,049	0,6	9,02	88,9
7	Лимонна + кульбаба	30,5124	30,5095	19,8213	1,46	16,1	0,86	–15,9
8	Винна + кульбаба	31,3442	31,3441	20,1245	0,05	0,6	6,02	83,4
9	Лимонна+винна + кульбаба	32,6237	32,6221	20,8695	0,77	8,5	0,58	–75,0

Контрольні зразки сталі (без додавання витяжок з кори дубу чи коріння кульбаби) представлені на рисунку 3.1. Поступово в районі отвору зразків почали з’являтися бульбашки водню, що свідчить про протікання процесу корозії. Найбільша швидкість корозії серед контрольних зразків була зафіксована в розчині лимонної кислоти (K_m = 1,26; П = 13,9 мм/рік). Винна кислота виявилася менш агресивною по відношенню до сталі 12х18н10т (K_m = 0,30; П = 3,3 мм/рік). Суміш лимонної та винної кислот продемонструвала середній результат (K_m = 0,44; П = 4,9 мм/рік).



а) б) в)

а – лимонна кислота; б – винна кислота;

в – суміш лимонної та винної кислот (1:1);

Рисунок 3.1 – Контрольні зразки сталі 12х18н10т

Зразки сталі 12х18н10т в розчинах кислот з додаванням витяжки з кори дубу представлені на рисунку 3.2. Як видно з розрахунків, в розчині лимонної кислоти витяжка з кори дубу знижує швидкість корозії на ~53 % (γ = 2,14). У розчині винної кислоти кора дубу виявилася неефективною (Z = –30 %). А в суміші лимонної та винної кислот (1:1) водне вилучення з кори дубу показало найкращий результат (γ = 9,02; Z = 88,9 %).



а) б) в)

а – лимонна кислота; б – винна кислота;

в – суміш лимонної та винної кислот (1:1);

Рисунок 3.2 – Експериментальні зразки сталі 12х18н10т (з додаванням вилучення з кори дубу)

Зразки сталі 12х18н10т в розчинах кислот з додаванням витяжки з коріння кульбаби представлено на рисунку 3.3.



а) б) в)

а – лимонна кислота; б – винна кислота;

в – суміш лимонної та винної кислот (1:1);

Рисунок 3.3 – Експериментальні зразки сталі 12х18н10т (з додаванням вилучення з коріння кульбаби)

У середовищі лимонної кислоти додавання водного вилучення з коріння кульбаба навпаки прискорює процеси корозії (Z = –15,9 %). У розчині винної кислоти витяжка з кульбаби демонструє сильний захист (~83 %). А в суміші лимонної та винної кислот (1:1) «зелена» витяжка знову прискорює корозію (Z = –75 %).

Загальний вигляд проведення дослідження особливостей корозії сталі 12х18н10т в розчинах різних органічних кислот наведено на рисунку 3.4, а загальний вигляд всіх зразків (№ 1-9) після завершення експерименту – на рисунку 3.5.



Рисунок 3.4 – Загальний вигляд виконання експерименту

Узагальнюючи дані, отримані в дослідженні, можна зазначити, що найефективнішим інгібітором виявилася кора дубу у суміші кислот (захист становить майже 89 %). Другою за ефективністю виявилася витяжка з коріння кульбаби у винній кислоті (~83 %).

У суміші органічних кислот ефект «зелених» інгібіторів виявися неоднозначним: кора дубу продемонструвала захисну дію, а коріння кульбаби, навпаки, виступило активатором корозії. Можливо, це пов’язано з особливостями хімічної будови використаних кислот: лимонна кислота має три карбоксильні (COOH) групи, винна – дві. У суміші вони можуть

утворювати комплексні сполуки з іонами Fe^{2+}, змінюючи розчинність продуктів корозії. Це створює інше середовище, ніж кожна кислота окремо: змінюється баланс pH, буферні властивості та здатність утримувати іони металу.

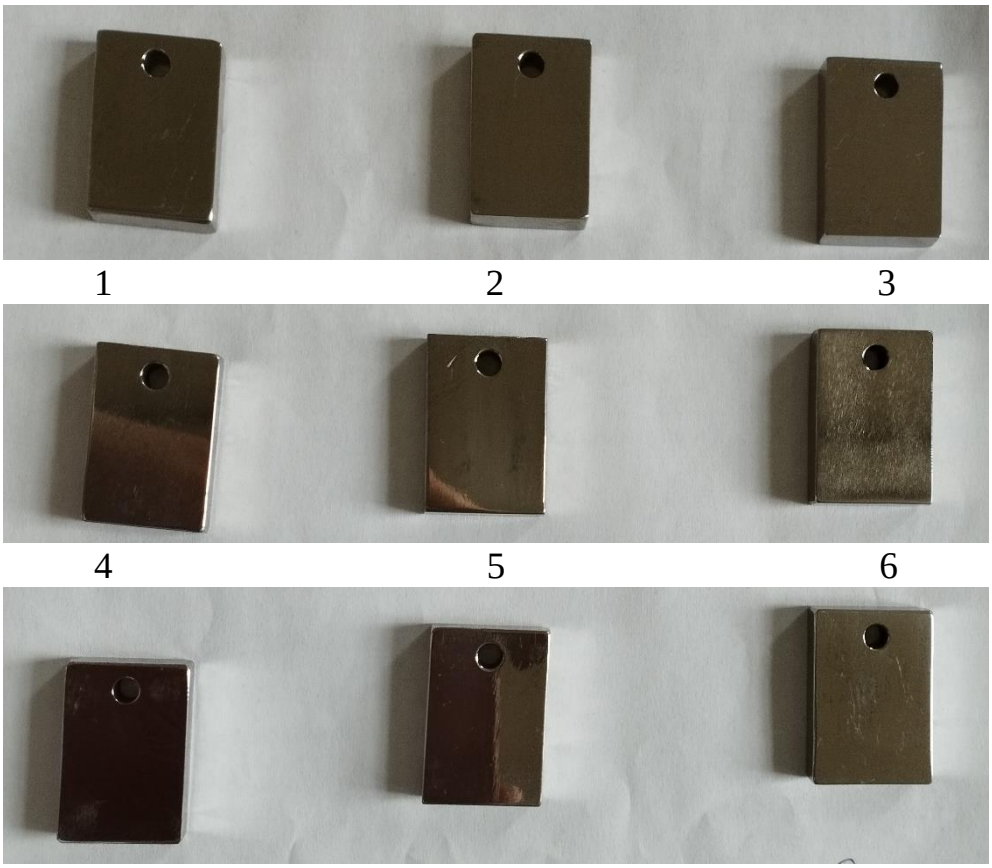


Рисунок 3.5 – Загальний вигляд всіх зразків сталі 12х18н10т після завершення експерименту

Кора дубу, яка містить таніни й поліфеноли, добре працює у суміші кислот, оскільки утворює стабільні адсорбційні плівки на сталі. У цьому середовищі продукти корозії менш розчинні, і дубовий екстракт може закріпитися на поверхні.

Коріння кульбаби, яке містить органічні кислоти й флавоноїди, у суміші працює інакше: сполуки з водного вилучення можуть утворювати розчинні комплекси з Fe^{2+}, які легко виносяться у розчин. Це «знімає» пасивацію і прискорює корозію.

Крім того, у суміші органічних кислот може відбуватися конкуренція між іонами та молекулами інгібітора за адсорбцію на поверхні сталі. Якщо «зелений» інгібітор утворює міцні комплекси з іонами металу (як кора дубу), він може стабілізувати захисний шар. Якщо «зелений» інгібітор утворює розчинні комплекси (як коріння кульбаби), він навпаки полегшує винесення іонів у розчин. Це свідчить про складну взаємодію органічних кислот та природних інгібіторів, яка потребує подальшого дослідження.

ВИСНОВКИ

1. Проведено дослідження процесу корозії сталі 12х18н10т в розчинах лимонної кислоти, винної кислоти та їх суміші. З'ясовано, що серед контрольних зразків найбільш інтенсивна корозія спостерігається в розчині лимонної кислоти ($K_m = 1,26$; $П = 13,9$ мм/рік). Винна кислота значно менш агресивна ($K_m = 0,30$; $П = 3,3$ мм/рік) по відношенню до сплаву. Суміш кислот дає проміжний результат ($K_m = 0,44$; $П = 4,9$ мм/рік).

2. Встановлено, що витяжка з кори дубу в розчині лимонної кислоти знижує швидкість корозії на ~53 % ($\gamma = 2,14$), а в суміші лимонної та винної кислот демонструє найвищий захист (~89 %, $\gamma = 9,02$). У розчині винної кислоти ефект негативний ($Z = –30$ %), що свідчить про специфічну взаємодію інгібітору з середовищем.

3. За результатами лабораторних досліджень встановлено, що витяжка з коріння кульбаби у розчині лимонної кислоти ($Z = –15,9$ %) та в суміші кислот ($Z = –75$ %) прискорює корозію, тобто діє як активатор корозії. У розчині винної кислоти, навпаки, забезпечує високий захист (~83 %, $\gamma = 6,02$).

4. Виявлено, що ефект «зелених» інгібіторів у суміші кислот (лимонна + винна) виявився неоднозначним: вилучення з кори дубу стабілізує захисний шар, тоді як вилучення з коріння кульбаби утворює розчинні комплекси з іонами заліза, що прискорює винесення іонів у розчин.

5. З'ясовано, що кора дубу є перспективним природним інгібітором для захисту сталі 12х18н10т у змішаних кислотних середовищах, тоді як коріння кульбаби демонструє ефективність лише у розчині винної кислоти. Це підтверджує необхідність індивідуального підбору «зелених» інгібіторів залежно від складу агресивного середовища.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Сухенко Ю. Г., Литвиненко О. А., Сухенко В.Ю. Надійність і довговічність устаткування харчових і переробних виробництв: підручник. Київ: НУХТ, 2010. 547 с.

2. Сухенко В. Ю., Авдєєва Л. Ю., Осипенкова І. І., Куриленко Ю. М. Захист розсільних систем харчових підприємств із застосуванням екологічних інгібіторів корозії. *Інновації та технології в сфері послуг і харчування*. 2022. № 2 (6). С. 44-50.

3. Сухенко Ю. Г., Сухенко В. Ю., Доценко В. В. Безпечні інгібітори корозії для холодоносіїв переробних і харчових підприємств АПК. *Науковий вісник ЛНУВМБТ імені С.З. Ґжицького*. 2009. Т. 11, № 3 (42). С. 312-317.

4. Шпеньович А. В. Зміна структурного стану в сталі аустенітного класу під впливом нагрівання. Сучасні матеріали та технології їх обробки : зб. наук. пр. Міжнар. конф. здобувачів вищ. освіти і молодих учених, 20-21 квіт. 2023 р. Харків. нац. автомоб.-дор. ун-т. Харків, 2023. С. 46-56.

5. Нарівський О. Е., Бєліков С .Б. Стійкість сталей AISI 321 і 12Х18Н10Т до міжкристалітної корозії залежно від зміни їх хімічного складу. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2012. № 2. С. 20-24.

6. Бєліков С. Б., Нарівський О. Е. Кінетика корозійних процесів сталей AISI 321 та 12Х18Н10Т у нейтральних хлоридовмісних розчинах та швидкість їх корозії. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2011. № 1. С. 36-44.

7. Черкас К., Лопін О., Кузьмін С. Вплив озону на локальні види корозії сталі 12Х18Н10Т в кислотах. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2006. С. 138-143.

8. Аршук М. В., Хижняк В. Г., Лоскутова Т. В., Погребова І. С. Корозійна стійкість хромоалітованої сталі 12Х18Н10Т. *Матеріалознавство та машинобудування*. 2011. № 6. С. 89-95.

9. Петруша Ю.Ю., Пушкарьова Є.Р., Сохрякова І.М. Дослідження антикорозійних властивостей водних вилучень з рослинної сировини. *Екологічні науки*. 2024. № 4 (55). С. 207-210.

10. Петруша Ю.Ю., Сохрякова І.М., Повзло В.М. Вплив водних вилучень з рослинної сировини на антикорозійну стійкість металів в кислому середовищі. Український журнал природничих наук. 2025. № 12. С. 146-154.

11. Костенко І.А., Челябієва В.М. Корозія та захист металів від корозії: методичні вказівки до виконання лабораторних робіт для студентів напрямів підготовки 6.051701 – Харчові технології та інженерія; 6.050502 – Інженерна механіка; 6.050503 – Машинобудування. Чернігів: ЧНТУ, 2014. 50 с.