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 корозійного опору матеріалів у різних умовах
(назва теми)

Виконав: студент 4 курсу, групи БАДз-213сп

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

Освітня програма (спеціалізація):
«Композиційні та порошкові матеріали, покриття»
Хандан Р.І.
(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) СТУДЕНТА

Хандана Руслана Ігоревича
(прізвище, ім'я, по батькові)

1.Тема проєкту (роботи) «Дослідження корозійного опору матеріалів у різних умовах»

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 65Г; обладнання та устаткування

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Характеристика та особливості корозії сталі 65Г. Застосування сталі 65Г. Вплив температури та перемішування на швидкість та характер корозійних процесів. 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.	15.05.26	20.05.26

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.

Студент _____ (Руслан ХАНДАН)
(підпис) (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

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

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної кваліфікаційної роботи бакалавра: 31 с., 4 табл., 8 рис., 9 джерел.

СТАЛЬ 65Г, КОРОЗІЯ, ТЕМПЕРАТУРА, ПЕРЕМІШУВАННЯ, ІНГІБІТОРИ КОРОЗІЇ, КОРА ДУБУ, ЗВАЖУВАННЯ, ГРАВІМЕТРИЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ КОРОЗІЙНИХ ПРОЦЕСІВ.

Мета роботи – дослідження корозійного опору сталі 65Г в різних умовах (за температури 20 ^{0}C, при нагріванні до 40 ^{0}C та при нагріванні до 40 ^{0}C з одночасним періодичним перемішуванням) без додавання та в присутності витяжки з природної сировини. Було застосовано такі методи дослідження: аналіз наукової літератури з обраної теми дослідження, зважування, приготування витяжок з природної сировини, гравіметричне визначення швидкості корозійних процесів.

За результатами виконання проєкту було встановлено, що нагрівання корозійноагресивного середовища підсилює процеси корозії сталі 65Г. Вплив перемішування виявився неоднозначним, що потребує подальших досліджень. З’ясовано високий позитивний ефект застосування витяжки з кори дубу (спостерігається гальмування корозійних процесів).

Результати дослідження мають значну практичну користь для промисловості й науки. Вони дозволяють зрозуміти, як змінюється швидкість руйнування металу під впливом термічних і гідродинамічних факторів, що наближує умови експерименту до реальних експлуатаційних ситуацій, а також дає можливість прогнозувати довговічність деталей в галузях, де температурні коливання та рух середовища є постійними.

ЗМІСТ

Вступ.....6
1 Сталь 65Г, властивості, застосування. Вплив різних факторів на процеси корозії 8
1.1 Характеристика сталі 65Г 8
1.2 Особливості процесів корозії сталі 65Г 9
1.3 Застосування сталі 65Г.....10
1.4 Вплив температури на швидкість та характер корозійних процесів 13
1.5 Вплив перемішування на швидкість та характер корозійних процесів ...15
2 Матеріали та методики дослідження.....18
2.1 Вибір об'єктів дослідження.....18
2.2 Підготовка екстракту з кори дубу.....20
2.3 План тестування.....20
2.4 Гравіметричне визначення швидкості корозійних процесів.....21
3 Дослідження особливостей корозії сталі 65Г за різних температурних умов та в присутності водного вилучення з рослинної сировини.....24
3.1 Обробка експериментальних даних.....24
Висновки.....30
Перелік джерел посилань.....31

ВСТУП

Вивчення впливу різних факторів (зокрема, температури та перемішування) на процеси корозії має важливе значення для прогнозування довговічності металевих конструкцій у реальних умовах експлуатації. Зазвичай підвищення температури прискорює хімічні реакції, збільшує швидкість дифузії й може змінювати електродні потенціали металів. Це призводить до посилення корозійних процесів. Перемішування середовища також суттєво впливає на перебіг корозії. Воно руйнує захисні плівки продуктів корозії. А також забезпечує постійний контакт металу зі «свіжим» агресивним середовищем і тому прискорює руйнування.

Дослідження цих факторів дозволяє моделювати реальні експлуатаційні умови – від роботи трубопроводів і теплообмінників до деталей машин, що функціонують у потоках рідин чи газів. Розуміння взаємодії температури та перемішування дає змогу розробляти ефективні методи захисту. А також оптимізувати вибір матеріалів і створювати інгібітори, які враховують гідродинамічні та термічні особливості середовища. Тому аналіз цих чинників є важливим для підвищення надійності, безпеки та економічної ефективності металевих конструкцій у промисловості.

Сталь 65Г має надзвичайно широку сферу застосування завдяки поєднанню високої міцності, пружності та зносостійкості. Це робить її основним матеріалом для виробництва пружин, ресор, деталей автомобілів, залізничних кріплень, інструментів та інших елементів, які працюють під динамічними навантаженнями. Тому вивчення процесів її корозії є важливим та актуальним завданням.

Розуміння механізмів корозії сталі 65Г дозволить розробляти ефективні методи захисту, зокрема застосування екологічно безпечних інгібіторів. А це відповідає сучасним вимогам сталого розвитку. А також підвищує безпеку експлуатації виробів у транспорті, машинобудуванні та інструментальному

виробництві. І сприяє зменшенню економічних втрат та екологічного навантаження. Таким чином, дослідження корозійної поведінки сталі 65Г має стратегічне значення для промисловості, науки та екології, забезпечуючи баланс між технічною ефективністю та відповідальністю перед довкіллям.

Метою дипломного проєкту є дослідження корозійного опору сталі 65Г в різних умовах (за температури 20 ^{0}С, при нагріванні до 40 ^{0}С та при нагріванні до 40 ^{0}С з одночасним періодичним перемішуванням) без додавання та в присутності витяжки з природної сировини.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

1) опрацювати наукову фахову літературу з обраної теми дослідження та детально ознайомитися з характеристикою, застосуванням та особливостями процесів корозії сталі 65Г;

2) здійснити дослідження швидкості корозії сталі 65Г гравіметричним методом за температури 20 ^{0}С без інгібітору та в присутності водної витяжки з кори дубу;

3) здійснити дослідження швидкості корозії сталі 65Г гравіметричним методом за температури 40 ^{0}С без інгібітору та в присутності водної витяжки з кори дубу;

4) здійснити дослідження швидкості корозії сталі 65Г гравіметричним методом за температури 40 ^{0}С з одночасним періодичним перемішуванням без інгібітору та в присутності водної витяжки з кори дубу.

Об’єктом дослідження є зразки сталі 65Г.

Предметом дослідження є такі параметри: ваговий (масовий) показник швидкості корозії, коефіцієнт гальмування швидкості корозії, ступінь інгібіторного захисту та глибинний показник швидкості корозії.

Дані, отримані при виконанні проєкту, можуть бути корисними для промисловості та науки з метою прогнозування довговічності деталей, які працюють у транспорті, машинобудуванні чи енергетиці, та сприятимуть впровадженню екологічно відповідальних технологій у виробництво.

1 СТАЛЬ 65Г, ВЛАСТИВОСТІ, ЗАСТОСУВАННЯ. ВПЛИВ РІЗНИХ ФАКТОРІВ НА ПРОЦЕСИ КОРОЗІЇ

1.1 Характеристика сталі 65Г

Сталь 65Г – одна з найбільш затребуваних у промисловості конструкційних ресорно-пружинних сталей. Вона знаходить широке застосування в різних галузях промисловості, бо має оптимальне поєднання високої міцності, зносостійкості та відносно низької вартості.

Сталь 65Г відноситься до категорії якісних конструкційних вуглецевих марганцевистих сталей. Головна особливість її складу – це підвищений вміст марганцю. Mn виступає основним легуючим елементом.

Хімічний склад сталі 65Г наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Хімічний склад сталі 65Г

Елемент	Вміст, %	Значення елемента
Вуглець (C)	0,62 – 0,70	Надає високу твердість та міцність після гартування
Марганець (Mn)	0,90 – 1,20	Підвищує загартовуваність, зносостійкість та пружні властивості
Кремній (Si)	0,17 – 0,37	Сприяє розкисленню сталі, підвищує межу пружності
Хром (Cr)	до 0,25	Трохи підвищує корозійну стійкість та міцність
Нікель (Ni)	до 0,25	Покращує в’язкість сталі
Мідь (Cu)	до 0,20	Домішка, що дещо покращує антикорозійні властивості
Сірка (S)	до 0,035	Небезпечна домішка. Може викликати червоноламкість
Фосфор (P)	до 0,035	Небезпечна домішка. Може підвищувати крихкість при низьких температурах

Сталь 65Г вважається важкозварюваною, бо вона містить багато вуглецю та марганцю. Це робить її схильною до утворення тріщин при зварюванні.

Фізичні характеристики сталі 65Г залежать від температури та стану постачання. Основні фізичні параметри: щільність (приблизно 7850 кг/м^3), модуль пружності (2,1*10^5 МПа), питома теплоємність (460-480 Дж/(кг*К)), коефіцієнт лінійного розширення (приблизно 11,5*10^{-6} К$^{-1}$). Теплопровідність знижується зі збільшенням температури – від 35 Вт/(м*К) при 20 ^{0}С до 28 Вт/(м*К) при 50 ^{0}С.

Сталь 65Г отримує свої робочі властивості після гартування (810-830 ^{0}С, охолодження в оливі) та середнього відпуску (400-480 ^{0}С). Після гартування твердість може сягати 55-62 HRC. Межа міцності буде приблизно 980-1180 МПа, а межа текучості – 800-1000 МПа і вище. Відносне подовження буде дорівнювати ≥8%, а ударна в’язкість становити 590-780 кДж/м^2 тощо [1, 2].

1.2 Особливості процесів корозії сталі 65Г

Сталь 65Г легко піддається корозії. Вона швидко іржавіє за підвищеної вологості, у морській воді та агресивних хімічних середовищах (кислоти або луги). Захисна оксидна плівка погано формується через відсутність значної кількості хрому.

Тобто, корозійна стійкість сталі 65Г – це її слабке місце. У науковій літературі вказується, що швидкість корозії у водопровідній воді становить приблизно 0,1-0,15 мм/рік. А в агресивних середовищах цей показник збільшується в 10 та вище разів.

Для сталі 65Г характерні декілька видів корозії.

Перший вид – це атмосферна корозія. При ній відбувається утворення осаду $Fe(OH)_3$ за наявності вологи та O_2. Другий вид – корозійне розтріскування під напругою. Сталь 65Г дуже чутлива до водневої крихкості (зниження пластичності та міцності під впливом атомарного водню) та

мікротріщин у корозійному середовищі. Третій вид корозії – піттингова корозія. У розчинах солей (наприклад, NaCl) виникають локальні виразки.

Для того, щоб підвищити довговічність деталей та виробів зі сталі 65Г можна застосовувати низку способів. Наприклад, фосфатування та оксидування. Тобто створення захисного шару, який додатково просочують мастилом. Або хромування чи цинкування. Але цинкування може викликати водневу крихкість, що є небезпечним для пружин. Також використовують різноманітні інгібітори корозії [1].

Таким чином, стан поверхні сталі 65Г та метод її модифікації є важливими факторами для терміну служби виробу, оскільки можуть змінити швидкість корозії в декілька разів. Обробка змінює мікроструктуру, шорсткість та створює захисні шари.

1.3 Застосування сталі 65Г

Сталь 65Г широко використовується у машинобудуванні, автомобільній промисловості, залізничній галузі, інструментальній галузі та сільському господарстві. Це обумовлено її здатністю витримувати великі навантаження без залишкової деформації. З неї виготовляють:

- пружини та ресори;
- фрикційні диски та гальмівні стрічки;
- шайби Гровера (пружинні шайби);
- шестерні, фланці, корпуси підшипників;
- рельсові скріплення, пружні елементи кріплення рейок;
- ножі (особливо метальні та мачете);
- пилки по дереву та металу;
- зубила, лопатки для перфораторів;

– лемеші плугів (основні робочі органи ґрунтообробної техніки, що підрізують шар ґрунту знизу);

– лапи культиваторів;

– дискові борони.

Сталь 65Г широко застосовується у сільськогосподарському машинобудуванні тому, що вона може протистояти інтенсивному абразивному зносу та ударним навантаженням. Ґрунт є надзвичайно агресивним середовищем, що діє на «робочі органи» машин як абразив. Тому вибір матеріалу є важливим для довговічності техніки.

Сталь 65Г – це безальтернативний стандарт для виготовлення деяких основних вузлів та деталей сільгосптехніки. Найчастіше з неї виготовляють «робочі органи» техніки для обробки ґрунту. Деталі, що контактують із землею, повинні мати високу поверхневу твердість. Але щоб не тріснути при ударі об каміння, вони повинні бути достатньо в’язкими [3, 4].

Сталь 65Г дуже підходить для виготовлення сферичних та зубчастих дисків (для борони та сівалки). Завдяки термічній обробці (гартуванню), крайка диска довго зберігає гостроту. Це важливо для якісного перерізання пожнивних залишків.

Лапи культиваторів використовуються для розпушування ґрунту. Сталь 65Г дозволяє лапі пружинити при контакті з перешкодами та повертатися у вихідну форму недеформованою.

Також сталь 65Г – це «золотий стандарт» для виробництва лемешів плугів. Іноді використовуються більш дорогі борвмісні сталі. Але сталь 65Г є лідером на цьому сегменті ринку. Вона легко піддається ремонту та має можливість багаторазового наплавлення зносостійкими сплавами для подовження терміну роботи.

Для сільськогосподарських комбайнів та косарок потрібні ножі, які б не тупилися одразу після початку роботи. Сталь 65Г підходить для виробництва для цих інструментів, бо має високу ударну в’язкість.

Сталь 65Г також використовується і для виготовлення сегментів ножів жаток. Це невеликі трапецієподібні зуби, що здійснюють зворотно-поступальний рух. Щоб сегменти не згиналися при потраплянні товстих стебел чи бур'янів сталь 65Г забезпечує їм необхідну жорсткість. Ще з неї роблять ножі соломоподрібнювачів. Вони встановлюються на роторах комбайнів. Сталь 65Г забезпечує їм стійкість до циклічних навантажень та вібрацій. Виготовляють з неї і ножі силосорізок та кормороздавачів. Щоб вони були гострими, то після гартування сталь 65Г шліфують до твердості 50-54 HRC.

Техніка для посіву та обробки ґрунту часто працює на високих швидкостях в умовах вібрації. Сталь 65Г підходить для виробництва пружинних зубців борони. Зубці з неї можуть працювати в режимі постійної вібрації. А коливання покращують якість розпушування ґрунту.

У сільському господарстві сталь 65Г стикається з двома основними проблемами. Це абразивний знос та атмосферна корозія під час зберігання між сезонами. Тому після завершення польових робіт «робочі органи» техніки треба консервувати. Це роблять в 2 етапи. Спочатку очищують від залишків ґрунту та добрив, бо вони є агресивними електролітами. А потім наносять захисні мастила або спеціальні консерваційні лаки.

Зносостійкість сталі 65Г можна збільшити при використанні ізотермічного гартування. Це дозволяє отримати структуру бейніту. Така структура краще чинить опір сколюванню при ударах об каміння порівняно зі стандартним мартенситом.

Використання сталі 65Г для виготовлення деталей сільгосптехніки дозволяє знайти баланс між вартістю запчастини та терміном її служби. А це є важливим для економіки агробізнесу.

Таким чином, сталь 65Г – це класичний матеріал для деталей, що працюють на пружну деформацію та знос. Її головною перевагою є технологічність і міцність. Але при проєктуванні виробів слід враховувати її низьку корозійну стійкість. А також необхідність захисного покриття при

експлуатації у вологому середовищі. Є ще обмеження щодо зварювання. Сталь 65Г не призначена для зварних конструкцій без спеціального попереднього підігріву та подальшої термообробки.

1.4 Вплив температури на швидкість та характер корозійних процесів

Швидкість та особливості протікання процесів корозії металів визначаються багатьма факторами. Зовнішні фактори – це умови навколишнього середовища, у якому відбувається корозія. Сюди відноситься склад агресивного середовища, температура, тиск, швидкість руху середовища та інші параметри. Внутрішні фактори – це особливості самого матеріалу. Це хімічний склад, структура сплаву, наявність внутрішніх напружень у металі, спосіб та якість обробки його поверхні.

Вплив температури на швидкість та характер корозійних процесів є одним із найважливіших чинників у матеріалознавстві. Температура може впливати на термодинаміку реакцій. А також на кінетику хімічних перетворень та фізичні властивості середовища.

Корозія – це хімічна або електрохімічна реакція. Тому підвищення температури зазвичай пришвидшує рух молекул та збільшує кількість їх зіткнень. Найчастіше швидкість корозії зростає з підвищенням температури згідно з рівнянням Арреніуса [5-7].

Для сталей (зокрема, і для 65Г) підвищення температури на кожні 10 ^{0}C у рідких середовищах може призвести до збільшення швидкості корозії у 2-4 рази.

Для металів, що знаходяться в електролітах (вода, розчини солей), температура впливає на катодний та анодний процеси. В анодному процесі зі збільшенням температури полегшується перехід іонів металу в розчин. Це відбувається, бо знижується енергетичний бар’єр їхнього виходу з

кристалічної решітки. У катодному процесі прискорюється дифузія деполяризаторів (O_2 або H^+) до поверхні металу.

У воді залежність швидкості корозії від температури можна описати так. За температури до 70-80 ^{0}C швидкість корозії сталі зростає. Це відбувається у зв'язку з прискоренням дифузії кисню та зниженням в'язкості води. За температури більше 80 ^{0}C швидкість корозії вже починає швидко знижуватися. Це пов'язано з тим, що при наближенні до температури кипіння розчинність кисню у воді падає майже до нуля. Кисень є головним катодним деполяризатором, тому його відсутність зменшує процес корозії.

Крім того, температура змінює структуру та властивості оксидних плівок, які утворюються на поверхні металів. При цьому відбуваються три типи процесів. Перший процес – це руйнування пасивності сплаву. За певних температур захисні плівки на нержавіючих сталях можуть стати пористими та втратити свої захисні властивості. Другий процес – це зміна адгезії. Різне термічне розширення металу та оксидної плівки призводить до її розтріскування та відшаровування. І третій процес – це зміна складу іржі. За низьких температур утворюються пухкі гідроксиди заліза, а за високих – щільніші. Щільніші сполуки можуть трохи зменшити корозію.

Наприклад, при корозії цинку в дистильованій воді за температури 323-368 К утворюється порувата крупно-кристалічна гідроксидна плівка. Вона погано зчеплена з металом і не має захисних властивостей. Тому швидкість корозії буде зростати, і досягне максимуму за 340 К. Але при температурах нижче 323 К і вище 368 К утворюється суцільна, більш щільна плівка. Вона має високу адгезією та захищає метал від руйнування [7].

На інтенсивність окиснення металів також впливає режим нагрівання. Якщо здійснювати циклічні процеси нагрівання та охолодження, то це спричинить появу внутрішніх напружень у захисних плівках. І призведе до їх руйнування та до прискорення процесу окиснення металу [5]. У двигунах або печах, де температура вище 500-600 ^{0}C, важливу роль у процесах газової корозії має пряма хімічна взаємодія металу з газами.

Для сталі марки 65Г висока температура є небезпечною. Ця сталь не містить достатню кількість хрому або алюмінію для формування жаростійкої плівки. І тому вона швидко окиснюється при нагріванні на повітрі.

Температура сильно впливає на ймовірність виникнення контактної корозії металів у агресивних середовищах. Наприклад, у холодній водопровідній воді цинкове покриття є анодом щодо вуглецевої сталі. У гарячій воді потенціал цинку збільшується. І в парі «сталь – цинк» він уже стає катодом. Це спричиняє прискорене руйнування основного металу.

У різних ділянках металевих конструкцій є температурна неоднорідність. Це може викликати термогальванічну корозію. У закритих системах більш нагріті частини стають анодами та зазнають сильного руйнування [7].

Таким чином, температура є каталізатором більшості корозійних процесів. Але в закритих системах або при температурі кипіння середовища можуть бути аномалії, які обумовлені зміною концентрації розчинених агресивних газів. Тому для визначення впливу температури на швидкість корозійних процесів важливо враховувати й аналізувати температурні залежності основних чинників.

1.5 Вплив перемішування на швидкість та характер корозійних процесів

Перемішування (або швидкість руху електроліту) – це один із важливих динамічних факторів, що визначають швидкість корозії металів, які занурені у рідке середовище. Вплив перемішування пов’язаний з процесами масопереносу.

Інтенсивність руйнування металу під впливом руху розчину змінюється за рахунок деяких факторів. По-перше, через посилення дифузії деполяризаторів. Для більшості конструкційних сталей (включаючи сталь 65Г)

у нейтральних середовищах (вода, розчини солей) головною причиною корозії є киснева деполяризація. По-друге, без перемішування біля поверхні металу утворюється збіднений шар електроліту. Там концентрація кисню значно нижча, ніж в об'ємі розчину. Тому і швидкість корозії там лімітується швидкістю дифузії кисню через цей шар. По-третє, при перемішуванні товщина дифузійного шару зменшується, а кількість «свіжого» кисню біля поверхні збільшується. Це призводить до прискорення катодного процесу і до зростання швидкості корозії.

Для металів, які схильні до пасивації, перемішування може мати позитивний ефект. Це пояснюється тим, що O_2 є не тільки окисником, а й пасиватором. І тому його інтенсивний приплив при перемішуванні навпаки допомагає швидше сформувати захисну оксидну плівку. Є також певна швидкість потоку, при якій метал переходить із активного стану в пасивний. При цьому швидкість корозії зменшується. Для сталі 65Г цей ефект майже не спостерігається. Вона не має достатньо легуючих елементів для стійкої пасивації в агресивних середовищах.

Якщо швидкість руху розчину стає дуже високою як турбулентний потік, то виникає явище «ерозійної корозії». Це прискорене руйнування поверхні металу. Його викликає одночасна дія корозійного середовища (хімічна взаємодія) та механічного впливу (швидкий потік рідини, газу або твердих частинок). Потік механічно видаляє з поверхні пухкі шари іржі, які могли б слугувати бар'єром для подальшого окиснення. Це оголює «свіжий» метал для постійної «атаки» агресивного середовища. При дуже великих швидкостях (наприклад, на лопатях насосів або гвинтах суден) утворюються бульбашки вакууму. При схлопуванні вони створюють мікроудари. І це руйнує поверхню металу, створюючи глибокі виразки.

Перемішування також змінює хімічний склад середовища безпосередньо біля металу. Воно запобігає локальному накопиченню іонів металу (Fe^{2+}), які могли б сповільнити анодний процес за законом діючих мас. І перемішування

сприяє швидкому вимиванню інгібіторів корозії, якщо їх концентрація в розчині є низькою для миттєвої адсорбції.

Для сталі 65Г у сільськогосподарських або промислових умовах (наприклад, при промивці деталей або роботі в рідкому гної) помірне перемішування часто збульшує корозію через приток кисню. Дуже інтенсивний рух буде спричиняти механічний знос. А це зробить руйнування сплаву дуже швидким.

Тому, вивчення процесів корозії сталі 65Г в різних умовах є дуже важливим та актуальним для розуміння механізмів цих процесів. А також дає можливість накопичити науковий матеріал для створення «зелених» інгібіторів корозії, які можна використовувати між сезонами роботи сільськогосподарської техніки.

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Вибір об’єктів дослідження

Дослідження було проведено на прямокутних пластинках сталі 65Г (рис. 2.1). Сталь 65Г – це високовуглецева ресорно-пружинна конструкційна сталь. Вона вирізняється високою міцністю, твердістю та пружними властивостями. Завдяки вмісту близько 0,65% вуглецю та легуванню марганцем, вона добре піддається термічній обробці. Це дозволяє досягати оптимального балансу між твердістю та еластичністю. Матеріал має високу зносостійкість і використовується для виготовлення пружин, ресор, стопорних кілець, деталей автомобілів, залізничних кріплень та інструментів. Основним недоліком є чутливість до корозії. Тому сталь потребує захисних покриттів або мастил при експлуатації в агресивних умовах.

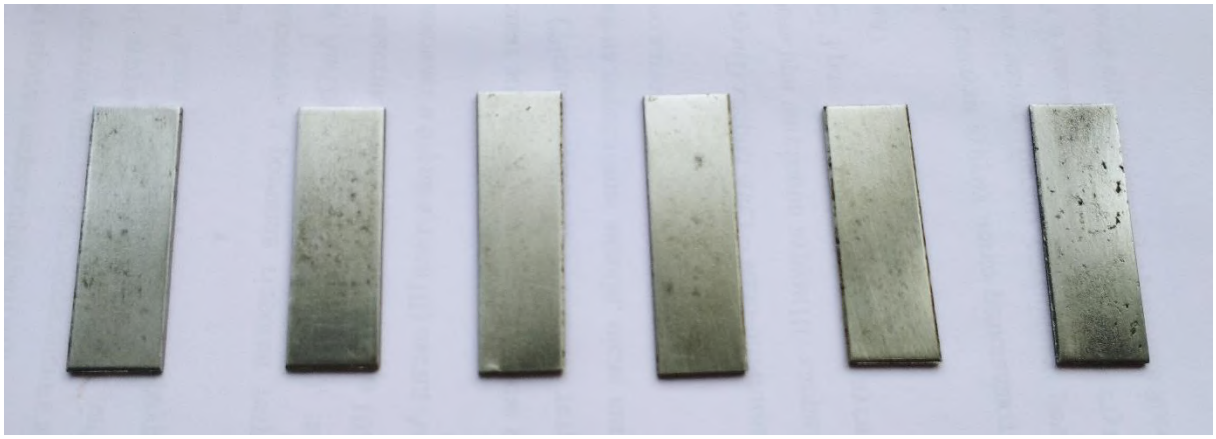


Рисунок 2.1 – Зразки сталі 65Г

Для вивчення особливостей корозії сталі 65Г в різних умовах (при температурі 20 ^{0}C, при нагріванні до 40 ^{0}C та при нагріванні до 40 ^{0}C з одночасним періодичним перемішуванням) було обрано 1 тип природної сировини – кора дубу (виробник ПрАТ «Фармацевтична фабрика «Віола», м. Запоріжжя).



Рисунок 2.2 – Природна сировина (кора дубу)

Площа поверхні та середня вага зразків сталі 65Г представлені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Площа поверхні та середня вага зразків сталі 65Г

№ зразка	65Г	
	m_1, г	S, $см^2$
1	2	3
1	7,2016	15,7950
2	7,3261	15,8636
3	7,7282	17,0168
4	8,0270	17,5030
5	7,4234	16,3142
6	7,5013	16,2232

2.2 Підготовка екстракту з кори дубу

При підготовці до експерименту було отримано водні витяжки з кори дубу.

Рослинний матеріал (кору дубу) заливали дистильованою водою за температури 100 ℃, потім його витримували протягом доби та проціджували.

Одержаний екстракт з кори дубу потім використовували для вивчення особливостей корозії сталі 65Г в 10%-вому розчині сульфатної кислоти за різних умов проведення експерименту.

2.3 План тестування

Вивчення особливостей корозії сталі 65Г проводили у кислому середовищі (10%-вий розчин сульфатної кислоти). Тому що цей матеріал широко застосовується для виготовлення деталей, які часто працюють у контакті з агресивними середовищами, де кислоти прискорюють руйнування металу. Зразки сталі 65Г вистоювали в розчині кислоти 60 хвилин.

Витяжку з кори дубу додавали безпосередньо у стакани з кислотою. Контрольні зразки вистоювали в сульфатній кислоті без присутності екстракту з кори дубу.

Кору дубу доцільно тестувати як «зелений» інгібітор корозії. Вона містить значну кількість природних поліфенолів, танінів та органічних кислот. Вони здатні адсорбуватися на поверхні металу й утворювати захисну плівку. Це знижує швидкість руйнування матеріалу у кислому середовищі. Ці сполуки є біорозкладними та нетоксичними, тому їх застосування відповідає принципам «зеленої хімії» та екологічної безпеки.

Склад розчинів та умови тестування описано в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Склад тестових розчинів та умови проведення досліду

№	Склад розчину та умови
1	сульфатна кислота 75 мл + 25 мл H_2O за температури 20 ^{0}C (контроль)
2	сульфатна кислота 75 мл + 25 мл H_2O за температури 40 ^{0}C (контроль)
3	сульфатна кислота 75 мл + 25 мл H_2O за температури 40 ^{0}C + періодичне перемішування (контроль)
4	сульфатна кислота 75 мл + вилучення з кори дубу 25 мл за температури 20 ^{0}C
5	сульфатна кислота 75 мл + вилучення з кори дубу 25 мл за температури 40 ^{0}C
6	сульфатна кислота 75 мл + вилучення з кори дубу 25 мл за температури 40 ^{0}C + періодичне перемішування

2.4 Гравіметричне визначення швидкості корозійних процесів

Перспективність вивчення швидкості корозії сталей гравіметричним методом пояснюється тим, що цей спосіб є простим, універсальним і водночас достатньо точним для кількісної оцінки руйнування металу. Він дозволяє без складного обладнання визначати втрату маси зразка після експозиції у корозійному середовищі. А потім на основі цього розраховувати швидкість корозії. Такий підхід дає можливість порівнювати стійкість різних металів і сплавів, оцінювати ефективність інгібіторів та захисних покриттів. А також прогнозувати довговічність матеріалів у реальних умовах експлуатації. Завдяки своїй доступності та надійності гравіметричний метод залишається поширеним інструментом для фундаментальних досліджень та для

прикладних завдань у промисловості та екологічно направлених технологіях [8, 9].

Пластинки зі сталі 65Г важили на аналітичних терезах RADWAG AS220.R2 (рис. 2.3). Перед цим параметри (довжину, ширину, товщину) сталевих пластинок заміряли штангенциркулем та вирахували площу поверхні.



Рисунок 2.3 – Аналітичні терези RADWAG AS220.R2 з дослідним зразком сталі 65Г

Після цього зразки сталі 65Г опускали в розчин сульфатної кислоти за різних температурних умов, без та у присутності екстракту з кори дубу. Температуру розчинів контролювали за допомогою термометру (рис. 2.4).



Рисунок 2.4 – Термометр для контролю температури

Періодичне перемішування здійснювали за допомогою скляних паличок, не виймаючи розчини з водяної бані, яка підтримувала температуру, необхідну для проведення експерименту.

Через 60 хвилин після початку експерименту пластинки сталі 65г діставали з розчину кислоти, полоскали, сушили і знову зважували.

На основі отриманих даних розраховували стандартні параметри: ваговий (масовий) показник швидкості корозії (K_m), коефіцієнт гальмування швидкості корозії (γ), ступінь інгібіторного захисту (Z) та глибинний показник швидкості корозії (П).

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ КОРОЗІЇ СТАЛІ 65Г ЗА РІЗНИХ ТЕМПЕРАТУРНИХ УМОВ ТА В ПРИСУТНОСТІ ВОДНОГО ВИЛУЧЕННЯ З РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ

3.1 Обробка експериментальних даних

На основі отриманих при тестуванні даних було розраховано ваговий (масовий) показник швидкості корозії (K_m), коефіцієнт гальмування швидкості корозії (γ), ступінь інгібіторного захисту (Z) та глибинний показник швидкості корозії (П) для сталі 65Г. Результати розрахунків представлено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Розрахунки для сталі 65Г

Показник	H_2SO_4 за температури 20 ^{0}C	H_2SO_4 за температури 40 ^{0}C	H_2SO_4 за температури 40 ^{0}C + перемішування	H_2SO_4 + кора дубу за температури 20 ^{0}C	H_2SO_4 + кора дубу за температури 40 ^{0}C	H_2SO_4 + кора дубу за температури 40 ^{0}C + перемішування
S, см^2	15,7950	15,8636	17,0168	17,5030	16,3142	16,2232
m_1, г	7,2016	7,3261	7,7282	8,0270	7,4234	7,5013
m_2, г	7,1841	7,2451	7,6546	8,0153	7,3764	7,4571
t, хв.	60	60	60	60	60	60
K_m (г/(м^2·год))	11,1	51,11	43,3	6,7	28,8	27,3
γ	-	-	-	1,66	1,77	1,59
Z, %	-	-	-	39,6	43,7	37,0
П, мм/рік	12,3	57,0	48,3	7,4	32,1	30,5

Результати тестування показали, що за температури 20 ^{0}C кора дубу знижує швидкість корозії. Це показує нам ефективність природного інгібітору навіть у відносно «м'яких» умовах.

Зразки сталі 65Г в експериментальних розчинах сульфатної кислоти за температури 20 ^{0}C на початку та в кінці досліду представлені на рисунку 3.1.



а) б) а) б)

початок досліду закінчення досліду

а – контроль; б – сульфатна кислота + вилучення з кори дубу;

Рисунок 3.1 – Зразки сталі 65Г в експериментальних розчинах сульфатної кислоти за температури 20 ^{0}С на початку та в кінці досліду

При нагріванні до 40 ^{0}С ефект «зеленого» інгібітору був ще сильнішим, бо підвищена температура прискорює корозію. Але дубовий екстракт частково компенсує цей вплив.

Зразки сталі 65Г в експериментальних розчинах сульфатної кислоти за температури 40 ^{0}С на початку та в кінці досліду представлені на рисунку 3.2.



б) а) а) б)

початок досліду закінчення досліду

а – контроль; б – сульфатна кислота + вилучення з кори дубу;

Рисунок 3.2 – Зразки сталі 65Г в експериментальних розчинах сульфатної кислоти за температури 40 ^{0}С на початку та в кінці досліду

При нагріванні до 40 ^{0}C з перемішуванням ступінь захисту виявився трохи нижчим. Зразки сталі 65Г на початку та в кінці досліду в експериментальних розчинах сульфатної кислоти за температури 40 ^{0}C + періодичне перемішування представлені на рисунку 3.3.



а) б) а) б)

початок досліду закінчення досліду

а – контроль; б – сульфатна кислота + вилучення з кори дубу;

Рисунок 3.3 – Зразки сталі 65Г в експериментальних розчинах сульфатної кислоти за температури 40 ^{0}C з періодичним перемішуванням на початку та в кінці досліду

Таким чином, ми помітили, що ваговий показник швидкості корозії (K_m) у контрольних зразках сталі 65Г зростав із підвищенням температури (від 20 ^{0}C до 40 ^{0}C) та при перемішуванні. Додавання водного вилучення з кори дубу знижувало ці значення майже удвічі. Це свідчить про ефективність природного інгібітору.

Глибинний показник корозії (П) також має аналогічну тенденцію. Контрольні зразки мали швидкість втрати товщини від майже 12 до майже 57 мм/рік, а за наявності інгібітору – від 7,4 до 32,1 мм/рік.

Коефіцієнт гальмування (γ) був між 1,59 та 1,77. Це також означає зменшення швидкості корозії у 1,6-1,8 рази.

Ступінь інгібіторного захисту (Z) становив 37-43,7 %. Найвищий ефект (43,7 %) спостерігався при 40 ^{0}C без перемішування, а найнижчий (37 %) – при 40 ^{0}C з перемішуванням.

Таким чином, усі результати разом демонструють, що водна витяжка з кори дубу стабільно знижує швидкість корозії сталі 65Г. Але ефективність, мабуть, залежить від умов. При підвищенні температури інгібітор працює сильніше, але інтенсивне перемішування зменшує його захисну дію. Найбільший захисний ефект спостерігається при 40 ^{0}C без перемішування, де втрати товщини знижуються майже удвічі. Це підтверджує доцільність використання природних інгібіторів у корозійному захисті. Особливо це є перспективним в умовах підвищеної температури без механічного впливу.

На рисунку 3.4 представлені всі зразки після закінчення експерименту. Ми помітили, що з підвищенням температури зразки сталі 65Г набувають темного кольору, що свідчить про інтенсивне утворення продуктів корозії.

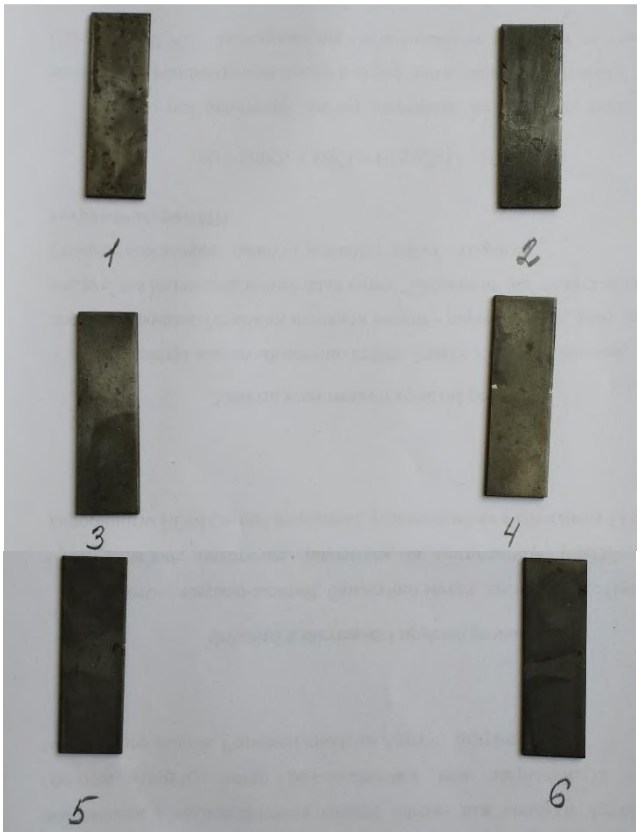


Рисунок 3.4 – Всі досліджувані зразки сталі 65Г після закінчення тестування

У багатьох випадках перемішування прискорює корозію за рахунок полегшення доступу кисню або оновлення реагенту біля поверхні. Але для сталі 65Г у розчині сульфатної кислоти результати досліду були неоднозначними, і, мабуть, механізм впливу виявився іншим.

З отриманих даних видно, що за температури 40 ^{0}C перемішування призвело до незначного уповільнення процесу корозії. Це могло відбутися за декількох причин.

Перша причина – це вплив продуктів реакції та пасивація. При взаємодії сталі з сульфатною кислотою утворився ферум (II) сульфат, розчинність якого за температури 40 ^{0}C обмежена. Без перемішування біля поверхні зразка утворюється пухкий, але відносно товстий шар. Він механічно гальмує дифузію свіжої кислоти до металу. При перемішуванні продукти реакції видаляються швидше. Це сприяє більш рівномірному розподілу розчиненого кисню та компонентів розчину. Якщо починають переважати процеси формування тонких захисних шарів, перемішування може стабілізувати такий стан.

Друга причина – це ефект «винесення» водню. Корозія сталі супроводжується інтенсивним виділенням водню. Без перемішування бульбашки водню можуть затримуватися на поверхні сталі. Це створює мікроскопічні зони, де метал контактує з газом, а не з рідиною. Але під бульбашками часто виникають умови для локальної корозії через різницю потенціалів. При перемішуванні бульбашки водню відриваються від поверхні набагато швидше. І це зменшує час перебування водню в контакті зі сталлю та може змінити швидкість реакції.

Третя причина – це температурний градієнт. Хімічна реакція розчинення сталі в кислоті є екзотермічною (виділяється теплота). Без перемішування безпосередньо біля поверхні зразка температура може бути трохи вищою за номінальні 40 ^{0}C. Це локально прискорює реакцію. Перемішування відводить «зайве» тепло від поверхні. І це знижує швидкість корозії порівняно з перегрітою приповерхневою зоною.

Четверта причина – це особливості легування. Сталь 65Г містить приблизно 0,9-1,2 % марганцю. При кислотній корозії марганець може впливати на структуру поверхневого шару. Можливо, динамічний вплив потоку рідини сприяв формуванню більш щільного залишкового шару з легуючих елементів або вуглецю. А цей шар мав кращі захисні властивості, ніж пухкий осад у стані спокою.

Таким чином, мабуть, перемішування подіяло як фактор однорідності температури та стабілізації дифузійних процесів. І не дозволило виникнути зонам прискореного саморозчинення. Ці зони часто з’являються через локальний перегрів або накопичення агресивних проміжних продуктів.

Тому, використання «зелених» інгібіторів корозії, створених на основі природних сполук, дозволяє одночасно забезпечити ефективний захист сталі від руйнування та відповідати сучасним екологічним вимогам. Це є важливим для зменшення токсичного навантаження на довкілля. А також для підвищення безпеки виробництва та впровадження принципів сталого розвитку у промисловості.

Таким чином, поєднання дослідження корозійної поведінки сталі 65Г у кислому середовищі з пошуком екологічно чистих інгібіторів є стратегічним напрямом для підвищення надійності матеріалів та екологічної відповідальності виробництва.

ВИСНОВКИ

За результатами проведеного тестування корозійного опору сталі 65Г в різних умовах (за температури 20 ^{0}C, при нагріванні до 40 ^{0}C та при нагріванні до 40 ^{0}C з одночасним періодичним перемішуванням) без додавання та в присутності витяжки з природної сировини можна зробити такі висновки.

1. Підвищення температури з 20 ^{0}C до 40 ^{0}C значно прискорює корозію сталі 65Г. Це підтверджується збільшенням вагового показника швидкості корозії (K_m) від 11,1 до 51,1 г/(м²·год) та глибинного показника (П) від 12,3 до 57,0 мм/рік.

2. Додавання водного вилучення з кори дубу знижує швидкість корозії майже в 2 рази. При 20 ^{0}C K_m зменшився з 11,1 до 6,7 г/(м²·год), а при 40 ^{0}C – з 51,1 до 28,8 г/(м²·год). Це підтверджує високу ефективність природного інгібітору навіть у агресивних умовах.

3. Коефіцієнт гальмування (γ) коливався між 1,59-1,77, що вказує на зменшення процесу корозії у 1,6-1,8 рази. Ступінь інгібіторного захисту (Z) становив 37-43,7 %. Найвищий ефект (~44 %) спостерігався при 40 ^{0}C без перемішування.

4. Перемішування при 40 ^{0}C знижувало ефективність інгібітору (Z = 37 %). Це пояснюється видаленням продуктів реакції та бульбашок водню з поверхні металу, а також гомогенізацією температури. Це призводило до менш вираженого захисного ефекту порівняно зі станом спокою.

5. Використання «зелених» інгібіторів, таких як кора дубу, є перспективним напрямом для захисту сталі 65Г у промислових умовах. Це дозволяє поєднати ефективність корозійного захисту з екологічною безпекою та принципами сталого розвитку.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Похмурський В.І., Хома М.С. Корозійна втома металів та сплавів. Львів: СПОЛОМ. 2008. 301 с.

2. Куцова В. З., Ковзель М. А., Носко О. А. Леговані сталі та сплави з особливими властивостями: підручник. Дніпропетровськ: НМетАУ, 2008. 348 с.

3. Борак К. В. Забезпечення рівностійкості зношування робочих органів ґрунтообробних машин. *Наукові праці ВНТУ*. 2022. № 1. 12 с.

4. Борак К. В., Куликівський В. Л. Руднік Д. І. Вплив попередньої корозії на інтенсивність абразивного зношування робочих органів ґрунтообробних машин. *Наукові праці ВНТУ*. 2023. № 2. 10 с.

5. Стоєв П. І., Литовченко С. В., Гірка І. О., Грицина В. Т. Хімічна корозія та захист металів : навчальний посібник. Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2019. 216 с.

6. Борисенко Ю. В. Матеріали сучасної техніки та захист від руйнування : навчальний посібник. Київ: КНУТД, 2016. 111 с.

7. Нестеренко С. В. Конспект лекцій з дисциплін «Електрохімія і захист від корозії» для студентів 3-5 курсів денної і заочної форм навчання за напрямами підготовки 6.060101 – Будівництво, 6.060103 – Гідротехніка (водні ресурси) (фахові спрямування «Водопостачання та водовідведення», «Теплопостачання та вентиляція»). Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. 104 с.

8. Гуменюк О., Трус І. Аналіз сучасних методів вимірювання швидкості корозії. *Biota. Human. Technology.* 2025. № 1. С. 197-210.

9. Стоєв П. І., Литовченко С. В., Гірка І. О., Грицина В. Т. Хімічна корозія та захист металів : навчальний посібник. Харків : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2019. 216 с.