

### РОЗДІЛ III ПРОЦЕСИ ОБРОБКИ ТИСКОМ У МЕТАЛУРГІЇ

УДК: 621.771.23:620.193

DOI: 10.37142/2076-2151/2025-1(54)156

Кухар В. В.  
Курпе О. Г.  
Бутенко Е. О.  
Циміданов Д. В.  
Малій Х. В.

#### КОМПЛЕКСНИЙ АНАЛІЗ ПРИЧИН ДЕГРАДАЦІЇ ЦИНКОВОГО ПОКРИТТЯ НА ГНУТИХ СТАЛЕВИХ ПРОФІЛЯХ ДЛЯ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

У статті представлено комплексний аналіз причин деградації цинкового покриття на гнутих сталевих профілях, виготовлених з рулонної оцинкованої сталі марки DX51D+Z140, яка широко використовується у будівництві як армувальний або конструктивний елемент. Досліджено повний технологічний цикл виробництва — від кислотного травлення гарячекатаної смуги та її холодної прокатки, через гаряче цинкування у захисній атмосфері, до фінального етапу профілювання на багатовалкових станах. У кожному з етапів проаналізовано потенційні чинники виникнення дефектів, що можуть призвести до зниження антикорозійної стійкості покриття. Встановлено, що основними технологічними порушеннями є: залишки оксидів заліза на поверхні після неповного травлення, відсутність або неякісна пасивація зовнішньої поверхні профілю після цинкування, а також потрапляння хлоридів — як внутрішнього походження (технічна вода), так і зовнішнього (атмосферні впливи). Проведено експериментальні вимірювання товщини цинкового шару на штабових заготовках і готових профілях із подальшою статистичною обробкою даних за критеріями Кохрена та Фішера. Хімічний аналіз забруднень підтвердив наявність хлоридів на зовнішній поверхні профілів, Cr(VI) лише під покриттям (свідчення неповної пасивації), а також залишкових органічних емульсій. Дослідження показали, що профілі, виготовлені з рулонів із підвищеною дисперсією цинку, є найбільш вразливими до локальної корозії. Навіть мінімальні відхилення від регламентованих параметрів на будь-якому етапі виробництва можуть мати критичні наслідки для експлуатаційної надійності конструкцій. Попри те, що середні значення товщини покриття відповідали вимогам стандарту Z140 (ДСТУ EN 10346:2014), комплексна дія внутрішніх і зовнішніх чинників спричинила появу «білої іржі» ще до експлуатації. Запропоновано рекомендації щодо вдосконалення технологічних і логістичних процесів для підвищення довговічності гнутих оцинкованих профілів.

**Ключові слова:** оцинкована сталь, гнутий профіль, холодна прокатка, цинкування, пасивація, хлориди, корозія, технологія профілювання, хімічний аналіз

У сучасних умовах зростаючої потреби у швидкому відновленні пошкодженого житлового фонду, зокрема внаслідок повномасштабної агресії та бойових дій в Україні, особливу увагу привертають конструктивні матеріали, які забезпечують надійність, швидкість і економічність будівництва [1]. Одним із ключових елементів таких систем є гнуті профілі з оцинкованої сталі, що широко застосовуються в якості армувальних елементів у віконних конструкціях, каркасах, фасадних рішеннях, а також у тепличних та сільськогосподарських спорудах (рис. 1). Їхнє застосування забезпечує необхідну жорсткість і геометричну стабільність у поєднанні з легкою вагою та зручністю монтажу.

Разом із тим, навіть за наявності цинкового покриття, яке має гарантувати довготривалий захист від корозії, можливі випадки його передчасного пошкодження [2]. Особливо поширеним є утворення «білої іржі» — продукту атмосферної корозії, що виникає на поверхні металу під дією вологи, агресивних аерозолів та відсутності належної пасивації. Така корозія погіршує зовнішній вигляд виробів, спричиняє поступове руйнування цинкового шару та оголення основного металу, що в подальшому знижує експлуатаційну надійність конструкцій. Ситуацію додатково ускладнюють глобальні кліматичні зміни, що супроводжуються частими та

різкими коливаннями температури, підвищеною вологістю та зростанням атмосферних впливів. Активне використання хімічних реагентів для зимового обслуговування доріг, а також добрив і дезінфекційних засобів в агросекторі створює хімічно агресивне середовище, здатне руйнувати захисні функції цинкового шару. Профілі, що зберігаються або експлуатуються в таких умовах, стають вразливими до локалізованої корозії навіть при незначних виробничих відхиленнях [3].

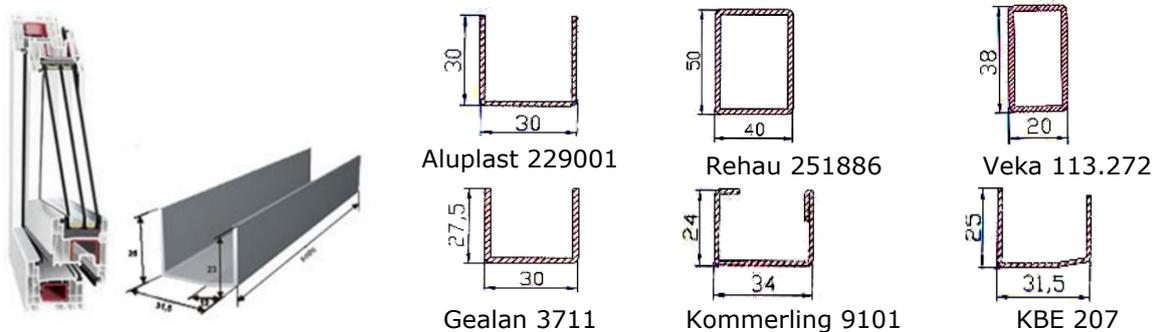


Рис. 1. Гнуті профілі у віконних системах

Важливо підкреслити, що виготовлення таких металевих елементів є технологічно складним процесом, що включає холодну прокатку, оцинкування рулонів, їхню порізку на штрипси та подальше профілювання. Кожен із цих етапів може містити потенційні ризики формування дефектів, пов'язаних з недотриманням параметрів очищення, пасивації, контролю вологості чи використання технологічної води. Саме тому питання забезпечення довговічності оцинкованих гнутих профілів набуває сьогодні стратегічного значення — як у технічному, так і в соціальному, та навіть геополітичному контексті.

Гнуті профілі з оцинкованої сталі повинні відповідати комплексу експлуатаційних вимог, що забезпечують їхню надійність і довговічність у будівельних та інженерних конструкціях. Основними серед них є достатня жорсткість і міцність при мінімальній вазі, точність геометричних параметрів, стабільність форми при монтажі, стійкість до механічних пошкоджень і вібраційних навантажень [4]. Особливу увагу приділяють антикорозійній стійкості, яка досягається застосуванням двостороннього цинкового покриття (наприклад, Z140), відповідного нормам ДСТУ EN 10346:2014, що гарантує термін служби профілю в умовах неагресивного середовища щонайменше 25 років.

Крім загальних механічних показників, профілі призначені забезпечувати зручність монтажу та сумісність із різними системами конструкцій. Це включає відсутність задирок, рівномірність шару цинку, та відповідність умовам транспортування й зберігання (у т. ч. захист від утворення конденсату, промерзання, корозії). Недотримання цих вимог — особливо у частині поверхневого захисту — призводить до прискореного кородування навіть нових виробів, що знижує довіру споживача та експлуатаційну цінність профілю.

Виробництво оцинкованої сталевий заготовки в цехах холодного прокату (рис. 2) починається з травлення гарячекатаного рулону, який містить окалину та поверхневі забруднення [5]. На металургійних підприємствах очищення виконується на безперервно-травильних агрегатах (БТА) із використанням сірчаної кислоти, після чого полосу багаторазово промивають і сушать гарячим повітрям. Якість травлення й повнота промивки мають критичне значення для адгезії майбутнього цинкового покриття: залишки кислоти чи шламу можуть призводити до прискореної корозії металу.

Після травлення полоса направляється на холодну прокатку на багатоклетьовому стані, де формується задана товщина та структура металу. Наступним етапом є безперервне гаряче цинкування, в процесі якого полоса проходить відпал у захисній атмосфері (азот + водень), очищується, а потім занурюється у ванну з розплавленим цинком температурою ~450–460 °С. Товщина покриття формується «повітряними ножами» та визначається умовами

охолодження й складом розплаву (вміст Al, Pb, Fe). Для поліпшення стійкості до білої корозії виріб пасивується розчином хромової кислоти та, за потреби, промаслюється. Усі ці етапи мають сувору регламентацію, оскільки навіть незначне відхилення в параметрах процесу може призвести до дефектів покриття — від відшарування до швидкої деградації при зберіганні.

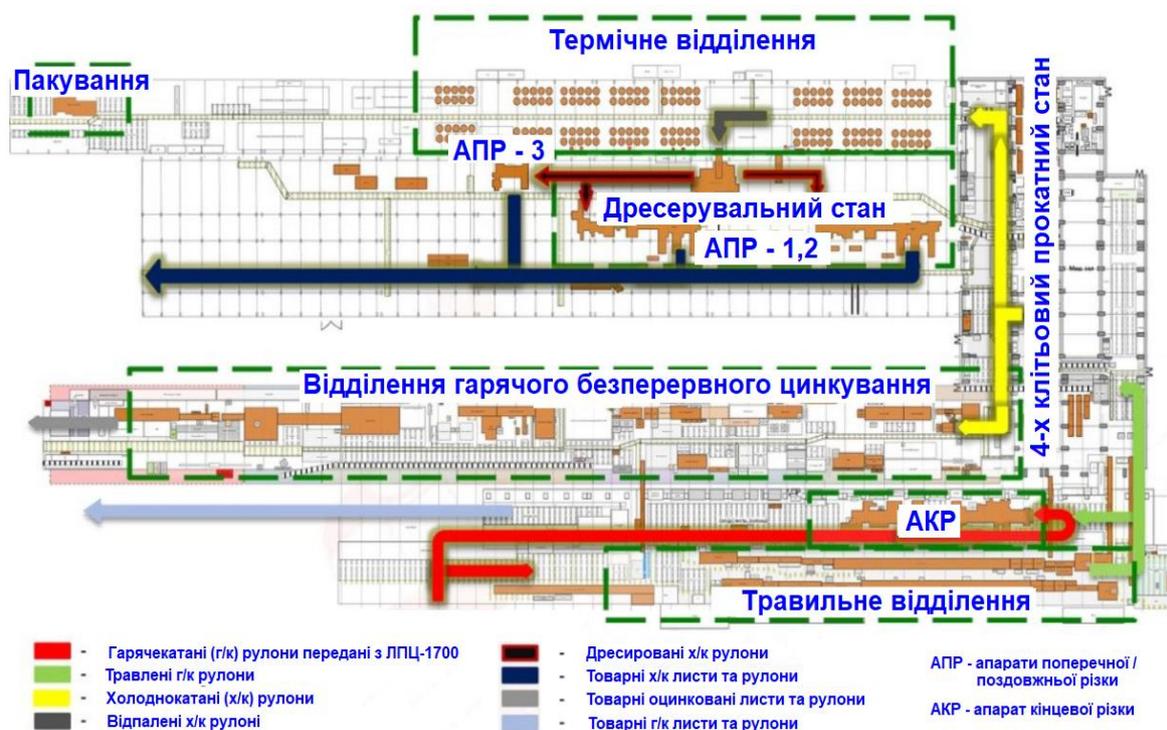


Рис. 2. Організація виробництва оцинкованих рулонів в цеху холодного прокату [5]

Холодногнуті профілі, в узагальненому випадку, виготовляють методом багатовалкової профілюючої прокатки з рулонної оцинкованої сталі товщиною переважно від 0,65 до 2,0 мм. На початковому етапі рулони розмотуються, нарізаються на штаби необхідної ширини, після чого штаба послідовно проходить через серію формувальних клітей профілезгинального стану (рис. 3). Кожна кліть деформує метал поетапно, надаючи йому заданого перерізу, — без нагрівання, що дозволяє зберегти цинкове покриття.

На завершальних етапах профіль нарізається на задану довжину (ножами “летючого різку”), проходить контроль геометрії та, за потреби, пакується. Особливу увагу приділяють захисту цинкового шару від механічних пошкоджень під час проходження через напрямні, ролики та приймальні столи. Підвищена точність обладнання та автоматичне регулювання параметрів дозволяють отримати профілі з мінімальними допусками по довжині, площинності та серповидності. Порушення технології, такі як перекіс штаби чи наявність абразивних частинок, може призвести до задирів і мікропошкоджень покриття, що знижує корозійну стійкість виробу.

Фактори, що спричиняють корозію, зокрема «білу іржу», у гнутих оцинкованих профілях пов'язані як з порушеннями технології виробництва, так і з умовами транспортування та зберігання. На етапі виготовлення основними ризиками є: нерівномірне або недостатнє цинкування, наявність шламу чи залишків кислот після травлення, відсутність або погана якість пасивації, пошкодження покриття під час прокатки чи різання. Усі ці дефекти можуть стати точками початку локального кородування або викликати відшарування захисного шару, особливо при дії вологи й температурних коливань [9].

«Біла іржа» утворюється при вологому зберіганні виробів у щільно складених пакетах без вентиляції. Вона виникає внаслідок утворення гідроксиду та карбонату цинку під дією вологи, кисню й вуглекислого газу. Найбільш вразливими є нові, ще не стабілізовані покриття без сформованої захисної карбонатної плівки. Білу іржу легко сплутати з незначними естетичними

дефектами, однак вона може стати початком серйозного пошкодження шару цинку та навіть основного металу, якщо не вжити заходів. Саме тому контроль вологості, правильна упаковка й провітрюваність складських приміщень є критично важливими.

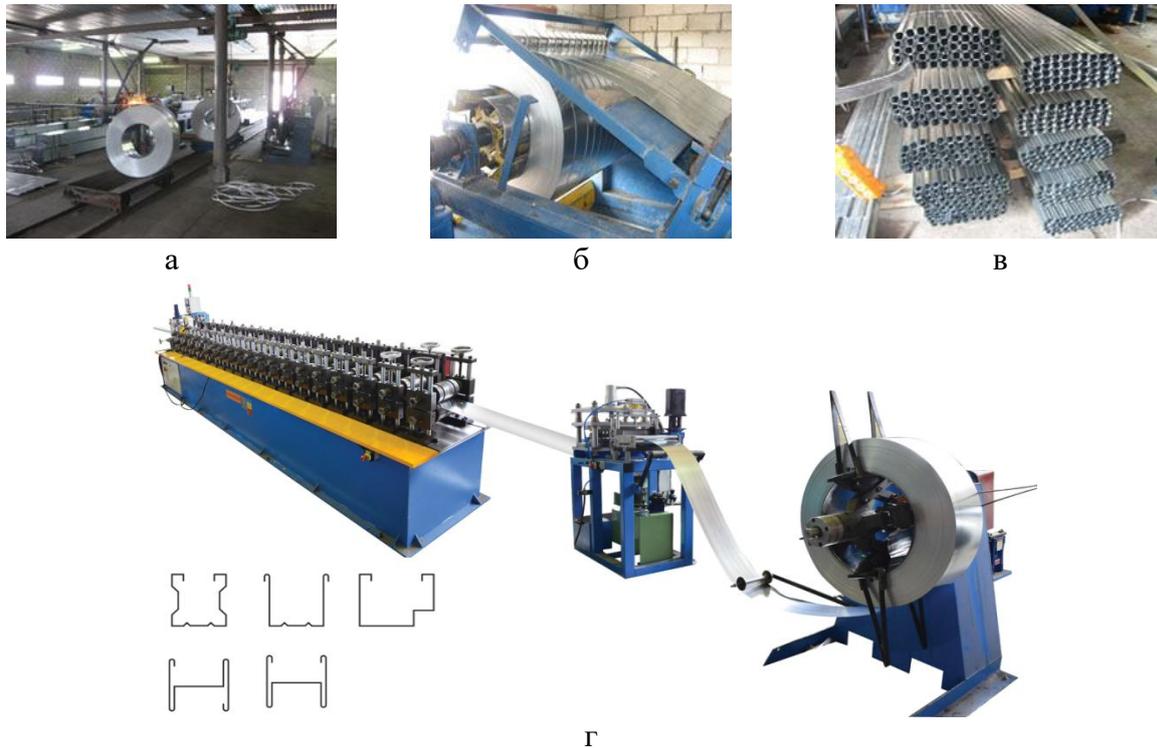


Рис. 3. Організація виробництва холодногнутих профілів з оцинкованої рулонної сталі [5–8]: а – сталеві рулони на стелажах; б – розмітка та розрізання рулонів та штаби (штрипси); в – готова продукція; г – лінія профілювання штрипсу

Виробництво та постачання оцинкованої сталі в Україні регламентується національним стандартом ДСТУ EN 10346:2014, який є адаптованим перекладом європейського EN 10346 і встановлює вимоги до хімічного складу, механічних властивостей, типів покриттів (наприклад, Z140), їх маси, якості поверхні та оброблення (пасивування, змащування тощо). Додатково застосовується ДСТУ EN 10143:2014, що визначає допуски на розміри та форму виробів з тонколистової сталі з металевим покриттям. Ці стандарти зобов'язують виробника точно вказувати всі параметри продукції в сертифікаті якості, а також дотримуватись вимог до захисту поверхні від корозії під час транспортування та зберігання.

Дефекти цинкового покриття можуть виникати вже на стадії виробництва оцинкованої заготовки, якщо порушено процеси травлення, промивки, сушіння чи нанесення самого покриття. Серед поширених причин — наявність залишків окалини через забруднені травильні ванни, недостатнє знежирення або промивка смуги перед оцинкуванням, нерівномірний розподіл розплаву цинку, перевищення вмісту домішок у ванні, а також помилки під час пасивації. Крім того, неналежне сушіння та неефективне промаслювання сприяють утворенню вологи на поверхні, що призводить до «білої іржі» ще до відвантаження продукції.

Під час транспортування й зберігання критичними факторами стають контакт вологого повітря з металом, недостатній нахил упакованих виробів, щільне укладання без циркуляції повітря, а також потрапляння води (дощу чи конденсату) між елементами профілів. Особливо небезпечним є зберігання неупакованих чи свіжооцинкованих виробів у закритих, непровітрюваних просторах. Якщо порушено умови пакування, вентиляції або не дотримано нахилу 5 мм/м для стоку вологи, навіть якісне покриття може втратити захисні властивості ще до монтажу.

У зв'язку з фіксуванням випадків передчасного прояву корозії на гнутих профілях із оцинкованої сталі, зокрема у вигляді «білої іржі» вже на етапі складування або короткочасного зберігання, виникла потреба у з'ясуванні можливих причин таких дефектів. Візуальний огляд зразків свідчив про наявність поверхневих уражень корозійного характеру різного ступеня вираженості, що ставило під сумнів якість початкового оцинкованого прокату або умови виробництва. Було висунуто припущення про можливе зменшення товщини захисного цинкового шару у вихідному матеріалі, або його часткове руйнування під час профілювання.

З метою об'єктивної оцінки стану покриття та перевірки його відповідності стандарту Z140 за ДСТУ EN 10346:2014 було проведено експериментальне дослідження товщини цинкового шару як на вихідних штабових заготовках («штаба»), так і на готових гнутих профілях («профіль»). Завданням дослідження було: визначення середньої товщини цинкового покриття на заготовках із різних джерел постачання; оцінка зміни товщини покриття після технологічного формування профілю; статистична перевірка достовірності результатів і відповідність стандарту.

Для виконання цих завдань спочатку було досліджено три типи оцинкованих штабових заготовок товщиною 1,03 мм (виробництво Республіки Польща, присвоєно індекс I), 1,35 мм та 1,5 мм (українського виробництва, присвоєно індекси II та III відповідно). Кожен зразок було розсортовано, промарковано, і з кожної позиції вирізано по п'ять темплетів розміром  $30 \times 20$  мм. Для збереження достовірності ідентифікації маркування внесено до журналу випробувань, а самі зразки подано на первинне вимірювання. Окремо були досліджені три типи гнутих профілів: два з перерізом  $30 \times 50$  мм (з товщинами 1,48–1,5 мм та 1,5 мм) і один з перерізом  $35 \times 49,5$  мм (1,5 мм). Ці профілі вже мали ознаки корозійного ураження, в тому числі білої та бурої іржі (рис. 4).

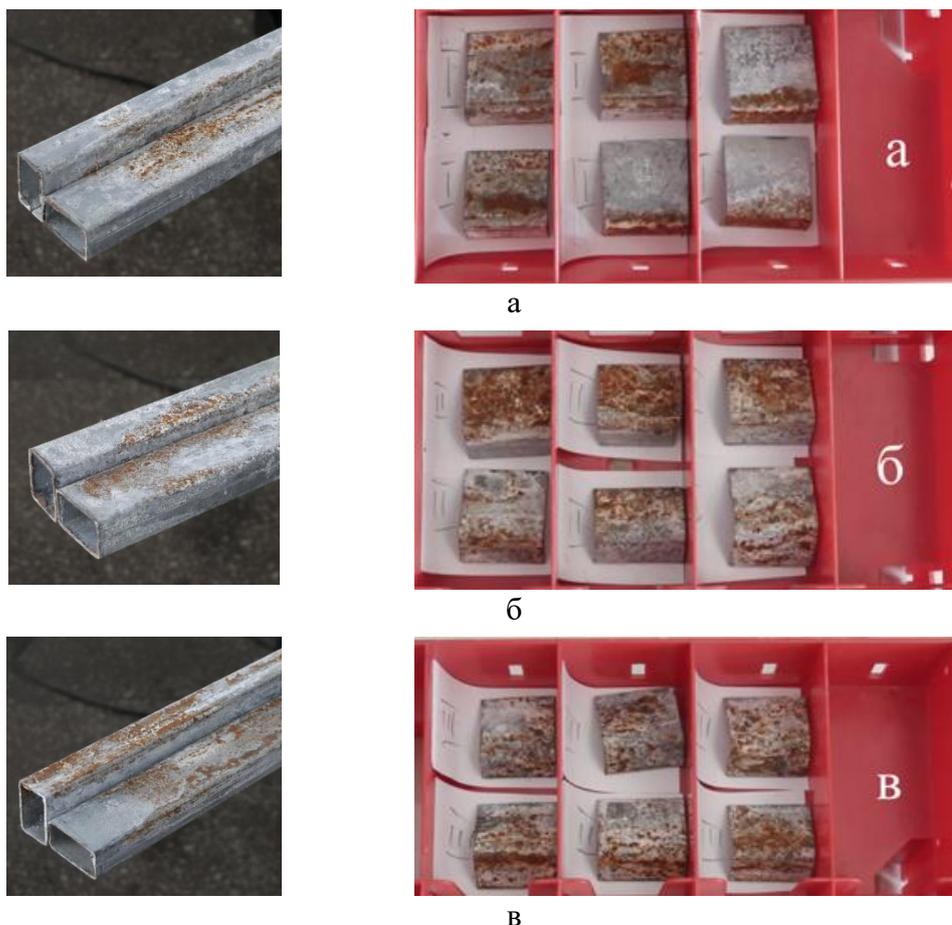


Рис. 4. Профілі зі слідами корозії (ліворуч) та темплети (праворуч), вирізані з відповідних профілів для проведення хімічних випробувань:  
а –  $30 \times 50$ , 1,48-1,5 мм; б –  $30 \times 50$ , 1,5 мм; в –  $35 \times 49,5$ ; 1,5 мм

Із кожного типу профілю вирізали по п'ять темплетів тих самих розмірів — 30 × 20 мм, з обов'язковим збереженням кутової геометрії сегменту, характерної для профільованого виробу. Темплети маркували згідно з джерелом вихідного матеріалу та конструктивними розмірами профілю (див. рис. 4). Після виготовлення темплетів та їх маркування було здійснено вимірювання товщини цинкового покриття за допомогою електромагнітного приладу «NOVOTEST ТП-1» (рис. 5) з автоматичним усередненням. Надалі темплети були передані для подальшого хімічного аналізу та статистичної обробки даних з використанням критеріїв Кохрена та Фішера, що дозволило зробити висновки про вірогідність відхилень, а також загальну відповідність покриття вимогам стандарту.



Рис. 5. Зразки для проведення випробувань та прилад «NOVOTEST ТП-1»

Методика обробки експериментальних даних полягала в статистичному аналізі результатів вимірювань товщини цинкового покриття на темплетях, вирізаних із гнутих профілів. Перевірка внутрішньої узгодженості та відтворюваності результатів здійснювалась за критерієм Кохрена (Gr), а адекватність опису — за F-критерієм Фішера, з рівнем надійності  $\alpha = 0,95$  [10]. Для кожного зразка обчислювались середні значення, абсолютна та відносна похибка, а також повна загальна дисперсія. Як приклад повної обробки подано табл. 1, що містить детальні дані по заготовці з Республіки Польща («Польща»), інші результати вимірювань були оброблені аналогічним чином.

Таблиця 1

Статистична обробка змін товщини цинкового покриття заготовки «Польща»

Товщина цинкового покриття	№ темплету					Середнє значення (маг. очікування), $\bar{h}$	Повна загальна дисперсія, $S^2$	Середньоквадратична похибка, $S_h$	Абсолютна похибка, $\Delta h$	Завершальний результат, $h = \bar{h} + \Delta h$	Відносна похибка, $\delta - \%$	Типове значення товщини цинкового покриття Z140 за ДСТУ EN 10346:2014	Відповідність Так/Ні	Інтервал рекомендованих значень товщини цинкового покриття Z140 за ДСТУ EN 10346:2014	Відповідність Так/Ні
	1	2	3	4	5										
$h_i$ , мкм	10	11	12	10	11	10,8	3,5	0,837	2,326	10,8 ± 2,326	7,7	10	Так	7-15	Так
$S_{ah}^2 = 0,7$					$S_{nh}^2 = 0,303$					$S^2 = 3,5$					
Gr = 0,315; Gтабл = 0,544; Gr < Gтабл										F = 2,31; Fкр = 14,02; F < Fкр					

Таким чином, встановлено, що середні значення товщини цинкового покриття на всіх штабових заготовках — 10,8 мкм («Польща»), 12,4 мкм (українська, 1,35 мм), 21,4 мкм (українська, 1,5 мм) — відповідають або перевищують типове значення для стандарту Z140 (10 мкм) та потрапляють у рекомендований інтервал 7–15 мкм за ДСТУ EN 10346:2014.

Гнуті профілі з типорозмірами  $30 \times 50$  мм (1,5 мм) та  $35 \times 49,5$  мм (1,5 мм) також продемонстрували відповідність — середні значення 10,4 мкм і 11,0 мкм відповідно. Водночас, для профілю  $30 \times 50$  мм, виготовленого зі штаби товщиною 1,48–1,5 мм, зафіксовано найменше середнє значення — 8,6 мкм, яке не досягає типового, проте залишається в межах допустимого інтервалу. Саме в цьому зразку виявлено максимальну відносну похибку 15,6 % та найбільшу дисперсію ( $S^2 = 9$ ), що може свідчити про нестабільність покриття або локальні втрати цинку під час деформації. Усі інші серії вимірювань підтвердили статистичну достовірність, нормальний розподіл та належну якість цинкування.

Узагальнені результати для всіх зразків наведено в табл. 2. Усі значення критерію Кохрена виявилися меншими за табличне ( $G_p < G_{табл} = 0,544$ ), що підтверджує відтворюваність вимірювань. Результати також пройшли перевірку за критерієм Фішера: для всіх серій  $F < F_{кр} = 14,02$ , що вказує на адекватність статистичної моделі.

Таблиця 2

Узагальнені результати вимірювань товщини цинкового покриття

Зразок	Середня товщина покриття (мкм)	Відносна похибка (%)	$G_p$	$G_{табл}$	$G_p < G_{табл}$	Відповідність Z140 (типове значення)	Відповідність інтервалу 7–15 мкм
Штаба, «Польща»	10,8	7,7	0,315	0,544	Так	Так	Так
Штаба, Сертифікат № 1	12,4	4,4	0,399	0,544	Так	Так	Так
Штаба, Сертифікат № 2	21,4	5,3	0,354	0,544	Так	Ні	Так
Профіль $30 \times 50$ (1,48–1,5)	8,6	15,6	0,328	0,544	Так	Ні	Так
Профіль $30 \times 50$ (1,5)	10,4	12,9	0,276	0,544	Так	Так	Так
Профіль $35 \times 49,5$	11,0	11,1	0,400	0,544	Так	Так	Так

Далі проводили хімічний аналіз 30 темплетів із штабових оцинкованих заготовок (вирізаних із штаб) та гнутих профілів (по 15 з кожної групи). Метою було встановити вплив поверхневих і внутрішніх домішок на розвиток корозії. Першочергово визначали наявність хлоридів, які реагували з іонами  $Ag^+$ , утворюючи осад  $AgCl$  за реакцією [11]:



де  $AgCl$  — характерний білий осад.

Хлориди виявлено у всіх 15 профілях на поверхні, але відсутні під покриттям. У зразках рулонної сталі хлориди не виявлені взагалі.

Далі визначали сульфат-іони ( $SO_4^{2-}$ ) за класичною реакцією [11]:



де  $BaSO_4$  — білий осад, що не розчиняється у  $HCl$  чи  $H_2SO_4$ .

Сульфати не виявлено ні на поверхні, ні під покриттям у усіх зразках. Це свідчить про якісне промивання після травлення.

Аналіз на шестивалентний хром  $Cr(VI)$  (індикатор пасивації) проводили після розчинення навісок у концентрованій  $HNO_3$  з подальшим додаванням: 1 мл розбавленої (1:9)  $H_2SO_4$ , декількох крапель  $H_3PO_4$ , 0,5 мл 0,5% розчину дифенілкарбазиду в ацетоні. Через 10 хвилин поява червонувато-фіолетового забарвлення свідчила про наявність  $Cr(VI)$ . У всіх 30 зразках (15 профілів + 15 штаб) виявлено  $Cr(VI)$  лише під цинковим покриттям, зовні — відсутній. Це означає, що внутрішня сторона пройшла пасивацію, а зовнішня — ні, що могло спричинити формування білої корозії.

Для визначення оксидів заліза FeO/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (залишкова окалина) було проведено мікроскопічний аналіз за допомогою Zeiss Supra V50 згідно з ГОСТ 9.908 та ГОСТ 21014. Виявлено оксиди на всіх зразках профілів під цинковим шаром, у той час як штабові (штабові) заготовки були чистими, що свідчить про проблеми з травленням та підготовкою до цинкування у рулонах, використаних для профілювання.

Аналіз на залишки технологічної емульсії («Універсал–1ТС» або «Агринол–ХП») проводили шляхом розчинення 30 навісок по 2 г у HNO<sub>3</sub>, подальшої екстракції та паперової хроматографії. В усіх 30 зразках виявлено слідові кількості органіки, що могло спричинити погіршення адгезії покриття. Узагальнені результати наведено у табл. 3.

Таблиця 3

Результати хімічного аналізу темплетів із штабових заготовок і гнутих профілів

№	Зразок (типорозмір, товщина)	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cr(VI)	Оксиди Fe під Zn	Органіка (емульсія)
I. Штабові заготовки (DX51D+Z140)						
1–5	Польща, 1,03 мм	-/-	-/-	-/+	-	+
6–10	Україна, 1,35 мм	-/-	-/-	-/+	-	+
11–15	Україна, 1,5 мм	-/-	-/-	-/+	-	+
II. Гнуті профілі (виробництво з DX51D+Z140)						
16–20	Профіль 30×50 мм, 1,48–1,5 мм	+/-	-/-	-/+	+	+
21–25	Профіль 30×50 мм, 1,5 мм	+/-	-/-	-/+	+	+
26–30	Профіль 35×49,5 мм, 1,5 мм	+/-	-/-	-/+	+	+

(«+» – виявлено; «-» – не виявлено; чисельник – на поверхні, знаменник – під цинковим покриттям)

Для кількісного оцінювання маси цинкового покриття було застосовано методику за ДСТУ EN 10346:2014, що базується на розчиненні цинку у 50 % HCl із 3,5 г/л гексаметилентетраміну (уротропіну) при кімнатній температурі (20–25 °С). Було відібрано 12 темплетів (по 2 з кожного типу зразка), які знежирювали ацетоном, зважували з точністю до 0,0001 г, занурювали в розчин до припинення виділення водню, потім промивали, сушили при 100 °С та повторно зважували. В результаті маса покриття становила 1,14–1,28 % від маси темплетів у штабових заготовках та 1,02 % у гнутих профілях, що свідчить про часткову втрату цинку внаслідок корозійного пошкодження покриття на профілях ще до експлуатації.

Таким чином, причину корозії гнутих профілів слід вважати комплексною, зумовленою одночасною дією технологічних чинників (недостатня підготовка поверхні рулонів, наявність залишків емульсії та оксидів заліза, відсутність пасивації зовнішньої поверхні) і зовнішніх впливів (наявність хлоридів атмосферного походження).

## ВИСНОВКИ

У результаті проведеного дослідження встановлено, що основні причини корозії гнутих оцинкованих профілів мають комплексний характер. На виробничих етапах зафіксовано низку технологічних порушень: недостатнє очищення поверхні рулонної сталі перед оцинкуванням (наявність залишків емульсії та оксидів заліза), нерівномірне або відсутнє пасивування зовнішнього шару, дефекти нанесення цинкового покриття. Технологію профілювання реалізовано без зауважень. Також виявлено невідповідність умов зберігання та транспортування, включно з можливістю механічних пошкоджень і забруднення хлоридами (з технічної води або атмосфери). Хоча товщина покриття у більшості зразків відповідала нормативам Z140 (за ДСТУ EN 10346:2014), для одного з профілів (30 × 50; 1,48–1,5 мм) зафіксовано вихід за межі типових значень при допустимому діапазоні. Таким чином, головними чинниками прискореного кородування слід вважати: низьку якість рулонної сировини; порушення підготовки та пасивації при оцинкуванні; використання технічної води з вмістом хлоридів; ймовірні зовнішні впливи під час транспортування та зберігання. Усі ці фактори потребують корекції виробничих і логістичних процесів на всіх етапах — від постачання рулонної сталі до формування готового профілю.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Відбудова для розвитку: зарубіжний досвід та українські перспективи : міжнародна колективна монографія / [А. Андрощук, Г. Андрощук, В. Небрат, Н. Супрун та ін. ; редкол.: В. Небрат, А. Беляк, О. Курбет та ін.]; НАН України, ДУ "Інститут економіки та прогнозування НАН України". Київ : [б. в.], 2023. 570 с.
2. Курандо О. І., Плеснецов Ю. О., Плеснецов С. Ю. Прогнозування виникнення дефектів гнутих профілів. *Методи та прилади контролю якості*. 2024. № 2(53). С. 16–22. DOI: [https://doi.org/10.31471/1993-9981-2024-2\(53\)-16-22](https://doi.org/10.31471/1993-9981-2024-2(53)-16-22)
3. Дегтярєва І., Бурлакова І., Бавикіна А. Економіка для екології: перспективи та виклики. *Mechanism of an Economic Regulation*. 2014. № 2(64). С. 134–141. Режим доступу: <http://mer-journal.sumy.ua/index.php/journal/article/view/499>
4. Нагнібеда М. М., Кухар В. В., Ткачов Р. О., Радусhev О. О., Ясько С. Г., Фролов Є. А. Випробування на поперечний згин закритих армуючих профілів гнutoго та гнutoзварного виконання. *Обробка матеріалів тиском*. 2019. № 2(49). С. 156–162.
5. Kukhar V., Klimov E., Chernenko S. Analysis of Galvanized Steel Sheets Fabrication in Cold Rolling Shop and Identification of Local Impacts Contributing to Corrosion of Metal-Products. *Solid State Phenomena*. 2021. Vol. 316. P. 873–879. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.316.873>
6. Саенко О. Ф., Губський С. О., Чухліб В. Л., Сергієнко М. Є., Колісник К. Д. Підхід до зменшення кількості технологічних переходів при виробництві гнутих профілів. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Машинознавство та САПР*. 2023. № 2(8). С. 108–113. DOI: [https://doi.org/10.20998/2079-004X.2023.2\(8\).12](https://doi.org/10.20998/2079-004X.2023.2(8).12)
7. Danvis. Режим доступу: <http://danvis.ua/>
8. Лінії профілювання металу SLM / QUARTZ. Режим доступу: <https://qz.dp.ua/ua/p1559589547-linii-profilirovaniya-metalla.html>
9. Fuentes M., de la Fuente D., Chico B., Llorente I., Jiménez J.A., Morcillo M. Atmospheric Corrosion of Zinc in Coastal Atmospheres. *Materials and Corrosion*. 2019. P. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1002/maco.201810620>
10. Єременко В. С., Куц Ю. В., Мокійчук В. М., Самойліченко О. В. Статистичний аналіз даних вимірювань : навч. посіб. Київ : НАУ, 2013. 320 с.
11. Дзюба О. А. Дослідження впливу нерівномірності корозійного ураження на довговічність стрижнів в агресивному середовищі. *Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій*. 2016. Вип. 25. С. 51–68. Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pom\\_2016\\_25\\_7](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pom_2016_25_7)

## REFERENCES

1. Androshchuk A., Androshchuk H., Nebrat V., Suprun N., et al. *Recovery for development: foreign experience and Ukrainian prospects*. Kyiv: Institute for Economics and Forecasting of the NAS of Ukraine, 2023. 570 p. (in Ukrainian).
2. Kurando O. I., Plesnetsov Yu. O., Plesnetsov S. Yu. Forecasting the emergence of defects in cold-formed profiles. *Methods and Devices for Quality Control*. 2024. No. 2(53), pp. 16–22. [https://doi.org/10.31471/1993-9981-2024-2\(53\)-16-22](https://doi.org/10.31471/1993-9981-2024-2(53)-16-22) (in Ukrainian).
3. Dehtiarіova I., Burlakova I., Bavykina A. Economy for ecology: prospects and challenges. *Mechanism of an Economic Regulation*. 2014. No. 2(64), pp. 134–141. <http://mer-journal.sumy.ua/index.php/journal/article/view/499> (in Ukrainian).
4. Nahnibeda M. M., Kukhar V. V., Tkachov R. O., Radushev O. O., Yasko S. H., Frolov Ye. A. Bending test of closed reinforcing profiles of cold-formed and welded execution. *Material Forming by Pressure*. 2019. No. 2(49), pp. 156–162. (in Ukrainian).
5. Kukhar V., Klimov E., Chernenko S. Analysis of galvanized steel sheets fabrication in cold rolling shop and identification of local impacts contributing to corrosion of metal-products. *Solid State Phenomena*. 2021. Vol. 316, pp. 873–879. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.316.873>.
6. Saienko O. F., Hubsnyi S. O., Chukhlib V. L., Serhienko M. Ye., Kolisnyk K. D. Approach to reducing the number of technological transitions in the production of cold-formed profiles. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Mechanical Engineering and CAD Systems*. 2023. No. 2(8), pp. 108–113. [https://doi.org/10.20998/2079-004X.2023.2\(8\).12](https://doi.org/10.20998/2079-004X.2023.2(8).12) (in Ukrainian).
7. Danvis. Access mode: <http://danvis.ua/>.
8. QUARTZ. Profiling lines for metal SLM. Access mode: <https://qz.dp.ua/ua/p1559589547-linii-profilirovaniya-metalla.html>.
9. Fuentes M., de la Fuente D., Chico B., Llorente I., Jiménez J. A., Morcillo M. Atmospheric corrosion of zinc in coastal atmospheres. *Materials and Corrosion*. 2019. pp. 1–11. <https://doi.org/10.1002/maco.201810620>
10. Yeremenko V. S., Kuts Yu. V., Mokiichuk V. M., Samoilenko O. V. *Statistical analysis of measurement data: textbook*. Kyiv: NAU, 2013. 320 p. (in Ukrainian).
11. Dziuba O. A. Study of the impact of uneven corrosion damage on the durability of rods in an aggressive environment. *Problems of Computational Mechanics and Structural Strength*. 2016. Issue 25, pp. 51–68. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pom\\_2016\\_25\\_7](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pom_2016_25_7) (in Ukrainian).

**Kukhar V., Kurpe O., Butenko E., Tsymidanov D., Malii Kh., Spichak O. Comprehensive analysis of the causes of zinc coating degradation on cold-formed steel profiles for construction applications.**

This article presents a comprehensive analysis of the causes behind zinc coating degradation observed on cold-formed galvanized steel profiles used in construction. The profiles were manufactured from steel grade DX51D+Z140, widely applied in structural elements such as window reinforcements, frames, and façade systems. The study investigates the entire technological chain — from hot-rolled coil pickling and cold rolling, through hot-dip galvanizing in protective atmospheres, to final roll-forming operations on multi-stand lines. Each stage is evaluated for its potential contribution to defects, especially with regard to corrosion resistance. Key technological factors contributing to premature corrosion include incomplete removal of iron oxides during acid pickling, insufficient surface passivation after galvanizing, and contamination by chloride-bearing substances — likely from external environmental sources or technical water. The research involved experimental thickness measurements of the zinc coating on both flat sheets and finished profiles using non-destructive magnetic methods, followed by statistical evaluation applying Cochran's and Fisher's criteria for reproducibility and adequacy. Additionally, chemical analyses were conducted to identify surface and sub-coating contamination by chlorides ( $Cl^-$ ), sulphates ( $SO_4^{2-}$ ), hexavalent chromium ( $Cr(VI)$ ), and organic residues from emulsions. The results confirmed that although the average coating thickness generally complies with the Z140 standard (DSTU EN 10346:2014), localized inconsistencies and technological lapses can lead to the emergence of "white rust" before installation. The findings emphasize the importance of improving not only galvanizing and roll-forming operations but also storage and transport conditions. Recommendations are provided to optimize industrial practices and enhance the durability of zinc-coated steel profiles under real-world conditions.

**Keywords:** galvanized steel, cold-formed profile, cold rolling, hot-dip galvanizing, passivation, chlorides, corrosion, roll-forming technology, chemical analysis.

**Кухар Володимир Валентинович** – д-р техн. наук, професор, проректор з науково-дослідної роботи, МІП  
**Kukhar Volodymyr** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-rector for R&D Work, MIP  
E-mail: [kvv.mariupol@gmail.com](mailto:kvv.mariupol@gmail.com)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4863-7233>

**Курпе Олександр Геннадійович** – д-р техн. наук, керівник інженерно-технологічної групи, МСС  
**Kurpe Oleksandr** – Doctor of Technical Sciences, Head of the Engineering and Technology Group, MSS  
E-mail: [aleksandr.kurpe@gmail.com](mailto:aleksandr.kurpe@gmail.com)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2039-7239>

**Бутенко Елеонора Олегівна** – канд. техн. наук, доцент, ПДТУ  
**Butenko Eleonora** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, PSTU  
E-mail: [butenko\\_e\\_o@pstu.edu](mailto:butenko_e_o@pstu.edu)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6296-2075>

**Циміданов Денис Владиславович** – директор, ПП «ДАНВІС»  
**Tsymidanov Denys** – Director, PE "DANVIS"  
E-mail: [danvis@danvis.ua](mailto:danvis@danvis.ua)

**Малій Христина Василівна** – канд. техн. наук, доцент, МІП  
**Malii Khrystyna** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, MIP  
E-mail: [kristina.v.goncharuk@gmail.com](mailto:kristina.v.goncharuk@gmail.com)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9046-426>

ТОВ «Технічний університет «Метінвест Політехніка» (МІП), м. Запоріжжя  
Technical University "Metinvest Polytechnic" LLC (MIP), Zaporizhzhia

ТОВ «Метінвест січсталь» (МСС), м. Дніпро  
"Metinvest Sichsteel" LLC (MSS), Dnipro

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро  
Pryazovskiy State Technical University (PSTU), Dnipro

Приватне Підприємство «ДАНВІС» (ПП «ДАНВІС»), Київ  
Private Enterprise "DANVIS" (PE "DANVIS"), Kyiv