

Моделювання оцінки фізичного зносу цинкового покриття просторових сталевих рамних дорожніх конструкцій для інформаційних систем безпеки на дорогах

Сергій Білик¹, Артем Білик², Євген Цюпин³, Олександр Глітін⁴

^{1,2,3,4,5}Київський національний університет будівництва і архітектури,

31, просп. Повітрофлотський, Київ, Україна, 03037

¹artist@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0001-8783-5892>

²artem.bilyk@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-9219-920X>

³standartbc@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-9428-6166>

⁴glitin@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0003-1697-6473>

DOI: 10.32347/2522-4182.8.2021.25-31

Анотація. В статті розроблено удосконалену фізико-математичну модель зносу цинкового покриття сталевих дорожніх конструкцій в умовах експлуатації міста на відкритому повітрі в умовах міста. Дослідження базуються на натурних експериментальних даних визначення зносу цинкового покриття натурних металевих просторових конструкцій рамних дорожніх конструкцій для інформаційних систем безпеки на дорогах після 10 років експлуатації в умовах м. Києва. Рамна конструкція складається з наскрізних металевих колон і ригеля. Ригель є просторовий блок двох сталевих ферм. Блок ферм збирається з уніфікованих просторових секцій, об'єднаних вертикальними і горизонтальними в'язями, і які з'єднані фланцевими вузлами спеціальної конструкції. Всі елементи конструкції виготовлені з прокатних труб. За результатами досліджень запропоновано підхід для визначення фізичного зносу цинкового покриття просторової конструктивної системи. За фактом особливості розташування елементів в рамній конструкції та відповідно різними умовами експлуатації запропоновано оцінку корозійного зносу цинкового покриття розділяти на групи: колони, ригель рами з блоку ферм, фланцеві вузли.

Фізико-математичну модель побудовано на робочій гіпотезі нерівномірного зносу цинкового покриття у часі й для різних конструктивних елементів. Встановлено, що для кожної групи конструктивних елементів в залежності від газового середовища та впливу атмосферних опадів, розташування і швидкості вітру та зміни температури, зменшення цинкового покрит-



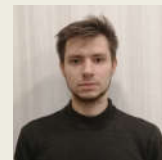
Сергій Білик

завідувач кафедри, професор кафедри металевих і дерев'яних конструкцій
д.т.н., професор.



Артем Білик

доцент кафедри металевих та дерев'яних конструкцій
к.т.н., доцент.



Євген Цюпин

асистент кафедри металевих та дерев'яних конструкцій



Олександр Глітін

доцент кафедри металевих та дерев'яних конструкцій
к.т.н., доцент

тя відбувається індивідуально. Отримані експериментальні дані за середніми показниками використані для визначення параметричних коефіцієнтів фізико-математичної моделі. Результати досліджень допомогли встановити умови експлуатації цинкового покриття і класифікувати категорію агресивності середовища для кожної групи конструктивних елементів.

Проведені дослідження дозволяють прогнозувати знос цинкового покриття у часі у наступний період експлуатації.

Методика універсальна і може бути розповсюджена на інші типи металевих оцинкованих конструкцій.

Ключові слова. Знос цинкового покриття; металеві покриття; сталеві ферми, наскрізні колони; дорожні конструкції для інформаційних систем безпеки на дорогах.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Рівень розвитку промисловості кожної країни визначає рівень використання металевих конструкцій. Але широке використання металевих конструкцій для будівництва мостів, морських бурових платформ, каркасів промислових будівель, а також для каркасів хмарочосів та інших конструкцій викликає необхідність захисту цих конструкцій від корозії. За різними оцінками збільшення загальних витрат на захист від корозії досягає мільярдів доларів, але й втрати від корозії теж сягають значного рівня. Але самим небезпечним впливом від корозії є руйнування конструкцій. Підсумовуючи всі витрати на захист сталі від корозійних впливів, попередження корозійного руйнування є важливою задачею. Тому втрати металу від корозії слід прирівняти до відповідного обсягу плавлення сталі і впливу на екологію. За різними оцінками 3/4...5/6 витрат сталі на металоконструкції повертається на металургійні комбінати через переплавку металобрухту. Таким чином, близько 10%...15% виробленого металу після закінчення життєвого циклу становить безповоротні втрати.

Одним з економічних видів захисту від корозії є оцинкування поверхні металевих конструкцій.

Проведені дослідження дозволяють визначити закономірності розподілення зносу антикорозійного цинкового покриття для різних груп сталевих елементів дорожніх конструкцій в умовах експлуатації міста на основі натурних експериментальних досліджень. Створення удосконаленої фізико-математичної моделі фізичного зносу цинкового покриття металевих конструкцій дозволяє у часі прогнозувати життєвий цикл антикорозійного покриття.

АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Складний напружено-деформований стан конструкцій висуває необхідність враховувати вплив корозійного зносу окремо на певні групи елементів в одній конструктивній системі [1,2,3,4]. Це стосується і легких ефективних конструктивних металевих систем, захист яких від корозійного впливу також важливий в силу тонкостінності профілів [5,6,7]. Принциповими головними технологічними підходами щодо підвищення опору корозії конструктивних систем розділяють на такі групи: лакофарбові покриття, гаряче гальванічне оцинкування поверхні металевих конструкцій, холодне оцинкування сумішами, захист полімерними плівками, використання корозійностійких сталей. Аналіз впливу корозії на металеві конструкції детально приведений зокрема в роботах [1,2, 4].

В міжнародних стандартах ISO 9223 «Корозія металів і сплавів. Корозійна агресивність атмосфери. Класифікація, визначення, оцінка» встановлені категорії агресивності атмосфери: C1 – дуже слабка (низька); C2 – слабка (низька); C3 – середня, помірна; C4 – висока (сильний вплив); C5 – дуже висока (дуже сильний вплив); CX – екстремальна висока. Така класифікація категорій корозії розрахована на оцінку рівномірної корозії, а точкова корозія потребує окремого вивчення і аналізу впливу. Кожній вказаній корозійній категорії відповідає швидкість корозії цинкового покриття або сталі на рік: r_{cor} [г/(м²рік)] втрат за товщиною покриття або шару металу – r_{cor} [мкм/(рік)]. Діапазон втрат антикорозійного покриття, що відноситься до тієї або іншої категорії достатньо широкий, з іншого боку, стандарт не регламентує відношення до розділення конструкцій по групам конструктивних елементів всієї системи. Існують відомі емпіричні формули для визначення зносу цинкового покриття. В цих формулах пошкодження цинкового покриття залежить від середньої температури повітря, відносної середньої вологості повітря, осадження SO₂ і Cl⁻ [1,2,3,4].

Необхідність вдосконалення розрахункових положень прогнозування корозійного зносу пов'язана, як з оптимальним вибором конструктивних рішень сталевих конструкцій, так і з розвитком теорії вибору найкращих конструктивних рішень з позиції життєвого циклу конструкцій [8,9,10,11].

ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

Створена фізико-математична модель зносу оцинкованого покриття на основі експериментальних даних при технічному обстеженні та моніторингу конструкцій



Рис.1 Сталева оцинкована рамна конструкція для автоматичних систем управління дорожнім рухом.
Fig.1 Galvanized steel frame construction for automatic traffic control systems.

Споруда для дорожнього руху має прогін 34 м і позначку низу ригеля +6.500. Прогонова споруда складається з просторової решітчастої системи (просторовий блок металевих ферм) з габаритами поперечного перерізу в осях 2х1,3 м та складається і монтується з п'яти уніфікованих секцій прольотами 5 і 8 м. За проектним рішенням елементи металевих конструкцій мають антикорозійне покриття, отримане гарячим оцинкуванням в гальванічних ваннах.

Виконано вимір товщини оцинкування труб та листових деталей металевих конструкцій арки. Товщину труб виміряно за допомогою ультразвукового товщиноміру покриттів «NOVOTEST ТП-1», який має діапазон вимірювання 0-300 мкм, прилад калібрований, точність вимірювання $\pm(0,03h+0,001)$ мм, умови експлуатації: $\pm 0 \sim +45^\circ\text{C}$. Товщину труб виміряно за допомо-

(рис.1). Досліджена натурна металева просторова конструкція рамних дорожніх конструкцій для інформаційних систем безпеки на дорогах після 10 років експлуатації в умовах м. Києві. Рамна конструкція складається з наскрізних двогілкових колон і ригеля – просторовий блок двох ферм. Блок ферм збирається з уніфікованих просторових секцій, об'єднаних вертикальними і горизонтальними в'язями, і які з'єднані між собою фланцями спеціальної конструкції [8]. Всі елементи конструкції виготовлені з прокатних труб

гою ультразвукового товщиноміру «Walcom tm-8812», нижня границя розміру сталевих труб: $\varnothing 15 \times 2.0$ мм, $\varnothing 20 \times 3.0$ мм, прилад калібрований, точність вимірювання $\pm 0,5\% + 0,1$ мм, умови експлуатації: $-10^\circ\text{C} \sim +60^\circ\text{C}$.

В результаті досліджень встановлено, що всі елементи конструкцій слід розбити на групи в залежності від швидкості зносу цинкового покриття на рік: ригелі рам, фланцеві вузли, колони.

Відомо, що початкове зменшення товщини оцинкування для всіх категорій клімату становить 4-5 мкм на рік, а потім зменшується і стабілізується. Прийнята експоненціальна залежність між втратами цинком (a_{corrC}) та періодом експлуатації (T_{exp}) для певної групи елементів конструктивної системи або контрольної точки, в залежно-

сті від параметра швидкості втрати цинку – зменшення товщини цинкового покриття (α_k) і проектного терміну експлуатації (T_0) та проектної товщини цинкового покриття (t_{corr0}).

$$a_{corrC} = t_{corr0} \left(1 - e^{-\alpha_k T_{exp}/T_0} \right) \quad (1)$$

В залежності від терміну експлуатації (T_{exp}) і проектних вихідних значень (t_{corr0} , T_0) відкрита можливість визначення зменшення товщини цинкового покриття у часі на основі експериментальних даних моніторингу та прогнозування подальшого зме-

ншення антикорозійного покриття. Швидкість зменшення товщини цинкового покриття характеризується параметром (α_k):

$$\alpha_k = \frac{t_{corrCi} - t_{corrCi+1}}{t_{corr0}} \frac{T_0}{T_{i+1} - T_i} \quad (2)$$

Залишкова товщина цинкового покриття металоконструкцій буде:

$$t_{corrC} = t_{corrC0} - a_{corrC} \quad (3)$$

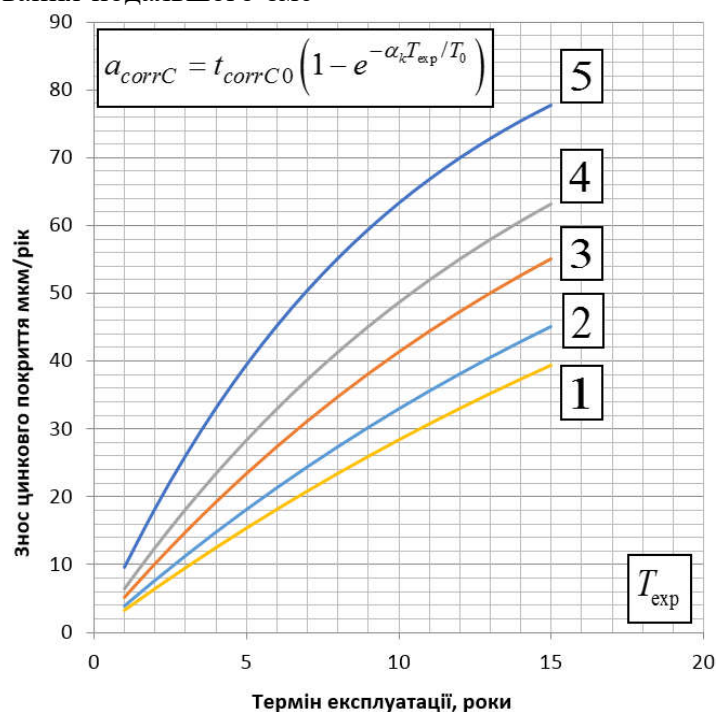


Рис.2 Знос цинкового покриття сталевих конструкцій в залежності від швидкості корозії і терміну експлуатації конструкцій: графік 1 – $\alpha_k=0,5$; графік 2 – $\alpha_k=0,6$; графік 3 – $\alpha_k=0,8$; графік 4 – $\alpha_k=1,0$; графік 5 – $\alpha_k=1,5$, α_k – параметр швидкості корозії.

Fig.2 The thickness of the zinc coating of steel structures depending on the corrosion rate and service life of structures: graph 1 – $\alpha_k=0,5$; graph 2 – $\alpha_k=0,6$; graph 3 – $\alpha_k=0,8$; graph 4 – $\alpha_k=1,0$; graph 5 – $\alpha_k=1,5$, α_k – corrosion rate parameter.

Проведені числові дослідження функцій (1,2) при різних параметрах швидкості зносу цинкового покриття (рис.1,рис.2).

Отримані монограми дозволяють для кожного типу конструкції побудувати такі номограми зміни товщини цинкового покриття і далі, на основі функцій (1,2,3) прогнозувати термін експлуатації кожної групи елементів конструктивної системи до на-

ступного періоду ремонтних робіт.

За інструментальними дослідженнями встановлено, що категорія агресивності середовища експлуатації сталевих блоків ферм покриття слід віднести до С3 – помірна, середня, але по периметру трубчастих елементів ферм є зони сильного впливу (для верхнього поясу ферм та елементів решітки й в'язів).

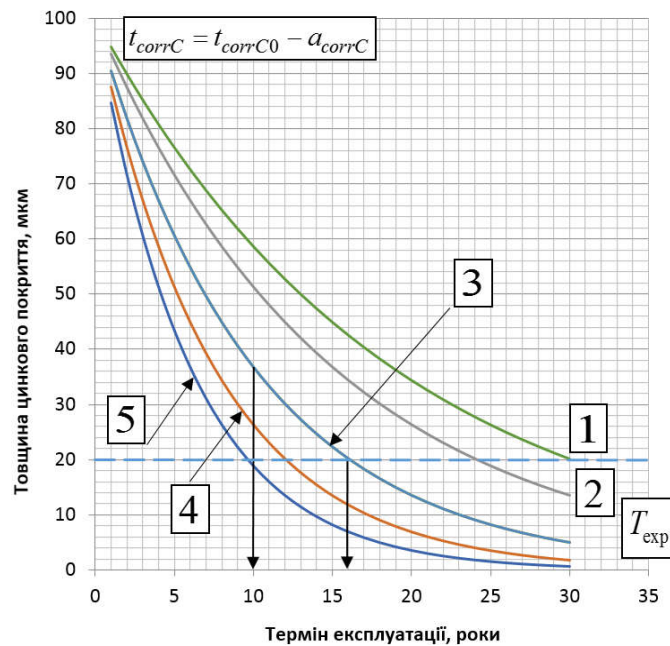


Рис.3 Товщина цинкового покриття сталевих конструкцій в залежності від швидкості корозії і терміну експлуатації конструкцій: графік 1 – $\alpha_k=0,8$; графік 2 – $\alpha_k=1,0$; графік 3 – $\alpha_k=1,5$; графік 4 – $\alpha_k=2,0$; графік 5 – $\alpha_k=2,5$, α_k – параметр швидкості корозії.

Fig.3 The thickness of the zinc coating of steel structures depending on the corrosion rate and service life of structures: graph 1 – $\alpha_k=0,8$; graph 2 – $\alpha_k=1,0$; graph 3 – $\alpha_k=1,5$; graph 4 – $\alpha_k=2,0$; graph 5 – $\alpha_k=2,5$, α_k – corrosion rate parameter.

Категорія агресивності середовища експлуатації оцинкованих сталевих колон за середньою швидкістю зменшення оцинкованого покриття слід віднести до категорій С2, С3 – середні.

ВИСНОВКИ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Розроблений теоретичний підхід для оцінки фізичного зносу оцинкованого покриття при довготривалій експлуатації металевих конструкцій за певного рівня агресивності середовища може бути застосований для різних конструкцій. Параметр швидкості втрати цинкового покриття, встановлений на основі експериментальних даних моніторингу конструкцій, дозволяє інтегрально визначити за певний період вплив агресивності газового середовища, змінність температури, вплив змінності швидкості вітру за час експлуатації. На підставі щорічного моніторингу корозійного зносу оцинкованого покриття, в певних фіксованих за розташуванням точках конструкції, можна спрогнозувати життєвий цикл експлуатації антикорозійного покриття і тер-

мін до капітального ремонту для різних груп конструктивних елементів. Методика може бути застосована і для інших несучих конструкцій, які експлуатуються в таких умовах і мають антикорозійне цинкове покриття.

Встановлені умови експлуатації розроблено удосконалену фізико-математичну модель зменшення цинкового покриття металоконструкцій при експлуатації в певних атмосферних умовах, а також розроблено методологічний підхід визначення зносу цинкового покриття сталевих дорожніх конструкцій в умовах експлуатації міста на відкритому повітрі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Макаренко В.Д., Білик С.І., Джон Ньюхук, Чеботар І.М., Ковалеко М.А., Винников Ю.Л., Харченко М.О., Максимов С.Ю., Кусков Ю.М., Макаренко Ю.В. «Сталеві резервуари. Основи корозійно-механічної стійкості». Монографія. Ніжин: НДУ ім. М. Гоголя. - 2020. - 523 с.
2. Білик С.І., Шимановський О.В., Нілов О.О., Володимирський В.О. Металеві

конструкції: Том 2. Конструкції металевих каркасів промислових будівель: Підручник для вищих навчальних закладів. /Білик С.І., Шимановський О.В., Нілов О.О., Володимирський В.О. /Кам'янець–Подільський: ТОВ «Друкарня «Рута» - 2021.-448 с. ISBN978-617-7887-94-1.

3. Нілов О.О., Пермяков В.О., Шимановський О.В., Білик С.І., Лаврінченко Л.І., Белов І.Д., Володимирський В.О.. Металеві конструкції. Київ: Видавництво «Сталь», 2010 - 869 с.
4. Макаренко В.Д., Білик С.І., Калужний А.П. і ін. Морські бурові платформи. Третій том: Мікробіологічна корозія. Розрахунок несучої здатності трубних конструкцій. / Київ: Редакційно-видавничий відділ НУБіП України. - 2020. – 360 с.
5. Bilyk S.I., Bilyk A.S., Nilova T.O., Shpynda V.Z., Tsyupyn E.I. Buckling of the steel frames with the I-shaped cross-section columns of variable web height // *Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles* – Kyiv: KNUBA, 2018. – Issue 100. – P. 140-154. <http://library.knuba.edu.ua/books/zbirniki/12/201604.pdf>
6. Bilyk Sergiy, Tonkacheiev Vitaliy. Determining sloped-load limits inside von Mises truss with elastic support. *Materiali in tehnologije., Ljubljana, Slovenija* 52 (2018), 105-109, doi:10.17222/mit.2016.083.
7. Bilyk S.I., Lavrinenko L.I., Nilov O.O., Nilova T.O., Semchuk I.Y.. Limit state theoretical and experimental investigation of corrugated sine-web under patchloading. *Onip materialiv i teorija snopyd/Strength of Materials and Theory of Structures*. 2020. № 105.- p.p.152-164.
8. Білик С., Білик А., Цюпин Є., Нужний В., Ключниченко Т. Удосконалення методики розрахунку зварних швів фланцевих вузлових з'єднань із врізаними ребрами жорсткості просторових сталевих ферм з труб / Будівельні конструкції. Теорія і практика. Вип.6 (2020) С.12 – 21. doi.org/10.32347/2522-4182.6.2020.57-65.
9. Daurov M.K., Bilyk A.S. Providing of the vitality of steel frames of high-rise buildings under action of fire // *Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles* – Kyiv: KNUBA, 2019. – Issue 102. – P. 62-68 <http://repository.knuba.edu.ua/bitstream/handle/1987654321/4701/07-102.pdf>

10.Білик С.І. Методика визначення оптимальної висоти сталевої двотаврової балки зі змінним перерізом стінки при розвитку обмежених пластичних деформацій. *Зб. наук. праць Українського інституту сталевих конструкцій ім. В.М. Шимановського. К., Сталь, 2012. Вип.9. С.28-33*

- 11.Білик С.І., Айед Альтайе Н., Лаврінченко Л.І. Конструктивні коефіцієнти та раціональна висота сталевої коробчастої балки постійного перерізу. *Будівельне виробництво: Відомчий науково-технічний збірник (технічні науки). К., ДП НДІБВ. 2017. № 62/1. С.33 – 38*

REFERENCES

1. Makarenko V.D., Bilyk S.I., John Newhook, Chebotar I.M., Kovaleko M.A., Vinnikov Yu.L., Kharchenko M.O., Maksimov S.Yu., Kuskov Yu. M., Makarenko Yu.V. 2020. "Steel tanks. Fundamentals of corrosion and mechanical resistance ". *Monograph. Nizhyn: NDU named after M. Gogol. - 2020. - 523 p. (in Ukrainian)*
2. Bilyk S.I., Shymanovskyi O.V, Nilov O.O., Lavrinenko L.I., Volodymyrskyi V.O. 2021. Metalevi konstruktсии:Tom 2/ Конструкції металевих каркасів промислових будівель: Підручник / Кам. –Поділ: «Printing house «Ruta» - 2021.-448 с. ISBN978-617-7887-94-1. (in Ukrainian)
3. Nilov O.O., Permiakov V.O., Shymanov-skyi O.V, Bilyk S.I., Lavrinenko L.I., Bielov I.D., Volodymyrskyi V.O. 2010. Metalevi konstruktсии: Zahalnyi kurs: Pidruchnyk [Metal constructions. General course. Textbook]. K, Stal, 2010. 869 p. (in Ukrainian)
4. Makarenko V.D., Bilyk S.I., Kalyuzhny A.P. Offshore drilling rigs. Third volume: Microbiological corrosion. Calculation of bearing capacity of pipe structures. // Kyiv: Editorial and Publishing Department of NUBiN of Ukraine. -2020.-360p. (in Ukrainian)
5. Bilyk S.I., BilykA.S., Nilova T.O., Shpynda V.Z., Tsyupyn E.I. 2018. Buckling of the steel frames with the I-shaped cross-section columns of variable web height // *Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles* – Kyiv: KNUBA, 2018. – Issue 100. – P. 140-154. (in Ukrainian) /<http://library.knuba.edu.ua/books/zbirniki/12/201604.pdf>

6. **Bilyk Sergiy, Tonkacheiev Vitaliy.** Determining sloped-load limits inside von Mises truss with elastic support. *Materiali in tehnologije., Ljubljana, Slovenija* 52 (2018), 105-109, doi:10.17222/mit.2016.083
7. **Bilyk S.I., Lavrinenko L.I., Nilov O.O., Nilova T.O., Semchuk I.Y..** 2020. Limit state theoretical and experimental investigation of corrugated sine-web under patchloading. // *Onip materialiv i teoriya snopyd /Strength of Materials and Theory of Structures.* 2020. № 105.- p.p.152-164. (in Ukrainian)
8. **Bilyk S., Bilyk A., Nujnyy V., Tsyupyn E., Kluchnichenko T.** 2020. Improvement of the method of calculation of welds of flange joints with stiffeners of steel trusses with chs elements // *Budivelni konstruksii. Teoriia i praktyka : zb. nauk. prats - Kyiv : KNUBA, 2020. - Vyp. 7. - S. 57-65.* doi.org/10.32347/2522-4182.6.2020.57-65. (in Ukrainian)
9. **Daurov M.K., Bilyk A.S.** 2019. Providing of the vitality of steel frames of high-rise buildings under action of fire // *Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles – Kyiv: KNUBA, 2019. – Issue 102. – P. 62-68.* (in Ukrainian) <http://repository.knuba.edu.ua/bitstream/handle/1987654321/4701/07-102.pdf>
10. **Bilyk S.I.** 2012. Metodyka vyznachennia optymalnoi vysoty ctalevoi dvotavrovoi balky zi zminnym pererizom stinky pry rozvytku obmezhenykh plastychnykh deformatsii. [Method for determining the optimal height of a steel I-beam with a variable cross-section of the wall in the development of limited plastic deformations] *Zb. nauk. prats Ukrainskoho instytutu stalevykh konstruksii im. V.M. Shymanovskoho. K., Stal, 2012. Vyp.9. – Pp.28 – 33.* (in Ukrainian)
11. **Bilyk S.I., Aied Altaie N., Lavrinenko L.I.** 2017. Konstruktyvni koefitsiienty ta ratsionalna vysota stalevoi korobchastoi balky postiinoho pererizu. [Structural coefficients and rational height of a steel box- girder with constant section] *Budivelne vyrobnytstvo: Vidomchyi naukovy-tekhnichniy zbirnyk (tekhnichni nauky). K., DP NDIBV. 2017. № 62/1. Pp.33 – 38.* (in Ukrainian)

Modeling of physical wear assessment of zinc coating of space steel frame road structures for road safety information systems

*Serhiy Bilyk, Artem Bilyk,
Eugen Tsyupyn, Oleksandr Glitin*

Summary. The article developed an improved physical and mathematical model of the corrosive wear of zinc coating of steel structures in a city. The research is based on full-scale experimental data for determining the wear of a zinc coating of full-scale metal spatial structures of frame road structures for informational safety systems on roads after 10 years of operation in the conditions of Kyiv. The frame structure consists of metal columns and a steel crossbar frame. The crossbar frame is a spatial block of two steel trusses. The block of trusses is assembled from unified spatial sections united by vertical and horizontal ties, and which are connected by flange nodes of a special design. All structural elements are made of rolled tubes. Based on the research results, an approach to assessing the physical wear of the zinc coating of the spatial structural system is proposed.

1. According to the peculiarities of the arrangement of elements in frame structures, and, accordingly, to different conditions and operations, an approach is proposed to assess the corrosive wear of a zinc coating for various groups of elements: columns, spatial block of two steel trusses, flange nodes.

2. The physical and mathematical model is based on the working hypothesis of uneven wear of the zinc coating over time. It was found that for each group of structural elements, the conditions of the gaseous environment, the effects of atmospheric precipitation, wind speed, temperature changes individually affect the reduction of the zinc coating. The obtained experimental data were used to determine the parameter of the rate of decrease in the zinc coating of the physical and mathematical model. The results of the research and the development of the methodology helped to establish the operating conditions of the zinc coating according to the criterion of the rate of wear of the zinc coating, to classify the category of aggressiveness of the environment for each group of structural elements. Also, studies allow predicting the service life by reducing the thickness of the zinc coating, as well as the wear of the zinc coating in time in the subsequent period of operation.

The methodology is universal and can be extended to other types of galvanized metal structures.

Keywords. Zinc wear; metal structures; frame; steel trusses; e columns; road structures for road safety information systems.

