

## ТЕХНІЧНИЙ СТАН МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ ГОЛОВНИХ БАЛОК МОСТА ім. Є.О. ПАТОНА ЧЕРЕЗ р. ДНІПРО У м. КИЄВІ

**К**иївський міський міст ім. Є.О. Патона через р. Дніпро є першим у світі суцільнозварним автодорожнім мостом, який увійшов до аналіз світового мостобудування. Наказом Комітету охорони і реставрації пам'яток № 10 від 16.05.1994 р. міст ім. Є. О. Патона був визнаний сучасною пам'яткою архітектури. У 1995 році міст отримав визнання Американської асоціації зварювання як видатна зварна споруда ХХ століття.

Будівництво моста було розпочато ще до Другої світової війни. Прогонові споруди на той час були запроєктовані у вигляді наскрізних розрізних ферм. Передбачалося, що з'єднання елементів конструкції, які виготовляються на заводі, будуть зварними, а на монтажному майданчику – клепами. У зв'язку з початком війни будівництво моста було припинене та відновилося лише після її закінчення. На той час Є.О. Патон змінив концепцію побудови моста і запропонував виготовити його суцільнозварним. Такий підхід викликав необхідність у розробленні нових конструктивних рішень прогонових будов та сталі для їх виготовлення.

Окремо треба відзначити, що для виготовлення металевих конструкцій моста було запропоновано використати передові на той час технології механізованого зварювання під шаром флюсу, які добре себе зарекомендували під час Другої світової війни, зокрема, на підприємствах, що виробляли корпуси броньових машин. Саме ці технології зварювання були взяті за основу та застосовані під час виготовлення металевих конструкцій моста ім. Є.О. Патона в заводських умовах, а також під час їх монтажу на будівельному майданчику [1, 2, 3]. Це дало змогу отримати суттєві переваги перед існуючими на той час підходами до будівництва сталевих мостів, а саме:

- перенести складання великоблокових елементів із використанням автоматичного та напівавтоматичного зварювання на завод, який виготовляв конструкції, що значно спростило й скоротило монтажні операції (рис. 1);
- застосувати автоматичне та напівавтоматичне зварювання під шаром флюсу під час складання двотаврових балок в умовах монтажу (рис. 2);



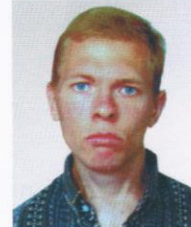
**В.Д. Позняков**  
завідувач відділу  
Інституту електрозварювання  
ім. Є.О. Патона НАН України,  
чл.-кор. НАН України,  
д.т.н.



**В.П. Дядін**  
старший науковий співробітник  
Інституту електрозварювання  
ім. Є.О. Патона НАН України,  
к.т.н.



**Є.О. Давидов**  
старший науковий співробітник  
Інституту електрозварювання  
ім. Є.О. Патона НАН України,  
к.т.н.



**Р.І. Дмитрієнко**  
провідний інженер-технолог  
Інституту електрозварювання  
ім. Є.О. Патона НАН України

- звести номенклатуру монтажних з'єднань до однотипних стиків суцільних ферм двотаврового перетину (рис. 3), що дозволило значно спростити складання й скоротити час на виконання зварювальних робіт, які раніше виконувалися переважно з використанням ручного дугового зварювання покритими електродами.

Комплекс цих рішень забезпечив необхідну надійність та якість вузлових зварних з'єднань мостових споруд, що підтверджено часом.

Міст складається з 24-х прогонових споруд та має загальну довжину 1542,2 м. Правобережна частина моста складається з десяти прогонів, які перекриті двома суцільнозварними 5-прогоновими нерозрізними спорудами (5×58) + (5×58) м. Середня частина моста, яка розташована над судноплавною ділянкою річки, має шість про-

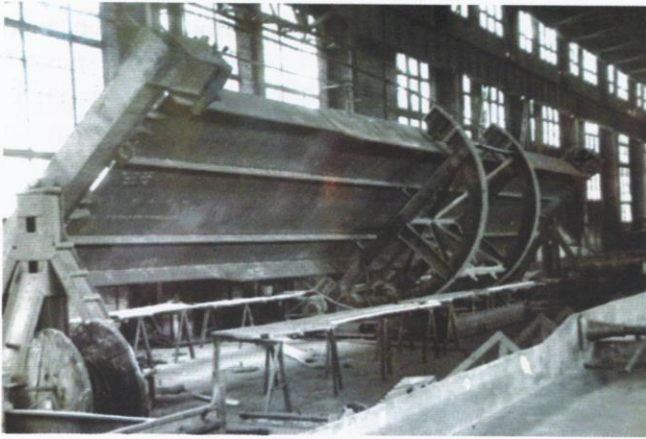


Рис. 1. Зварювання поздовжніх ребер жорсткості та поясних швів ферми [2]

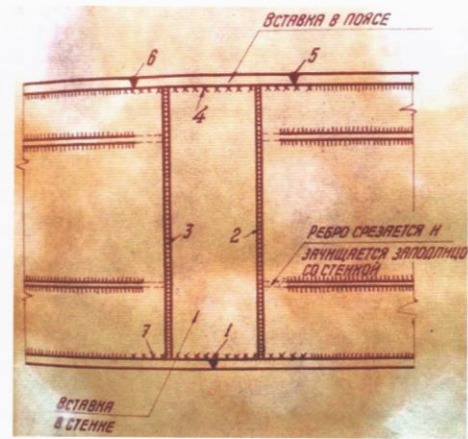


Рис. 3. Порядок монтажного складання та зварювання типових ферм моста [2]



Рис. 2. Приклад застосування автоматичного зварювання під шаром флюсу при стикуванні ферм головних балок [2]



Рис. 4. Поперечний переріз ферми головних поздовжніх балок 4- та 5-прогонових споруд моста

гонів, які перекриті нерозрізним суцільнозварним спорудами  $58 + 4 \times 87 + 58$  м. Лівобережна частина моста має 8 прогонів по 58 м, яка перекрита двома 4-прогоновими суцільнозварними нерозрізними спорудами  $(4 \times 58) + (4 \times 58)$  м.

У поперечному перерізі кожна споруда має чотири головні поздовжні балки двотаврового перетину, що складаються з вертикальної стінки, заввишки 3600 мм і завтовшки 14 мм і поясів різної товщини, яка змінюється від 30 мм до

80 мм, при ширині до 1000 мм (рис. 4). Стійкість стінки балки додатково забезпечується вертикальними ребрами, встановленими з кроком 7,25 м. У 6-прогонових спорудах висота стінки над проміжними опорами за рахунок пристрою вутів збільшена до 6200 мм.

Головні поздовжні балки складаються з ферм, які зварені між собою встик із використанням автоматичного зварювання під флюсом під час монтажу металевих конструкцій. Кількість

ферм у кожній з 4-прогонових головних поздовжніх балок становить 9 шт, в 5-прогонових головних балках – 11 шт, а в 6-прогонових головних балках – 21 шт. Ферми виготовлені з низьковуглецевої сталі марки М16С.

Міст ім. Є.О. Патона через р. Дніпро у м. Києві було запроектовано виходячи з умов, що проектна інтенсивність руху має складати 10 тис. автомобілів на добу. В процесі тривалої експлуатації моста навантаження на його несні елементи поступово зростали, що пов'язано як із збільшенням інтенсивності руху автомобілів на добу, наразі вона зросла практично в десять разів, так і зі збільшенням ваги автомобілів. Окрім цього збільшилися постійні навантаження на міст внаслідок прокладання труб теплотраси та збільшення товщини асфальтобетонного покриття. У зв'язку з цим у 1994–1998 роках було виконано підсилення поперечних балок моста, які розташовані біля деформаційних швів, та встановлено додаткові ребра жорсткості на окремих ділянках вертикальних стінок ферм головних балок [4].

Враховуючи важливе для м. Києва значення моста ім. Є.О. Патона, він із певною періодичністю обстежується фахівцями ТОВ «Український інститут сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського». До 2018 року головна увага при обстеженні технічного стану моста приділялась дорожньому полотну, тротуарам, деформаційним швам, поперечним елементам і зв'язкам між головними балками [4]. Що стосується основних несних елементів моста – головних поздовжніх балок, то їх обстежували лише візуально без використання інструментальних та фізичних методів контролю, що не дозволяло отримати більш детальну інформацію фактичного технічного стану металевих конструкцій.

З часом металеві конструкції моста почали зазнавати втрат металу від корозії. Перша згадка про корозійні пошкодження елементів головних поздовжніх балок з'явилася в статтях [4, 5], що були опубліковані спеціалістами ТОВ «Український інститут сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського» за результатами обстеження моста, виконаному наприкінці 2018 року. Саме тоді вони звернули увагу на те, що на стінках головних балок споруди в місцях розташування деформаційних швів відбулася значна корозія металу та дійшли висновку, що міст ім. Є.О. Патона перебуває в аварійному стані та невідкладно потребує капітального ремонту з частковою заміною його конструктивних еле-

ментів. У подальшому ці питання неодноразово обговорювалися на нарадах в Київській міській державній адміністрації та КП «Київавтодор», за підсумками яких було прийняте рішення щодо реконструкції моста та необхідності проведення більш детального обстеження його конструктивних елементів. Зокрема, вперше увага була акцентована на необхідності перевірки технічного стану головних поздовжніх металевих зварних балок та на тому, що такі роботи мають бути виконані з використанням сучасних неруйнівних методів контролю. За результатами тендера, який відбувся у 2019 році, відповідальність за виконання таких робіт було покладено на ТОВ «Український інститут сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського» з залученням фахівців Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України в частині обстеження головних поздовжніх балок моста. Зазначені роботи було виконано у 2020 році.

При обстеженні технічного стану головних балок споруд моста робота виконувалася за наступними напрямками:

1. Вибірковий ультразвуковий контроль стикових заводських і монтажних зварних з'єднань балок.
2. Вибірковий ультразвуковий контроль основного металу елементів балок на наявність розшарування.
3. Вибіркова товщинометрія основних елементів головних балок.
4. Вибірковий магнітний контроль кутових і стикових зварних з'єднань.

Необхідність і достатність саме таких методів контролю було визначено за результатами попереднього обстеження головних поздовжніх балок моста, розташованих між 2-ю і 3-ю опорами, яке було виконано фахівцями Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України в липні 2019 р.

Беручи до уваги значну загальну довжину заводських та монтажних зварних з'єднань (більше 110 км), вибірковий ультразвуковий контроль стикових швів виконувався в місцях, визначених за результатами візуального огляду головних балок. Основна увага приділялась місцям, в яких при монтажі та виготовленні елементів ферм були виявлені дефекти [1, 2] в зварних з'єднаннях та проводився їх частковий ремонт. Усього було проконтрольовано 150 м зварних з'єднань, 50 % з яких склали монтажні шви, якими через вставки з'єднувалися між собою ферми (рис. 3, 5, 6).



**Рис. 5.**  
Контроль стикових  
вертикальних швів  
з'єднувальної  
вставки



**Рис. 6.** Контроль стикового шва у верхньому поясі  
з'єднувальної вставки



**Рис. 7.** Дефект, не усунений під час монтажу  
(кінці тріщини були зупинені методом свердлення),  
що не набув подальшого розвитку [2]

Результати ультразвукового контролю монтажних і заводських зварних швів прогонових споруд свідчать про те, що зварні з'єднання головних балок перебувають у задовільному

стані. Навіть ті де дефекти, що були виявлені ще на етапі будівництва моста, в процесі тривалої експлуатації розвитку не набули (рис. 7).

З використанням ультразвукового контролю вибірково було також перевірено суцільність основного металу головних балок. Необхідність проведення такого типу неруйнівного контролю пов'язана з тим, що, як свідчать результати звіту з будівництва моста, при виготовленні ферм головних поздовжніх балок у ряді випадків фіксувалися локальні місця з розшаруванням в металі горизонтальних ребер жорсткості. Якщо розшарування не доходило до зварних з'єднань, такі ділянки не ремонтувалися та в подальшому контролювалися на предмет можливого збільшення несучільностей [2]. Після 80-х років минулого сторіччя такі спостереження припинили і тому було прийняте рішення щодо їх огляду в рамках даного обстеження головних балок моста. Для оцінки ймовірного збільшення розшарування металу в місцях розташування Т-подібних та Х-подібних зварних з'єднань було вибірково проконтрольовано 7 м<sup>2</sup> металу. Контролювали ділянки основного металу різної товщини, які безпосередньо примикають до зварних з'єднань та в яких під час монтажу було виявлено розшарування. Результати такого контролю показали, що в жодній з проконтрольованих ділянок поширення розшарування на інші ділянки не виявлено. Слід зазначити, що при проектуванні горизонтальних ребер жорсткості було передбачено їх приварювання до вертикальної стінки ферми без повного проплавлення (рис. 4). Це дало змогу значно зменшити залишкові напруження у напрямку товщини металу та за рахунок цього суттєво знизити ризик розвитку даного дефекту металу.

Оскільки ультразвуковий метод контролю не дозволяє надійно проконтролювати поверхневі та приповерхневі шари зварного з'єднання, при обстеженні металевих конструкцій головних балок моста було додатково застосовано магнітний метод контролю. Такий метод контролю було обрано з урахуванням того, що він виконується відносно швидко та не потребує значних зусиль на підготовку поверхні для контролю.

Враховуючи велику кількість зварних з'єднань та обмежений доступ до місць контролю, вибір ділянок, де виконувався такий контроль, базувався на наступному.

1. Ділянки контролю вибиралися випадково.  
2. Вибір місць контролю, в більшості випадків, здійснювався в найбільш навантажених зонах (зазвичай вибиралися зварні з'єднання в нижній розтягнутій зоні).

3. З огляду на те, що монтажні зварні шви виконувалися в більш складних умовах, ніж заводські, контроль монтажних з'єднань був у більшому пріоритеті незалежно від їх розрахункового навантаження.

4. Оскільки утворення тріщин хоч і підпорядковується певним правилам, але, тим не менш, має ймовірнісний характер, контролювалися не лише значно навантажені по відношенню до інших ділянки конструкції, а й ті місця, де розрахункові навантаження є відносно невеликими.

Всього в різних місцях прогонових споруд було проконтрольовано 124 ділянки зварних з'єднань із біляшовними зонами загальною площею 40,0 м<sup>2</sup>. Такий обсяг контролю цілком достатній для виявлення системних втомних тріщин. Результати контролю вносились до робочих карт контролю, які були прив'язані до номерів ферм, із яких виготовлена повздовжня балка, та номерів опор, між якими вона знаходиться. Загалом за результатами цих досліджень було встановлено, що в процесі тривалої експлуатації тріщини втоми в зварних з'єднаннях металевих конструкцій головних балок не утворилися і конструкції перебувають в задовільному стані. Грунтуючись на даних магнітного контролю, можна також зазначити, що обстежені металоконструкції мають необхідний запас циклічної міцності та відповідають вимогам ДСТУ EN ISO 23278.

Оскільки, як зазначалося вище, метал головних балок зазнав певних втрат товщини від корозії, значна увага при їх обстеженні приділялась тому, щоб оцінити ступінь корозійного ураження елементів металевих конструкцій балок (пояс, стінка, горизонтальні і вертикальні ребра жорсткості, які посилюють накладки поясів, опорні ребра та ін.) та виявити основні чинники, які сприяли розвитку корозії. Враховуючи значну довжину головних балок, товщинометрія зазначених елементів конструкції виконувалася шляхом вибіркового, а тому нерівномірного по довжині всієї конструкції, вимірювання фактичної товщини. З метою уточнення і виявлення найбільш характерних ушкоджень елементів головних балок і супутніх їм факторів при обстеженні прогонових споруд інструментальними методами

контролю кількість вимірювань на крайніх балках (№ 1, № 4) була більш щільною, ніж на балках № 2 та № 3. Необхідність збільшення щільності вимірювань була викликана великим скупченням сміття на крайніх балках споруди та обмеженим доступом до елементів контролю зі зворотного боку конструкції.

Крім вимірювання товщини відстежувалася наявність можливого розшарування металу вузлових з'єднань, в місці приварювання горизонтальних і вертикальних ребер жорсткості до стінок балки. Місця, де були виявлені розшарування в металі та витягнуті неметалічні включення, фіксувалися на робочих картах контролю.

При вибіркового контролю товщини елементів ферм у місцях скупчення сміття було виконано 12640 вимірювань. При частковому обстеженні головних поздовжніх балок прогонових споруд було виконано 16876 вимірювань товщини. За результатами вимірювань були побудовані робочі карти контролю (168 карт-ферм). Типові приклади корозійних ушкоджень зварних вузлів головних балок моста представлено на рис. 8.

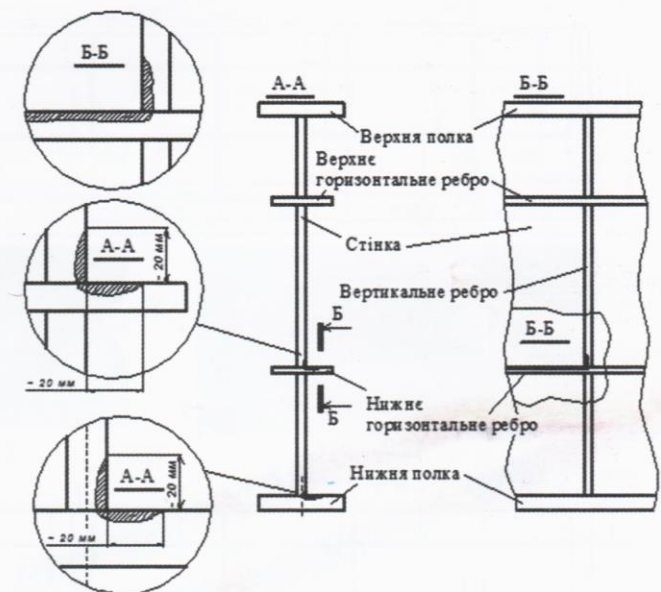



Рис. 8. Типове корозійне пошкодження зварних з'єднань елементів ферм головних балок

Найбільш типові пошкодження головних балок прогонових споруд показані у вигляді фрагментів робочих карт контролю, які представлені на рис. 9–11. Причому на картах контролю застосовано наступні умовні позначення: Ф – ферма; ділянки, на яких втрата металу від корозії знаходиться в межах від 2 мм до 4 мм – ,

а у разі більше за 4 мм – ■. Цифра зверху над кольором означає приблизну довжину відповідної зони вздовж ферми. Окремий квадрат ■ або ■ відповідає довжині приблизно 100 мм. Якщо зона відокремлюється конструктивними елементами, наприклад, вертикальними ребрами або зварними з'єднаннями листів, тоді цифра над кольором не позначена. Неметалеві включення – ●. Границі ферм позначені синім кольором, а рухома та нерухома опори відповідно –  $\odot$  22  $\triangle$  23. У квадратних дужках надані номери фотографій деяких ділянок. Місця, де не проводився вибірковий контроль, позначені пунктирним перехрестям.

Чорним кольором нанесені дефекти згідно з даними ТОВ «Український інститут сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського», які були наведені в звіті, складеному за результатами обстеження моста в 2018 році.

Загалом за результатами виконаних вимірювань товщини та проведеного аналізу було визначено, що внаслідок протікання скрізь деформаційні шви дощової води та води, що утворилася

після танення снігу (містить солі) на металеві конструкції головних балок, метал кінцевих ділянок ферм, які примикають до деформаційних швів, зазнав локальних, але місцями значних корозійних ушкоджень. Через корозію товщина металу в елементах конструкції, а саме: в нижніх поясах, нижніх горизонтальних ребрах та в нижній частині стінок головних балок, суттєво зменшилася. В окремих місцях на 40 % ... 50 %.

Найменші пошкодження від корозії спостерігаються біля деформаційних швів у фермах середніх головних балок № 2 та № 3, а більш масштабні втрати металу від корозії виявлені в фермах крайніх № 1 та № 4 головних балок. Останнє пов'язано з наявністю на нижньому горизонтальному ребрі та нижньому поясі цих балок значної кількості сміття, яке концентрує в собі вологу та не дає можливості просихати металу довгий час (рис. 12, 13). Окрім ділянок головних балок № 2 та № 3, які розташовані біля деформаційних швів, інші елементи цих балок перебувають у задовільному стані.

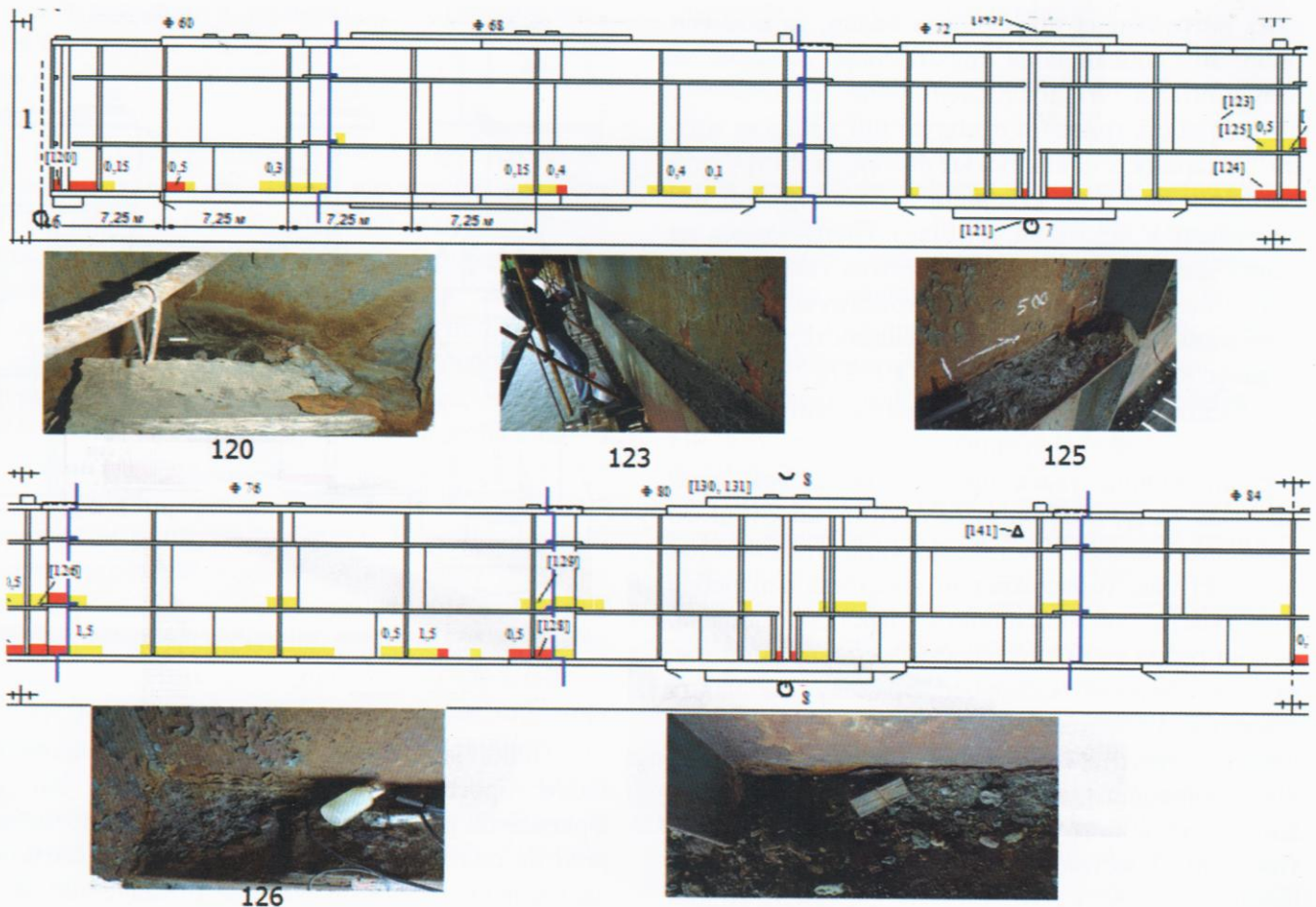


Рис. 9. Фрагмент зведених результатів контролю елементів балки № 1, розташованої між 6–9 опорами

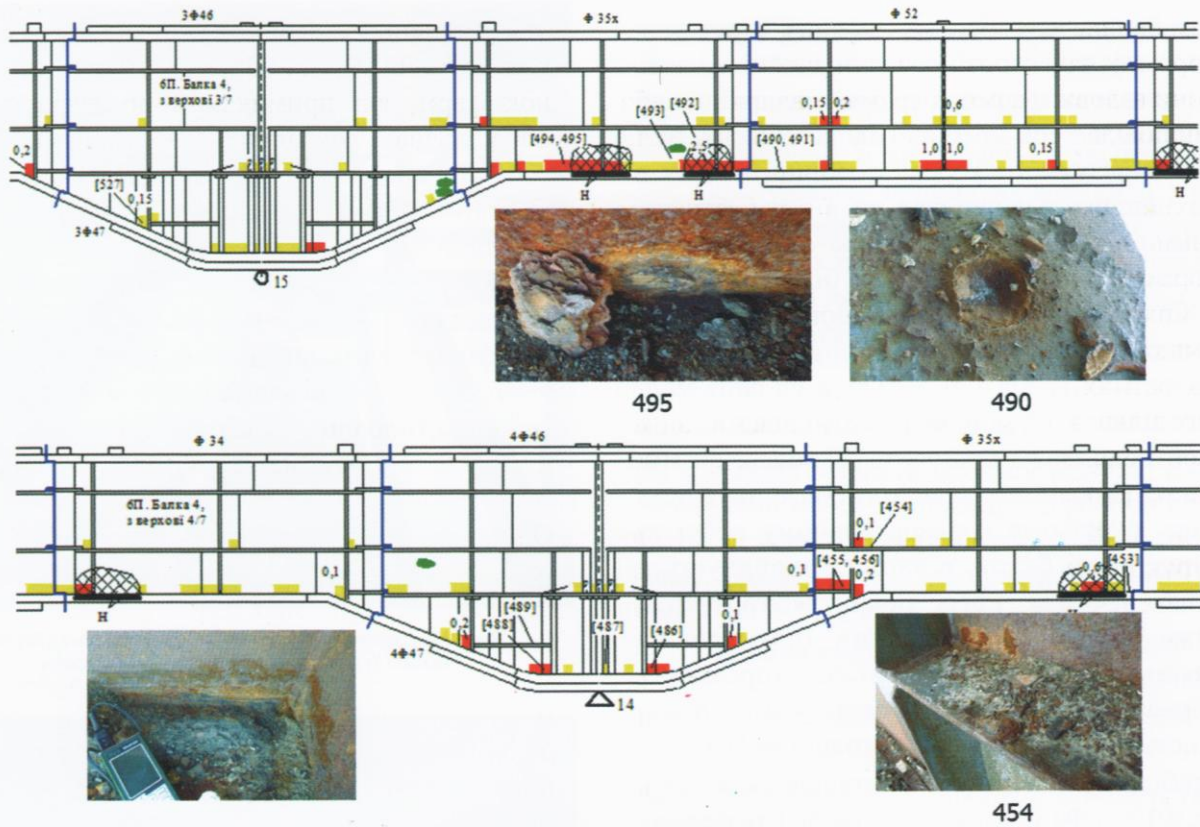


Рис. 10. Фрагмент зведених результатів контролю елементів балки №4, розташованої між 13–15 опорами

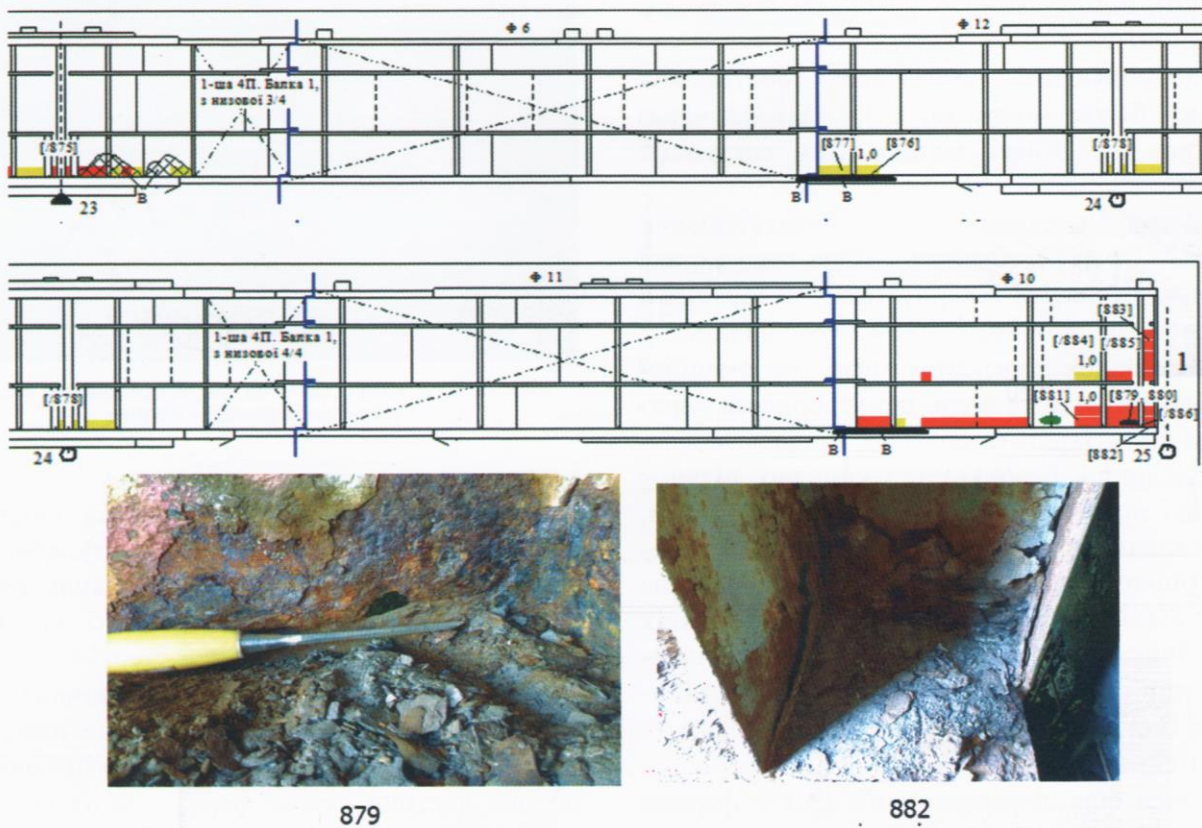


Рис. 11. Фрагмент зведених результатів контролю елементів балки № 4, розташованої між 21–25 опорами

Локальних, але місцями значних втрат товщини металу від корозії зазнали нижні полиці, нижні горизонтальні ребра та примикаючі до них частини стінок ферм крайніх головних балок № 1 та № 4. В результаті корозії товщина металу в окремих місцях зменшилася на 4 мм і більше. Найбільш пошкоджені корозією ділянки, які знаходяться по кінцях ферм та біля рухомих і нерухомих опор, а в шести прогонових балках ще і в місцях розташування вутів. Довжина цих ділянок становить від 1 м до 4 м, а ширина майже співставна з шириною навколошовної зони зварного з'єднання і становить 20 мм ... 30 мм. Причиною корозійних пошкоджень є наявність сміття на нижньому горизонтальному ребрі та нижньому поясі балок, в якому накопичується вода, що протікає крізь покриття тротуарів, головним чином через щілини біля стовпів освітлення. Максимальна глибина корозійних пошкоджень у ряді випадків сягає 5 мм – 8 мм, що становить 40 % ... 65 % від товщини стінки.

Найбільш катастрофічна ситуація склалася в фермах Ф10 та Ф15 головної балки № 1 та фермах Ф1 і Ф3 головної балки № 4. В цих фермах спостерігаються значні корозійні ураження (місцями наскрізні), а тому вони потребують невідкладного ремонту.

Підсумовуючи результати обстеження головних балок моста ім. Є.О. Патона через р. Дніпро у м. Києві, можна дійти наступних висновків:

1. Зварні з'єднання елементів ферм головних поздовжніх балок перебувають у задовільному стані. В процесі тривалої експлуатації недопустимі дефекти та тріщини втомі в них не утворилися.

2. Внаслідок протікання крізь деформаційні шви дощової води та води, що утворилася через танення снігу (містить солі) на металеві конструкції головних балок, метал кінцевих ділянок ферм, які примикають до деформаційних швів, зазнав локальних, але місцями значних корозійних ушкоджень. У результаті корозії товщина металу в елементах конструкції, а саме нижніх поясах, нижніх горизонтальних ребрах та в нижній частині стінок головних балок суттєво зменшилася. В окремих випадках на 40 % ... 50 %.

3. Найменші пошкодження від корозії спостерігаються біля деформаційних швів у фермах середніх головних балок № 2 та № 3, а більш масштабні втрати металу від корозії виявлені в фермах крайніх № 1 та № 4 головних балок.



**Рис. 12.** Скупчення сміття на крайній балці № 4 першої п'ятипрогової споруди моста



**Рис. 13.** Скупчення сміття на кінцях прогонових споруд у зоні деформаційного шва

Останнє пов'язано з наявністю на нижньому горизонтальному ребрі та нижньому поясі цих балок значної кількості сміття, яке концентрує в собі вологу та не дає можливості просихати металу довгий час.

4. Локальних, але місцями значних втрат товщини металу від корозії зазнали нижні полиці, нижні горизонтальні ребра та примикаючі до них частини стінок ферм крайніх головних балок № 1 та № 4. Аналогічні ділянки головних балок № 2 та № 3 перебувають у задовільному стані.



5. Найбільш катастрофічна ситуація склалася в фермах Ф10 та Ф15 головної балки № 1 та фермах Ф1 і Ф3 головної балки № 4. В цих фермах спостерігаються значні корозійні ураження (місцями наскрізні), а тому вони потребують невідкладного ремонту.

6. Враховуючи існуючий на даний час технічний стан головних балок моста ім. Є.О. Патона через р. Дніпро у м. Києві, за умови виконання робіт, спрямованих на відновлення їх початкової несної здатності, головні балки можуть бути вико-

ристані при реконструкції (реставрації) моста.

7. Оскільки основними причинами корозії є волога та наявність сміття на металевих конструкціях головних балок № 1 та № 4 необхідно: терміново прибрати сміття з балок; відновити під деформаційними швами лотки для стікання води; загерметизувати тротуарне покриття навколо стовпів освітлення. Якщо цього не зробити, процеси корозії будуть продовжуватись і відповідно технічний стан головних балок погіршиться.

- [1] Отчет о заводском изготовлении элементов пролетных строений Киевского городского моста на заводе им. Молотова в г. Днепропетровске. Киев: ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ. – 1953 г. – 244 с.
- [2] Отчет по теме «Монтажная сварка пролетных строений Киевского городского моста им. Е.О. Патона НАН УССР через р. Днепр». – Киев: ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ. – 1953. – 342 с.
- [3] Лобанов Л.М., Кирьян В.И. Шестьдесят лет цельносварному мосту им. Е.О. Патона // Автоматическая сварка. – 2013 – № 12. – С. 35–40.

- [4] Шимановський О.В., Котлубей Д.О., Шалінський В.В. Міст ім. Є.О. Патона – нинішній стан та перспективи // Промислове будівництво та інженерні споруди. – 2018. – № 1. – С. 2–9.
- [5] Шимановський О.В., Котлубей Д.О., Шалінський В.В. Аварійна ситуація на мосту ім. Є.О. Патона та заходи щодо її вирішення // Промислове будівництво та інженерні споруди. – 2018. – № 4. – С. 30–33.

Надійшла 02.03.2021 р.