УДК 624.076.2 **DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.160.2016.70023**

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЖИВУЧЕСТИ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ПУТЕПРОВОДА

Кандидаты техн. нак А.Н. Гибаленко, А.С. Коваленко, Т.С. Трофимчук

РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЖИВУЧОСТІ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ ШЛЯХОПРОВОДУ

Кандидати техн. наук А.Н. Гибаленко, А.С. Коваленко, Т.С. Трофимчук

DESIGN & EXPERIMENTAL DATA OF DURABILITY CHARACTERISTICS THE METAL STRUCTURES OF THE RAILWAY OVERBRIDGE

Cand. of techn. sciences O. M. Gibalenko, A. S. Kovalenko, T.S. Trofymchuk

Излагаются основные принципы обеспечения качества и надежности противокоррозионной защиты металлоконструкций по уровню коррозионной опасности. В работе показаны возможности применения стратегии DMAIC при робастном (устойчивом) проектировании противокоррозионной защиты эксплуатируемых железнодорожных путепроводов. Разработанная методика включает расчетно-экспериментальную оценку коэффициентов надежности и готовности противокоррозионной защиты. Представлены основные этапы выявления критически значимых показателей для обеспечения качества и надежности металлоконструкций и их защитных покрытий.

Ключевые слова: *металлические конструкции, процессный подход, качество, надежность, уровень коррозионной опасности, мониторинг коррозионного состояния.*

Викладаються основні принципи забезпечення якості і надійності протикорозійного захисту металоконструкцій за рівнем корозійної небезпеки. У роботі показані можливості

застосування стратегії DMAIC при робастному (стійкому) проектуванні протикорозійного захисту експлуатованих залізничних шляхопроводів. Розроблена методика містить розрахунково-експериментальну оцінку коефіцієнтів надійності та готовності протикорозійного захисту. Наведено основні етапи виявлення критично значущих показників для забезпечення якості та надійності металевих конструкцій і їх захисних покриттів.

Ключові слова: *металеві конструкції, процесний підхід, якість, надійність, рівень корозійної небезпеки, моніторинг корозійного стану.*

The paper sets out the main principles ensuring the corrosion protection of steel structures quality & reliability depending on the medium aggressiveness. It has been found out the back of design & experimental data for assessment of the corrosion damage results in difficulties in comparative analysis of the corrosion resistance & durability.

The paper shows the possibility of DMAIC strategy, the railway overbridge corrosion protection being robust. To be able to take precaution against corrosion, all the metal structures & their coatings were classified as to their liability for construction failures. The design factors of durability have been stated.

The worked out method emprises the design & experimental assessment of corrosion protection safety & operational readiness. The main stages of defining the crucial factors providing for the metal structures & the protection coatings quality & reliability have been shown.

The stated principles make it possible to substantiate the quality & reliability factors of corrosion protection at all the stages of the metal structures work.

Keywords: *steel structures, process approach, quality, reliability, level of corrosion hazard monitoring corrosion condition.*

Введение. Неудовлетворительное состояние строительных металлоконструкций по уровню коррозионной защищенности, долговечности и надежности создает угрозы проявления аварийных ситуаций для 15-40 % эксплуатируемых зданий и сооружений. Успешное управление и функционирование объектов транспортной инфраструктуры невозможно без дополнительных затрат, экономическая эффективность которых во многом определяется правильным выбором конструктивных и технологических решений противокоррозионной защиты [1, 12].

В настоящее время около 50 % металлофонда зданий и сооружений различных отраслей промышленности и сельского хозяйства эксплуатируется в условиях средне- и сильноагрессивных воздействий, что является усугубляющим фактором снижения технологической безопасности, при этом потери от коррозии составляют 10-15 % всего выработанного черного металла в стране [2].

Постановка проблемы. С позиции теории надежности важным интегральным свойством, характеризующим систему мер защиты металлоконструкций от коррозии, является живучесть. Живучесть определяет способность систем противокоррозионной защиты конструкций (СПЗК) сохранять свойства, необходимые для выполнения требуемых функций, при наличии неблагоприятных воздействий. При этом принципы проектирования по уровню коррозионной опасности включают обоснование последовательности этапов для оценки живучести строительных металлоконструкций на основе стратегии *DMAIC* (define, measure, analyze, improve, control): определения, измерения, анализа, совершенствования и контроля мер первичной и вторичной защиты от коррозии.

Надежная и безопасная эксплуатация зданий и сооружений на протяжении установленного срока эксплуатации T_{ef} определяется соблюдением требований

нормативных положений, обуславливающих выполнение объектами технологических и эксплуатационных функций на протяжении заданного промежутка времени [3].

Является актуальной необходимость совершенствования требований к средствам и методам противокоррозионной защиты конструкций, что влечет уменьшение уровней риска – возможных потерь, причинённых случайными действиями, вызывающих разрушение конструкций при выходе из режима нормальной эксплуатации путем обеспечения первичной и вторичной противокоррозионной защиты [4].

Анализ исследований и публикаций. Неудовлетворительное коррозионное состояние конструкций, сооружений и инженерных сетей требует принятия неотложных мер, направленных на усиление надзора за требованиями безопасного уровня их механической прочности при нарушении режима нормальной эксплуатации в коррозионных средах [5].

Особенности работы сооружений, изменение характеристик технологических процессов и закономерностей нагрузок, состава факторов воздействий агрессивной среды оказывают существенное влияние на показатели коррозионной стойкости и долговечности конструктивных элементов, их защитных покрытий [6, 14]. Отечественный и зарубежный опыт свидетельствует, что долговременная защита от коррозионного разрушения обеспечивается при условии согласования всеми заинтересованными сторонами состава спецификации по противокоррозионной защите в соответствии с требованиями ISO 12944:1998 «Лаки и краски – защита от коррозии стальных конструкций системами защитных покрытий» [7, 8].

Одной из основных составляющих промышленного потенциала являются конструкции мостов и транспортных сооружений, которые обеспечивают функционирование транспортной инфраструктуры [9].

Актуальной является проблема моделирования стохастических процессов накопления повреждений в элементах металлоконструкций, которая особую актуальность приобрела в последние два десятилетия из-за стремительного роста числа физически устаревших сооружений. В сложившихся условиях безаварийная эксплуатация сооружений требует научных подходов к оценке технического состояния, которые обеспечат количественные критерии уровня надежности и прогнозирования остаточного ресурса [10, 15].

Определение целей и задач исследования. Задачей работы является анализ данных результатов экспертного обследования металлоконструкций сооружений транспортной инфраструктуры в условиях агрессивных воздействий с целью разработки аналитического метода технического диагностирования коррозионного состояния (ТДКР), описания расчетных ситуаций по признакам коррозионной опасности для формирования программ обеспечения надежности (ПОН) на основании данных оценки показателя живучести СПЗК.

Структура требований по надежности и условия оценки коррозионной опасности металлоконструкций. Понятие коррозионной опасности включает определенное состояние или ситуацию (угрозу), при которых увеличивается вероятность наступления ущерба в связи с тем, что данное коррозионное состояние или отклонение от нормальной эксплуатации являются потенциальной причиной (угрозой) наступления опасности или того, что может повлиять на размер ущерба.

Управление технологической безопасностью выполняется на основе анализа рисков с учетом коэффициента обратной связи при негативных внешних воздействиях и варьировании параметров первичной и вторичной защиты для

обеспечения заданной послеремонтной несущей способности конструкций зданий и сооружений. Установленные принципы обеспечивают возможность разработки единой методологической основы для расчетно-экспериментального обоснования соответствия показателей качества и надежности СПЗК на всех стадиях жизненного цикла строительных металлоконструкций (рис. 1).

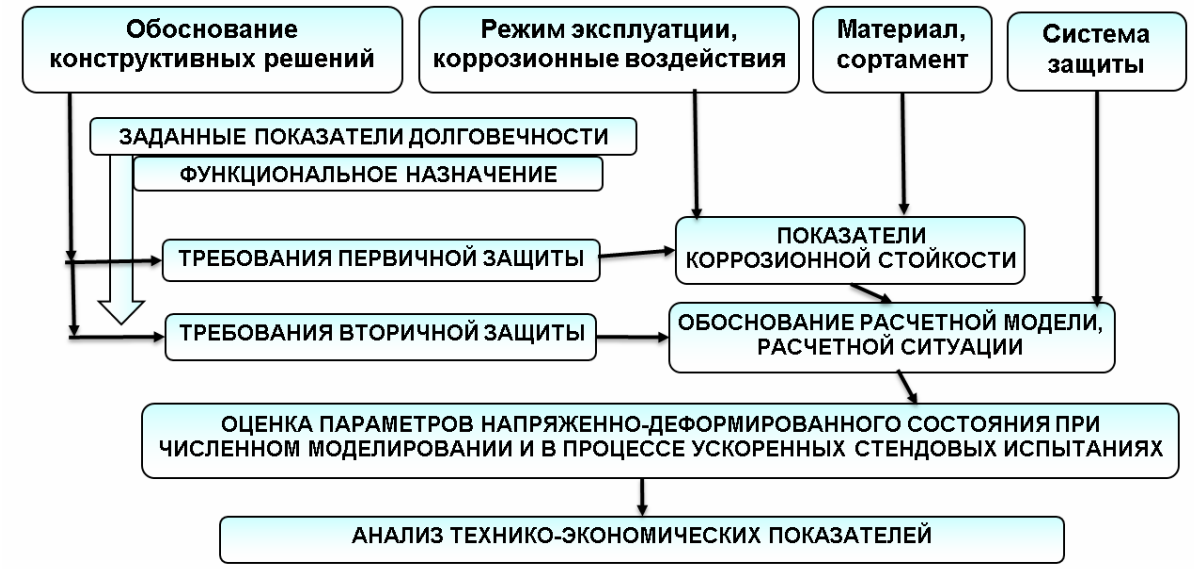

Рис. 1. Схема обоснования мер первичной и вторичной защиты стальных конструкций с гарантированными показателями долговечности

Основная часть исследования. В соответствии с разработанной методикой технического аудита коррозионного и технического состояния конструкций оборудования осуществлен комплекс работ по определению показателей долговечности для выявления остаточного ресурса по фактическому состоянию, выявления пригодности (или непригодности) к дальнейшей эксплуатации. Комплекс мероприятий включает процедуру оценки требований технологической безопасности по параметрам регламентированных типовых моделей эксплуатации и обеспечивает принятие решений для снижения определенной степени риска или опасности возникновения аварийной ситуации сооружений.

Планирование эксперимента и выявление критически значимых параметров качества и надежности. Использование методов физико-химического моделирования показателей коррозионной стойкости и долговечности является обязательным инструментом для оценки качества и надежности проектных решений [1, 13].

Реакция сопротивления поверхностному разрушению [$\Phi(N)$, г/м^2] получена методом активного экспериментирования при использовании дробной реплики 2^{15-10}, отражающей программированные пробные воздействия при варьировании параметров конструктивной формы (j) и факторов коррозионных воздействий (i):

$$\Phi(N) = A_i + A_j + A_{i,j} + A_{i,j-1}; \qquad (1)$$

$$A_{i,j} = a_0 \sum_{i=0}^{i=N} \sum_{j=0}^{j=L} a_{i,j} \Big/ T_k \quad , \qquad (2)$$

где $A_{i(j)}$ – системная переменная коррозионных потерь, г/м^{2}год; а $i(j)$ – весовая характеристика параметров конструктивной формы (i, j);

a_0 – коррозионные потери стали С235, г/м^2, при ускоренных коррозионных испытаниях;

T_k – промежуток времени, соответствующий установившимся коррозионным потерям, год.

Экспертная оценка состояния обобщенного показателя защитных свойств покрытий (A_z) представлена в виде зависимости

$$A_z = \sum_{i=1}^{i=N} B_i X_i, \qquad (3)$$

где B_i – коэффициент весомости вида разрушения;

X_i – относительная оценка i-того вида разрушения;

i – число видов разрушения.

Результаты оценивания показателей по формулам (2, 3) позволяют установить нормативный срок службы системы защитного покрытия (СЗП)

$$T_z = \Delta P(N) / A_n, \qquad (4)$$

где $P(N)$ – коррозионные потери незащищенной стали, соответствующие количеству циклов ускоренных испытаний N до установленной характеристики отказа, г/м^2; A_n – характеристическое значение годовых коррозионных потерь, г/м^2.

Качество защитных покрытий определяется на основе статистической оценки коэффициента надежности вторичной защиты γ_{zn}. Оценка результатов испытаний включает: статистический анализ отказов (предельных состояний); проверку контролируемых параметров для заданной области интервальной оценки γ_{zn}; анализ соответствия расчетной ситуации требованиям обеспечения надежности с учетом экономических факторов.

Расчет на коррозионную стойкость, долговечность и ремонтопригодность стальных конструкций связан с учетом показателей качества мер первичной и вторичной защиты на основе признаков предельных состояний первой и второй группы (табл. 1).

Таблица 1

Характеристики коррозионной стойкости материалов и конструкций при оценке соответствия по уровню коррозионной опасности

Шкала стойкости металлов и покрытий				Категория ответственности конструкций	Коэффициенты надежности	
Группа стойкости по ГОСТ 13819-68	Оценка стойкости, балл	Глубина поражения, мм/год	Класс первичной и вторичной защиты по СНиП (ДСТУ)		Первичной защиты, $\gamma_{zк}$	Вторичной защиты, γ_{zn}
Нестойкие (IV)	8 7	1 – 5 0,5 - 1	I	С4	От 0,80 до 0,85	От 0,85 до 0,90
Пониженно-стойкие (III)	6 5	0,1-0,5 0,05-0,1	II	С3	»0,85 » 0,90	»0,90 »0,95
Удовлетворительно-стойкие (II)	4 3	0,01-0,05 0,005-0,01	III	С2	»0,90 »0,95	»0,95 »0,99
Стойкие (I)	2 1	0,001-0,005 Менее 0,001	IV	С1	»0,95 »0,99	»0,99 »1,00

Данные контроля коррозионного состояния объектов (параметры «выхода» системы) позволяют произвести анализ качества и надежности (параметры «входа») для обоснования требований технологической безопасности с учетом показателей ремонтопригодности, живучести и послеремонтной несущей способности. Задание критериев предельных состояний при продлении ресурса по результатам оценки фактического состояния выполняется с помощью коэффициента обратной связи режима эксплуатации конструкций (ψ) на основании зависимости

$$N = \Phi/(\Gamma - \psi), \qquad (5)$$

где N – наибольшее расчетное усилие в конструктивном элементе, кН;

Φ – предельное усилие, кН, которое может воспринять элемент с характеристикой повреждаемости Θ_f;

Γ – отношение резерва надежности.

Предложенная характеристика коэффициента обратной связи режима эксплуатации (ψ) обеспечивает реализацию информационно-аналитического подхода к управлению технологической безопасностью, формированию программ обеспечения надежности (ПОН). При этом критерием технологической безопасности конструкций является характеристика живучести (η), определяющая уменьшение пропускной способности регулирования ресурса

$$\eta = 1/(\Gamma - \psi). \qquad (6)$$

При накоплении повреждений Θ_f и потере качества $\overline{F}e$ коэффициент обратной связи (ψ) характеризует снижение эксплуатационных показателей стальных конструкций при установленном проектном значении отношения надежности (Γ). Возмущающие воздействия негативных внешних факторов *A(L,G,S,T,R)* и внутренних параметров $A(f)$ вызывают коррозионное разрушение и появление признаков предельных состояний конструкций. Пропускная способность регулирования ресурса характеризует допустимое изменение проектного значения отношения резерва надежности (Γ) для восстановления работоспособного состояния и продления ресурса за счет конструктивно-технологических ограничений и методов обеспечения требуемой послеремонтной несущей способности.

Подтверждение соответствия показателей качества СМЗК требованиям конструктивной и технологической безопасности СПЗК производится расчетным или расчетно-измерительным методами на основе данных проектной спецификации.

Расчетно-экспериментальная оценка интегральной характеристики живучести позволит устранить неопределенность и субъективизм при установлении проектных решений противокоррозионной защиты металлоконструкций.

Мониторинг интегральных показателей качества и надежности металлоконструкций. В соответствии с разработанным подходом контроль коррозионного разрушения производился по приведенной характеристике потери качества $\overline{F}_e$ в агрессивных средах, установленной по методу Г. Тагути [11]. Показатель качества $\overline{F}_e$ пропорционален квадрату отклонений значений контролируемого показателя $\gamma_{zk}(\gamma_{zn})$ от его номинального значения

$$\overline{F}e = \left[\frac{2}{\gamma_{zk(n)}^{\max} - \gamma_{zk(n)}^{\max}} (\gamma_{zf} - \frac{\gamma_{zk(n)}^{\max} + \gamma_{zk(n)}^{\max}}{2} \right]^2, \qquad (7)$$

Реализация подхода выполнена при рассмотрении условий соответствия требований противокоррозионной защиты для металлоконструкций пролетного строения железнодорожного путепровода, эксплуатация которого происходит в условиях предприятия металлургического производства (рис. 2, 3, 4). Требования к контролю качества и надежности мер СПЗК позволяют выявлять признаки коррозионного разрушения на ранних стадиях послеремонтной готовности конструкций (рис. 5, 6).

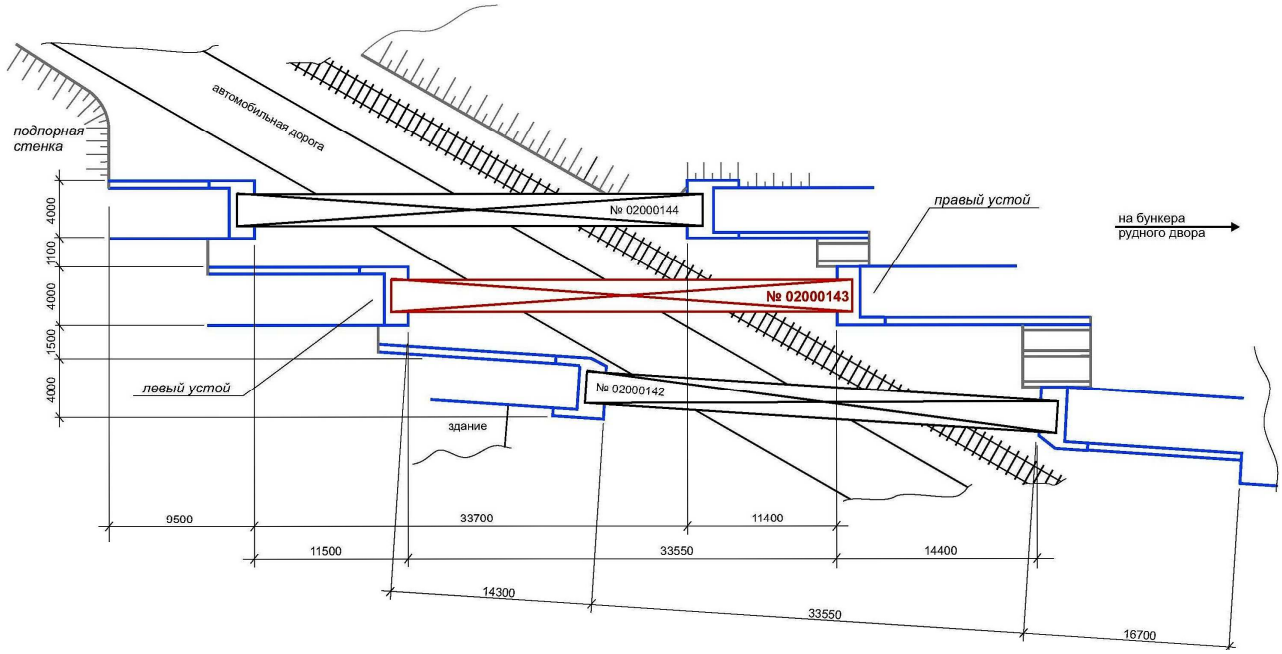

Рис. 2. Схема расположения путепровода в условиях заводской площадки

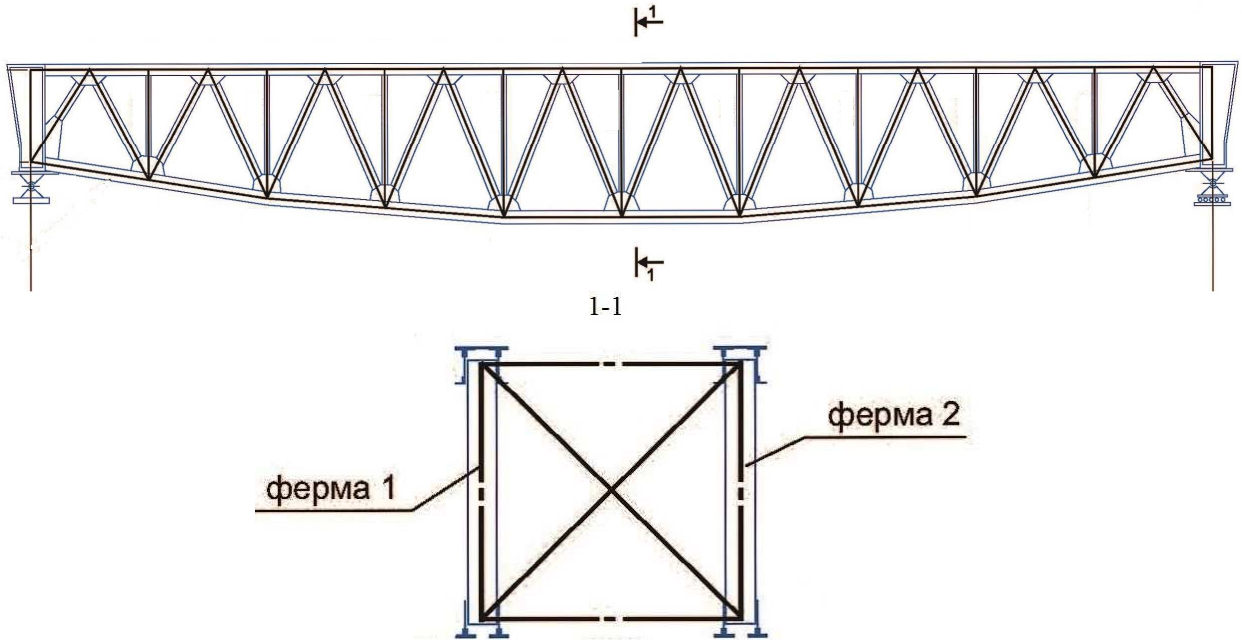

Рис. 3. Конструктивное решение сооружения железнодорожного путепровода

Рис. 4. Общий вид пролетного строения

Рис. 5. Ремонтное восстановление верхнего строения пути

Рис. 6. Коррозионное разрушение узлового соединения опорного участка

Рассмотрение результатов мониторинга технического состояния на этапе послеремонтного контроля спецификации вторичной защиты от коррозии (рис. 7), позволило выявить дефекты и повреждения, которые в период эксплуатации до выполнения ремонтно-восстановительных работ по объекту не превышали номинальных значений отклонений от проектных характеристик (табл. 2) [16].

Выводы. Рассмотрение результатов послеремонтного контроля спецификации вторичной защиты от коррозии позволило выявить дефекты и повреждения вторичной зашиты, которые в период ввода в эксплуатацию не превышали номинальных значений отклонений от проектных характеристик.

Отмечено, что представленные характеристики мер защиты от коррозии по критерию коррозионной опасности позволяют устанавливать требования проектных спецификаций к качеству и надежности металлоконструкций и их защитных покрытий на всех стадиях жизненного цикла строительных объектов. Использование норм, а также технических регламентов по противокоррозионной защите конструкций, внедренных на ряде предприятий

металлургического комплекса, создает благоприятные условия для обоснованной экономической оценки и управления рисками, увеличения межремонтных сроков службы, своевременной диагностики коррозионного состояния и восстановления противокоррозионной защиты конструкций.

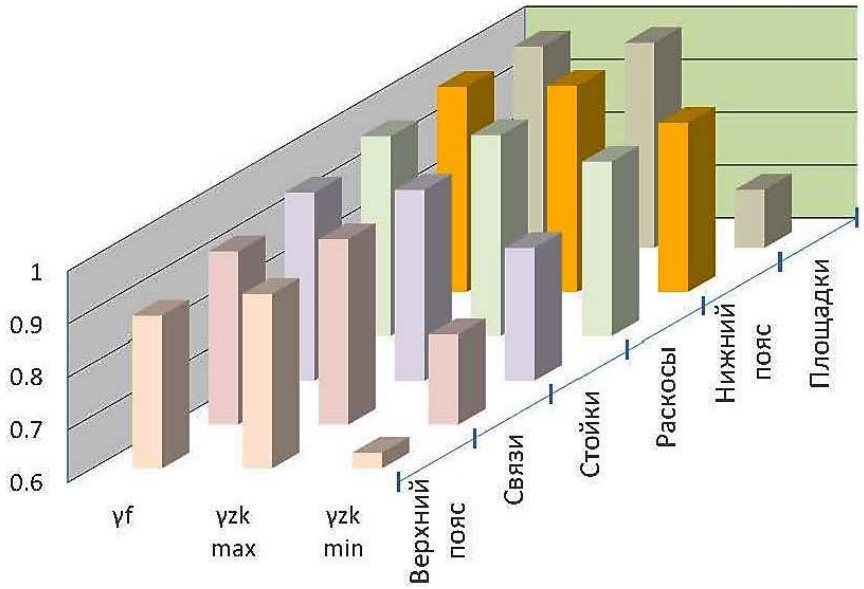

Рис. 7. Результаты мониторинга на этапе технической диагностики коррозионного состояния основных конструкций пролетного строения путепровода

Таблица 2

Требования к показателям надежности противокоррозионной защиты по критериям предельных состояний

Условия размещения	Конструктивное решение	Срок службы, год	Расчетные значения, γ_{zn}/γ_{zk}	Показатель потери качества, $\overline{Fe}$
Несущие фермы пролётного строения	Верхний пояс	60	0,93/0,63	0,528
	Связи	15	0,96/0,77	0,554
	Стойки	60	0,96/0,85	0,826
	Раскосы	60	0,98/0,93	0,846
	Нижний пояс	30	0,99/0,92	0,889
Верхнее строение пути	Площадки	10	0,99/0,71	0,902

Список использованных источников

1. Королёв, В.П. Теоретические основы инженерных расчетов стальных конструкций на коррозионную стойкость и долговечность [Текст] / В.П. Королёв // Научн. труды. – Донецк: Донеччина, 1995. – Вып. 1-95. – С. 24.

2. Королёв, В.П. Реинжениринг для обеспечения технологической безопасности конструкций зданий и сооружений [Текст] / В.П. Королев, О.Б. Лотоцкий, Ю.В. Филатов // Промислове будівництво та інженерні споруди. – 2008. – № 2. – С. 26-33.

3. ДБН В.1.2-14-2009 Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ [Текст]. – К.: ВАТ "Укрінсталькон імені В.М. Шимановського". – 48 с.

4. Sørensen J. D. Codified Risk Based Inspection Planning. / Sørensen, John Dalsgaard; Faber, M.H. // Structural Engineering International. – Switzerland: International Association for Bridge and Structural Engineering. – Vol. 12, No. 3. – 2002. – p. 195-199.

5. Перельмутер, А.В. Стан та залишковий ресурс фонду будівельних конструкцій [Текст] / А.В. Прельмутер, В.М. Гордеєв, Є.В. Горохов [та ін.]. – К.: Сталь, 2002. – 166 с.

6. Motoki Kato Development of Rational Design Technique for Frame Steel Structure Combining Seismic Resistance and Economic Performance / Motoki Kato, Masaki Shimono // Mitsubishi Heavy Industries Technical Review. – Vol. 52, No. 1. – 2015. – 14 p.

7. Vimani Y.P. Corrosion Inhibitors for New Bridges Members. / Y.P. Vimani // – Technical Note on Corrosion Protection Systems, Federal Highway Administration. Washington , DC, 1997. – 5 pp.

8. Korouš J. Probabilistic modelling of corrosion processes and inspections using SBRA concept. / Korouš Jan, Marek Pavel // In Proc. International Workshop: Risk based inspection and maintenance planning. Zurich : TU Zurich, 2001. – P. 67-74. – 2001.

9. Salmon, C.G. Steel Structures: Design and Behavior (5th Edition) / Salmon, C.G. and Johnson, J.E // U.S.A.: Prentice Hall. – 2008. – 888 p.

10. Лантух-Лященко, А.И Марковские модели накопления повреждений. Наука и искусство [Текст] / А.И Лантух-Лященко // Промислове будівництво та інженерні споруди. – 2009. – № 2. – С. 22-25.

11. Ealey L.A. Quality by Design: Taguchi Methods and Us Industry / L.A. Ealey. // Industry 2nd ed., ASI Press and Irwin Professional Publishing. – 1994. – 298 p.

12. Cai F. Fatigue life analysis of crane k-type welded joints based on non-linear cumulative damage theory / Fuhai Cai, Xin Wang, Jiquan Liu, Fuling Zhao // Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering. – 2014. – № 60(2014)2. – P. 135-144.

13. Korb, Lawrence J. Metals Handbook, Ninth Edition: Volume 13 - Corrosion / Lawrence J., Korb. – U.S.A: ASM International, 1997. – 3455 p.

14. Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection Volume 13A / Stephen D., Cramer, Bernard S., Covino// USA: ASM International. – 2006. – 1342 p.

15. Richardson, J. N. Robust topology optimization of truss structures with random loading and material properties: A multiobjective perspective / J. N. Richardson, Rajan Filomeno Coelhoa, Sigrid Adriaenssens // Computers & Structures. – Volume 154, 1. –USA: Elsevier. – 2015. – P. 41-47.

16. Holm, A. Inelastic Behavior of Materials and Structures Under Monotonic and Cyclic Load-ing / A. Holm, M. Brünig // Advanced Struc-tured Materials. – Switzerland : Springer, 2015. – Vol. 57. – 261 p. – doi: 10.1007/978-3-319-14660-7.

Рецензент д-р техн. наук, профессор В.П. Королёв

Гибаленко Олександр Миколайович, канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри будівництва, технічної експлуатації та реконструкції, Приазовський державний технічний університет». Тел. (0629) 44-62-94. E-mail: alexgib@yandex.ru, ORCID 0000-0003-2979-5225.
Коваленко Ганна Сергіївна, канд. техн. наук, доцент, кафедра будівництва, технічної експлуатації та реконструкції, Приазовський державний технічний університет». Тел. (0629) 44-61-94.
Трофимчук Тарас Сергійович, зав. лабораторією кафедри будівництва, технічної експлуатації та реконструкції, Приазовський державний технічний університет». Тел. (0629) 44-61-94. ORCID orcid.org/0000-0002-1051-4561.

Gibalenko Oleksandr Mykolayovych, CandSc, Head of Department, Department of Construction, Technical Operating and Reconstruction, Pryazovskyi State Technical University, vul. Universytets'ka 7, Mariupol 87500, Ukraine, tel.: +38 (0629) 44-62-94, email alexgib@yandex.ru, ORCID 0000-0003-2979-5225.
Kovalenko Anna Serhiyovna, CandSc, Department of Construction, Technical Operating and Reconstruction, Pryazovskyi State Technical University, vul. Universytets'ka 7, Mariupol 87500, Ukraine, tel.: +38 (0629) 44-61-94.
Trofymchuk Taras Serhiyovych, Head of Laboratory, Department of Construction, Technical Operating and Reconstruction, Pryazovskyi State Technical University, vul. Universytets'ka 7, Mariupol 87500, Ukraine, tel.: +38 (0629) 44-61-94.

Принята 24.03.2016 р.