

УДК 691.714:620.169.1

Мониторинг и диагностика коррозионного разрушения строительных металлоконструкций

Кущенко И.В.

Научно-образовательный центр «Техноресурс»,
ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», Украина

Анотація. Розглянуто проблему контролю корозійного стану і оцінки рівня небезпеки під час експлуатації металлоконструкцій будівель і споруд. У відповідності з установленим підходом режим контролю корозійного стану вибирається в залежності від ступеня критичності дефектів і руйнувань. Встановлено характеристики ремонтпридатності і можливості використання засобів аварійного захисту для оцінки вразливості конструкцій. Управління технологічною безпекою включає в себе визначення технічних вимог до оцінки фактичного стану конструкції, визначення коефіцієнта зворотного зв'язку умов експлуатації та характеристик ефективності управління терміном служби конструкції.

Аннотация. Рассмотрена проблема контроля коррозионного состояния и оценки уровня опасности при эксплуатации металлоконструкций зданий и сооружений. В соответствии с установленным подходом режим контроля коррозионного состояния выбирается в зависимости от степени критичности дефектов и разрушений. Были установлены характеристики ремонтпригодности и возможности использования средств аварийной защиты для оценки уязвимости конструкций. Управление технологической безопасностью включает в себя определение технических требований к оценке фактического состояния конструкции, определение коэффициента обратной связи условий эксплуатации и характеристик эффективности управления сроком службы конструкции.

Abstract. The problems of corrosion state monitoring and registration of risk level estimation at operation of metal structures of buildings and constructions is considered. According to specified approach the mode of facilities corrosion state monitoring is chosen depending on criticality degree of defects and damages. To estimate the susceptibility of structures, the maintainability performances and possibility of using emergency protection means are determined. Technological safety management includes specification of requirements to structure actual state estimation, determination of a feedback ratio of operation conditions and capacity characteristics of structure lifetime management.

Ключевые слова: стальные конструкции, противокоррозионная защита, расчет по предельным состояниям, коррозионная стойкость, долговечность, ремонтпригодность, уровень коррозионной опасности.

В последние годы все более очевидной становится тенденция совершенствования нормативно-технических требований в области безопасности конструкций при эксплуатации зданий и сооружений [1, 2]. Важным показателем механической прочности, устойчивости и экологической безопасности является уровень коррозионной опасности строительного

объекта, определяющий критические интервалы коэффициента готовности противокоррозионной защиты металлоконструкций проектного режима коррозионных воздействий [3]. Коррозионная опасность определяет техническое состояние или расчетную ситуацию (угрозу), когда увеличивается вероятность ущерба, вызванного коррозионным разрушением или отклонением от нормальной эксплуатации конструкций зданий и сооружений. Поэтому заданный на стадии проектирования уровень коррозионной опасности является исходной характеристикой, формирующей требования к долговечности и ремонтпригодности при разработке спецификации по техническому обслуживанию конструкций и их защитных покрытий [4].

Цель статьи состоит в определении признаков коррозионного разрушения, условий мониторинга и диагностики технического состояния металлоконструкций по уровню коррозионной опасности строительного объекта.

Критерии диагностики коррозионного разрушения. Необходимость привлечения дополнительных материально-технических ресурсов для обеспечения надежности и долговечности строительных объектов в условиях агрессивных сред является основным недостатком металлических конструкций. Выбор стратегии предупреждения и контроля коррозионного разрушения на основе методов технической диагностики определяет эффективность управления и снижения затрат на всех стадиях жизненного цикла конструкций и сооружений. При отсутствии определяющих параметров коррозионной опасности необоснованные конструктивные и технологические решения вызывают преждевременное разрушение и рост эксплуатационных затрат на восстановление работоспособности или полную замену проблемных конструктивных элементов.

Не вызывает сомнений, что проблема обеспечения безопасности металлоконструкций в коррозионных средах имеет комплексный многоплановый и многофакторный характер [5]. Особым аспектом проблемы коррозионно-механического разрушения является управление эксплуатационным сроком службы конструкций и их защитных покрытий на основе методов технического диагностирования остаточного ресурса объектов.

В настоящее время оценка коррозионного состояния стальных конструкций выполняется в соответствии с требованиями норм [6–8]. Следует отметить ограниченный состав определяющих параметров, не позволяющий производить техническое диагностирование признаков коррозионной опасности при оценке эксплуатационного состояния конструкций. В пособии [6] показатель глубины проникновения коррозии определяется без учета доверительного интервала статистической погрешности измерений. Влияние коррозионных повреждений на несущую способность

в нормах [7] пропонується врахувати шляхом зміни геометричних характеристик сечень на основі даних рівномірної корозії і коефіцієнта слитності сечення, що робить неможливим урахування особливостей нерівномірного (місцевого) руйнування конструкційних елементів.

Значительним шагом вперед на пути развития диагностического обеспечения является внесение изменений в нормы [8], допускающие меры первичной защиты (увеличение толщины проката) с учетом уровня коррозионной опасности. Отмечается необходимость разработки конструктивных решений, препятствующих развитию местной, щелевой, контактной, межкристаллитной коррозии и коррозионному растрескиванию. Вместе с этим, при увеличении толщины металлопроката оценка долговечности по мерам первичной защиты выполняется только при расчетном подтверждении соответствия по требованиям [9]. Установлено также проектное требование не учитывать изменения несущей способности в результате увеличения толщины конструктивных элементов по мерам первичной защиты. Представленные особенности проектирования по признакам коррозионной опасности создают условия для совершенствования методов технической диагностики как составной части технического обслуживания при эксплуатации строительных объектов.

Основной задачей диагностирования коррозионного состояния является обеспечение безопасности, функциональной надёжности и эффективности мер противокоррозионной защиты конструкций зданий и сооружений. В соответствии с разработанной методикой диагностирование по признакам коррозионной опасности выполняет следующие функции:

- обнаружение и определение однородных по локализации коррозионных поражений и повреждений конструктивных элементов;
- мониторинг допусковых значений определяющих параметров коррозионной опасности объекта;
- оценка коррозионного состояния и выявление предельных состояний (отказов) конструкций и их защитных покрытий;
- расчет остаточного ресурса объекта;
- корректировка определяющих параметров, анализ структурной схемы и разработка программы обеспечения надежности (ПОН).

Определяющие параметры коррозионной опасности объекта включают допустимые отклонения показателей надежности, при превышении которых наступает предельное состояние (отказ). Требования к определяющим параметрам при проектировании мер защиты от коррозии по уровню коррозионной опасности представлены в табл. 1, 2.

Таблиця 1

Категории ответственности защитных покрытий по коррозионной стойкости

Обозначение категории ответственности	Условие соответствия категории ответственности	Интервальная оценка отказа защитных свойств покрытий по критерию:		Коэффициент надежности γ_{zn}
		A_z	h_k , мкм	
C1	Допускает снижение декоративных свойств вторичной защиты	0,85–0,90	-	0,99–1,00
C2	Не допускает снижения декоративных свойств вторичной защиты	0,55–0,60	-	0,95–0,99
C3	Допускает снижение защитных свойств вторичной защиты	0,40–0,45	40–50	0,90–0,95
C4	Допускает снижение характеристик первичной защиты	0,30–0,35	90–100	0,85–0,90

Таблиця 2

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

Шкала стойкости металлов и покрытий				Категория ответственности конструкций (покрытий)	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, γ_{zk}	Вторичной защиты, γ_{zn}
Нестойкие (IV)	8 7	1–5 0,5–1	I	C4	0,80–0,85	0,85–0,90
Пониженно-стойкие (III)	6 5	0,1–0,5 0,05–0,1	II	C3	0,85–0,90	0,90–0,95
Удовлетворительно-стойкие (II)	4 3	0,01–0,05 0,005–0,01	III	C2	0,90–0,95	0,95–0,99
Стойкие (I)	2 1	0,001–0,005 Менее 0,001	IV	C1	0,95–0,99	0,99–1,00

Условие соответствия категории ответственности защитных покрытий определяются интервальными значениями обобщенного показателя защитных свойств (A_z) или критической толщины подпленочной коррозии (h_k , мкм). Коэффициенты надежности противокоррозионной защиты (γ_{zk} , γ_{zn}) учитывают допустимые отклонения эксплуатационных характеристик конструктивных элементов в зависимости от категории ответственности конструкций и их защитных покрытий [10].

Методика оценки характера и интенсивности коррозионных поражений. Для выполнения мониторинга определяющих параметров необходим показатель эксплуатационного состояния, позволяющий обеспечить достоверную оценку и классификацию уровня коррозионной опасности при сопоставлении с проектными требованиями.

Известно, что диагностическая достоверность показателей коррозионного разрушения хорошо согласуется с нормальным законом распределения случайных величин [11]. Поэтому статистическое обоснование коррозионно-механического разрушения однородных по конструктивным параметрам элементов выполняем путем расчетного определения коэффициента коррозионных потерь γ_{zf} :

$$\gamma_{zf} = \alpha_k \cdot \alpha_p \cdot \gamma_k (1 - \delta), \quad (1)$$

где α_k – коэффициент изменения геометрических характеристик сечений элементов при равномерной коррозии; α_p – коэффициент изменения геометрических характеристик с учетом местной коррозии; γ_k – коэффициент изменения расчетного сопротивления стали при коррозионном растрескивании; δ – предельная относительная ошибка экспериментальной оценки геометрических характеристик и механических свойств с учетом нормального закона распределения случайных величин.

Коэффициент равномерной коррозии α_k , устанавливается согласно зависимости:

$$\alpha_k = \frac{\Omega_k}{\Omega}, \quad (2)$$

где Ω_k – геометрические характеристики элемента с учетом равномерной коррозии; Ω – начальные геометрические характеристики элемента.

Определение геометрических характеристик элементов с учетом равномерной коррозии производится по данным замеров штангенциркулями и микрометрами.

Коэффициент изменения геометрических характеристик с учетом местной коррозии α_p рассчитывается по формуле:

$$\alpha_p = 1 - 2\gamma_p \frac{P}{t_k}, \quad (3)$$

где P – глубина коррозионного поражения, см; t_k – толщина элемента конструкции с учетом равномерной коррозии, см; γ_p – коэффициент плотности коррозионных поражений.

$$\gamma_p = \frac{F_k}{F}, \quad (4)$$

где F_k – площадь локальной коррозии язв и питтингов, см²; F – площадь рассматриваемого участка j -го однородного элемента.

Статистическое обоснование характеристики δ производится с учетом объема экспериментальных измерений (N), заданной доверительной вероятности (γ), коэффициента вариации (V) показателей коррозионного износа (табл. 3).

Таблица 3

Количество инструментальных замеров N конструкционных однородных элементов

δ	γ	N при V				
		0,10	0,15	0,20	0,25	0,30
0,05	0,80	4	6	13	20	25
	0,90	8	15	25	40	65
	0,95	13	25	40	66	100
	0,99	25	50	100	150	200
0,10	0,80	-	3	5	8	10
	0,90	3	5	8	13	15
	0,95	5	8	13	20	25
	0,99	8	15	25	32	50
0,15	0,80	-	-	3	4	5
	0,90	-	3	4	6	8
	0,95	3	5	6	10	13
	0,99	5	8	13	5	25
0,20	0,80	-	-	-	-	3
	0,90	-	-	4	5	6
	0,95	-	4	5	6	8
	0,99	4	6	8	10	15

Результаты расчетной оценки коэффициента γ_{zf} и фактические значения определяющих параметров коррозионной опасности позволяют формировать условия для расчета остаточного ресурса и разработки мер ПОН с учетом требований технологической безопасности конструкций зданий и сооружений [12].

Расчет остаточного ресурса стальных конструкций по репрезентативным данным диагностирования коррозионной опасности. Объектом исследования являются стальные конструкции рабочей площадки в условиях коррозионных воздействий. Для экспериментальной проверки теоретических положений расчета строительных металлоконструкций по предельным состояниям I группы (на коррозионную стойкость) и II группы (на долговечность), проведены стендовые определительные испытания балочных элементов Z-образного сечения (далее по тексту – образцы), выполненных из холодногнутого тонколистового проката.

Программа эксперимента включала два последовательных этапа:

- на первом этапе (стендовые коррозионные испытания в промышленной атмосфере) 2 образца (Б-1, Б-2 с категорией ответственности С-1) и два образца (Б-3, Б-4 с категорией ответственности С-3) размещались в условиях высокоагрессивных воздействий ($0,08 < K \leq 0,20$). Продолжительность коррозионных испытаний для образцов (Б-1, Б-2) составила один год при воздействиях агрессивной среды, соответствующих коррозионным потерям эталонных образцов 1600 г/м^2 . Продолжительность коррозионных испытаний для образцов (Б-3, Б-4) составила 2,8 лет при воздействиях агрессивной среды, соответствующих коррозионным потерям эталонных образцов 4700 г/м^2 ;
- на втором этапе (стендовые силовые испытания) балочные образцы проходили диагностирование по признакам коррозионной опасности и закреплялись на опорных элементах испытательного стенда для нагружения и оценки параметров напряженно-деформированного состояния (НДС).

Проектные спецификации определяющих параметров по мерам первичной защиты балок-образцов представлены в табл. 4.

Основной задачей выполнения определительных испытаний (рис. 1) является оценка остаточного ресурса и подтверждение проектного уровня коррозионной опасности для балок – образцов с различными категориями ответственности. При этом показатель живучести (η) балок – образцов после коррозионных испытаний характеризует уменьшение пропускной способности регулирования ресурса:

$$\eta = \Gamma - 1/(\Gamma - \psi). \quad (5)$$

Показатель живучести (η) определяет допустимое изменение проектного значения отношения резерва надежности (Γ), не требующее дополнительных мер по восстановлению работоспособного состояния балок-образцов при установленном значении коррозионных потерь (γ_{zf}).

Таблиця 4

Проектная спецификация мер первичной защиты балок-образцов

№ п/п	Обозначение балок – образцов элементов рабочей площадки, сталь С 235	Уровень коррозионной опасности	Категория ответственности конструкций	Характеристика агрессивности режима эксплуатации, A_n , г/(м ² год)	Сроки службы конструкций, первичной защиты, $T_{пз}$ / $T_{кз}$, лет	Коэффициент готовности, K_g	Коэффициент надежности, γ_{zk}
1	Марка Б-1	КІ	С-1	1200	30/10	0,33	0,95
2	Марка Б-2						0,95
3	Марка Б-3		С-3				0,85
4	Марка Б-4						0,85



а)



б)

Рис.1. Стендовые силовые испытания балок-образцов с коррозионными поражениями: а) опорные конструкции и пневматическая система нагружения; б) контроль параметров НДС балки-образца Б-4

Стенд для определительных испытаний представляет сборно-разборную установку, включающую опорные конструкции, балки-образцы (Б-1 ÷ Б-4), профилированный настил, обеспечивающий совместную работу системы пневматического нагружения, тензометрическую аппаратуру для измерения относительных деформаций, механические прогибомеры и индикаторы часового типа, манометр для контроля величины испытательной нагрузки.

Программа экспериментальных исследований предусматривала режимы нагружения, при которых балки-образцы сохраняли работоспособное состояние без признаков потери несущей способности (рис. 2). При этом

основное внимание уделялось экспериментальной оценке изменения НДС балок-образцов, с учетом различий определяющих параметров проектного уровня коррозионной опасности и коррозионных потерь при стендовых испытаниях.

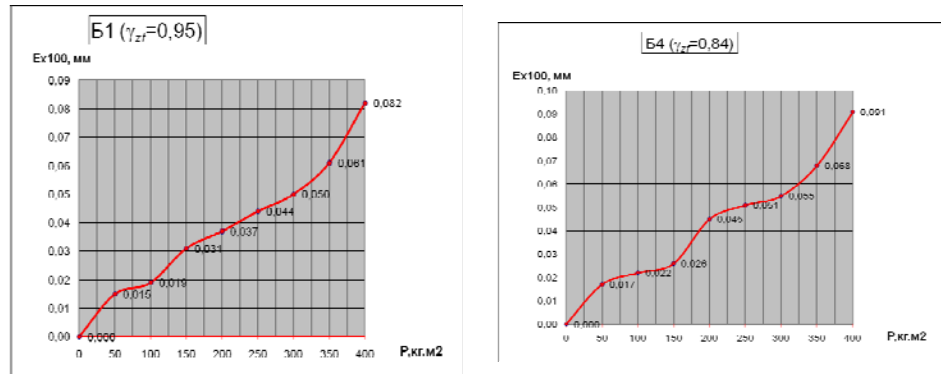


Рис.2. Экспериментальные зависимости прогибов при нагружении балок-образцов с коррозионными поражениями

Расчетные характеристики спецификации остаточного ресурса, установленные на основании данных технического диагностирования состояния балок-образцов с коррозионными поражениями, представлены в табл. 5.

Таблица 5

Спецификация остаточного ресурса по данным коррозионного диагностирования балок-образцов

№ п/п	Обозначение балок – образцов элементов рабочей площадки, сталь С 235	Уровень коррозионной опасности	Категория ответственности конструкций	Характеристика агрессивности режима эксплуатации, A_n , г/(м ² год)	Сроки службы конструкций, первичной защиты, $T_{n\gamma} / T_{k\gamma}$, лет	Коэффициент готовности, K_g	Коэффициент коррозионных потерь, γ_{cr}	Показатель живучести, η
1	Марка Б-1	Не нормируется	С-1	950	30/30	1,0	0,95	1,47
2	Марка Б-2				30/33	1,1	0,97	1,51
3	Марка Б-3				30/20	0,67	0,86	1,31
4	Марка Б-4		С-3		30/18	0,6	0,84	1,30

Выводы

Анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований, направленных на обоснование расчетно-экспериментальных методов оценки ресурса эксплуатации строительных металлоконструкций в коррозионных средах, позволяет заключить:

1. Введение классификационных признаков уровня коррозионной опасности строительных объектов (A_n , K_g) в нормах ДСТУ Б В.2.6-193 является важным условием для разработки комплекса инженерных и научно-технических требований по контролю коррозионного состояния на всех стадиях жизненного цикла металлоконструкций. При этом объекты, для которых установлены меры первичной и вторичной защиты по определяющим параметрам (A_n , K_g) в области значений, не требующей нормирования уровня коррозионной опасности [3, табл. 8], должны соответствовать требованиям нормального инспекционного контроля (специалисты и эксперты служб технической эксплуатации предприятий). Для объектов, представляющих коррозионную опасность, необходимо установить усиленную инспекцию с привлечением специализированных организаций, выполняющих функции научно-технического сопровождения программ обеспечения надежности конструкций, зданий и сооружений. Очевидно, что предлагаемые дополнительные меры должны быть учтены при разработке требований взамен действующих [5].

2. Сравнительный анализ данных проектной спецификации (см. табл. 4) и результатов выявления остаточного ресурса (см. табл. 5) подтверждает, что представленные определительные параметры технического диагностирования обеспечивают необходимые репрезентативные данные для мониторинга коррозионного разрушения и эффективного менеджмента показателей надежности конструкций и их защитных покрытий, снижение затрат за счет рационального использования новых материалов и технологий противокоррозионной защиты.

Литература

- [1] Исаенко Д. В. Механизмы обеспечения безопасности зданий и сооружений в контексте положений Закона Украины «О регулировании градостроительной деятельности» / Д. В. Исаенко // Промислове будівництво та інженерні споруди. – 2012. – № 4. – С. 2–7.
- [2] Шимановський О. В. Концептуальні основи системи технічного регулювання надійності й безпечності будівельних конструкцій. / О. В. Шимановський, В. П. Корольов // Промислове будівництво та інженерні споруди. – 2008. – № 1. – С. 4–9.

- [3] Захист металевих конструкцій від корозії. Вимоги до проектування : ДСТУ Б В.2.6-193:2013. – Офіц. вид. – К. : Мінрегіон України, 2014. – 74 с. – (Національний стандарт України)
- [4] Королёв В. П. Современные подходы к менеджменту качества противокоррозионной защиты и коррозионному контролю металлоконструкций / В. П. Королёв, А. А. Рыженков, А. Н. Гибаленко // Промислове будівництво та інженерні споруди. – 2009. – № 4. – С. 7–11.
- [5] Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин / Цільова комплексна програма НАН України : зб. наук. ст. за результатами, отриманими в 2007–2009 рр.; наук. керівник – академік Б.Є. Патон. – К. : ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України, 2009. – 709 с.
- [6] Пособие по контролю состояния строительных металлических конструкций зданий и сооружений в агрессивных средах, проведению обследований и проектированию восстановления защиты конструкций от коррозии : пособие к СНиП 2.03.11-85) / [Сост. Голубев А.И., Горохов Е.В., Королев В.П. и др.]. – М. : Стройиздат, 1989. – С. 51.
- [7] Оцінка технічного стану сталевих конструкцій виробничих будівель і споруд, що знаходяться в експлуатації : ДБН 362-92. – Офіц. вид. – К. : Держбуд України, 1995. – 44 с. – (Державні будівельні норми України).
- [8] Сталеві конструкції. Норми проектування : ДБН В.2.6-198:2014 – Офіц. вид. – К. : Мінрегіон України, 2014. – 199 с. – (Державні будівельні норми України).
- [9] Оцінювання відповідності у будівництві згідно з технічним регламентом будівельних виробів, будівель і споруд. Настанова з порядку проведення оцінки відповідності із застосування розрахункового методу підтвердження відповідності : ДСТУ-Н Б А.1.2-6:2010. – Офіц. вид. – К.: Мінрегіон України. – 19 с. – (Система ліцензування та сертифікації у будівництві. Національний стандарт України).
- [10] Королёв В. П. Нормативные требования оценки коррозионной опасности при проектировании строительных объектов / В. П. Королёв, А. Н. Гибаленко // Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій ім. В. М. Шимановського ; під заг. ред. д.т.н., проф. О.В.Шимановського. – К. : Вид-во “Сталь”, 2014. – Вип. 13. – С. 133–145.

- [11] Королев В. П. Экспертное диагностирование коррозионного разрушения при определении остаточного ресурса строительных металлоконструкций в коррозионных средах / В. П. Королев, И. А. Волкова, Е. В. Шелихова // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2002. – № 1. – С. 6–11.
- [12] Королёв В. П. Развитие корпоративной системы менеджмента: технологическая безопасность производственных объектов / В. П. Королёв, Ю. В. Филатов, Ю. В. Селютин // Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій ім. В. М. Шимановського ; під заг. ред. д.т.н., проф. О. В. Шимановського. – К. : Вид-во “Сталь”, 2014. – Вип. 14. – С. 136–149.

Надійшла до реколегії 18.11.2015 р.