

Володимир КОРОЛЬОВ¹, Олександр ГАЛАКТИОНОВ², Галина ГЕРМАН²

ОБҐРУНТУВАННЯ ЧАСОВОГО РЕЗЕРВУВАННЯ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ КОРОДУЮЧИХ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ ЗА ПРИЙНЯТНИМ РИЗИКОМ

¹*ДВНЗ “Приазовський державний технічний університет”*

вул. Університетська, 7, м. Маріуполь, 87500. E-mail: center_sts@ukr.net

²*Підкомітет – 4 “Протикорозійний захист у металобудівництві” технічного комітету
стандартизації ТК 301 “Металобудівництво”, м. Маріуполь*

Volodimir KOROLOV¹, Oleksandr GALAKTIONOV², Galina GERMAN²

JUSTIFICATION OF TIME RESERVATION OF LOAD CAPACITY OF CORROSIONING STEEL STRUCTURES TAKING INTO ACCOUNT AN ACCEPTABLE RISK

¹*State Higher School “Priazovsky State Technical University”*

7, Universitetska Str., Mariupol, 87500, Ukraine. E-mail: center_sts@ukr.net

²*Corrosion protection in metal engineering” Subcommittee - 4 of “Metal engineering”
TC 301 Technical Committee for Standardization*

ABSTRACT

The paper deals with the task of corrosion protection in accordance with the provisions of DSTU B. 2.6-193, which provide for the use of primary and secondary protection measures. The need is pointed up for assessing technical and process risks for reducing the operational costs for restoring serviceability of structures and their protective coatings. The essence is justified of methods of risk-diagnostics of corrosion protection for identifying threats to process safety of buildings and installations.

Based on the signs of an acceptable risk class, it is proposed to monitor the corrosion risk level with account for the indices of the generalized matrix of choosing the level of SCPSS taking into account the requirements of process safety of industrial facilities.

To implement the monitoring procedure with account for the acceptable class of SCPSS, determinative parameters of corrosion state (DPCS) were adapted with no single point of failure. It is proposed to assess conformity of the structural steel category based on the level of corrosion protection in accordance with parameters of a partial degradation of protective features of primary and secondary protection.

The composition of design parameters of the time reservation is determined, which depends on defining the direct and inverse problems of survivability of structural steel. Experimental trial of the indicated provisions of the time reservation is carried out with the use of the most vulnerable thin-walled sections which are extensively used in manufacture of the light-gauge constructions. The bench determinative tests are carried out of Z beam elements made of the cold-formed C235 steel. The experiment procedure involved the statement of the problem of survivability assessment with account for formation of representative samples of corrosion protection monitoring data. The models are justified of the time reservation of the load capacity of structural steel based on the mode and rate of corrosion damages.

The time reservation of the systems of corrosion protection of structural steel provides the great advantages for determinative approach to determine a balanced combination of means and methods of primary and secondary corrosion protection. The risk-diagnostics assignments are supplemented with conditions for calculating the combination factor of elements of corrosion protection (CECP).

With that, it is indicated that the risk-diagnostic assignments can be accomplished on the basis of the representative data of corrosion protection monitoring only. Justification of class of risks of SCPSS defines a set of measures to monitor, reduce and eliminate the uncertainty of situations while maintaining and repairing structures in the actual state. This approach ensures that the results of estimation of measures of the time reservation of primary protection (increase in thickness of rolled metal) are taken into account to determine resource of the load capacity and durability of corrosive structures.

KEY WORDS: *structural steel, monitoring of corrosion protection, risk-diagnostics of corroding structures, time and functional reservation of reliability, load capacity, corrosion hazard, risk assessment.*

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Для забезпечення довговічності конструкцій будівель і споруд слід або проектувати їх з урахуванням впливів агресивного середовища, або захищати їх від цих впливів [1–4]. Корозійне руйнування є основним недоліком металоконструкцій, для усунення якого потрібне залучення додаткових матеріально-технічних ресурсів для забезпечення надійності та довговічності будівельних об'єктів в умовах агресивних впливів. Вибір стратегії попередження та контролю корозії на основі сучасних технологій протикорозійного захисту визначається ефективністю управління та зниження витрат на всіх стадіях життєвого циклу конструкцій. За відсутності цілеспрямованого підходу до вибору засобів і методів захисту, необґрунтовані конструктивні та технологічні рішення викликають передчасне руйнування та зростання експлуатаційних витрат на відновлення роботоздатності або повну заміну проблемних конструкційних елементів [5-7].

Наведені умови формують актуальне проблемне завдання, яке полягає у розв'язанні питань з управління ризиками технологічної безпеки при подовженні ресурсу кородуючих конструкцій на підставі методу HAZOP (Hazard and Operability Study) щодо ідентифікації загроз і можливостей запланованих заходів протикорозійного захисту, котрі застосовано до підтримки роботоздатного стану промислових об'єктів.

Мета даної роботи полягала в обґрунтуванні етапів часового резервування несучої здатності з урахуванням функціонального визначення роботоздатності елементів системи захисту від корозії сталевих конструкцій.

Аналіз стану проблеми [3] дозволяє зробити висновок про те, що крім спеціальних питань ризик-діагностики, важливе значення має експериментальне дослідження напружено-деформований стану (НДС) несучих конструкцій з корозійними пошкодженнями, відмова яких може стати безпосередньою причиною аварійної ситуації з прямою загрозою повного руйнування будівель і споруд.

ПРОТИДІЯ КОРОЗІЙНО-МЕХАНІЧНОМУ РУЙНУВАННЮ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ ЗАСОБАМИ АКТИВНОГО УПРАВЛІННЯ І ЗАХИСТУ

Методологія управління безпекою на основі критеріїв граничних станів для заданих показників якості та довговічності металоконструкцій заснована на застосуванні процесного підходу при обґрунтуванні засобів і методів захисту від корозії [8–10]. Умови забезпечення несучої здатності, експлуатаційної придатності та довговічності повинні визначатися з використанням частинних коефіцієнтів надійності за правилами ДБН В.1.2-14. Згідно ДСТУ Б В.2.6-193, вимоги до засобів первинного та вторинного захисту встановлюються залежно від рівня корозійної небезпеки будівельних об'єктів. З позицій положень ДБН В.2.6-163, роботоздатність металоконструкцій при нормальній експлуатації протягом встановленого терміну служби конструкцій визначається правильним вибором розрахункової моделі та розрахункової ситуації. Розрахунковий термін експлуатації приймається рівним періоду, впродовж якого передбачається використання будівлі або споруди за його функціональним призначенням. Для визначення передбачуваного розрахункового терміну експлуатації конструкцій ДСТУ Б В.2.6-193 встановлені вимоги щодо заходів первинного та вторинного захисту від корозії.

Спектр визначень поняття технологічна безпека досить широкий, а концепція подолання загроз корозійного руйнування за впровадженні нових матеріалів і технологій знаходиться у стадії формування. У працях [11–13] розглядаються критерії оцінки економічних і техніко-технологічних ризиків на методичній основі стандарту ІЕС 61882 «Hazard and operability studies (HAZOP studies)». При такому підході оцінка технологічної безпеки є основним елементом для прийняття рішень на підставі ідентифікації ризику, аналізу та порівняльному визначенні заходів по відновленню роботоздатності та подовженню проектного строку служби кородуючих конструкцій. Зазначені умови дозволяють застосувати процесно-орієнтований підхід до розв'язання задачі оптимального розподілу обмежених ресурсів щодо обґрунтування прийнятного ризику систем протикорозійного захисту конструкцій (СПЗК). Методика HAZOP studies представляє ризик, як вірогідну подію, внаслідок якої можуть статися нейтральні або негативні явища.

Критерії технологічної безпеки дозволяють сформулювати вимоги до довговічності та ремонтпридатності, підтвердження яких при технічному обслуговуванні відповідає умовам нормальної експлуатації будівельних конструкцій. Таким чином, процедура контролю корозійного стану конструкцій повинна містити можливості управління живучістю конструкцій при дотриманні умов прийнятого ризику, відповідно до заданого рівня корозійної небезпеки промислових об'єктів. Обґрунтовано класифікаційні ознаки класів ризиків згідно з характеристиками можливих наслідків від відмови будівлі або споруди за процедурою HAZOP, що дозволяє виконувати ідентифікацію загроз та прийняття рішень з відновлення роботоздатності СПЗК в умовах корозійної небезпеки [14].

Зрозуміло, що для техніко-економічного обґрунтування заходів СПЗК при проектуванні, а також за умов відновлення роботоздатності кородуючих конструкцій потрібна розробка додаткових вимог, передбачаючи резервування корозійної захищеності.

Резервування корозійної захищеності стосується способу підвищення характеристик надійності сталевих конструкцій та їх захисних покриттів або підтримання їх на необхідному рівні за допомогою надмірності заходів первинного та вторинного захисту в порівнянні з мінімально необхідними для виконання заданих функцій у даних умовах роботи. В резервованих конструкціях відмова настає тоді, коли втрачена роботоздатність всіх елементів СПЗК. Найважливішою умовою резервування корозійної захищеності є виконання процедури ризик-діагностики на основі реалізації принципів одиничної відмови.

Конструктивний елемент вважається резервованим, якщо відмова одного або декількох елементів первинного та вторинного захисту не порушує роботоздатності сталевих конструкцій, встановленої відповідно до цільової технологічної функції промислового об'єкту. Таке резервування розглядається як функціональне резервування корозійної захищеності [13].

Послідовність етапів процедури резервування представлено на рис. 1. Засоби активного управління та захисту передбачають визначення категорії відповідальності промислових об'єктів за технологічною безпекою (табл. 1).

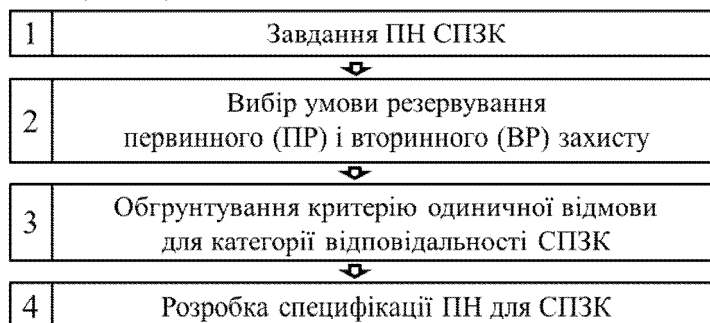


Рис. 1. Етапи резервування корозійної захищеності СПЗК.

Fig. 1. Stages of reserving the corrosion protection of the CPS.

Таблиця 1. Категорії відповідальності промислових об'єктів за технологічною безпекою

Table 1. Categories of criticality of industrial facilities on the basis of process safety

Рівень загроз	Незначний (0)	Низький (I)	Обмежений (прийнятний) (II)	Середній (III)	Високий (IV)	Граничний (V)
Категорія технічного стану	Справний	Не-справний	Роботоздатний	Обмежено роботоздатний	Перед-аварійне	Аварійне
Рівень безпеки, R_i	1-2	3-4	5-6	7-8	9-10	-
Категорія відповідальності	R_0	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5
Коефіцієнт технологічної безпеки γ_{sr}	Більш 1,2	Від 1,15 до 1,2	»1,1 »1,15	»1,05 » 1,1	»1,00 »1,05	Менш 1,0
Сигнальний колір небезпеки	Жовтий	Зелений	Синій	Помаранчевий	Червоний	Чорний

МЕТОДИКА ЧАСОВОГО РЕЗЕРВУВАННЯ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ КОНСТРУКЦІЙ ЗА КОРОЗІЙНИХ ВПЛИВІВ

Часове резервування корозійної захищеності розглядається як метод підвищення надійності кородуючих конструкцій, при якому системі в процесі функціонування надається можливість витратити деякий час, який називається резервним, для відновлення робоздатності СПЗК. При цьому, часове резервування визначає параметри ремонтпридатності конструкцій і їх захисних покриттів.

Сформульовані підходи до функціонального та часового резервування корозійної захищеності забезпечують використання принципу одиначної відмови визначальних параметрів корозійного стану (ВПКС) при експериментальних дослідженнях тонкостінних конструкцій. Склад розрахункових параметрів часового резервування залежить від формулювання умов прямої та оберненої задач живучості сталевих конструкцій. У розрахунках за граничними станами для резервування застосовують завдання фіктивних корозійних навантажень. Умови прямої задачі [13] мають вигляд: за заданими показниками матриці рівня корозійної захищеності сталевих конструкцій визначити фіктивне корозійне навантаження (A_f , $g \cdot year/m^2$). Умови оберненої задачі живучості виражені в наступному: за визначеними параметрами моніторингу корозійного стану вибрати модель подовження ресурсу сталевих конструкцій.

Експериментальне відпрацювання зазначених положень часового резервування відбулося на прикладі найбільш вразливих корозією тонкостінних профілях, які розповсюджені при виготовленні легких металевих конструкцій. Для конструкцій та елементів категорії А за вимогами [2] передбачається використання принципів гарантування безпеки. У складі категорії А окремо розглядаються конструкції категорії А1 (головні несучі конструкції), безвідмовність яких забезпечує будівлю або споруду від повного руйнування при аварійних впливах, навіть якщо її подальше використання за призначенням при цьому стане неможливим без капітального ремонту.

Таким чином, кородуючі конструкції промислових об'єктів слід відносити до категорії А1, відмова яких може стати безпосередньою причиною аварійної ситуації з прямою загрозою для людей або довкілля.

Стендові визначальні випробування балкових елементів Z-образного перетину (далі по тексту – зразки), виконаних з тонкостінного холодно гнутого прокату зі сталі С235, були призначені підтвердити достовірність вирішення задач живучості та побудованих моделей екстраполяції параметрів корозійних пошкоджень щодо управління часовим резервуванням несучої здатності сталевих конструкцій при моделюванні проектної аварії. Матеріал моделей і зразків-свідків при моніторингу корозійного руйнування – маловуглецева сталь з наступними механічними характеристиками: $E = 210\ 000$ МПа, $R_y = 245$ МПа, $R_u = 360$ МПа; і хімічним складом, відповідним ВСт3пс6 по ГОСТ 380-71**.

Здійснені дослідження відображають реалізацію двох етапів програми ризик-діагностики за умов корозійного моніторингу та оцінювання живучості.

Розділ містить програму моніторингу 1 етапу (ризиків 1 та 2 класу) і методику випробування кородуючих еталонних зразків-свідків (рис. 3.4) при заходах первинного захисту балкових елементів (збільшення товщини прокату).

На першому етапі (стендові корозійні випробування в промисловій атмосфері) 2 зразка (Б-1, Б-2 з категорією відповідальності П-1) і два зразки (Б-3, Б-4 категорії П-3) розміщувалися в умовах високоагресивних впливів ($0,08 < K \leq 0,20$). Тривалість корозійних випробувань для зразків (Б-1, Б-2) склала один рік (корозійні втрати еталонних зразків 1600 g/m^2). Тривалість корозійних випробувань для зразків (Б-3, Б-4) склала 2,8 року (корозійні втрати еталонних зразків 4700 g/m^2).

На другому етапі (стендові силові випробування) зразки проходили діагностування ВПКС і закріплювалися на опорних елементах випробувального стенду для навантаження та оцінки параметрів НДС. Стенд для визначальних випробувань являє збірно-розбірну установку, опорні конструкції, балки-зразки (Б-1 ÷ Б-4), профільований настил, що забезпечує спільну роботу системи пневматичного навантаження, тензометричну апаратуру для вимірювання відносних деформацій, механічні прогиномири та індикатори годинникового типу, манометр для контролю величини випробного навантаження (рис. 2).

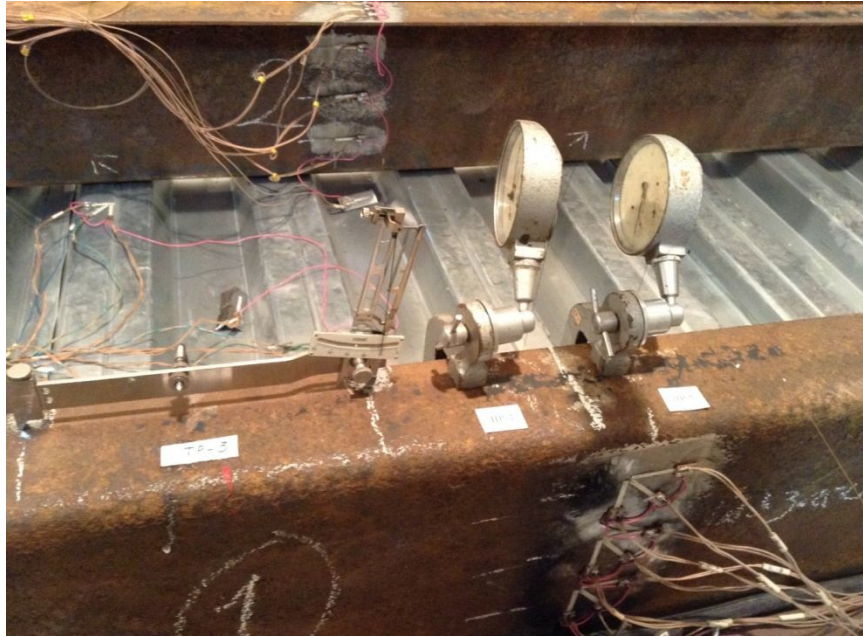


Рис. 2. Розміщення тензорезисторів при вивченні плоского напруженого стану стінки балочного елемента з корозійними пошкодженнями.

Fig. 2. Location of strain gages for monitoring the stressed state of the wall of the beam element with corrosion damage.

Програма експериментальних досліджень передбачала режими навантаження, при яких балки-зразки зберігали робоздатний стан без ознак втрати несучої здатності. При цьому основна увага приділялася контролю зміни НДС балок-зразків, з урахуванням особливостей ВПКС в результаті корозійного руйнування на першому етапі стендових випробувань.

Силові випробування балкових конструкцій з тонкостінних холодногнутих профілів підтвердили можливість використання розрахункових моделей функціонального резервування корозійної захищеності при проектуванні, визначення живучості за даними корозійного моніторингу та часового резервування кородуючих конструкцій за фактичним станом. Застосований порядок резервування корозійної захищеності відповідає вимогам забезпечення надійності та визначає послідовність техніко-економічного обґрунтування за вимогою замовника збільшення товщини прокату та стінок труб з урахуванням можливої корозії конструкцій. При цьому ризик-діагностика допускає визначення безпечних умов оцінювання довговічності СПЗК, живучості та резервування несучої здатності конструкцій.







РИЗИК-ДІАГНОСТИКА КОРДУЮЧИХ КОНСТРУКЦІЙ

Враховуючи результати попередніх експериментальних досліджень, можна констатувати, що ризик-діагностика кородуючих конструкцій створює додаткові можливості для управління заходами з відновлення кородуючих конструкцій для забезпечення технологічної безпеки промислових об'єктів.

Науково-практичне обґрунтування двох складових ризик-діагностики, моніторингу рівня технологічної безпеки й оцінювання живучості, виконано за результатами аналізу режиму тривалої експлуатації прольотних споруд транспортерних галерей. Отримані дані корозійно-механічного руйнування та розрахункові показники несучої здатності дозволили обґрунтувати характеристики відповідності категорій технічного стану конструкцій та рівня технологічної безпеки об'єктів (табл. 2). Встановлено відмінності у формуванні вихідних даних для резервування надійності за критеріями корозійної захищеності (пряма задача забезпечення живучості) і виявленні резерву несучої здатності за ознаками корозійної небезпеки (зворотна задача оцінювання живучості). Принципово важливим є обґрунтування 10-бальної шкали рівня ризику технологічної безпеки (див. табл. 1), що дозволяє систематизувати результати

моніторингу та діагностики корозійної захищеності для прийняття рішень з урахуванням прийнятного ризику.

Таблиця 2. Результати ризик-діагностики прольотних споруд транспортерних галерей
Table 2. Results of risk diagnostics of transit facilities of transport galleries

Клас ризику/ R_i , бал	Загальний вид об'єкта	Технічний стан при обстеженні	Параметри ризик-діагностики			
			Роботоздатність		Живучість	
			A_z	$\gamma_{zk}(\gamma_{zf})$	ψ_m	η_m
2/7	Конвеєрна галерея ТОВ «Центральна збагачувальна фабрика «Торезька»					
			0,35- 0,50	0,50- 0,65	0,50- 0,35	2,15- 2,25
3/6	Міст конвеєру вуглепідготовчого цеху ПрАТ «Авдіївський коксохімзавод»					
			0,45... 0,70	0,80... 0,85	0,20... 0,15	1,90... 2,05
4/2	Конвеєрні галереї ТОВ «Збагачувальна фабрика «Свято-Варваринська»					
			0,50... 0,80	0,95... 1,00	0,05... 0,00	1,45... 1,65

ВИСНОВКИ

За підсумками виконаних досліджень доведено, що технологічна безпека в агресивних середовищах досягається часовим резервуванням несучої здатності сталевих конструкцій із урахуванням функціональної живучості систем корозійної захищеності за прийнятним ризиком наслідків корозійно-механічного руйнування промислових об'єктів.

Одержані результати експериментальних досліджень дозволяють використовувати дані ризик-діагностики параметрів СПЗК для часового резервування несучої здатності сталевих конструкцій на основі обґрунтування заходів захисту від корозії з урахуванням вимог технологічної безпеки. Для відновлення роботоздатності конструкцій запропоновано ефективний механізм протидії корозійно-механічному руйнуванню, який містить узагальнені результати ризик-діагностики заходів надлишкової корозійної захищеності та підтримки на необхідному рівні засобів вторинного захисту за рахунок включення додаткових (резервних) елементів первинного захисту.

ЛІТЕРАТУРА

- 1 Лобанов Л.М., Олійник Н.І., Цибульник О.В. Про концепцію створення системи технологічної безпеки для основних галузей економіки України // Захист від корозії і моніторинг залишкового

- ресурсу промислових будівель, споруд та інженерних мереж. Матеріали наук.-практ. конф. (м. Донецьк, 9-12 червня 2003 р.) – Донецьк: УАМК, 2003, С. 14–19.
- 2 ДБН В.1.2-14-2008. Загальні принципи забезпечення надійності та безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ». – Мінрегіон України. – 30 с.
 - 3 ISO 12944:2007 Paints and varnishes - Corrosion protection of steel structures by protective paint systems.
 - 4 ДСТУ Б В.2.6-193:2013 Захист металевих конструкцій від корозії. Вимоги до проектування. – Мінрегіон України. – 74 с.
 - 5 Пособие по контролю состояния строительных металлических конструкций зданий и сооружений в агрессивных средах, проведению обследований и проектированию восстановления защиты конструкций от коррозии (к СНиП 2.03.11-85) / Сост.: Голубев А.И., Горохов Е.В., Королев В.П. и др. М.: Стройиздат, 1989. – С. 51.
 - 6 Булєєв І.П., Коновалов О.Ф., Корольов В.П. Нормативно-правове забезпечення технічного стану будівельних конструкцій за рівнем корозійної небезпеки // Промислове будівництво та інженерні споруди. – 2011. – № 3. – С. 25–29.
 - 7 Проблеми ресурсу і технологічної безпеки металевих конструкцій у корозійних середовищах / В.П. Корольов, О.М. Гібаленко, І.В. Кущенко та ін. // Зб. наук. праць. Розробки і практичний досвід менеджменту надійності будівельних об'єктів. – Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2015. – 75 с.
 - 8 Стан та залишковий ресурс фонду будівельних металевих конструкцій в Україні / А.В. Перельмутер, В.М. Гордєєв, Є.В. Горохов., Єгоров Є.А., Корольов В.П., Лантух-Лященко А.И., Оглобля А.И. – К.: УІНЦіЗР, 2002, – 132 с.
 - 9 Dementiev V., O. Gibalenko, P. Korolov Justification of corrosion protection economic efficiency criterion according to design and experimental estimation of building structures // II international conference Prague, 19–22 april 2010: Book of Abstracts. – P. 305–313.
 - 10 Гібаленко О., Кущенко І., Корольов П. Організаційно-економічний механізм менеджменту протикорозійного захисту будівельних конструкцій // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2012. – Спецвип. № 9, Т. 1. – С. 349–355.
 - 11 Management of the Quality of Corrosion Protection of Structural Steel Based on Corrosion Risk Level / V. Korolov, Yu. Filatov, N. Magunova, P. Korolov // Journal of Materials Science and Engineering A & B, Volume 3, Number 11. New York: David Publishing Company. – 2013. – P. 740–747.
 - 12 Korolov V. Risk Assesment and Qoluity Assuranse Of Corrosion Protection For Steel Structures Of Industrial Fasilities / Korolov V., Vysotskyuy Y., Filatov Y., P. Korolov // EUROCORR-2013. The European Corrosion Congress // Corrosion Control for a Blue Sky // 1-5 September 2013, Estoril, Portugal. // Book of Abstracts. – P. 719.
 - 13 Королєв П.В., Королєв В.П., Кущенко И.В. Управление рисками коррозионной защищенности при решении прямой и обратной задач живучести стальных конструкций // Вісник Одеської державної акад. буд-ва та арх. – 2016. – Вип. № 63. – С. 67–75.
 - 14 Structural Survivability Reserve Planning Based on Analysis of Corrosion Hazard of Industrial Facilities / V. Korolov, T. Godun, P. Korolov, T. Trofimchuk // European Corrosion Congress, 20th International Corrosion Congress & Process Safety Congress. 3-7 September 2017, Prague, Czech Republic. // Book of Abstracts. – P. 639.