ISSN 1814-5566
МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ
МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ
METAL CONSTRUCTIONS
11, N3 (2006) 197-202
УДК 624.014.2:620.193

(06)-0118-0

НАДІЙНІСТЬ СТИСНУТИХ СТАЛЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ З ШВЕЛЕРІВ ПРИ КОРОЗІЙНОМУ ЗНОСІ

О.В. Семко, А.В. Гасенко

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка,
пр. Першотравневий 24, 36021, м.Полтава, Україна.
E-mail: Syom@mail.ru

Отримана 18 липня 2006; прийнята 28 серпня 2006

Анотація. Розглянуто надійність центрально-стиснутих елементів квадратного перерізу, що складаються з двох швелерів, при корозійному зносі. Наведено формулу, що дозволяє оцінити надійність елементу в умовах рівномірної корозії при нормальному законі розподілу випадкової величини початкової швидкості корозії. Розглянуто найбільш важливі характеристики піттінгової корозії при нерівномірному зносі. Застосовано теорію екстремальних значень для описання піттінгової корозії.

Ключові слова: стиснутий сталевий елемент, корозійний знос, надійність.

НАДЕЖНОСТЬ СЖАТЫХ СТАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ШВЕЛЛЕРОВ ПРИ КОРРОЗИОННОМ ИЗНОСЕ

А.В. Семко, А.В. Гасенко

Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка,
пр. Первомайский 24, 36021, г. Полтава, Украина.
E-mail: Syom@mail.ru

Получена 18 июля 2006; принята 28 августа 2006

Аннотация. Рассмотрена надежность центрально-сжатых элементов квадратного сечения, что состоят из двух швеллеров, при коррозионном износе. Приведено формулу, что позволяет оценить надежность элемента в условиях равномерной коррозии при нормальном законе распределения случайной величины начальной скорости коррозии. Рассмотрено наиболее важные характеристики питтинговой коррозии при неравномерном износе. Применено теорию экстремальных значений для описания питтинговой коррозии.

Ключевые слова: сжатый стальной элемент, коррозионный износ, надежность.

RELIABILITY OF THE COMPRESSED STEEL ELEMENTS OF CHANNELS AT CORROSION DETERIORATION

O.V. Semko, A.V. Gasenko
Poltava National Technical University named in honour of Jury Kondratyuk,
Pershomajskij pr. 24, 36021, Poltava, Ukraine.
E-mail: Syom@mail.ru

Received 18 July 2006; accepted 28 August 2006

Abstract. Reliability of the central-compressed elements of square section that consist of two channels is considered, at corrosion deterioration. It is resulted the formula that allows to estimate reliability of an element in conditions of uniform corrosion at the normal law of distribution of a random variable of initial speed of corrosion. It is considered the most important characteristics corrosion at non-uniform deterioration. It is applied the theory of extreme values to the description this corrosion.

Keywords: the compressed steel element, corrosion deterioration, reliability.

Вступ

Зниження надійності та довговічності споруд і будівель під час їх експлуатації відбувається при виникненні дефектів частин конструкцій [2]. Під дефектом розуміють кожну окрему невідповідність конструкції вимогам, встановлених нормативною документацією. Одною з причин виникнення дефектів є корозія. Кожний рік 10...12% виплавленого та експлуатуємого металу втрачається внаслідок руйнуючої дії корозії. Розвиток методики нормування впливу корозійного зносу на несучу здатність та термін експлуатації конструкції можливий при подальшому розвитку теорії надійності будівельних конструкцій у поєднанні з інженерним досвідом. Розрахунок конструкцій з врахуванням корозійного зносу ускладнюється стохастичним ненормованим характером проходження процесу корозії.

Аналіз останніх досліджень

У звичайній атмосфері метал конструкцій нестійкий: навіть у відносно чистому повітрі сільської місцевості він покривається іржою. У забрудненій атмосфері міст залізо кородує дуже швидко та його необхідно ретельно захищати від корозії. Швидкість корозії у залежності від ступеня агресивності навколишнього середовища змінюється від 0,05 до 1,6 мм/рік [1]. Розрізняють різні типи корозії у залежності від зміни внутрішньої структури металу. Головні з них – рівномірна, нерівномірна, місцева, піттінгова, точкова корозії, корозійне розтріскування. Під дією корозії елементи конструкції втрачають початкову площу, тобто й несучу здатність.

Оцінка довговійності конструкцій суттєвим чином залежить від правильності вибору моделі, здатної відобразити вплив агресивного середовища на основні процеси, що протікають в структурі металу. У самій загальній постановці процеси зносу представляються у вигляді нестаціонарних випадкових функцій часу [4]. На вид реалізації зношування впливають умови експлуатації (наприклад атмосферна, підземна чи підводна корозії), фізико-хімічна структура матеріалу та технологія його виготовлення [3].

Розрахунок надійності елементів кільцевого перерізу із заданою початковою товщиною стінки, що піддається корозійному зносу при випадковому характеру механічних властивостей, досить детально викладений в [4]. Також тут розглядається кругова циліндрична оболонка, як ділянка магістрального трубопроводу, при дії внутрішнього тиску та корозії.

Встановлено, що напруження розтягу прискорюють розвиток корозії. Двоосність напруженого стану в зоні сполучення елементів конструкції і в зонах біля зварних швів сприяє розвитку локальних корозійних ушкоджень у вигляді піттінгів і корозійних плям [5].

У даній роботі за **мету** ставиться дослідження факторів корозійного зносу, які впливають на надійність коротких сталевих елементів з швелерів, для яких аналізується як рівномірна, так і нерівноірна корозії.

Надійність при рівномірному корозійному зносі

Розглядається центрально-стиснутий елемент квадратного перерізу, що складається з двох зварених швелерів, початковою товщиною d_0, довжиною l під дією детермінованого навантаження F, що знаходиться в умовах атмосферного корозійного зносу. Елемент має шарнірне закріплення по кінцям та вважається, що довжина l у часі залишається постійною. Потрібно оцінити надійність цього елементу при випадковому характеру механічних властивостей (границі текучості сталі, для якої приймається нормальний закон розподілу). Швидкість корозії розглядається як детермінована чи випадкова величина.

Напруження, що виникають від постійного у часі навантаження в елементі, рівні:

$$s_0 = F / A_0,$$

де

A_0 – площа поперечного перерізу елементу.

У процесі корозії поперечний переріз конструкції підлягає зміні таким чином, що всі відносні відстані між точками перерізу зменшуються за час t по одному й тому ж закону $\varphi(t)$. Тут $\varphi(t)$ – безрозмірна функція, що характеризує корозійний знос. До функції $\varphi(t)$ пред'являються наступні вимоги: $\varphi(0)=1$; $\varphi(\infty)=0$; $\varphi(t)>0$; $\varphi'(0) < 0$.

Тоді товщина стінки

$$d = d_0 \bullet \varphi(t). \qquad (1)$$

Нормальні напруження в перерізі елементу ростуть у часі по закону $s = s_0 / \varphi^2(t)$.

Умова безвідмовної роботи приймається у вигляді

$$s(t) \le R_T \text{ або } s_0 / \varphi^2(t) \le R_T. \qquad (2)$$

Зменшення товщини конструкції внаслідок корозійного зносу

$$d = d_0 - \delta_0 \cdot \varphi(t) \qquad (3)$$

де $\delta_0 \cdot \varphi(t) = \delta_i$ – глибина проникнення корозії за i років.

Підставляючи в (1), після інтегрування, отримаємо:

$$d = d_0 \cdot \left[1 - \frac{v_0}{\alpha \cdot d_0} \cdot \left(1 - e^{\alpha \cdot t}\right)\right] = d_0 \cdot \varphi(t), \qquad (4)$$

де

$$\varphi(t) = 1 - \frac{v_0}{\alpha \cdot d_0} \cdot \left(1 - e^{\alpha \cdot t}\right); \quad \frac{v_0}{\alpha \cdot d_0} - 1 - \varepsilon \ ;$$

ε – мале число.

При нормальному законі розподілу величини R_T інтеграл, що визначає надійність елементу, підраховується за допомогою функції Лапласа $\varphi(z)$

$$P\left[R_T > s_0 / \varphi^2(t)\right] = \\ = \int_{s_0/\varphi^2(t)}^{\infty} P_{R_T}(x)dx = \frac{1}{2} \cdot \left[1 - \varphi(z)\right], \qquad (5)$$

де $z = \left[s_0 / \varphi^2(t) - \overline{R}_T\right] / \sigma_{R_T}$.

Використовуючи (5) для кожної із моделей корозії, після відповідних перетворень можна підрахувати значення імовірності безвідмовної роботи конструкції до моменту часу t.

Наступний етап задачі, що розглядається, складається у оцінці надійності конструкції при випадковому характері початкової швидкості корозії. Підставивши (4) у (2), отримаємо:

$$v_0 \le \frac{d_0 \cdot \alpha \cdot \left(1 - \sqrt{s_0 / R_T}\right)}{1 - e^{-\alpha \cdot t}}. \qquad (6)$$

Умовна функція надійності для нерівності (6) (для $t=n$ років) при фіксованому значенні R_T має вигляд

$$P_1 \cdot \left(n / R_T\right) = \\ = P_V \cdot \left[d_0 \cdot \alpha \cdot \left(1 - \sqrt{s_0 / R_T}\right) / \left(1 - e^{-\alpha \cdot n}\right)\right],$$

де $R_T \in [s_0, \infty]$.

Імовірність безвідмовної роботи конструкції при випадковому значенні границі текучості визначається у вигляді безумовної функції надійності

$$P_1 \cdot (n) = \\ = P_0 \cdot \int_{s_0}^{\infty} P_{V_0} \cdot \left[\frac{d_0 \cdot \alpha \cdot \left(1 - \sqrt{s_0 / R_T}\right)}{\left(1 - e^{-\alpha \cdot n}\right)} \right] \times \quad (7) \\ \times P_{R_T}(x) dx$$

де
$P_0 = P(R_T > s_0) = 1 - P_T(s_0)$ імовірність того, що при $t = 0$ напруження $s_0 < R_T$.

Формула (7) дозволяє оцінити надійність елементів в умовах рівномірної корозії при нормальному законі розподілу випадкової величини v_0.

Надійність при нерівномірному зносі.

Розподілення числа каверн на одиницю площі.
Не дивлячись на те, що для будівельних металевих конструкцій розповсюдженим типом корозії вважається рівномірна, немало важливе значення у забезпеченні їх надійності та довговічності має врахування і місцевої корозії. Місцева корозія приводить до локальних руйнувань, які проявляються у вигляді корозійних каверн, плям, піттінгів і т.д., розташованих випадковим чином по поверхні конструкції. Час появи корозійних каверн та піттінгів теж має випадковий характер. Небезпечність відмов у тонкостінних конструкцій безпосередньо пов'язана з величиною язв і піттінгів. Тому для проектування необхідне прогнозування розмірів піттінгів і язв та густина їх розміщення на поверхні конструкції.

Приймаються наступні передумови для поєднання корозійних каверн: а) події, пов'язані з появою різного числа каверн на різних інтервалах часу, є незалежними; б) інтенсивність імовірності появи корозійної каверни у будь-якому інтервалі часу t пропорційна довжині цього інтервалу з коефіцієнтом пропорційності μ; в) імовірність появи двох та більше подій за безкінечно малий проміжок часу є безкінечно малою величиною більш високого порядку.

Одночасне виконання всіх трьох перерахованих передумов має місце для найпростішого потоку подій, яке носить також назву однорідних процесів Пуассона. Такий процес математично може бути описаний за допомогою системи диференційних рівнянь:

$$\frac{dP_0}{dt} = \mu \cdot P_0(t), \ldots, \frac{dP_n}{dt} = \mu \cdot \left[P_{n-1} - P_n\right];$$

тут $P_n(t)$ – імовірність появи до моменту t_n корозійних каверн.
Початковими умовами для цієї системи рівнянь є

$$P_n(t) = \begin{cases} 1, npu(n = 0) \\ 0, npu(n = 1;2;\ldots) \end{cases}. \quad (8)$$

Єдине вирішення цієї системи з даними початковими умовами (8) має вигляд:

$$P_n(t) = \left[\mu(t - t_0)\right]^n / n!! \cdot e^{-\mu \cdot (t - t_0)}. \quad (9)$$

Це рівняння є пуассоновським розподілом і дає імовірність того, що в момент $t \geq t_0$ система знаходиться у стані n ($n = 1, 2, 3, \ldots$). Якщо число каверн, що з'являється у деякому інтервалі часу, підчиняється пуассоновському розподілу, то час до появи наступної каверни має експонентний розподіл. Звідки слідує, що $P(t) = e^{-\mu \cdot t}$.

Обробка результатів натурних досліджень підтверджує пуассоновський розподіл густини розміщення піттінгів [4]. Маючи статистичні дані про розподіл числа піттінгів на одиницю площі поверхні, а також розподіл значень глибини піттінгів, можна визначити імовірність появи наскрізного отвору у тонкостінній конструкції. Знання закону розподілу максимальних значень глибини піттінгів дозволяє визначити час життя конструкції до появи наскрізного отвору.

Застосування теорії екстремальних значень для описання піттінгової корозії.

Для піттінгової корозії найбільш важливими характеристиками є максимальна глибина проникнення піттінгу, діаметр та площа каверни у перерізі елементу. *Глибина каверни* δ_k для елементу, що має товщину d_0, змінюється в інтервалі $[0, d_0]$, тобто випадкова величина глибини каверни розподілена на цьому кінцевому інтервалі. Вважається, що ця випадкова величина має рівномірний розподіл на відрізку $[0, d_0]$, тобто

$$P_\delta(x) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } x < 0 \\ x/d_0, & \text{якщо } 0 \leq x \leq d_0 \\ 1, & \text{якщо } x > d_0 \end{cases} \quad (10)$$

Розподіл максимуму $\delta_n = max\ \{x_1, x_2, ..., x_n\}$, тобто максимальної глибини для n каверн, як відомо із теорії екстремальних значень, можна прийняти експонентним для наступного типу

$$P_{\delta_n}(x) = \begin{cases} e^{-n\cdot(d_0-x)}; 0 \le x \le d_0 \\ 1; x > d \end{cases} . \quad (11)$$

Наступною важливою характеристикою каверни є її *діаметр* d_k, припускаючи, що каверна має циліндричну форму. Розглядається елемент з поперечним перерізом у вигляді швелера. Тоді можливою областю зміни діаметру каверни є максимальний розмір поперечного перерізу тобто висота стінки швелера h. Приймається, що випадкова величина y_i діаметру каверни розподілена рівномірно в інтервалі $[0;h]$.

$$P_\partial(y) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } y < 0 \\ y/h, & \text{якщо } 0 < y < h \\ 1, & \text{якщо } y > h \end{cases} \quad (12)$$

Розподіл максимуму $d_n = max\ \{y_1, y_2, ..., y_n\}$, тобто максимального діаметру для n каверн має вигляд:

$$P_{d_n}(y) = \begin{cases} e^{-n\cdot(h-y)}; 0 \le y \le h \\ 1; y > h \end{cases} . \quad (13)$$

Третьою характеристикою каверни є її *площа* A_k. У задачах надійності конструкцій, що пошкоджені піттінговою корозією, важливо знати максимальне значення площі A_k. Це питання наштовхується на труднощі, не зовсім визначені у теорії порядкових статистик. Максимальному значенню δ_n не обов'язково відповідає максимальне значення d_n. Якщо прийняти, що це так, то розрахунок буде проведений у запас надійності, тобто імовірності безвідмовної роботи, отримувані у цьому випадку, будуть меншими за дійсні. Можна прийняти ще два варіанти розрахунку – використовувати в одному варіанті розподіл максимального значення глибини δ_n та розподіл величини d однієї каверни, у другому варіанті – розподіл для δ_k та максимального значення діаметру d_n. Закон розподілу $P_A(x)$ записується у трьох випадках:

1) $P_{\delta n}(x) = e^{-n\cdot(d_0-x)}; x \in [0; d_0]$;
$P_d(y) = y/h; 0 \le y \le h \cdot$

Вираз визначення величина площі каверни A_k записується в залежності від глибини каверни x та діаметру каверни y: $A_k = x \cdot y$. Максимальне значення площі каверни A_k буде при $x=d_0$ та $y=h$. Вигляд розподілу:

$$P_{Ak}(A) = \int P(d < A/x) dP_{\delta n}(x) =$$
$$= (A \cdot n/h) \cdot \int_0^{d_0} e^{-n\cdot(d_0-x)} \cdot x^{-3/2} dx \quad , \quad (14)$$

тобто A_k розподілена рівномірно на інтервалі [0;A].

2) $P_\delta(x) = x/d_0; x \in [0; d_0]$;
$P_{dn}(y) = e^{-n\cdot(h-y)}; y \in [0; h]$.

У цьому випадку розподіл A_k має вигляд:

$$P_{Ak}(A) = \frac{1}{d_0} \cdot \int_0^{d_0} e^{-n\cdot(h-y)-A/x} dx . \quad (15)$$

3) $P_{\delta n}(x) = e^{-n\cdot(d_0-x)}; x \in [0; d_0]$;
$P_{dn}(y) = e^{-n\cdot(h-y)}; y \in [0; h]$.

тоді

$$P_{An}(A) = \int_0^{d_0} e^{-n\cdot(h-A/x)} de^{-n(d_0-x)} . \quad (16)$$

Цей випадок йде в запас надійності. Характеристики процесу корозії, що розглядалися, можуть бути використані у різних задачах надійності тонкостінних конструкцій в умовах корозійного зносу.

Висновки

Надійність сталевих елементів при рівномірному корозійному зносі, яку можна визначити по формулі (7), залежить від початкової товщини елементу, значення границі текучості матеріалу, початкової швидкості корозії. При нерівномірному корозійному зносі, розглядаючи наприклад піттінгову корозію, важливими характеристиками є максимальні значення глибини проникнення піттінгу і його діаметру, та сполучення їх випадкових величин при визначенні площі каверни у перерізі елементу. Забетонувавши сталевий елемент, виконаний з двох

швелерів, утворюється сталебетонний. Корозія металевої оболонка стає тільки зовнішньою, а отже односторонньою, тобто надійність у часі такого елементу порівняно з металевим є вищою.

Література

1. Бахвалов Г.Т., Турковская А.В. Коррозия и защита металлов. – М.: Металлургиздат, 1959. – 312с.
2. ДБН 362-92. Оцінка технічного стану сталевих конструкцій виробничих будівель і споруд, що знаходяться в експлуатації. Укрархбудінформ, 1992. – 45с.
3. Експлуатаційні властивості і захист від корозії будівельних металоконструкцій: Розробки і практичний досвід забезпечення довговічності: Прес- досьє НВВЛ \"Антикор-Дон\" Донбаської національної академії будівництва і архітектури / В.П. Корольов (ред.), О.М. Гібаленко (уклад.) – Донецьк : Норд-Пресс, 2005. – 45с.
4. Райзер В.Д. Расчет и конструирование надежности строительных конструкций. – М.: Стройиздат, 1995. – 352с.
5. Югов А.М. Технічна діагностика та оцінка залишкового ресурсу експлуатованих металевих конструкцій: Автореферат дис. д-ра техн. наук. – Макіївка, 2004. – 36с.

Семко Олександр Володимирович є професором кафедри «Конструкції із металу, дерева і пластмас» Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. Член Української асоціації з металевих конструкцій. Наукові інтереси: металеві конструкції, проектування та надійність сталебетонних конструкцій.

Гасенко Антон Васильович є аспірантом кафедри «Конструкції із металу, дерева і пластмас» Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. Наукові інтереси: надійність сталебетонних стиснутих елементів.

Семко Александр Владимирович является профессором кафедры «Конструкции из металла, дерева и пластмасс» Полтавского национального технического университета имени Юрия Кондратюка. Член Украинской ассоциации по металлическим конструкциям. Научные интересы: металлические конструкции, проектирование и надежность сталебетонных конструкций.

Гасенко Антон Васильевич является аспирантом кафедры «Конструкции из металла, дерева и пластмасс» Полтавского национального технического университета имени Юрия Кондратюка. Научные интересы: надежность сталебетонных сжатых элементов.

Semko Oleksandr Vladimirovich is a Professor of the Chair of Metal, Wood and Plastic Structures at Poltava National Technical University named in honour of Uriy Kondratuk. He is a member of Ukrainian Association of Metal Construction. His research interests include the metallic structures and design and reliability of steel-concrete composite structures.

Gasenko Anton Vasil'evich is Post-graduate student of the Chair of Metal, Wood and Plastic Structures at Poltava National Technical University named in honour of Uriy Kondratuk. His research interests include the reliability of steel-concrete central compressed composite structures.