

УДК 539.3

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ФОРМИ ПЕРЕРІЗУ НА ДОВГОВІЧНІСТЬ СТРИЖНІВ В АГРЕСИВНОМУ СЕРЕДОВИЩІ ПРИ СКЛАДНОМУ ВИГІНІ

А.П. Дзюба<sup>1</sup>,  
д-р техн. наук, проф.,

О.А. Дзюба<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Дніпропетровський національний університет ім. О. Гончара, Дніпропетровськ, Україна

Побудовано алгоритм комп'ютерного моделювання корозійної деградації поверхні стержневих елементів в умовах одночасного впливу агресивного середовища та складного вигину з використанням математичних моделей корозії, що враховують взаємозв'язок напружено-деформованого стану та швидкості корозійного ураження. Досліджено вплив злитності перетину, що характеризує величину відкритої поверхні матеріалу, яка контактує з агресивним середовищем, на параметри довговічності стержневого елемента. Приведені та проаналізовані картини корозійного ураження та залежності, що характеризують зменшення площ, збільшення напружень і зміну периметра перетинів різної конфігурації в часі.

**Ключові слова:** корозійне ураження, стержневі елементи, алгоритм комп'ютерного моделювання.

**Вступ. Постановка задачі.** Дослідження міцності та надійності елементів конструкцій сучасної техніки, які функціонують в умовах одночасної дії екстремального термосилового навантаження та агресивного середовища, є досить актуальними [1 – 5]. Особливістю цієї проблеми є те, що у навантаженому елементі конструкції в умовах корозії існує два взаємопов'язаних кінетичних процеси – деформування та корозійного зношування [6, 7]. При цьому напруження на поверхні матеріалу викликає прискорення корозійної деградації, що призводить до зміни (зменшення) геометричних розмірів перерізу, а це, в свою чергу, веде до перерозподілу (у сторону збільшення) напружень і деформацій в елементах конструкцій. Вочевидь також, що чим більшою є поверхня (периметр перерізу), тим більшою виявляється втрата матеріалу елемента конструкції, а отже, і прискорення (у часі) збільшення напружень і подальшого корозійного ураження конструкції.

Таким чином, довговічність конструкцій, взаємодіючих із агресивним середовищем, у значній мірі залежить від конструктивної форми її окремих елементів і у цьому випадку логічним було б застосування елементів конструкцій з якомога меншою площею поверхні (або периметру перерізу), і, відповідно, із меншою втратою матеріалу у часі, внаслідок корозійної деградації.

У той же час широко застосовувані стержневі елементи конструкцій часто мають перерізи раціональної форми з точки зору забезпечення міцності при мінімумі витрат матеріалу у вигляді двутраврів, швелерів, кутників та інших тонкостінних профілів, які у зазначеному вище сенсі недостатньо стійкі до впливу агресивного оточуючого середовища, оскільки мають більшу площу поверхні.

Очевидною в таких умовах є необхідність проведення відповідного порівняльного аналізу раціональних форм перерізів і оцінки довговічності елементів конструкцій, функціонуючих в агресивному середовищі.

У поданій статті дослідження зазначених аспектів проблеми здійснюється шляхом розробки алгоритму комп'ютерного моделювання корозійної деградації поверхні стрижнів, які знаходяться в умовах агресивного середовища і складного вигину, та подальшого чисельного аналізу впливу злитності перерізу (що характеризує величину відкритої поверхні матеріалу, контактуючого з агресивним середовищем, і представляє собою [6] відношення периметра  $L$  до площі  $F$  перерізу у вигляді  $C=L/F$ ) на параметри довговічності елементів конструкції.

**Алгоритм чисельного моделювання корозійної деградації.** У загальному випадку математична модель корозійного зношування, що враховує вплив напружено-деформованого стану на процес корозійного руйнування, приймається у вигляді

$$\frac{d\delta}{dt} = f(\delta, \sigma, \bar{V}, \bar{X}, t); \quad \delta|_{t=t_0} = 0, \quad (1)$$

де  $\sigma(\bar{X}, t)$  напруження, а  $\delta(\bar{X}, t)$  глибина шару корозійного ураження у точці  $\bar{X}(x, y, z)$  на поверхні досліджуваного елемента, відповідно;  $\bar{V}$  – вектор параметрів, які характеризують ступінь корозійного опору матеріалу та рівень агресивності зовнішнього середовища;  $t$  – час.

Найбільш відомими моделями, які враховують вплив напружень на швидкість корозії у розрахунках на міцність, є моделі В.М. Долинського та Є.М. Гутмана [1, 2, 6], які подаються, відповідно, у вигляді:

$$\frac{d\delta}{dt} = \varphi(t)(1 + K\sigma); \quad (2,а)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = V(t) \exp(\gamma\sigma), \quad (2,б)$$

де  $\varphi(t)$ ,  $V(t)$  – відомі функції (які, у зв'язку зі складністю їх експериментального визначення, у більшості випадків подаються довідковими сталими  $V_0$ ), що характеризують корозійне зношування

конкретного напруженого матеріалу у певному агресивному середовищі;  $K$ ,  $\gamma$  – коефіцієнти, що виражають ступінь впливу напружень на швидкість корозії.

Таким чином, задача розрахунку довговічності конструктивного елементу зводиться до інтегрування рівняння математичної моделі корозійного ураження у вигляді (2,а) або (2,б) з метою відшукування змін  $\delta(\overline{X}, t)$  положення кожної точки  $X(x, y, z)$  поверхні матеріалу (контур перетину) в процесі корозійної деградації від початкового  $t = t_0$  до деякого кінцевого (критичного)  $t = t^*$  часу існування конструкції. Критичний стан конструкції визначається досягненням граничного  $\sigma_{кр}$  для даного матеріалу значення максимального напруження  $\sigma(\overline{X}, t)$  у результаті зменшення жорсткісних параметрів перерізу, внаслідок корозійного пошкодження.

Один  $k$ -й крок інтегрування початкової задачі (2) може бути поданий у вигляді:

$$\delta^k = \delta^{k-1} + f^{k-1}(\delta^{k-1}, \overline{V}, X^{k-1}, t^{k-1}) \cdot \Delta t; \quad (k=1, 2, 3, \dots). \quad (3)$$

Слід зазначити, що вибір методу розв'язування початкової задачі для рівнянь математичної моделі корозії (2) принципового впливу на структуру алгоритму не має, оскільки на кожному кроці використовується лише результат цього інтегрування у вигляді зміни  $\Delta \delta_i^k = \delta_i^k - \delta_i^{k-1}$  положення деякої  $i$ -ої точки з координатами  $\overline{X}^k(x_i, y_i, z_i)$  на поверхні матеріалу за час  $\Delta t$  для обчислення нової конфігурації поверхні (контур перерізу) в залежності від величини та напрямку корозійного зношування.

Побудова алгоритму комп'ютерного моделювання корозійного зношування поверхні розглядається далі для випадку плоского поперечного перерізу довільної форми.

Для обчислення геометричних характеристик і напружень, які далі в результаті дії корозії змінюються у часі, контур поперечного перетину стрижня дискретизується шляхом його рівномірного в початковий момент часу  $t = t_0$  розбиття кінцевим набором  $n$  точок з координатами  $(x_i, y_i)$ ,  $(i = \overline{1, n})$ , де  $x_{n+1} = x_1$ ;  $y_{n+1} = y_1$  та наступної апроксимації контуру лінійними сплайнами [8, 9]. Кількість вузлових точок визначається нерегулярністю самого контуру, нерівномірністю корозійного впливу та діючих напружень.

При цьому переріз розміщується у першому квадранті деякої нерухомої декартової системи  $XOY$ , що розташовується у площині

перетину, а контурні точки перетину нумеруються при обході контуру за годинниковою стрілкою так, щоб матеріал перетину весь час залишався праворуч. При наявності отворів і технологічних порожнин створюються уявні розрізи і аналогічним чином виконується послідовний обхід контуру цих отворів.

Такий підхід дозволяє побудувати ефективний алгоритм відшукування усіх геометричних характеристик перетину довільної конфігурації [8, 9]. Очевидно, що функціями координат точок контуру  $(x_i^k, y_i^k)$ ,  $(i = \overline{1, n})$ , що змінюються у часі в системі координат  $XOY$ , будуть при цьому площа поперечного перерізу  $F^k$ , моменти інерції  $I_x^k, I_y^k, I_{xy}^k, I_{kp}^k$ , координати центру ваги перерізу  $(x_0^k, y_0^k)$  та кут нахилу головних центральних осей  $\alpha^k$ .

Приймається, що на  $k$ -ому кроці інтегрування кожна окрема точка контуру отримує зміщення у глибину матеріалу перпендикулярно контуру перетину, а величина корозії в окремій точці поверхні не залежить від величини корозії у сусідніх точках. Враховуючи, що відстань між вузловими точками є достатньо малою, а контур між ними апроксимується лінійними сплайнами, можна припустити, що і після корозійного зношування на  $k$ -му кроці лінії апроксимуючого контуру між вузловими точками залишаться прямими. У цьому випадку результуюче зміщення вузлових точок буде здійснюватися за поданою на рис. 1 схемою.

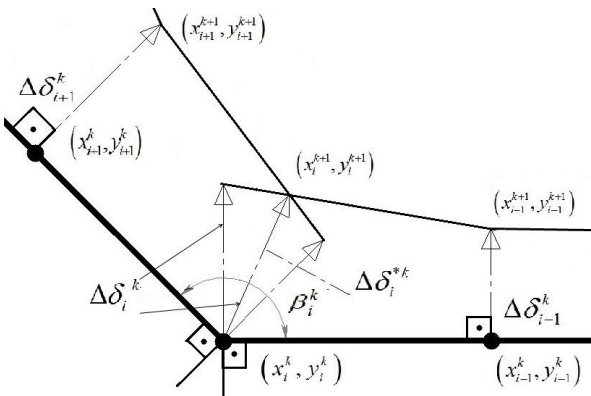


Рис. 1. Розрахункова схема для обчислення величини та напрямку корозійного ураження у довільній точці контуру

Тут  $\Delta\delta_i^k = \delta_i^k(x_i, y_i) - \delta_i^{k-1}(x_i, y_i)$ ,  $\{i = \overline{1, n}\}$ , а підсумкова величина та напрямок зміщення  $\Delta\delta_i^{*k}$   $i$ -ої точки контуру за час  $\Delta t$  на  $k$ -ому кроці інтегрування обчислюється з геометричних співвідношень [9] з урахуванням відомої (в процесі обчислення геометричних характеристик перетину) величини кута  $\beta_i^k$ , утвореного двома лінійними апроксимуючих контур прямими, як функціями координат вузлових точок контуру.

Слід зазначити, що довжина контуру перетину в процесі корозійного зношування змінюється. Так, зовнішній периметр опуклого перетину зменшується, а довжина контуру внутрішніх кутів, порожнин, вирізів, отворів, як правило, збільшується. При цьому рівномірне розбиття контуру перетину в початковий момент часу вже на перших кроках алгоритму стає нерівномірним у зв'язку з нерівномірністю корозійного зношування і, як наслідок, зміною відстані між вузловими точками контуру.

Тут в програмній реалізації розв'язування задачі виникає ряд проблем, пов'язаних з необхідністю виключення з розгляду в процесі роботи алгоритму на  $k$ -му кроці точок контуру, відстань між якими стає меншою сумарної величини корозійного ураження сусідніх точок, оскільки в подальшому це може (в залежності від величини і напрямку  $\Delta\delta_i^k$ ) привести до можливості «забігання» вузлових точок за уявний контур наступного наближення. З іншого боку, можливою може виявитися і необхідність введення нових контурних точок, якщо відстань між ними збільшується, оскільки це може призвести до втрати необхідної точності дискретного подання контуру.

Зазначені труднощі в реалізації процесу цих перетворень, включаючи ідентифікацію і перенумерацію відповідних точок контуру, долаються програмним шляхом і, як результат, побудовані в роботі засоби реалізації алгоритму дозволяють моделювати корозійне зношування стрижня довільного поперечного перерізу до його повної деградації.

Нормальні напруження в точках  $(x_i, y_i)$ ,  $(i = \overline{1, n})$  поперечного перетину стрижня при складному згинанні (для обчислення складових правої частини (3)) обчислюються в головних осях інерції з використанням відомих залежностей:

$$\sigma = \left| \mp \frac{M_V(x_i, y_i)u(x_i, y_i)}{I_V(x_i, y_i)} \pm \frac{M_U(x_i, y_i)v(x_i, y_i)}{I_U(x_i, y_i)} + \frac{N(x_i, y_i)}{F(x_i, y_i)} \right|. \quad (4)$$

При необхідності (з метою, наприклад, врахування концентрації напружень або інших можливих особливостей розподілу напружень в

перерізі), обчислення напружень на контурі перерізу слід здійснювати методами теорії пружності або за допомогою МСЕ.

Тут  $M_U$ ,  $M_V$ ,  $N$  – згинальні моменти в головних осях і поздовжнє зусилля;  $I_U = I_{x_0} \cos^2 \alpha + I_{y_0} \sin^2 \alpha + I_{x_0 y_0} \sin 2\alpha$ ;  $I_V = I_{x_0} \sin^2 \alpha + I_{y_0} \cos^2 \alpha - I_{x_0 y_0} \sin 2\alpha$ ;  $\text{tg}(2\alpha) = 2I_{x_0 y_0} / (I_{y_0} - I_{x_0})$ ;  $I_{x_0}$ ,  $I_{y_0}$ ,  $I_{x_0 y_0}$ ,  $I_U$ ,  $I_V$  – центральні і головні моменти інерції в осях  $XOY$  и  $UO_0V$ , відповідно;  $I_{x_0} = I_x - y_0^2 F$ ;  $I_{y_0} = I_y - x_0^2 F$ ;  $I_{x_0 y_0} = I_{xy} - x_0 y_0 F$ ;  $x_0, y_0$  – координати центру ваги перерізу в початкових осях  $XOY$ ;  $F$  – площа перерізу;  $u_i$ ,  $v_i$  – координати вузлових точок перетину в головній системі, які пов'язані з координатами точок вихідної системи у вигляді:

$$u_i = (x_i - x_0) \cos \alpha + (y_i - y_0) \sin \alpha; \quad v_i = -(x_i - x_0) \sin \alpha + (y_i - y_0) \cos \alpha. \quad (5)$$

Враховується, що значення згинальних моментів, які обчислюються з використанням відомих залежностей:

$$M_U = M_{x_0} \cos \alpha + M_{y_0} \sin \alpha; \quad M_V = -M_{x_0} \sin \alpha + M_{y_0} \cos \alpha, \quad (6)$$

також змінюються в процесі роботи алгоритму, оскільки розташування центру ваги перерізу  $x_0, y_0$ , як початку координат центральної і головної системи, а також кут повороту головних осей є функціями змінних в часі координат контурних точок  $(x_i, y_i), (i = \overline{1, n})$ . У співвідношенні (6)  $M_{x_0}$ ,  $M_{y_0}$  – згинальні моменти в центральних осях, які додатні при повороті осі за годинниковою стрілкою.

Таким чином, всі геометричні характеристики поперечного перерізу, у загальному випадку довільної форми, і напруження в його контурних точках виявляються відомими функціями  $(x_i, y_i), (i = \overline{1, n})$ , що дозволяє обчислити величини і напрямки корозійного пошкодження в кожній з вузлових точок контуру перетину (поверхні) стрижневого елемента і визначити його нову конфігурацію на наступному кроці інтегрування відповідного рівняння обраної моделі корозії за часом відповідно до (3).

При підготовці до наступного кроку алгоритму відшукування зміни розмірів поперечного перетину в результаті корозійної деградації необхідно виконати зворотні перетворення для обчислення координат вузлових точок у вихідній системі координат  $XOY$ :

$$x_i^k = x_0^k + u_i^k \cos \alpha^k - v_i^k \sin \alpha^k; \quad y_i^k = y_0^k + u_i^k \sin \alpha^k + v_i^k \cos \alpha^k \quad (7)$$

і повторити процес.

Таким чином, для визначення основних параметрів процесу комп'ютерного моделювання корозійного пошкодження поверхні

поперечного перерізу здійснюється синхронний (на кожному кроці за часом) перехід від вихідної нерухомої системи координат  $XOY$  до центральної  $X_0O_0Y_0$  і далі до головної  $UO_0V$  системи, розташування якої згодом змінюється, і після обчислення розміру і напрямку корозійного ураження в точках контуру поперечного перерізу  $k$ -го кроку інтегрування, в зворотному напрямку.

**Результати числових досліджень.** З використанням розробленого алгоритму були отримані числові результати і проведено порівняльний аналіз зміни в часі максимальних напружень, периметра і площі (швидкості втрати матеріалу) перетинів різної форми (рис. 2) стрижневого елемента, що знаходиться в умовах складного (косого) вигину і одночасного впливу агресивного середовища: а) для випадку їх рівної початкової площі і б) з рівними значеннями максимальних напружень в початковий момент часу.

На рис. 2 приведені картини зміни в часі в результаті корозійного пошкодження конфігурацій перетинів рівної площі  $F^* = 1470 \text{ мм}^2$  прямокутної, круглої, коробчатої, двотаврової і швелерної форми в умовах складного вигину під дією згинальних моментів  $M_{x_0} = 9 \cdot 10^3 \text{ Н*м}$ ;

$M_{y_0} = 3 \cdot 10^3 \text{ Н*м}$  і поздовжньої сили  $N = 1,5 \cdot 10^4 \text{ Н}$ .

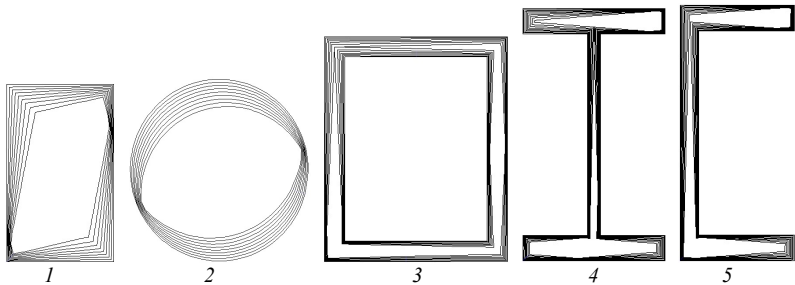


Рис. 2. Картини корозійного ураження поверхні матеріалу перетинів різної форми рівної у початковий момент часу площі при складному згинанні

Для демонстрації підходу прийнята модель корозійного ураження В.М. Долинського (2, а) для деякого "умовного" агресивного середовища з параметрами  $V_0 = 0,001 \text{ м/рік}$ ;  $K = 0,02 \text{ Па}^{-1}$  за час  $0 \leq t \leq t^*$ ;  $t^* = 4$  роки. Вкладені контури перетинів на рис. 2 зображують конфігурації цих перетинів у послідовні моменти часу  $t_k = k \cdot t^* / 8$ ,  $\{k = \overline{0,8}\}$ , тобто через кожні півроку. Основні розміри перетинів обрані наступними: ширина і

висота прямокутного перетину  $a_1 = 0,0297\text{м}$ ;  $b_1 = 0,0495\text{м}$ ; діаметр круглого:  $d_2 = 0,0432\text{м}$ ; ширина, висота і товщина стінки пустотілого прямокутного перетину:  $a_3 = 0,0575\text{м}$ ,  $b_3 = 0,0703\text{м}$ ,  $h_3 = 0,0064\text{м}$ ; висота двотавра і товщина стінки, ширина і товщина його полиці:  $a_4 = 0,0545\text{м}$ ,  $h_4 = 0,005\text{м}$ ,  $b_4 = 0,099\text{м}$ ;  $\delta_4 = 0,010\text{м}$ ; висота швелера і товщина стінки, ширина і товщина його полиці  $a_5 = 0,0446\text{м}$ ,  $h_5 = 0,0075\text{м}$ ,  $b_5 = 0,099\text{м}$ ,  $\delta_5 = 0,0098\text{м}$ , відповідно. Для критичного напруження було прийнято значення  $\sigma_{кр} = 200\text{МПа}$ .

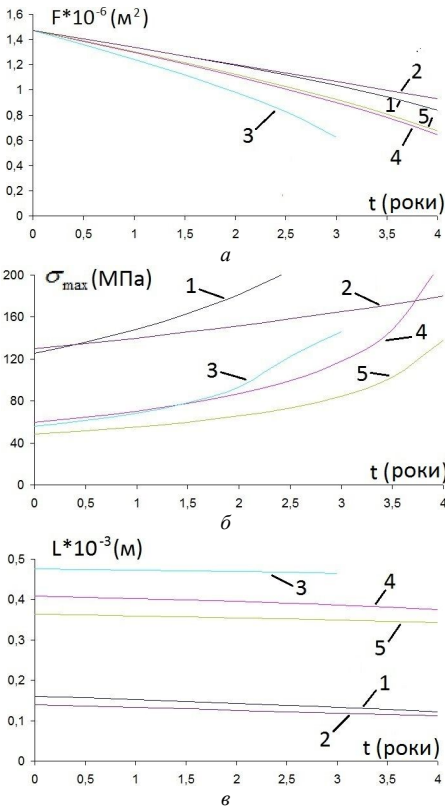


Рис. 3. Графіки зміни в часі: (а) - площі  $F$ ; (б) - максимальних напружень на контурі; (е) - периметра  $L$  перетинів (рис. 2) рівної (в початковий момент) площі

На рис. 3, а, б, в подані, відповідно, залежності зміни в часі площі  $F$ , максимальних напружень  $\sigma_{\max}$  і периметра  $L$  перетинів (рис. 2) рівної у початковий момент площі  $F^* = 1,47 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ , де номери ліній на рис. 3 відповідають номерам перетинів на рис. 2. Коефіцієнти злитності  $C = L/F$  для поданих на рис. 2 перетинів виявилися наступними:  $C_1 = 0,109$ ;  $C_2 = 0,095$ ;  $C_3 = 0,324$ ;  $C_4 = 0,278$ ;  $C_5 = 0,248$ .

Аналогічні результати для випадку перетинів такої ж форми (див. рис. 2), але з однаковими в початковий момент часу значеннями максимальних нормальних напружень  $\sigma_{\max}$  на контурі перетинів подані на рис. 4. Розміри перетинів були підібрані із умови рівності початкових



значень  $\sigma^* = 60 \text{ МПа}$   
 максимальних напружень  
 (див. рис.4, б) і виявилися,  
 відповідно, наступними:  
 $a_1 = 0,0384 \text{ м}$ ,  $b_1 = 0,0639 \text{ м}$ ,  
 $d_2 = 0,0568 \text{ м}$ ,  $a_3 = 0,0562 \text{ м}$ ,  
 $b_3 = 0,0688 \text{ м}$ ,  $h_3 = 0,0064 \text{ м}$ ,  
 $a_4 = 0,0545 \text{ м}$ ,  $h_4 = 0,005 \text{ м}$ ,  
 $b_4 = 0,099 \text{ м}$ ;  $\delta_4 = 0,010 \text{ м}$ ,  
 $a_5 = 0,0413 \text{ м}$ ;  $h_5 = 0,0067 \text{ м}$ ,  
 $b_5 = 0,092 \text{ м}$ ,  $\delta_5 = 0,0094 \text{ м}$ .

Із отриманих результатів видно, що, як і слід було очікувати, найбільша втрата матеріалу (площі) в результаті корозійного пошкодження (рис. 3, а) виявляється для перетинів з більшим периметром (рис. 3, в). При цьому перетини стержневих елементів, в залежності від конфігурації, для обраних «умовних» параметрів корозії за 2,2 – 3 роки втрачають від 25 до 40% матеріалу (площі), а максимальні напруження на їх контурі зростають в 1,5 – 3 рази.

Для обраних розмірів перетинів рівної площі і прийнятих параметрів корозійного середовища виявилось (рис. 3, б), що критичні напруження раніше всіх (приблизно через 2,5 роки) були досягнуті для прямокутного перерізу (лінія 1), далі (через 3 роки), не досягнувши критичних значень  $\sigma_{кр}$  втратив суцільність коробчатий перетин (лінія 3). Найбільш «живучими», в даному випадку навантаження, виявилися стрижні з перетином у формі швелера (лінія 5) і круглого поперечного перерізу (лінія 2), що зберегли (при різному рівні максимальних напружень (див. рис. 3, б)) свою несучу здатність через 4 роки, на відміну від стрижня двотаврового поперечного перерізу, для якого через 4 роки сталася втрата суцільності стінки в місці з'єднання з верхньою полицею.

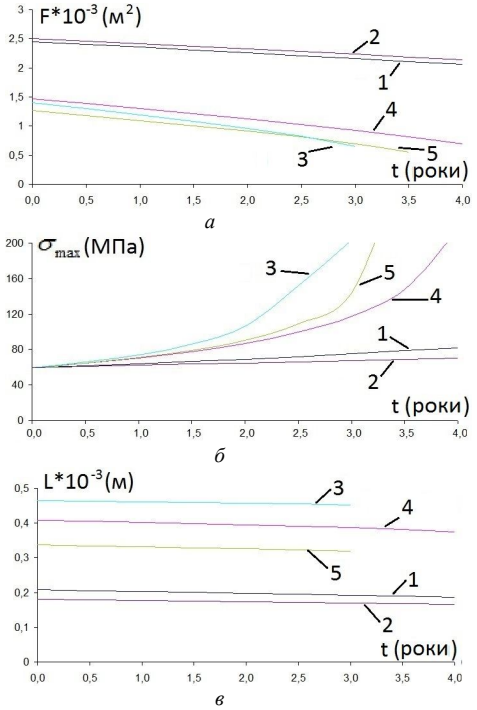


Рис. 4. Графіки зміни в часі: (а) - площі  $F$ ; (б) - максимальних напружень на контурі; (в) - периметра  $L$  перетинів (рис. 2) з рівними (в початковий момент) максимальними напруженнями на контурі

З результатів, поданих на рис. 4, б, випливає, що із розглянутих перетинів з рівними початковими напруженнями, коефіцієнтом запасу міцності 3,3 та коефіцієнтами злитності:  $C_1 = 0,085$ ;  $C_2 = 0,072$ ;  $C_3 = 0,332$ ;  $C_4 = 0,278$ ;  $C_5 = 0,267$ , відповідно, більш «живучими» виявилися стрижні круглого і прямокутного перерізу, хоча витрата матеріалу на їх виготовлення (площа перетину) виявилися майже в 2 рази більшими, ніж для тонкостінних профілів (рис. 4, а). В стрижнях тонкостінного профілю: коробчатого, швелера і двутавра критичні напруження були досягнуті через 3; 3,2 і 3,8 років, відповідно.

**Висновки:** У поданій статті викладено досить універсальний алгоритм комп'ютерного моделювання корозійної деградації поверхні стрижневих елементів в умовах одночасної дії агресивного середовища та складного вигину. Алгоритм дозволяє здійснювати обчислення величини і напрямку зміни положення кожної з контурних (вузлових) точок перетину в процесі корозійного зношування, а також конфігурацію і основні геометричні характеристики поперечного перерізу в довільний момент часу з використанням будь-якої з (однієї з існуючих) математичної моделі корозійного пошкодження поверхні матеріалу.

Наведено результати числового експерименту і порівняльного аналізу змін максимальних напружень, площі і периметра перетинів різної форми в процесі корозійного пошкодження для випадків рівних в початковий момент часу площ і рівних в початковий момент часу максимальних напружень на контурі перетинів. Отримані результати вказують на необхідність аналізу впливу форми перетинів силових елементів на їх довговічність при проектуванні конструкцій, що експлуатуються в умовах впливу агресивного середовища.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРИ

1. Гутман Э.М. Прочность газопроводных труб в условиях коррозионного износа / Э.М. Гутман, Р.С. Зайнулин, А.Т. Шаталов и др. – М., 1984. – 76 с.
2. Долинский В.М. Расчет элементов конструкций, подверженных равномерной коррозии / В.М. Долинский // Исследования по теории оболочек. – Казань, 1976. – Вып.7. – С. 37–42.
3. Карпунин В.Г. Долговечность пластин и оболочек в условиях коррозионного воздействия среды / В.Г. Карпунин, С.И. Клещев, М.С. Корнишин // Прочность и долговечность конструкций. – К., 1980. – С. 38–45.
4. Колесник И.А. Об одном подходе к решению задачи долговечности статически определимых ферм, функционирующих в химически активных средах / И.А. Колесник, Д.Г. Зеленцов, Ю.А. Храпач // Техническая механика. – Д., 2002. – №1. – С. 95–99.
5. Почтман Ю.М. Методы расчета надежности и оптимального проектирования конструкций, функционирующих в экстремальных условиях / Ю.М. Почтман, М.М. Фридман – Д., 1997. – 134 с.

6. *Петров В.В.* Расчет элементов конструкций, взаимодействующих с агрессивной средой / В.В. Петров, И.Г. Овчинников, Ю.М. Шихов. – Саратов, 1987. – 288 с.
7. *Овчинников И.Г.* Тонкостенные конструкции в условиях коррозионного износа (расчет и оптимизация) / И.Г. Овчинников, Ю.М. Почтман. – Д., 1995. – 190 с.
8. *Мяченков В.И.* Расчет составных оболочечных конструкций на ЭВМ / В.И. Мяченков, И.В. Григорьев. – М., 1981. – 216 с.
9. *Дзюба А.П.* Комп'ютерне моделювання корозійної деградації поверхні нерівномірно навантажених елементів конструкцій / А.П. Дзюба, А.П. Колодяжний, О.А. Дзюба // Вісник Дніпропетровського університету: механіка. – 2006. Т. 2. – Вип. 10 – с. 56-64.

*Dzyuba A.P., Dzyuba O.A.*

#### **ANALYSIS OF THE EFFECTS OF THE CROSS SECTION FORM FOR DURABILITY OF BARS UNDER COMPLEX BENDING IN THE AGGRESSIVE ENVIRONMENT**

An algorithm for computer simulation of corrosion degradation of the rod elements surface under conditions of simultaneous influence of aggressive medium and complex bending was constructed. Mathematical models of corrosion taking into account the relationship between the stress-strain state parameters and the corrosion damage rate was used. To calculate the cross section geometrical characteristics and stress values that are change in time as a result of corrosion, the rod cross section contour is discretized by its uniform splitting of a finite set of points and the subsequent approximation of the contour by linear splines. The problem of calculating of structural element durability is solved by integrating of the mathematical model equation of corrosion damage. In this case, the change of the position of the each surface point of the material (cross-section) in the process of corrosion degradation is determined. At each integration step it is assumed that each individual point of the contour get dislocation in the depth of the material in direction perpendicular to the cross section contour and the corrosion magnitude at a single point of the surface does not depend on the corrosion magnitude at adjacent points. The means of algorithm realization constructed in the work allow to model corrosive deterioration of a rod of arbitrary cross-section to its complete degradation. Numerical results, obtained using of the developed algorithm, allows to make a comparative analysis of changes in time of maximum stresses, perimeter and area (material loss rate) of a rod element of various cross section shapes (rectangular, round, square box, channel, and two-tailed) for the case of their equal initial area and with equal values of maximum stresses at the initial time moment. It is shown that the greatest loss of material (cross section area) as a result of corrosion damage is inherent to cross sections with a larger perimeter.

**Key words:** corrosion damage, bar elements, computer simulation algorithm.

**Автор (вчена ступень, вчене звання, посада):** доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри обчислювальної механіки і міцності конструкцій ДНУ ім. О. Гончара *ДЗЮБА Анатолій Петрович*

**Автор (вчена ступень, вчене звання, посада):** науковий співробітник НДІ математичних методів деформівного твердого тіла ДНУ ім. О. Гончара *ДЗЮБА Олександр Анатолійович*

Контакти:

E-mail: [dzub@ua.fm](mailto:dzub@ua.fm)

Сл. тел. (056) 745 - 00 – 85

Моб. Тел. (095) 349 – 38 78

Адреса кафедри обчислювальної механіки і міцності конструкцій  
ММФ, ДНУ ім. О. Гончара, пр. Гагаріна, 72,  
м. Дніпропетровськ, 49010