

УДК 539.3

О. А. Дзюба

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ НЕРІВНОМІРНОСТІ КОРОЗИЙНОГО УРАЖЕННЯ НА ДОВГОВІЧНІСТЬ СТРИЖНІВ В АГРЕСИВНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Розроблено алгоритм комп'ютерного моделювання процесу корозійного ушкодження поверхні стержневих елементів при одночасній дії нерівномірного агресивного середовища та складного вигину. Проведено чисельний порівняльний аналіз впливу обтічності поперечного перерізу, що характеризує залежну від форми перетину та його орієнтації в агресивному середовищі нерівномірність корозійного ураження на параметри довговічності елементів конструкцій.

*Ключові слова:* корозійне ураження, комп'ютерне моделювання, довговічність стержневих елементів.

**Вступ. Постановка задачі.** Дослідження міцнісної надійності елементів конструкції, які використовуються в умовах корозійного ураження поверхні їх матеріалу і, як наслідок, зменшення з часом їх жорсткісних параметрів, є досить актуальними [1, 3 – 6, 9 – 12]. Складність дослідження проблеми пов'язана у тому числі і з тим, що кінетичні процеси деформування і корозійного ураження поверхні навантажених елементів конструкції в умовах спільного впливу екстремального термосилового і агресивного середовища є взаємопов'язаними [2, 9 – 11]. При цьому швидкість корозійних процесів підвищується при збільшенні рівня напружень на поверхні матеріалу елементів конструкцій, а зменшення геометричних розмірів перетинів в результаті корозійного ушкодження у свою чергу призводить до збільшення напружень.

Крім того, в реальних умовах корозійне ураження елементів конструкцій здебільшого має нерівномірний характер. Нерівномірність корозії пов'язана як із зазначеним вище нерівномірним розподілом напружень на поверхні матеріалу (контурі перетину), так і з неоднорідністю самого агресивного середовища, а також з такою властивістю форми перетину, як обтічність [10]. Було виявлено, що форма перетину і його розташування в агресивному середовищі істотно впливає на швидкість корозійного ураження. Так, в [7], а також в [10] (стор. 103), наведені результати експериментальних досліджень у вигляді епюр, які характеризують швидкість корозійного ураження поверхні сталевих профілів різної форми в залежності від їх розташування (вертикального чи горизонтального) у вологому середовищі. Результати аналогічних експериментальних досліджень впливу розташування та форми перерізу алюмінієвих профілів на швидкість їх корозії в сірчистій нафті описані в [5, 12].

Така задача виникає і у багатьох інших випадках моделювання процесу корозійного ураження стрижневих елементів в умовах агресивного середовища. Так, наприклад, для профілю порожнистого перерізу зовнішня поверхня може бути захищена від корозії одним із існуючих способів (крім того, частина такого захисного покриття поверхні матеріалу з різних причин може бути пошкодженою), і при наявності агресивного середовища у внутрішньому просторі пустотілого навантаженого елемента (рідини чи газової суміші) корозійного ураження буде зазнавати його внутрішня поверхня. Навпаки, внутрішня частина пустотілого силового елемента може бути захищена від корозії, наприклад шляхом герметизації, і корозійного ушкодження буде зазнавати лише зовнішня поверхня. Тобто, як внутрішня, так і зовнішня частина пустотілого силового елемента, зокрема напівзаповненого резервуара, одночасно можуть перебувати в умовах впливу агресивного середовища різної інтенсивності.

У цих випадках необхідна розробка методів, алгоритмів та засобів числового комп'ютерного моделювання такого нерівномірного корозійного ушкодження поверхні матеріалу та дослідження змінного в часі напружено-деформованого стану елементів конструкцій, що функціонують в умовах агресивного середовища, з метою більш достовірного прогнозування їх міцнісної надійності та збільшення довговічності усієї конструкції у цілому. У той же час, як показує вивчення сучасного стану цього питання, наявні фрагменти відповідних пакетів прикладних програм для вирішення зазначеного аспекту проблеми є недостатньо доскональними, а спеціальні засоби комп'ютерного програмного забезпечення для проведення таких дослідження в цій області практично відсутні. Подана стаття присвячена розробці алгоритму комп'ютерного моделювання процесу корозійної деградації поверхні нерівномірно навантажених стрижневих елементів, які знаходяться в умовах при дії нерівномірного корозійного ураження їх поверхні та складного вигину одночасній. А також подальшому числовому порівняльному аналізу впливу обтічності (що характеризує, залежну від форми перетину та його орієнтації в агресивному середовищі, нерівномірність корозійного ураження на різних ділянках відкритої поверхні матеріалу) на параметри довговічності елементів конструкції.

**Алгоритм чисельного моделювання корозійної деградації.** У загальному випадку математична модель корозійної пошкоджуваності, 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 в точці  $\bar{X}(x, y, z)$  на поверхні досліджуваного елемента;  $\bar{V}$  – вектор параметрів, які характеризують ступінь корозійного спротиву матеріалу та рівень агресивності зовнішнього середовища;  $t$  – час.

Найбільш відомими та апробованими моделями, які враховують вплив напружень на швидкість корозії в розрахунках на міцність, є моделі В. М. Долинського [3], Е. М. Гутмана [1] та І. Г. Овчинникова [9, 10], які подаються, відповідно, у вигляді:

$$\frac{d\delta}{dt} = V(t)(1 + K\sigma); \text{ (а) } \frac{d\delta}{dt} = \varphi(t)\exp(\gamma\sigma); \text{ (б) } \frac{d\delta}{dt} = \psi(t)(1 + \varepsilon\mathcal{E}), \text{ (в) } \quad (2)$$

де  $V(t)$ ,  $\varphi(t)$ ,  $\psi(t)$  – функції (які, у зв'язку зі складністю їх експериментального визначення, у більшості випадків приймаються як довідкові постійні  $V_0$ ), що характеризують корозійне ураження конкретного ненапруженого матеріалу у певному агресивному середовищі;  $K$ ,  $\gamma$ ,  $\varepsilon$  коефіцієнти, що виражають ступінь впливу напружень на швидкість корозії;  $\mathcal{E} = \sigma_x^2 - \sigma_y^2 - 2\mu\sigma_x\sigma_y + 2(1 + \mu)\sigma_{xy}^2 / (2E)$  – питома енергія деформації;  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_{xy}$  – відповідні компоненти напруженого стану;  $E, \mu$  – модуль пружності та коефіцієнт Пуассона, відповідно.

Приймаючи до уваги результати експериментальних досліджень, які наведені в [10], що характеризують вплив форми і розташування перетину в агресивному середовищі на швидкість корозійного ураження поверхні профілю стержневого елемента, у поданій статті приймається, що параметр  $V_0 = V_0(x, y, z)$  є залежним від координат  $\bar{X}(x, y, z)$  точок поверхні матеріалу.

Задача визначення глибини корозійного ураження поверхні силових стержневих конструктивних елементів зводиться до інтегрування оберненого для даного агресивного середовища рівняння математичної моделі корозійного ураження у вигляді (2, а), (2, б) або (2, в) з метою відшукування змін  $\delta(\bar{X}, t)$  положення кожної точки  $\bar{X}(x, y, z)$  поверхні матеріалу (контуру перетину) в процесі корозійної деградації від початкового  $t = t_0$  до деякого кінцевого критичного  $t = t^*$  часу існування конструкції.

Критичний стан конструкції визначається досягненням деякого граничного, руйнівного для даного матеріалу, значення  $\sigma_{кр}$  максимального напруження  $\max \sigma(\bar{X}, t)$  в точках контуру перетину в результаті зменшення його жорсткісних характеристик внаслідок корозійного ушкодження.

Розв'язок цієї задачі на  $k$ -ому кроці інтегрування за часом рівнянь (2) може бути подано у вигляді

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

як результат інтегрування нелінійної початкової задачі (2) одним із відомих методів, зокрема, Кутта – Мерсона, Адамса, Ейлера або ін. [13].

Отримані значення  $\delta^k(t)$  дозволяють визначати величину  $\Delta\delta^k = \delta^k - \delta^{k-1}$  корозійного ураження в довільній точці  $\overline{X^k}(x, y, z)$  на поверхні матеріалу за час  $\Delta t$ .

Далі алгоритм комп'ютерного моделювання корозійного ураження поверхні викладено для випадку плоского поперечного перерізу довільної форми. Для визначення змінних в часі геометричних характеристик поперечного перерізу стержневого елемента і далі напружень в точках його поверхні, контур перетину розбивається скінченною кількістю рівномірно (в початковий момент часу  $t = t_0$ ) розташованих вузлових точок з координатами  $(x_i, y_i)$  ( $i = \overline{1, n}$ ), де  $x_{n+1} = x_1$ ;  $y_{n+1} = y_1$  [8], і апроксимується лінійними сплайнами.

При цьому перетин розміщується у першому квадранті деякої нерухомої декартової системи координат  $XOY$ , розташованої в площині перетину, а контурні точки по його периметру нумеруються при обході контуру за годинниковою стрілкою так, щоб матеріал перетину весь час залишався справа. При наявності отворів і технологічних порожнин, робляться уявні розрізи (рис. 1) і аналогічним чином здійснюється послідовний обхід контуру цих отворів. Криволінійні ділянки контуру перетину апроксимуються при цьому деякою ламаною лінією.

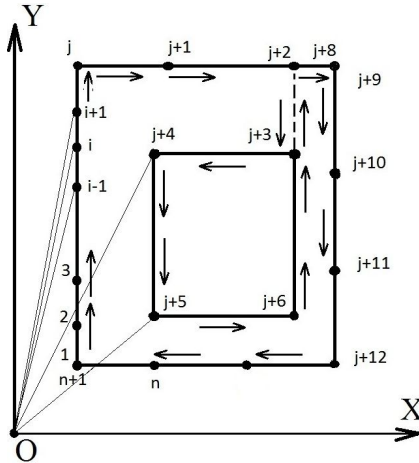


Рис. 1. - Ілюстрація до алгоритму обчислення геометричних характеристик поперечного перерізу довільної конфігурації

Для визначення нормальних напружень в точках  $(x_i, y_i)$  контуру поперечного перерізу стрижня при складному згинанні, необхідних для обчислення правої частини (2), використовують відомі залежності

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

Тут  $M_U, M_V, N$  – згинальні моменти в головних осях і поздовжнє зусилля, відповідно;

$$\begin{aligned} I_U &= I_{x_0} \cos^2 \alpha + I_{y_0} \sin^2 \alpha + I_{x_0 y_0} \sin 2\alpha; \\ I_V &= I_{x_0} \sin^2 \alpha + I_{y_0} \cos^2 \alpha - I_{x_0 y_0} \sin 2\alpha; \\ \operatorname{tg}(2\alpha) &= 2I_{x_0 y_0} / (I_{y_0} - I_{x_0}); \end{aligned}$$

$I_{x_0}, I_{y_0}, I_{x_0 y_0}, I_U, I_V$  – центральні і головні моменти інерції в осях  $X_0 O_0 Y_0$  и  $UO_0 V$ , відповідно;

$$I_{x_0} = I_x - y_0^2 F; \quad I_{y_0} = I_y - x_0^2 F; \quad I_{x_0 y_0} = I_{xy} - x_0 y_0 F;$$

$x_0, y_0$  – координати центру ваги перерізу в вихідних 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:

$$\begin{aligned} u_i &= (x_i - x_0) \cos \alpha + (y_i - y_0) \sin \alpha; \\ v_i &= -(x_i - x_0) \sin \alpha + (y_i - y_0) \cos \alpha. \end{aligned} \quad (5)$$

Значення згинальних моментів в головних осях, обчислюються з використанням відомих залежностей:

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

де  $M_{x_0}, M_{y_0}$  – згинальні моменти в центральних осях, додатні при повороті осі за годинниковою стрілкою.

Визначення геометричних характеристик перетину  $I_U, I_V, F$  ґрунтується на послідовному обчисленні і додаванні характеристик  $n$  трикутників (рис.1), створюваних початком відліку  $x = y = 0$  і двома сусідніми точками контуру з координатами  $(x_i, y_i)$  та  $(x_{i-1}, y_{i-1})$ . Вирази для обчислення площ перетинів через координати вузлових точок апроксимуючого контуру мають вигляд:

$$F = \frac{1}{2} \sum_{i=2}^{n+1} f_i; \quad f_i = x_i y_m - x_m y_i; \quad m = i - 1. \quad (7)$$

Слід звернути увагу, що при цьому частина доданків в (7) виявляється від'ємною (див. рис. 1), що у підсумку дозволяє обчислити лише площу, обмежену контуром перетину.

Аналогічним чином отримуються і вирази для обчислення інших геометричних характеристик перетину:

$$\begin{aligned}
x_0 &= \frac{1}{6F} \sum_{j=2}^{n+1} (x_i + x_m) f_j; & y_0 &= \frac{1}{6F} \sum_{j=2}^{n+1} (y_i + y_m) f_j; \\
I_x &= \frac{1}{12} \sum_{j=2}^{n+1} (y_i^2 + y_i y_m + y_m^2) f_j - y_0^2 F; \\
I_y &= \frac{1}{12} \sum_{j=2}^{n+1} (x_i^2 + x_i x_m + x_m^2) f_j - x_0^2 F; \\
I_{xy} &= \frac{1}{24} \sum_{j=2}^{n+1} (x_i x_m + 2x_i y_i + 2x_m y_m + x_m y_i) f_j - x_0 y_0 F.
\end{aligned} \tag{8}$$

Очевидно, що площа поперечного перерізу  $F^k$ , моменти інерції  $I_x^k, I_y^k, I_{xy}^k, I_{кр}^k$ , координати центру ваги перерізу  $(x_0^k, y_0^k)$  і кут нахилу головних центральних осей  $\alpha^k$  будуть функціями змінних в часі координат точок контуру  $(x_i^k, y_i^k)$  ( $i = \overline{1, n}$ ) у вихідній системі координат  $XOY$ .

Зворотні перетворення координат вузлових точок для повернення до вихідної системи координат здійснюються у відповідності з залежностями:

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

Враховується також, що значення згинальних моментів (6) в головних осях 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 нахилу  $\alpha$  головних осей, є функціями змінних в часі координат контурних точок  $(x_i, y_i)$  ( $i = \overline{1, n}$ ).

При побудові алгоритму обчислення величини і напрямку корозійного ураження в кожній із вузлових точок поверхні контуру перетину стрижневого елемента і визначення, таким чином, його нової, змінної в часі, конфігурації, приймається, що корозія в окремій точці відбувається вглиб матеріалу перпендикулярно контуру перетину, а величина корозійного ураження  $\Delta \delta_i^k(x_i, y_i) = \delta_i^k(x_i, y_i) - \delta_i^{k-1}(x_i, y_i)$  ( $i = \overline{1, n}$ ) яка обчислюється з використанням (3) для кожної  $i$ -ої точки контуру за час  $\Delta t$  на  $k$ -у кроці інтегрування рівняння обраної моделі корозії (2), не залежить від величини корозії в сусідніх точках. Враховуючи, що контур перетину має вигляд ламаної лінії, а кутова вузлова точка належить одночасно двом прямим апроксимуючої лінії, напрямок зміщення вузлових точок контуру на  $k$ -у кроці інтегрування може бути обчислений із геометричних міркувань (рис. 2).

На рис. 2  $AE=AF=\delta_i^k, BB_1 = \delta_{i-1}^k, CC_1 = \delta_{i+1}^k$  – відповідають величинам корозійного ураження в точках  $i, i-1, i+1$  на  $k$ -у кроці інтегрування рівняння (3).

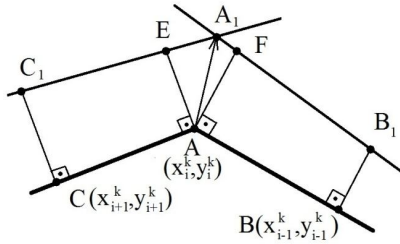


Рис. 2 – Розрахункова схема для обчислення величини і напрямку корозійного ураження у довільній (як приклад, вершині внутрішнього кута) вузловій точці контуру

Для обчислення значень координат кутових точок контуру на  $k$ -у кроці інтегрування вибраної моделі корозії (2) через координати цих точок на « $k-1$ »-у визначимо орт  $\overline{l}_{BA}$  вектора  $\overline{BA}$  (рис. 2), як

$$\overline{l}_{BA} = \frac{\overline{BA}}{|\overline{BA}|}; \quad \overline{l}_{BA} = \left\{ \frac{x_i^k - x_{i-1}^k}{|\overline{BA}|}, \frac{y_i^k - y_{i-1}^k}{|\overline{BA}|} \right\};$$

$$|\overline{BA}| = \sqrt{(x_i^k - x_{i-1}^k)^2 + (y_i^k - y_{i-1}^k)^2}. \quad (9)$$

Враховуючи, що вектори  $\overline{BB}_1$  і  $\overline{AF}$  перпендикулярні вектору  $\overline{BA}$ , орти  $\overline{l}_{BB_1}$ ,  $\overline{l}_{AF}$  векторів  $\overline{BB}_1$ ,  $\overline{AF}$  будуть паралельними і координати цих векторів можна виразити через координати орту  $\overline{l}_{BA}$  у вигляді

$$\overline{l}_{BB_1} = \overline{l}_{AF} = \left\{ \frac{y_i^k - y_{i-1}^k}{|\overline{BA}|}, -\frac{x_i^k - x_{i-1}^k}{|\overline{BA}|} \right\}, \quad (10)$$

а вектори  $\overline{BB}_1$  і  $\overline{AF}$ , як напрямки корозійного ураження  $\Delta\delta_{i-1}^k$ ,  $\Delta\delta_i^k$  поверхні матеріалу в точках В і А, можуть бути подані, як

$$\overline{BB}_1 = \Delta\delta_{i-1}^k \cdot \overline{l}_{BB_1}; \quad \overline{AF} = \Delta\delta_i^k \cdot \overline{l}_{AF}.$$

Позначаючи координати точок  $B_1$ ,  $F$ , як  $B_1(x_{B_1(i-1)}, y_{B_1(i-1)})$  і  $F(x_{F(i)}, y_{F(i)})$  (у подальшому індекси « $i-1$ », « $i$ » біля цих координат для зменшення громіздкості опускаються) із

$$\overline{BB}_1 = \left\{ x_{B_1} - x_{i-1}^k, y_{B_1} - y_{i-1}^k \right\} = \left\{ \Delta\delta_{i-1}^k \frac{y_i^k - y_{i-1}^k}{|\overline{BA}|}, -\Delta\delta_{i-1}^k \frac{x_i^k - x_{i-1}^k}{|\overline{BA}|} \right\};$$

$$\overline{AF} = \left\{ x_F - x_i^k; y_F - y_{i-1}^k \right\} = \left\{ \Delta\delta_i^k \cdot \frac{y_i^k - y_{i-1}^k}{|BA|}; -\Delta\delta_i^k \cdot \frac{x_i^k - x_{i-1}^k}{|BA|} \right\},$$

впливає

$$\begin{aligned} x_{B_1} &= x_{i-1}^k + \Delta\delta_{i-1}^k \cdot \frac{y_i^k - y_{i-1}^k}{|BA|}; & y_{B_1} &= y_{i-1}^k - \Delta\delta_{i-1}^k \cdot \frac{x_i^k - x_{i-1}^k}{|BA|}; \\ x_F &= x_i^k + \Delta\delta_i^k \cdot \frac{y_i^k - y_{i-1}^k}{|BA|}; & y_F &= y_i^k - \Delta\delta_i^k \cdot \frac{x_i^k - x_{i-1}^k}{|BA|}. \end{aligned} \quad (11)$$

Аналогічно (9), орт  $\overline{l_{AC}}$  вектора  $\overline{AC}$  визначається наступним чином

$$\overline{l_{AC}} = \left\{ \frac{x_{i+1}^k - x_i^k}{|AC|}; \frac{y_{i+1}^k - y_i^k}{|AC|} \right\}; \quad |\overline{AC}| = \sqrt{(x_{i+1}^k - x_i^k)^2 + (y_{i+1}^k - y_i^k)^2}.$$

З урахуванням, що орти  $\overline{l_{AE}}$ ,  $\overline{l_{CC_1}}$  векторів  $\overline{AE}$  та  $\overline{CC_1}$  перпендикулярні вектору  $\overline{AC}$

$$\overline{l_{AE}} = \overline{l_{CC_1}} = \left\{ \frac{y_{i+1}^k - y_i^k}{|AC|}; -\frac{x_{i+1}^k - x_i^k}{|AC|} \right\}. \quad (12)$$

Після позначення координат точок  $E$  і  $C_1$ , як  $E(x_{E(i)}, y_{E(i)})$ ,  $C_1(x_{C_1(i+1)}, y_{C_1(i+1)})$  (де індекси « $i+1$ », « $i$ » для зменшення громіздкості викладень надалі опускаються) можна записати  $\overline{AE} = \Delta\delta_i^k \cdot \overline{l_{AE}}$ ;  $\overline{CC_1} = \Delta\delta_{i+1}^k \cdot \overline{l_{CC_1}}$  і далі

$$\begin{aligned} \overline{AE} &= \left\{ x_E - x_i^k; y_E - y_i^k \right\} = \left\{ \Delta\delta_i^k \cdot \frac{y_{i+1}^k - y_i^k}{|AC|}; -\Delta\delta_i^k \cdot \frac{x_{i+1}^k - x_i^k}{|AC|} \right\}; \\ \overline{CC_1} &= \left\{ x_{C_1} - x_{i+1}^k; y_{C_1} - y_{i+1}^k \right\} = \left\{ \Delta\delta_{i+1}^k \cdot \frac{y_{i+1}^k - y_{i+1}^k}{|AC|}; -\Delta\delta_{i+1}^k \cdot \frac{x_{i+1}^k - x_i^k}{|AC|} \right\}, \end{aligned}$$

звідки

$$x_E = x_i^k + \Delta\delta_i^k \cdot \frac{y_{i+1}^k - y_i^k}{|AC|}; \quad y_E = y_i^k - \Delta\delta_i^k \cdot \frac{x_{i+1}^k - x_i^k}{|AC|}; \quad (13)$$



$$x_{C_1} = x_{i+1}^k + \Delta \delta_{i+1}^k \cdot \frac{y_{i+1}^k - y_C^k}{|AC|}; \quad y_{C_1} = y_{i+1}^k - \Delta \delta_{i+1}^k \cdot \frac{x_{i+1}^k - x_i^k}{|AC|}.$$

Рівняння прямих  $B_1F$  і  $EC_1$ , кожна з яких проведена через дві відомі точки  $B_1(x_{B_1}, y_{B_1})$  і  $F(x_F, y_F)$  та  $E(x_E, y_E)$  і  $C_1(x_{C_1}, y_{C_1})$ , мають вигляд:

$$\frac{x - x_{B_1}}{x_F - x_{B_1}} = \frac{y - y_{B_1}}{y_F - y_{B_1}}; \quad \frac{x - x_E}{x_{C_1} - x_E} = \frac{y - y_E}{y_{C_1} - y_E}. \quad (14)$$

Кутова точка  $A_1(x_{A_1}, y_{A_1})$  конфігурації перетину наступного кроку інтегрування рівняння математичної моделі корозії (3) є точкою перетину прямих  $B_1F$  і  $EC_1$  і, таким чином, її координати повинні задовольняти системі рівнянь (14)

$$\frac{x_{A_1} - x_{B_1}}{x_F - x_{B_1}} = \frac{y_{A_1} - y_{B_1}}{y_F - y_{B_1}}; \quad \frac{x_{A_1} - x_E}{x_{C_1} - x_E} = \frac{y_{A_1} - y_E}{y_{C_1} - y_E}.$$

Ці рівняння у формі  $ax + by = c$  мають вигляд

$$x_{A_1}(y_F - y_{B_1}) - y_{A_1}(x_F - x_{B_1}) = x_{B_1}y_F - y_{B_1}x_F; \quad (15)$$

$$x_{A_1}(y_{C_1} - y_E) - y_{A_1}(x_{C_1} - x_E) = x_E y_{C_1} - y_E x_{C_1}.$$

Якщо визначник системи (15)

$$\Delta = (y_F - y_{B_1})(x_E - x_{C_1}) - (y_{C_1} - y_E)(x_{B_1} - x_F) \quad (16)$$

не дорівнює 0, а це означає, що пряма  $\overline{B_1F}$  не паралельна прямій  $\overline{EC_1}$ , то розв'язок (13) можна записати за правилом Крамера:

$$x_{A_1(i)} = \Delta_1 / \Delta; \quad y_{A_1(i)} = \Delta_2 / \Delta, \quad (17)$$

$$\text{де } \Delta_1 = \begin{vmatrix} x_{B_1}y_F - x_F y_{B_1} & x_{B_1} - x_F \\ x_E y_{C_1} - x_{C_1} y_E & x_E - x_{C_1} \end{vmatrix}; \quad \Delta_2 = \begin{vmatrix} y_F - y_{B_1} & x_{B_1}y_F - x_F y_{B_1} \\ y_{C_1} - y_E & x_E y_{C_1} - x_{C_1} y_E \end{vmatrix}.$$

Таким чином визначають координати  $x_{A_1(i)}$ ,  $y_{A_1(i)}$   $i$ -ї кутової точки наступної в процесі корозійного ураження за час  $\Delta t$  конфігурації поперечного перетину. Корозійне ураження поверхні матеріалу перетину в кутовій точці А співпадає з напрямом і величиною вектора  $\overline{AA_1}$ , а

$$\Delta \delta_i^{*k} = |\overline{AA_1}| = \sqrt{\left(x_{A_1(i)}^2 - x_{A(i)}^2\right)^2 + \left(y_{A_1(i)}^2 - y_{A(i)}^2\right)^2},$$

де  $x_{A_1(i)}, y_{A_1(i)}$  визначаються із (17).

Якщо виявляється, що вектори  $\overline{B_1F}$  і  $\overline{EC_1}$  паралельні, тобто в (16)  $\Delta \leq \varepsilon$ , то у цьому випадку координати точок  $A_1, E, F$  та орти  $\overline{l_{AA_1}} = \overline{l_{AE}} = \overline{l_{AF}}$  суміщаються і координати точки  $A_1$  можуть бути обчисленні з урахуванням (11) та (3) у вигляді:

$$x_{A_1(i)} = x_i^k + \Delta \delta_i^k \cdot \frac{y_i^k - y_{i-1}^k}{|BA|}; \quad y_{A_1(i)} = y_i^k - \Delta \delta_i^k \cdot \frac{x_i^k - x_{i-1}^k}{|BA|}. \quad (18)$$

Слід звернути увагу також на те, що в процесі корозійного ураження та відповідної зміни координат контурних точок, розміри поперечного перерізу змінюються. Так, зокрема, довжина контуру зовнішньої опуклої частини контуру зменшується, а ділянки контуру внутрішніх кутів або вирізів можуть збільшуватися. Таким чином, відстань

$$d = \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2} \quad (i = \overline{1, n})$$

між вузловими точками контуру також змінюється.

Тут в програмній реалізації розв'язування задачі виникає ряд проблем, пов'язаних з необхідністю виключення з розгляду в процесі роботи алгоритму на  $k$ -ом 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  $\delta_i^k$ ) привести до можливого «забігання» точки перетину прямих (14) поза межі уявного контуру 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 таких перетворень, включаючи ідентифікацію та перенумерацію відповідних точок контуру, долаються в роботі програмним шляхом.

Таким чином, в запропонованому алгоритмі комп'ютерного моделювання процесу впливу агресивного середовища на довговічність стержневих елементів конструкцій, враховуються всі механічні параметри корозійної деградації перетину: зміна в часі координат кожної з вузлових точок контуру, положення центру ваги, розташування і напрямку головних центральних моментів інерції, значень головних згинальних моментів та параметрів напруженого стану для випадку перетинів довільної конфігурації, а також нерівномірності корозійного ураження, пов'язаної з обтічністю контуру.

Розроблені засоби реалізації алгоритму дозволяють моделювати корозійне пошкодження стрижня довільного поперечного перерізу до його

повної деградації з використанням будь-якої із відомих математичних моделей корозії.

**Результати числових досліджень.** З використанням розробленого алгоритму отримані числові результати і проведено порівняльний аналіз впливу нерівномірності корозійного ураження поверхні перетинів стержневих елементів, які знаходяться в умовах складного вигину моментами  $M_{x_0} = 3 \cdot 10^3 \text{ Н*м}$ ;  $M_{y_0} = 9 \cdot 10^3 \text{ Н*м}$ . для випадків вертикального і горизонтального розташування двотаврового (рис. 3, а, б) профілю.

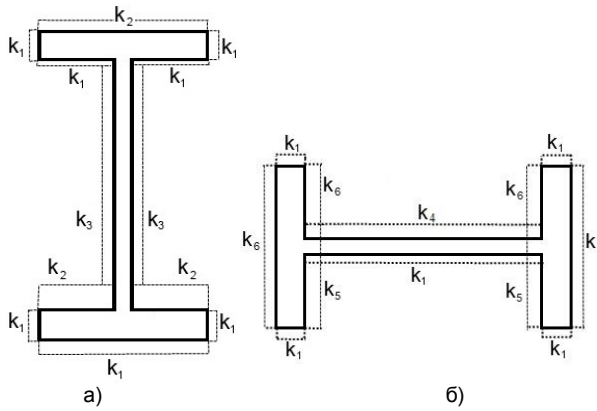


Рис. 3. – Параметри інтенсивності корозійного ураження

Для випадку горизонтального розташування двотавра, для коректності відповідних порівнянь, приймається  $M_{x_0} = M_{y_0}$ . Нерівномірність розподілу корозії по периметру перетинів задається за допомогою коефіцієнтів інтенсивності  $k_i$  ( $i = 1, 2, \dots$ ) корозійного ураження поверхні матеріалу цих профілів, як відношення швидкості корозії на окремій  $i$ -й ділянці перетину до деякої максимальної швидкості корозійної деградації для даного агресивного середовища і певного матеріалу перетину, що знаходиться у вологому середовищі, які у відповідності з [10] прийняті наступними:  $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6 = /0,07; 0,45; 0,30; 0,62; 0,16; 0,25/$  (див. рис. 3).

В числових розрахунках висота двотавра  $a$ , товщина стінки  $h$ , ширина  $b$  і товщина  $\delta$  його полиці були прийняті відповідно наступними:  $0,0545 \text{ м}$ ,  $0,005 \text{ м}$ ,  $0,099 \text{ м}$ ,  $0,010 \text{ м}$ . Була використана математична модель корозійного ураження у формі В. М. Долинського (2, а) для деякого «умовного» агресивного середовища з параметрами  $V_0 = 0,004 \text{ м/рік}$ ;  $K = 0,02 \text{ Па}^{-1}$  за час  $0 \leq t \leq t^*$ ;  $t^* = 4$  роки. При цьому, в умовах нерівномірної корозії, для окремих ділянок  $i = (1, 6)$  приймається  $V_{0i} = k_i V_0$ , а для випадку рівномірної корозії було прийнято певний «усереднений» коефіцієнт  $k_* = 0,27$ .

На рис. 4 подані зображення процесу корозійного ураження у вигляді картини зміни в часі конфігурації перетину контуру двотаврового профілю для його рівномірного (а) та нерівномірного (б), (в), відповідно для вертикального та горизонтального розташування у вологому середовищі. Вкладені контури перетинів на рис. 4 є конфігураціями цього перетину у послідовні моменти часу  $t_m = m \cdot t^* / 8$ , ( $m = \overline{0,8}$ ), тобто через кожні півроку. Слід зазначити при цьому на те, що у розглянутому випадку інтенсивність корозії цілеспрямовано була дещо завищеною з метою більш вираженої візуалізації процесу корозійної деградації.

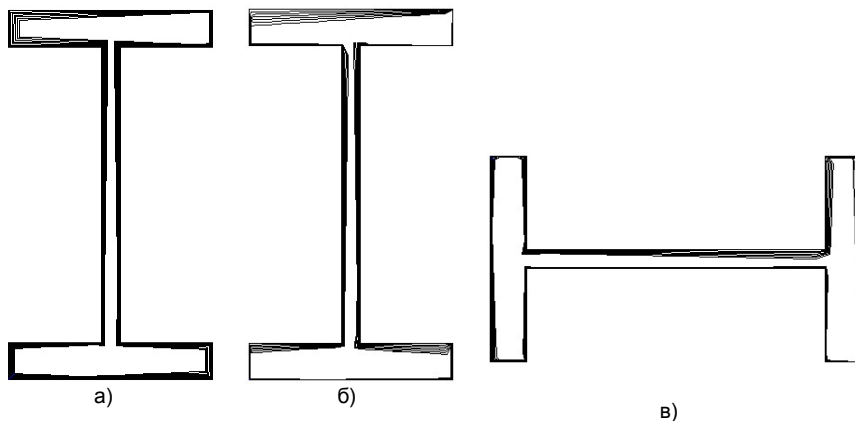


Рис. 4 – Картини корозійного ураження поверхні матеріалу перетину стержнів двотаврового профілю при косому згині для випадків:

а) рівномірної та нерівномірної корозії при його вертикальному розташуванні та в) горизонтальному розташуванні у вологому середовищі.

Аналіз отриманих результатів вказує на суттєвий вплив нерівномірності корозії на характер та величину корозійного ураження поверхні матеріалу розглянутих двотаврових профілів. Це, по-перше, стосується форми залишкового «живого» перерізу, які виявились суттєво різними (рис. 4). При цьому для вертикального розташування двотавра при рівномірній (рис. 4, а) та нерівномірній (рис. 4, б) корозії максимальні корозійні втрати товщини полиці двотавра склали біля 45%, а втрата товщини стінки для горизонтального розташування (рис.4, в) досягає 60%, що у подальшому призводить до втрати суцільності перерізу. Втрати площі перерізу для розглянутих випадків склали біля 33% – 35%, а максимальні напруження збільшились в 1,7 – 1,8 рази.

В реальних умовах експлуатації конструкції в жорсткому агресивному середовищі зазначені показники можуть відрізнятись від отриманих в статті для модельної задачі. В той же час є очевидною необхідність застосування надійних засобів (алгоритмів) врахування зазначених аспектів проблеми.

На рис. 5 подані результати комп'ютерного моделювання корозійного ураження пустотілого стрижня прямокутного поперечного перерізу з шириною, висотою та товщиною стінки відповідно:  $0,0575\text{ м}$ ;  $0,0703\text{ м}$ ;  $0,0064\text{ м}$  при косому вигині  $M_{x_0} = 3 \cdot 10^3\text{ Н*м}$ ;  $M_{y_0} = 9 \cdot 10^3\text{ Н*м}$ ,  $N = 0,15\text{ Н}$ , що знаходиться в агресивному середовищі з параметрами  $V_0 = 0,001\text{ м/рік}$ ,  $K = 0,02\text{ Па}^{-1}$ , з різними коефіцієнтами інтенсивності корозії  $k_1$ ,  $k_3$  на внутрішній і зовнішній поверхнях.

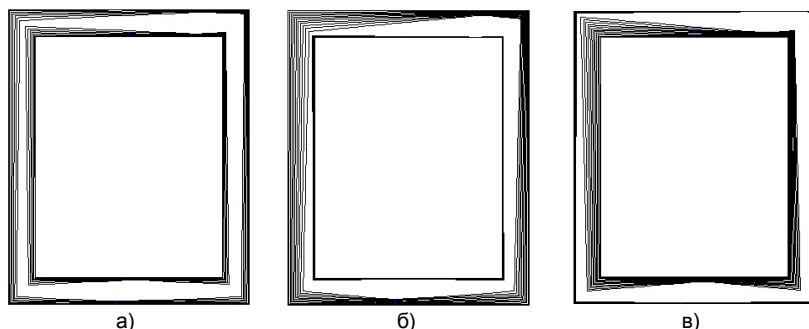


Рис. 5 – Корозія пустотілого профілю за моделлю В. М. Долинського (2, а)  
 а) – одночасна корозія внутрішньої і зовнішньої поверхні  $k_* = 0,30$ ;  
 б), в) – корозія тільки зовнішньої та тільки внутрішньої поверхні профілю, відповідно

Із отриманих результатів (рис. 5, рис. 6) видно, що корозійна деградація зовнішньої поверхні пустотілого профілю є більш небезпечною, ніж при корозії лише внутрішньої, що пов'язано з більшою площею поверхні, яка знаходиться під впливом агресивного середовища. Слід зазначити, що у випадку дії на внутрішній поверхні середовища з більшою агресивністю, небезпечною може виявитися корозія внутрішньої поверхні.

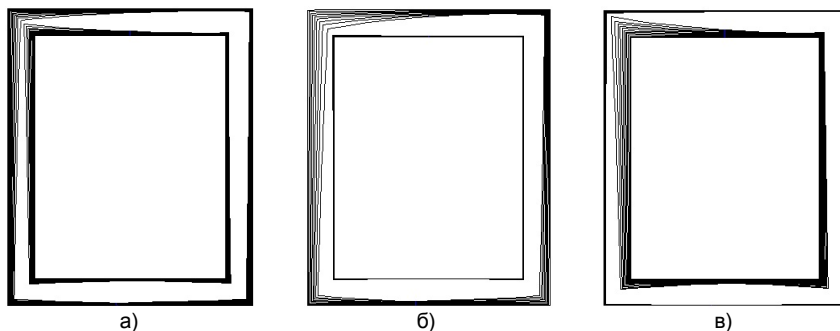


Рис. 6. – Корозія пустотілого профілю за моделлю Е. М. Гутмана (2, б)  
 а) – одночасна корозія внутрішньої і зовнішньої поверхні  $k_* = 0,30$ ;  
 б), в) – корозія тільки зовнішньої та тільки внутрішньої поверхні профілю, відповідно

Для зображених на рис. 5, б і рис. 5, в перерізів однакова втрата (біля 38%) початкової площі перетину для випадку корозії лише зовнішньої поверхні (рис. 3, б) відбулася за менший на 25% час (що визначається кількістю кроків інтегрування (3) в часі), ніж для випадку корозії лише внутрішньої поверхні (рис. 5, в), а максимальні напруження на контурі збільшились при цьому в 2,3 і 2 рази, відповідно.

Подані на рис. 5 і рис. 6 результати дозволяють провести також порівняння застосування двох найбільш відомих математичних моделей корозії В. М. Долинського (2, а) та Е. М. Гутмана (2, б). При цьому на початку процесу корозійного ураження ці моделі дають досить близькі результати, а надалі процес корозійного ураження за моделлю (2, б) помітно прискорюється у порівнянні із застосуванням моделі (2, а).

**Висновки.** Викладено досить загальний алгоритм комп'ютерного моделювання корозійної деградації перетинів стрижневих елементів в умовах одночасного впливу агресивного середовища та дії складного вигину. Алгоритм дозволяє здійснювати обчислення величини і напрямку зміни положення кожної з контурних (вузлових) точок перетину в процесі корозійного ураження та визначати конфігурації і основні геометричні характеристики поперечного перерізу та напруження в довільний момент часу з використанням будь-якої з існуючих математичних моделей корозійного ураження поверхні.

Наведено результати порівняльного аналізу змін максимальних напружень і площі двотаврового і пустотілого прямокутного перетину в процесі рівномірної та нерівномірної корозії окремих ділянок поверхні профілів. Подані дані відповідних порівнянь.

Отримані результати вказують на необхідність аналізу впливу обтічності контуру у вигляді нерівномірності корозійного ураження поверхні матеріалу в залежності, зокрема, від форми та розміщення (орієнтації) перерізу в агресивному середовищі, а також захищеності окремих частин поверхні антикорозійними засобами.

## БІБЛІОГРАФІЧНІ ПОСИЛАННЯ

1. **Гутман Э. М.** Прочность газопровисловых труб в условиях коррозионного износа / Э. М. Гутман, Р. С. Зайнулин, А. Т. Шаталов и др. – М.: Недра, 1984. –76 с.
2. **Дзюба А. П.** Комп'ютерне моделювання корозійної деградації поверхні нерівномірно навантажених елементів конструкцій / А. П. Дзюба, А. П. Колодяжний, О. А. Дзюба // Вісн. Дніпропетровського ун-ту. Сер.: Механіка. – Т. 2. – Д.: Вид-во ДНУ. – 2006. – Вип. 10. – С. 56–64.
3. **Долинский В. М.** Расчет элементов конструкций, подверженных равномерной коррозии / В. М. Долинский // Исследования по теории оболочек. – Казань: Изд-во Казанского ун-та. – 1976. – Вип. 7. – С. 37–42.
4. **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.: Наукова думка. – 1980. – С. 38–45.
5. **Каскевич Н. М.** Защита металлов / Н. М. Каскевич. – М.: Стройиздат, 1966. – 367с.
6. **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.: Техническая механика. –

2002. – №1. – С. 95–99.

7. **Кошин И. И.** Стальные конструкции / И. И. Кошин // сб. научн. тр. Московского инж.-строит. ин-та. – М.: Изд-во литерат. по строит. и архитектуре. – 1956, – №10, – С.–117–126.

8. **Мяченко В. И.** Расчет составных оболочечных конструкций на ЭВМ / В. И. Мяченко, И. В. Григорьев. – М.: Машиностроение, 1981. – 216 с.

9. **Овчинников И. Г.** Тонкостенные конструкции в условиях коррозионного износа (расчет и оптимизация) / И. Г. Овчинников, Ю. М. Почтман. – Д.: Изд-во ДДУ, 1995. – 190 с.

10. **Петров В. В.** Расчет элементов конструкций, взаимодействующих с агрессивной средой / В. В. Петров, И. Г. Овчинников, Ю. М. Шихов. – Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1987. – 288 с.

11. **Почтман Ю. М.** Методы расчета надежности и оптимального проектирования конструкций, функционирующих в экстремальных условиях / Ю. М. Почтман, М. М. Фридман. – Д.: Изд-во ДДУ, 1997. – 134 с.

12. **Розенфельд И. Л.** Коррозия и защита металлов / И. Л. Розенфельд. – М.: Металлургия, 1970. – 256 с.

13. Численные методы / под. ред. Н. И. Данилина, Н. С. Дубровская, О. П. Кваша, Ф. Л. Смирнов, Г. И. Феклисов. – М.: Высшая школа, 1976. – 368 с.

*А. А. Дзюба*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕРАВНОМЕРНОСТИ КОРРОЗИОННОГО ИЗНОСА НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ СТЕРЖНЯ В АГРЕССИВНОЙ СРЕДЕ**

Разработан алгоритм компьютерного моделирования процесса коррозионного повреждения поверхности стержневых элементов при одновременном воздействии неравномерной агрессивной среды и сложного изгиба. Проведен численный сравнительный анализ влияния обтекаемости поперечного сечения, характеризующей, зависимость от формы сечения и его ориентации в агрессивной среде, неравномерность коррозионного износа на параметры долговечности элементов конструкций.

*Ключевые слова:* коррозионный износ, компьютерное моделирование, долговечность стержневых элементов.

*O. A. Dziuba*

## **THE RESEARCH OF THE INFLUENCE OF AN INEQUALITY OF CORROSION DAMAGE ON A DURABILITY OF BEAMS IN AGGRESSIVE ENVIRONMENT**

It was developed the algorithm of computer modeling of the process of corrosion of the surface of beams elements under simultaneous action of an unequal aggressive environment and a compound bending. It was made the numerical comparative analysis of the influence of streamlining cross-section, that characterizes the inequality of corrosion damage which depends on an intersection's form and its orientation in the aggressive environment, on parameters of durability of constructional elements.

*Keywords:* corrosion damage, computer modeling, durability of beams elements.

**Introduction. Statement of problem.** Solution to the problem of forecasting of strength reliability of constructional elements, that are used in conditions of corrosion of a surface of their material [1, 3 – 6, 9 – 12] is quite

actual. Problem complexity is that kinetic processes of deformation and corrosive deterioration of the strained constructional elements surface in conditions of strong influence of extremal thermal-power and aggressive environment are interrelated [2, 9 – 11].

Under real-life conditions corrosion degradation of constructional elements mostly has an unequal character, that connected with unequal stress distribution on the material surface as well as inequality of the aggressive environment itself and influence of an intersection's form and its position in the aggressive environment on the corrosion rate [5, 7, 10, 12].

The research article is dedicated to a development of the algorithm of computer modeling of the process of corrosion degradation of the surface of unequally stressed beams elements, which are under simultaneous action of an unequal corrosion of their surface and a compound bending, and also the research of the influence of the intersection's form and its orientation in the aggressive environment (streamlining of the edge) on parameters of durability of constructional elements.

**The algorithm of numerical modeling of corrosion degradation.** The numerical model of corrosion damage, that considers an influence of a stressed-deformed state on the process of corrosion destruction, is taken as

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

where  $\sigma(\bar{X}, t)$  – a stress, and  $\delta(\bar{X}, t)$  – a layer depth of corrosion damage at a point  $\bar{X}(x, y, z)$  at analyzed element surface;  $\bar{V}$  – vector of parameters, which characterize a level of corrosion-resistance of material and a rate of the aggressiveness of outdoor environment;  $t$  – time.

The most well-known and evaluated models, which take into account an influence of strains on corrosion rate in strength calculation, are V. M. Dolinskiy and E. M. Gutman models [1, 3, 10], taken accordingly:

$$\frac{d\delta}{dt} = V_0(1 + K\sigma); \quad (a) \quad \frac{d\delta}{dt} = V_0 \exp(\gamma\sigma); \quad (b) \quad (2)$$

where  $V_0$  characterizes a corrosion of specific unstressed material in specific aggressive environment;  $K$ ,  $\gamma$  – coefficients that stand for the level of influence of strains at material surface on a rate of corrosion;

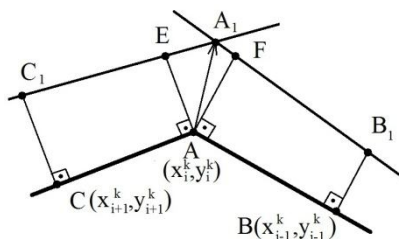
Outcome of this problem at « $k$ » integration step is taken:

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

as the result of integrating of nonlinear initial-value problem (2) one of the well-known methods [13].

Edge of a cross-section approximates by line splines, inasmuch as salient node point belongs to two straight lines of approximate line simultaneously, the direction of corrosion damage movement at nod points of the edge at the « $k$ » integration step is calculated from geometry (pic. 1).

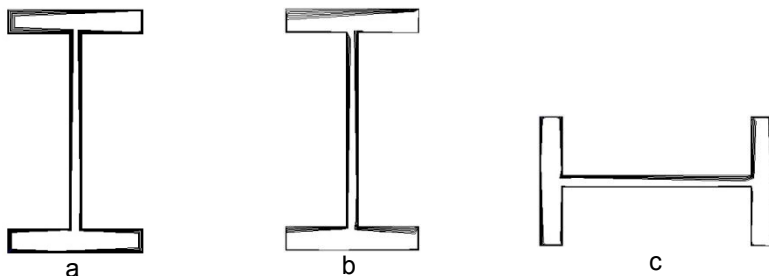




Pic.1 – Design model for calculation of value and direction of corrosion damage at unspecified (as an example, a vertex of inside angle) nod point of the edge

It was constructed quite an extensive algorithm of computer modeling of the process of corrosion of the surface of beams elements of constructions under the conditions of multi-axial load, that allows to introduce the change in time of coordinates of each nod point of the edge, centre-of-gravity position, location and direction of the main central inertia moments, values of main bending moments and parameters of the stressed state for variant of cross-sections of an arbitrary configuration and also inequality of corrosion, that connected with streamlining of the edge with usage of all kinds of known numerical corrosion models.

**The results of numerical researches.** Using the developed algorithm, we received the pictures of time change and made comparative analysis of the influence of inequality of corrosion damage of the surface of beams elements, of which I-beam section (pic. 4), which are located under the conditions of the compound bending by the moments  $M_{x_0} = 3 \cdot 10^3 H \cdot M$ ;  $M_{y_0} = 9 \cdot 10^3 H \cdot M$  for uniform (a) and staggering (b), (c), according to vertical and horizontal position of the section in the wet.



Pic. 4 – Pictures of the corrosion damage of a material surface of beams cross-section of I-beam section under an unsymmetrical bending for variants: a) equal-rate and nonequal corrosion under its vertical position in wet b) and c) horizontal position in wet

Nested cross-sections edges in pic. 4 are the configurations of this cross-section in series of time moments  $t_m = m \cdot t^* / 8$ , ( $m = \overline{0,8}$ ), that is every half a year. It was used V. M. Dolinskiy numerical corrosion model (2, a) for some «supposed» aggressive environment with parameters  $V_0 = 0,004 m/year$ ;  $K = 0,02 \Pi a^{-1}$ . A corrosion nonuniformity for particular areas was considered with a help of different coefficients of intensiveness  $V_{0i} = k_i V_0$ .

**Conclusions.** Analysis of the received results shows the substantial influence of corrosion inequality on a value of corrosion damage of material surface of the considered I-beam sections of beam elements, which are under simultaneous action of an unequal aggressive environment and a compound bending, and also on the necessity of consideration of influence of an unequal corrosion damage of the material surface depending on edge streamlining, connected with form and orientation of cross-section in aggressive environment.

## REFERENCES

1. **Gutman E. M.** Durability of gasfield pipes under the conditions of corrosion / E. M. Gutman, R. S. Zajnulín, A. T. Shatalov and others.– M.: Nedra, 1984. –76 p. (in Russian).
2. **Dziuba A.P.** Computer modeling of corrosion degradation of a surface of unequally loaded constructional elements / A.P. Dziuba, A.P. Kolodjazhnyi, O.A. Dziuba // Bulletin of Dnipropetrovsk University. Ser.:Mechanics. – T.2. – Dn-sk: Publishing House DNU. – 2006. – Vol. 10. – P. 56–64 (in Ukrainian).
3. **Dolinskiy V. M.** Calculation of constructional elements under uniform corrosion / V. M. Dolinskiy // Theory of shells research. – Kazan: Publishing House of Kazanian university. – 1976. – Vol.7. – P. 37–42. (in Russian).
4. **Karpunin V. G.** Durability of plates and shells under the conditions of corrosion influence of environment / V. G. Karpunin, S. I. Klesh'ev, M. S. Kornishin // Strength and durability of constructions. – K.: Naukova dumka. – 1980. – P. 38–45. (in Russian).
5. **Kaskevich N. M.** Protection of metals – M.: Stroyizdan, 1966. – 367 p. (in Russian).
6. **Kolesnik I. A.** About some approach to the solution of the problem of durability of statically determinate truss, working in chemically active environments / I. A. Kolesnik, D. G. Zelentsov, U. A. Khrapach // Engineering mechanics. – D. – 2002. – No 1. – P. 95–99. (in Russian).
7. **Koshin I. I.** Steel constructions; collection of scientific papers of Moscow eng-build. inst. – M.: Publishing House of building and architecture, – 1956. –No 10. – P. 117–126. (in Russian).
8. **Mjachenkov V. I.** Computer –mediated calculation of composite shell constructions / V. I. Mjachenkov, I. V. Grigorjev. – M.: Mechanic engineering, 1981. – 216 p. (in Russian).
9. **Ovchinnikov I. G.** Thin-wall construction under conditions of corrosion (calculation and optimization) / I.G. Ovchinnikov, U.M. Pochtman. – D.: Publishing House DDU, 1995. – 190 p. (in Russian).
10. **Petrov V. V.** Computation of constructional elements, aggressive environment-coupled / V. V. Petrov, I. G. Ovchinnikov, U. M. Shihov. – Saratov: Publishing House of Saratov university– 1987. – 288 p. (in Russian).
11. **Pochtman. U. M.** Methods of calculation of reliability and optimal structural engineering, working in extremal conditions / U. M. Pochtman, M. M. Fridman – D.: Publishing House DDU – 1997. – 134 p. (in Russian).
12. **Rozenfeld I. L.** Corrosion and protection of metals. – M.: Metallurgy, 1970. – 256 p. (in Russian).
13. Numerical methods / by ed. N. I. Danilina, N. S. Dubrovskaya, O. P. Kvasha, F. L. Smirnov, G. Feiksov.– M.: Higher school, 1976. – 368 p. (in Russian).

*Дніпропетровський національний університет  
ім. Олесья Гончара  
Дніпро, Україна*

*Надійшла до редколегії 12.11.2016*