

МОДЕЛЬ ТА ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ВИЗНАЧЕННЯ СКЛАДНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ МЕТАЛІВ ІЗ ЗМІННИМИ СТРУКТУРОЮ ТА ПАРАМЕТРАМИ

Актуальність. Проблема розроблення моделей і методів автоматизації управління в багаторівневих структурах на основі створення нових інформаційних технологій є актуальною. Відповідні дослідження щодо підвищення ефективності методів захисту потребують впровадження нових інформаційних технологій, пов'язаних із відбором інформації про параметри стану і процесів у приповерхневих шарах поблизу границі розділу між металом і агресивним середовищем. Важливою темою інформаційної технології такого типу є розвиток алгоритмічних підходів щодо вивчення особливостей міжфазних ефектів та застосування відповідних результатів в методиках визначення енергетичних характеристик поверхневих шарів і створення інформаційного продукту нової якості, з допомогою якого можна вивчати приховані закономірності корозійних процесів за допомогою параметрів та фізико-хімічних характеристик і приймати оптимальні рішення, використовуючи сучасні програмні засоби. Як показали експерименти, ресурс таких елементів конструкцій в розчинах електролітів залежить від наступних основних факторів: а) розмірів і форми елементів пристроїв, б) концентрації агресивних домішок, в) механічного стану поверхневих шарів; г) інтенсивності процесів переносу речовини на границях середовищ при активації корозійних взаємодій. В ряді випадків, оцінюючи фізичні параметри згаданих вище елементів конструкцій на основі традиційних підходів електрохімії, фізики твердого тіла і фізики поверхні, спостерігаємо великі відхилення від експерименту. Тому в практиці антикорозійного захисту потрібно використовувати нові сучасні математичні моделі та на їх основі відповідні інформаційні технології, які б враховували широкий спектр факторів впливу і взаємодій, що стосуються фізико-механічних полів. Моделювання предметних галузей на підґрунті застосування відповідних інформаційних технологій має важливе значення. Задача антикорозійного захисту елементів конструкцій із металів у водних розчинах електролітів є особливо актуальною в даний час та пов'язана із станом міжфазних шарів і фізико-хімічними процесами, що в них відбуваються.

Постановка задачі

Значний внесок у розробку теоретичних і прикладних питань математичного моделювання процесів протикорозійного захисту зробили Панасюк В. В., Похмурський В. І., Джала Р. М., Сопрунюк П. М., Остапенко

В.Н., Лукович В. В., Склярів С. О.[1-5] та інші. В основу інформаційної технології закладено фізико-математичну модель[2-4] поверхневих явищ (Юзевич В. М., 1999 р.), що описує складні електричні, теплові, дифузійні і механічні процеси в поверхневих шарах твердих тіл, враховує при цьому особливості електричних взаємодій, поверхневі енергію γ та натяг σ_h , а також модель аналізу корозійних процесів, яка характеризує активаційні процеси деформованого металу поблизу вершини корозійної тріщини.

Енергетичні характеристики міжфазних шарів металів [2-5], на поверхні яких знаходиться покриття, або адсорбовані з електроліту частинки, для аналізу корозійних процесів означимо (рис. 1) .

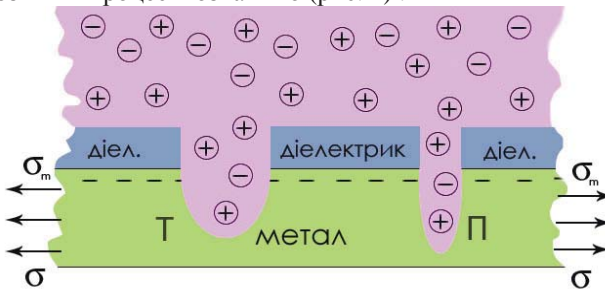


Рис. 1. Поверхневий шар металу з діелектричним покриттям і дефектами в електроліті (Т – тріщина, П – пітинг, σ – зовнішнє навантаження)

Пітинги це виразки, порожнини в металі, що розпочинаються з його поверхні. Зовні пітинг проявляється у вигляді появи заглиблень на поверхні сталі. Пітинги виникають в основному в захисному шарі в місцях різних дефектів - тріщин від внутрішніх напружень, пор, мікровключень, виходу на поверхню металу зерен, дислокацій тощо. Міжфазні енергію γ_m та натяг σ_m подамо з допомогою співвідношень [1-3]:

$$\gamma_m = \gamma_e + \xi_m \cdot \gamma_p; \quad \gamma_e = \int_{-H}^H w_1 dx; \quad \gamma_p = \int_{-H}^H w_2 dx; \quad \sigma_m = \int_{-H}^H \sigma_y dx. \quad (1)$$

Тут ξ_m , $z_m = \gamma_e/\gamma_m$ – фізичні характеристики міжфазного шару; $2H$ – ефективна товщина міжфазного шару; γ_e – електрична складова міжфазної енергії; γ_p – механічна складова міжфазної енергії; σ_y – механічні напруження розтягу, які діють вздовж границі розділу середовищ в результаті сумування компоненти σ_y в околі границі розділу середовищ визначають міжфазний натяг σ_m (четверте співвідношення із (1)). Умову рівноваги міжфазного шару для γ_m та наближені умови на границях міжфазного шару (при $x = H$ та $x = -H$) запишемо так [2-4]:

$$\frac{\partial \gamma_m}{\partial x} = \frac{\partial \gamma_e}{\partial x} + \xi_m \cdot \frac{\partial \gamma_p}{\partial x} = 0;$$

$$\sigma_y^+ + p = 0 \quad (x = +H) ; \quad \sigma_y^- + p = 0 \quad (x = -H) . \quad (2)$$

Тут індекс (+) відповідає параметрам металу, а (-) – параметрам покриття (або електроліту – агресивного середовища).

Подамо граничні умови для межі розділу середовищ метал – покриття (електроліт) [1-4]:

$$\Phi_+ = \Phi_-; \quad \sigma_{x+} = \sigma_{x-}, \quad \sigma_{y+} = \sigma_{y-} \quad \text{при} \quad (x = 0), \quad (3)$$

де σ_x – механічні напруження стиску, які діють перпендикулярно до границі розділу середовищ (рис 1.).

Необхідно врахувати зміщення Z_b подвійного електричного шару в глибину металу. Для зміщення Z_b використовуємо відому формулу [1-2]:

$$Z_b = (3/(4k_f))(\pi/2 + (E_f/E_v - 1)\arctg(E_f/E_v)^{1/2} - (E_f/E_v)^{1/2}). \quad (4)$$

Тут Z_b – ширина подвійного електричного шару на поверхні металу (аналітичний вираз для Z_b отримано Sugiyama A.); E_f – енергія Фермі; E_v – робота виходу електрона з металу; k_f – хвильовий вектор Фермі. Числові значення E_f , E_v , k_f , Z_b для заліза (Fe), золота (Au), срібла (Ag), алюмінію (Al) приведено в [1-3].

Співвідношення (1)–(4) створюють основу замкнутої системи рівнянь для визначення фізичних характеристик ξ_+ , ξ_- , ξ_m , $b = (b_+, b_-)$, $k = (k_+, k_-)$ і товщин $h = (h_+, h_-)$, $2H$ для поверхневих та міжфазного шарів. Роботу адгезії A_{ad} і енергію адгезійних зв'язків γ_{ad} системи метал – покриття (електроліт) визначимо на основі відомих співвідношень [1-3]:

$$A_{ad} = \sigma_{h+} + \sigma_{h-} - \sigma_m, \quad (5)$$

$$\gamma_{ad} = \gamma_+ + \gamma_- - \gamma_m. \quad (4.6)$$

Для запропонованої інформаційної технології розглядаємо три типи контактуючих середовищ: 1) метал (який кородує) – метал (покриття); 2) метал (який кородує) – діелектрик (покриття); 3) метал (який кородує) – розчин електроліту (покриття відсутнє). У першому випадку це може бути, наприклад, сталь – срібне покриття, у третьому – метал (сталь), який контактує безпосередньо з розчином електроліту в тріщині чи пітингу (рис. 1).

Алгоритм розв'язування задачі (1)–(6).

1) вибір системи контактуючих середовищ, наприклад «залізо (кородує) – метал (Au або Ag або Al – покриття)», «залізо (кородує) – електроліт», ...

2) оцінка фізичних характеристик і параметрів (з таблиць фізичних величин, довідників, наукових статей, Internet), зокрема згідно [1-3]:

$$E_+ = 177 \text{ GPa}, \quad \nu_+ = 0,334, \quad N_+ = 8,5 \cdot 10^{28} \text{ 1/m}^3,$$

$$\sigma_{h+} = 2,5 \text{ N/m}, \quad \gamma_+ = 2,5 \text{ J/m}^2, \quad Z_{b+} = 0,0236 \text{ nm (Fe);}$$

$$E_- = 80 \text{ GPa}, \quad \nu_- = 0,42, \quad N_- = 8,45 \cdot 10^{28} \text{ 1/m}^3,$$

$$\sigma_{h-} = 1,89 \text{ N/m}, \quad \gamma_- = 2,52 \text{ J/m}^2, \quad Z_{b-} = 0,034 \text{ nm (Au);}$$

$$E_- = 77 \text{ GPa}, \quad \nu_- = 0,37, \quad N_- = 5,85 \cdot 10^{28} \text{ 1/m}^3,$$

$$\sigma_{h-} = 1,5 \text{ N/m}, \quad \gamma_- = 2,52 \text{ J/m}^2, \quad Z_{b-} = 0,0318 \text{ nm (Ag);}$$

$$\begin{aligned}
 E_- &= 70 \text{ GPa}, \quad \nu_- = 0,34, \quad N_- = 5,8 \cdot 10^{28} \text{ 1/m}^3, \\
 \sigma_{h-} &= 1,05 \text{ N/m}, \quad \gamma_- = 1,043 \text{ J/m}^2, \quad Z_{b-} = 0,0133 \text{ nm (Al);} \\
 E_- &= 7,3 \text{ GPa}, \quad \nu_- = 0,3, \quad N_- = 10,037 \cdot 10^{28} \text{ 1/m}^3, \\
 \sigma_{h-} &= 0,5 \text{ N/m}, \quad \gamma_- = 0,5 \text{ J/m}^2 \text{ (вода)},
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

де N_+ , N_- – число частинок (атомів) в одиниці об'єму;

3) визначення на основі комп'ютерної програми стрибка потенціалів $\Delta\psi$ на міжфазних границях в системі «метал – електроліт» («метал – покриття»), а також енергетичних характеристик міжфазних шарів $\sigma_m, \gamma_m, A_{ad}, \gamma_{ad}$. Комп'ютерна програма розроблена з використанням співвідношень (1)–(6) і її структура подана на рис. 2. На основі $\Delta\psi$ (на границі метал – розчин електроліту) визначаємо зміни густини I_k корозійного струму [1-3]:

$$I_k = \frac{E_k - E_a}{R_k + R_a + R_C + R_M},
 \tag{8}$$

де E_k, E_a – електродні потенціали відповідно катодної й анодної ділянок; R_k, R_a, R_C, R_M – поляризаційні опори катодної і анодної ділянок, опір середовища (зовнішній) та опір металу (внутрішній опір корозійної пари).

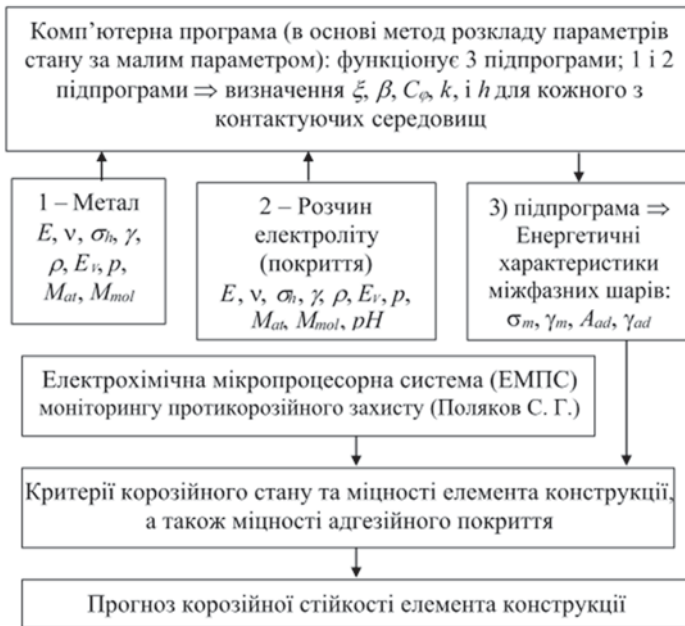


Рис. 2. Структура інформаційно-аналітичної моделі відбору, опрацювання і використання інформації про фізико-хімічні параметри контактуючих середовищ протикорозійного захисту ($E\nu$ – робота виходу електрона з поверхні металу; M_{at} , – атомна маса металу; M_{mol} – молярна маса речовини; pH – водневий показник розчину електроліту)

Густина I_k корозійного струму є важливим параметром процесу, оскільки його величина є основним критеріальним значенням для визначення швидкості залишкової корозії металу в дефекті ізоляційного покриття [1]:

$$I_k = I_{kg} \cdot 10^{V_{pt}}; \quad V_{pt} = \frac{\bar{E}_{cor} - \bar{E}_p}{b_{at}}. \quad (9)$$

Тут I_{kg} – швидкість ґрунтової корозії металу; \bar{E}_{cor} – корозійний потенціал; \bar{E}_p – поляризаційний потенціал; b_{at} – тафелевський нахил анодної поляризаційної кривої.

Для критерію (9) на рис. 3 зображено алгоритм. З допомогою енергетичних характеристик міжфазних шарів $\sigma_m, \gamma_m, A_{ad}, \gamma_{ad}$ визначаємо умови адгезії, механічної міцності (і, відповідно, умови руйнування) покриття, які захищають метал від корозійного середовища. З використанням даних (7) і комп'ютерної програми отримано для двох системи отримано:

А) «сталь – срібло (покриття)» –

$$\sigma_m = 1,5426 \text{ N / m}, \quad \gamma_m = 1,5905 \text{ J / m}^2, \quad A_{ad} = 2,457 \text{ N / m}, \quad \gamma_{ad} = 3,430 \text{ J / m}^2,$$

$$z_\gamma = \frac{\gamma_m}{\gamma_{ad}} = 0,464; \quad z_A = \frac{\sigma_m}{A_{ad}} = 0,628; \quad \Delta\Psi_m = 1,659 \text{ V}; \quad Q_m = 0,232 \frac{\text{C}}{\text{m}^2};$$

В) «сталь – алюміній (покриття)» –

$$\sigma_m = 1,455 \text{ N / m}, \quad \gamma_m = 1,0363 \text{ J / m}^2, \quad A_{ad} = 2,095 \text{ N / m}, \quad \gamma_{ad} = 2,507 \text{ J / m}^2,$$

$$z_\gamma = \frac{\gamma_m}{\gamma_{ad}} = 0,413; \quad z_A = \frac{\sigma_m}{A_{ad}} = 0,694; \quad \Delta\Psi_m = 2,146 \text{ V}; \quad Q_m = 0,209 \frac{\text{C}}{\text{m}^2}. \quad (10)$$

алгоритм

змінні

дійсні $\bar{E}_{cor}, \bar{E}_{cor}, b_{at}, I_{kg}, I_k, V_{pt}, a1, b1, b2, b3, b4, b5;$

дійсні $aaa, bbbb, cccc;$

початок

ввести $\bar{E}_{cor}, \bar{E}_{cor}, b_{at}, I_{kg};$

$I_k = 1.4;$

$V_{pt} = (\bar{E}_{cor} - \bar{E}_p) / b_{at}; \quad I_k = I_{kg} \cdot 10^{V_{pt}};$

вивести $I_k;$

вивести &Перевірка_процедури_DoIt, $I_k;$

/- $I_k = \alpha_1, I_k = \alpha_2, \alpha_1 > \alpha_2$ -/;

вивести &Перевірка_оператора_/-.....-/, $I_k;$

$I_k = 1;$

*\$ d $I_k = I_k * a, a = a + 1;$*

вивести &Перевірка_оператора_\$_x....., $I_k;$

кінець

Рис. 3. Алгоритм визначення швидкості залишкової корозії металу в дефекті ізоляційного покриття (за струмом корозії I_k)

Тут Q_m – заряд обкладки подвійного електричного шару (в околі межі «метал (залізо) – покриття»). Значення (10) можна використати як тестові приклад для запропонованої інформаційної технології. Для вимірювання адгезії покриття відносно металу, який захищають від корозії [2-6], використовують прилади – адгезиметри.

Для прикладу [2] $\Delta\Psi_m$ – електричний бар'єр на границі «метал (сталь 3) – водний розчин слабого електроліту» (стрибок потенціалу в подвійному електричному шарі) приймає значення:

$$\Delta\Psi_m = 5,3 \text{ В.} \quad (11)$$

Значення (11) можна розглядати також як тестовий приклад для запропонованої інформаційної технології. Використовуємо для позначення ємності міжфазного електричного конденсатора позначення C_m , а також формули, аналогічні [1-4]:

$$\gamma_{m1} = \frac{Q_m^2}{2 \cdot C_m} = \frac{Q_m \cdot \Delta\Psi_m}{2}, \quad C_m = \frac{Q_m}{\Delta\Psi_m} = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \cdot k_m, \quad d_\xi = \frac{2}{k_m}, \quad k_m = \sqrt{\frac{\rho_m \cdot C_{\phi m}}{\varepsilon_0}}, \quad (12)$$

де γ_{m1} – електрична складова міжфазної енергії; $d_\xi = 2H$ – ефективна товщина подвійного електричного шару; ρ_m – усереднена густина матеріалу в області подвійного електричного шару ($\rho_m \approx 9187 \text{ кг/м}^2$). Вирази (12) випливають із відомих співвідношень електростатики і [1-4].

Підставляючи Q_m і $\Delta\Psi_m$ в (12), отримуємо:

А) «сталь – срібло (покриття)» –

$$\gamma_{m1} = 0,308 \text{ Дж/м}^2, \quad C_m = 86,8 \text{ мФ/м}^2, \quad k_m = 1,96 \cdot 10^{10} \text{ 1/м},$$

$$d_\xi = 0,102 \text{ нм}, \quad C_{\phi m} = 3,70 \cdot 10^5 \text{ Ф/кг};$$

В) «сталь – алюміній (покриття)» –

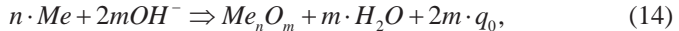
$$\gamma_{m1} = 0,224 \text{ Дж/м}^2, \quad C_m = 97,28 \text{ мФ/м}^2, \quad k_m = 2,20 \cdot 10^{10} \text{ 1/м},$$

$$d_\xi = 0,091 \text{ нм}, \quad C_{\phi m} = 8,09 \cdot 10^5 \text{ Ф/кг}. \quad (13)$$

Тут $C_{\phi m}$ – питома електроємність подвійного електричного шару (в околі межі «метал–покриття»). Параметри $\Delta\Psi_m$ і C_m важливі для вивчення механізмів антикорозійного захисту. Срібло можна використовувати як покриття тільки в тому випадку, якщо буде суцільне покриття без дефектів. Вигідніше покривати залізо алюмінієм, оскільки в алюмінію більш від'ємний електродний потенціал і, крім того, алюміній значно дешевший. Але в практиці можуть бути покриття з домішками [2-5], а домішки можуть як збільшувати, так і зменшувати електродний потенціал, і відповідна методика, яка апробована для покриттів з двома протилежними значеннями відносного електродного потенціалу (10), (13) допоможе на основі результатів стимуляційних програм прийняти правильне рішення, що забезпечить оптимальний варіант антикорозійного захисту.

Фізико-математична модель активації деформованого металу поблизу вершини корозійної тріщини має важливе значення. Утворення оксиду в околі

вершини тріщини можливе внаслідок взаємодії металу (Me) з іонами OH^- [1-3]:



де $q_0 = 1,6 \cdot 10^{-19}$ С – елементарний заряд (заряд електрона); n, m – натуральні числа.

Рівноважний потенціал утворення оксиду E_p^{MeO} на поверхні металу залежить від рівноважного потенціалу (електродного) процесу E_p і кислотності pH зовнішнього корозійного середовища [1-4]:

$$E_p^{MeO} = E_p + 0,826 - 0,059 \cdot pH. \quad (15)$$

Тут в (15) значення потенціалів виражені у вольтах.

В результаті розв'язання в циліндричних координатах (r, θ, z) задачі розподілу механічних напружень в області тріщини отримано наближене співвідношення для нормованих напружень:

$$\alpha_1 = \max(\bar{\sigma}_1) = \max(\sigma_{\theta\theta}(r, z, \pi/2) / \sigma_1) = 1 + 2 \cdot \bar{b}^{-\bar{a}/(\bar{a}+0,25)}, \quad (16)$$

де $\bar{a} = a / H_t$, $\bar{b} = b / H_t$; $\theta = \pi/2$ у вершині тріщини (в початку координат (див. рис. 1)); $\sigma_{\theta\theta}$ – компонента механічних напружень у циліндричних координатах (r, θ, z); $D=2R_t$, H_t – діаметр і товщина труби відповідно; $d=2a$, b – діаметр та глибина заглибини (поверхневої тріщини).

Енергетичний баланс процесу поширення корозійної тріщини в метали можна представити аналогічно як у ситуації корозійного розтріскування: робота пластичної деформації – P_{PL} , зміна початкового запасу енергії W_{zp} , виділення енергії в процесі електрохімічної реакції W_{ec} [1]:

$$P_{PL} = W_{zp} + W_{ec} = \frac{K_1^2(1-\nu^2)}{E} + \frac{z_{si}F\rho}{\zeta} \cdot \frac{\delta}{M}, \quad (17)$$

де K_1 — коефіцієнт інтенсивності напружень; ρ – густина матеріалу; z_{si} – формальний заряд сольватованих іонів; $F = 96500$ С/гр·mol – постійна Фарадея; δ – висота фронту тріщини, що насувається; M – молекулярна маса металу; ζ – перенапруження анодної реакції. Величиною поверхневої енергії в (17) можна нехтувати, оскільки вона мала в порівнянні з роботою пластичної деформації P_{PL} [1-3].

При пороговому значенні коефіцієнта інтенсивності напружень K_{1SCC} , тобто при мінімальному значенні K_1 , що відповідає початку поширенню корозійної тріщини, рівняння (17) набуває наступного вигляду:

$$K_{1SCC} = \sqrt{\frac{E}{1-\nu^2} \cdot \left(\frac{P_{PL} - z_{si}F\rho\delta\zeta}{M} \right)} = \sqrt{C_{k1}(P_{PL} - C_{k2} \cdot \zeta)}, \quad (18)$$

$$\text{де } C_{k1} = \frac{E}{M(1-\nu^2)}; \quad C_{k2} = \frac{z_{si}F\rho\delta E}{M(1-\nu^2)}.$$

Із виразу (18) видно, що P_{PL} , ζ – основні величини, від яких залежить K_{1SCC} . Зменшення значення роботи пластичної деформації P_{PL} відбуватиметься в результаті збільшення або межі текучості, або швидкості

механічного зміцнення у вершині тріщини [2]. В результаті кожен з цих чинників при постійному значенні ζ знижуватиме величину K_{ISCC} і, отже, знижуватиме ступінь опору щодо поширення корозійної тріщини [1]. Збільшення перенапруження анодної реакції ζ (при цьому потенціал металу стає більш електропозитивним) при певному значенні роботи пластичної деформації P_{PL} , згідно співвідношення (18), приводитиме до пониження опору поширенню тріщини. Величина анодного перенапруження ζ є функцією електрохімічних умов усередині тріщини і, відповідно, умови поширення корозійної тріщини будуть залежати від pH (водневого показника) розчину електроліту, активності аніонів, електродного потенціалу E_p , хімічного складу металу, поверхневого натягу і поверхневої енергії поблизу вершини тріщини, а також умов формування пасивувального шару. Напруження, що виникають в металі, і швидкість росту корозійного дефекту зв'язують за допомогою співвідношень нерівноважної термодинаміки. Деформація металу ε (ε – перший інваріант тензора деформацій) розглядається на стадії лінійного зміцнення, коли дислокації шикуються і рухаються в системі паралельних площин ковзання за відсутності поперечного ковзання. З математичних міркувань впливає ряд феноменологічних рівнянь, що відображають взаємозв'язок процесів пластичної деформації і стресс-корозії в металах. Такі рівняння при одночасному процесі деформування і електрохімічної корозії приймають наступний вигляд [2,3]:

$$J_d = L_A A + L_B \zeta; \quad I_C = L_C \varepsilon + L_d \zeta; \quad (19)$$

де J_d – густина потоку дислокацій (дислокаційний струм); I_C – густина електричного струму при корозії; A – узагальнена сила (хімічна спорідненість процесів створення і руху дислокацій); феноменологічні коефіцієнти: L_A – коефіцієнт, що характеризує провідність; L_d – характеризує поляризованість електроду; $L_C = L_B$ регулюють ступінь взаємного впливу деформації та електрохімічної корозії і виражають кількісно явище механохімічного ефекту. Фізичний сенс цього коефіцієнта (L_C) полягає в зміні хімічного потенціалу металу в результаті його пластичної деформації, яка пов'язана з ослабленням міжатомних зв'язків в місцях скупчення дислокацій.

Використаємо базову концепцію механіки корозійного руйнування конструкційних матеріалів [2,3,5]. Згідно цієї концепції стан зони передруйнування матеріалу в околі вершини тріщини можна описати такими групами параметрів [1-4]: $P_f(\sigma)$ – параметри, що характеризують напружено-деформований стан матеріалу і є функціями прикладених до тіла зовнішніх зусиль, яким відповідають напруження σ (σ – перший інваріант тензора механічних напружень); $L_m(\tau)$ – параметри, які визначають у часі τ фізико-хімічні процеси, що проходять між деформованим металом і корозійним середовищем; $B_m(s)$ – параметри, що характеризують стан поверхонь матеріалу «s», які є до руйнування і утворюються під час руйнування. Швидкість локального корозійного руйнування матеріалу (тобто швидкість розвитку корозійної тріщини, яка виникне у вершині поверхневого дефекту)

подамо аналогічно як для корозійно-втомної тріщини:

$$\frac{da_i}{d\tau} = f(C_i, P_j(\sigma), L_n(\tau), B_m(s)), \quad (20)$$

де a_i – характерний лінійний розмір тріщини в напрямку її поширення; C_i – константи, що характеризують систему «матеріал (метал) – корозійне середовище»; $i, j, n, m = 1, 2, 3, \dots$ Наближено для зони передруйнування металу (сталі) співвідношення (20) запишемо у вигляді:

$$\frac{da}{d\tau} = f(E, \nu, K_1, pH, E_p, \gamma_m, \sigma_m, \gamma_s), \quad (21)$$

де $E, \nu, K_1, pH, E_p, \gamma_m, \sigma_m, \gamma_s$ – фізичні характеристики матеріалу і параметри стану; γ_m, σ_m – міжфазні енергія та натяг; $\gamma_s = \gamma_s(\gamma_m)$ – питома робота пластичної деформації на одиницю поверхні тріщини при утворенні нової деформаційно активованої поверхні. Параметр γ_s входить у відому формулу Гріфітса-Орована [1]:

$$\sigma_* = \sqrt{\frac{2E(\gamma_m + \gamma_s)}{\pi \cdot a_i (1 - \nu^2)}}, \quad \sigma_{**} = \sqrt{\frac{2E(\gamma_m + \gamma_s)}{\pi \cdot a_i}}, \quad (22)$$

Тут перша формула (22) записана для плоскої деформації, друга – для плоского напруженого стану; σ^*, σ^{**} – критичні напруження ($\sigma^* = \sigma_T$, σ_T – границя текучості).

Аналогічно як у [1-4] подамо оцінки довжин пластичних зон в околі вершини тріщини:

$$d_* = 0,578 \frac{K_1^2}{\pi \cdot \sigma_T^2}, \quad d_{**} = \frac{\pi \cdot K_1^2}{8 \cdot \sigma_T^2}, \quad (23)$$

де d^* і d^{**} – характерні розміри пластичних зон для плоскої деформації і плоского напруженого стану відповідно. Для оцінювання граничного стану матеріалу (сталі) поблизу вершини тріщини в умовах складного напруженого стану використовуємо критерій Губера-Мізеса (для σ_i – інтенсивності напружень) або Кулона-Треска (для σ_r – максимального дотичного напруження):

$$\sigma_i = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2} = const, \quad (24)$$

$$\sigma_r = \tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = const,$$

в яких $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3 = \sigma_{zz}$ – головні напруження.

Для моделювання особливостей пластичного деформування у вершині тріщини використаємо інтегральну характеристику швидкості процесу, що веде до розриву тіла, тобто “довговічність” (τ_d) – час між моментом прикладання навантаження σ і моментом розриву тіла. Цей час обернено пропорційний середній швидкості процесу руйнування:

$$\tau_d(\sigma, T) = \tau_0 \exp \frac{U_0 - \gamma_d \cdot \sigma}{kT}, \quad (25)$$

де k – постійна Больцмана; $\tau_0 \sim 10^{-13}$ с – час, за порядком величини близький до періоду коливань атомів у твердих тілах (періоду коливань максимальної частоти в дебаєвському спектрі); U_0 характеризує енергію активації розриву міжатомних зв'язків і практично співпадає з енергією дисоціації речовини (металу); $\gamma_d = q \cdot V_a$, де V_a – активаційний об'єм у елементарному акті дисоціації, q коефіцієнт (безрозмірний) локальних механічних перенапружень (досягає за рахунок мікродфектів в реальних тілах значень $10 \div 100$ і вище, що і характеризує відмінність експериментальної величини міцності від теоретичної) [2-4]. Зокрема, для сталі (заліза) $U_0 = 4,4$ еВ ($1 \text{ еВ} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж), $V_a = 1,2 \cdot 10^{-2}$ нм³ [2]. Необхідно відзначити, що U_0 близька до енергії сублімації W_{subl} більшості металів, яка для заліза приймає значення $W_{subl}(Fe) = 4,2$ еВ [2].

Пластичне деформування металу супроводжується послідовними елементарними актами розриву напружених міжатомних зв'язків в результаті флуктуацій теплової енергії атомів. Залежність (25) увійшла до сфери наукових досліджень про міцність (руйнування) як формула Журкова [2]. Процесу електрохімічної (корозійної) реакції в системі «метал – електроліт» відповідають густини анодного i_a і катодного i_k струмів, які характеризують швидкості окислення та відновлення [2,3]:

$$i_a = k_1 \exp(-w_a / (RT)), \quad i_k = k_2 C \exp(-w_k / (RT)). \quad (26)$$

Тут k_1 , k_2 – константи швидкостей анодної та катодної реакцій; C – концентрація (активність) іонів металу (окиснювача) в приелектродному шарі електроліту; w_a , w_k – енергії активації анодної та катодної реакцій; $R = 8,31$ Дж/(г·моль·К) – універсальна газова стала; T – абсолютна температура. У виразі для i_a (26) у явному вигляді не входить концентрація атомів металу, бо вона під час реакції практично не змінюється і включена в константу k_1 .

Енергії активації електрохімічного процесу з урахуванням стрибка потенціалу напруженості електричного поля в подвійному електричному шарі $\Delta\psi_z$, тобто змін, викликаних в результаті поляризації об'єкту від зовнішнього джерела $\Delta\psi_e$, кривизни поверхні $\Delta\psi_r$, зміщення електродного потенціалу $\Delta\psi_s$ і механічним навантаженням $\Delta\psi_p$, запишемо у вигляді:

$$w_a = w_{0a} - \alpha z F (\Delta\psi_e + \Delta\psi_r + \Delta\psi_s + \Delta\psi_p),$$

$$w_k = w_{0k} + (1 - \alpha) z F (\Delta\psi_e + \Delta\psi_r + \Delta\psi_s), \quad (27)$$

де α , $(1 - \alpha)$ – коефіцієнти переносу; z – валентність іона; w_{0a} , w_{0k} – постійні величини для конкретних умов системи «метал – корозійне середовище (електроліт)». У [2] наведено приклади методики теоретичного оцінювання $\Delta\psi_e$ для металів. Зокрема, для сталі (заліза) $\Delta\psi_e = 5,3$ В (11).

Методика оцінювання зміни електродного потенціалу $\Delta\psi_r$, викликаного кривизною поверхні, і відповідний конкретний приклад для металевого тіла з

порожниною еліптичного перерізу наведено у працях [1,6]. На основі числових розрахунків встановлено, що перевищення електродного потенціалу у вершині еліпса в порівнянні з коловим отвором сягає більше 5 разів. Поверхня, заповнена пасивною плівкою, має властивості катодної області, а ювенільна поверхня поблизу вершини тріщини є анодною. При катодній поляризації зменшується густина струму анодного розчинення. При цьому виконується умова $i_a < i_{cor}$, де i_a – густина анодного струму, i_{cor} – струм корозії. Зниження i_a досягають шляхом накладання катодного поляризуючого струму з густиною i_p . Практично важливою є залежність між ними. Ефективність катодного захисту оцінюють на основі використання коефіцієнта гальмування корозії g , а також ступеня захисту P

$$g = \frac{i_{cor}}{i_a}, \quad P = 1 - \frac{1}{g}. \quad (28)$$

На основі співвідношень (1)–(27) можна оцінити енергетичні характеристики міжфазних шарів та активаційних процесів, які характеризують метал, середовище і динаміку корозійних (анодного та катодного) процесів поблизу вершини тріщини в навантаженому металі. Основне завдання запропонованої інформаційної технології – відбір і використання даних для фізико-механічних моделей, які відображені співвідношеннями (1)–(27). З допомогою інформаційно-комп’ютерної технології корозіометрії, яка враховує корозійні процеси поблизу вершини тріщини можна оцінювати якість протикорозійного захисту. Сформулюємо відповідні співвідношення концептуальної моделі для оцінювання якості протикорозійного захисту:

$$Ks = Ks(T, gradT, A(L, G, S), \sigma_{ij}), \quad Nz = Nz(T, gradT, A(L, G, S), \sigma_{ij}), \\ Pz = Pz(Nz, Ks), \quad Rz = Rz(Nz, Ks), \quad (29)$$

де σ_{ij} – компоненти тензора механічних напружень; Pz – набір параметрів, які характеризують міжфазні (поверхневі) шари; Nz – набір параметрів, які характеризують фізико-хімічні процеси в дефектах (тріщинах, пітингах); T – температура; $gradT$ – градієнт температури [2]; $A(L, G, S)$ – корозійні втрати (L, G, S – символічне позначення рідини (liquid), газу (gas), твердого тіла (solid)); Rz – набір параметрів, які характеризують корозійні струми; Ks – символічне позначення корозійної стійкості, для визначення якої можна використовувати критерій (9) і параметри g, P (28).

Загальний традиційний підхід до формування виробничої технології захисту металів від корозії включає наступні етапи (рис. 4).

На основі рівнянь (1)–(6) а також числових значень констант (7):

$$E = 200 \text{ ГПа}, \quad \nu = 0,26, \quad Z_b = 0,014 \text{ нм}; \quad N = 8,5 \cdot 10^{28} \text{ 1/м}^3; \quad E_v = 4,16 \text{ еВ};$$

$$E_f = 11,6 \text{ еВ}; \quad k_f = 1,714 \cdot 10^{10} \text{ 1/м}; \quad \sigma_h = 4,18 \text{ Н/м}; \quad \gamma = 2,26 \text{ Дж/м}^2, \quad (30)$$

з допомогою автоматизованих способів комп’ютерної алгебри для температури $T = 300 \text{ К}$ для сталі 20 встановлено:

$$k_1 = 1,33 \cdot 10^{10} \text{ 1/м}, \quad \zeta_1 = 15,43, \quad \beta_1 = -0,120 \text{ 1/В}; \quad \Delta \Psi_1 = 8,69 \text{ В};$$

$$k_2 = 2,04 \cdot 10^{10} \text{ 1/м}, \quad \zeta_2 = 34,07, \quad \beta_2 = -0,116 \text{ 1/В};$$

$$\Delta \Psi_2 = 3,7 \text{ В}; \gamma_{m1} = 0,742 \text{ Дж/м}^2. \quad (31)$$

Тут індекс "1" відповідає сталі, яка контактує з повітрям, а "2" – сталі, яка контактує з корозійним середовищем (розчином NACE); $\Delta \Psi$ – стрибок потенціалу напруженості електричного поля на границі метал – агресивне середовище; γ_{m0} – міжфазна енергія ненавантаженого зразка. Проведено аналіз процес довготривалої корозійної міцності (циклічної тріщиностійкості) сталей у розчині NACE протягом 720 годин від початкового напруження σ_{y0} до порогового σ_{yz} . Порогове напруження σ_{yz} – граничне напруження, за якого метал не руйнується протягом 720 годин.

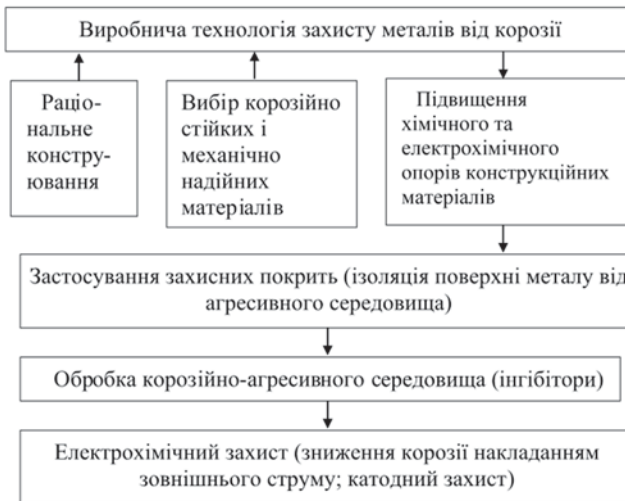


Рис. 4. Етапи технології для захисту металів від корозії

Методика визначення циклічної тріщиностійкості матеріалів передбачає [1,2,4] використання таких приладів та матеріалів: машина МО-041 для циклічних випробувань, EUS-20, шлейфовий осцилограф, блок живлення ВИП-009, катетометр В-630, призматичний зразок (сталі) з концентратором та виведеною тріщиною [2]. Пристрій EUS-20 – універсальна машина для випробування на міцність; служить для випробування матеріалів, зокрема, для випробування матеріалів всякого роду на міцність при розтягуванні, стискуванні і згині. На основі системи рівнянь (1)–(6) для даних [2] отримано конкретні числові значення змін міжфазної енергії γ_m . Зокрема, для різних марок сталей:

$$\begin{aligned} \text{стал 20: } & \sigma_{y0} = 330 \text{ МПа}; \quad \sigma_{yz} = 195 \text{ МПа}; \\ & \gamma_m = [0,767 \text{ Дж/м}^2; 0,797 \text{ Дж/м}^2]; \quad \Delta \Psi_2 = 3,650 \text{ В}; \\ \text{стал 12 X1МФ} & - \sigma_{y0} = 510 \text{ МПа}; \quad \sigma_{yz} = 170 \text{ МПа}; \end{aligned} \quad (32)$$

$$\gamma_m = [0,77 \text{ Дж/м}^2; 0,827 \text{ Дж/м}^2]; \Delta \Psi_2 = 3,839 \text{ В}; \quad (33)$$

сталь 20ЮЧ – $\sigma_{y_0} = 305 \text{ МПа}$; $\sigma_{yz} = 195 \text{ МПа}$;

$$\gamma_m = [0,774 \text{ Дж/м}^2; 0,792 \text{ Дж/м}^2]; \Delta \Psi_2 = 3,616 \text{ В}; \quad (34)$$

сталь 17ГС – $\sigma_{y_0} = 310 \text{ МПа}$; $\sigma_{yz} = 210 \text{ МПа}$;

$$\gamma_m = [0,777 \text{ Дж/м}^2; 0,793 \text{ Дж/м}^2]; \Delta \Psi_2 = \Delta \Psi = 3,622 \text{ В}; \quad (35)$$

сталь 14ГБ – $\sigma_{y_0} = 390 \text{ МПа}$; $\sigma_{yz} = 250 \text{ МПа}$;

$$\gamma_m = [0,783 \text{ Дж/м}^2; 0,807 \text{ Дж/м}^2]; \Delta \Psi_2 = \Delta \Psi = 3,686 \text{ В}; \quad (36)$$

сталь 14ГБ (зварне з'єднання) – $\sigma_{y_0} = 380 \text{ МПа}$; $\sigma_{yz} = 210 \text{ МПа}$;

$$\gamma_m = [0,777 \text{ Дж/м}^2; 0,805 \text{ Дж/м}^2]; \Delta \Psi_2 = \Delta \Psi = 3,70 \text{ В}; \quad (37)$$

сталь 02 Х20Н6М3 – $\sigma_{y_0} = 420 \text{ МПа}$; $\sigma_{yz} = 290 \text{ МПа}$;

$$\gamma_m = [0,79 \text{ Дж/м}^2; 0,812 \text{ Дж/м}^2]; \Delta \Psi_2 = \Delta \Psi = 3,744 \text{ В}. \quad (38)$$

На першому етапі обмежимося розглядом трьох визначальних параметрів: σ_{yz} , $(\gamma_m)_{\max}$, і $\Delta \Psi_2$. Перші два параметри характеризують міцність матеріалу і вони повинні бути максимальними, третій параметр $\Delta \Psi_2$ ($\Delta \Psi_2 = \Delta \Psi$) характеризує електричний бар'єр на границі «метал – агресивне середовище» і він також повинен бути максимальним. Частинки сірководню адсорбуються на поверхні зразка сталі, зменшують міцність поверхні (ефект Ребіндера), а також значення $\Delta \Psi_2$ і процес корозії підсилюється (стає більш інтенсивним приблизно в 3 рази як свідчать експерименти). Всі три параметри мають різну розмірність і тому їх не можна порівнювати. А порівнювати потрібно, Тому їх зробимо безрозмірними. Для цього серед кожного набору даних визначаємо максимальне значення:

$$\gamma_{mm} = 0,827 \text{ Дж/м}^2 \text{ (12 Х1МФ)}; \Delta \Psi_{2m} = \Delta \Psi_m = 3,616 \text{ В (20ЮЧ)}; \quad (39)$$

$$\sigma_{yzm} = 290 \text{ МПа (02 Х20Н6М3)}.$$

На ці значення (39) ділимо інші параметри і заносимо в таблицю 1.

$$\gamma_{mv} = \frac{\gamma_m}{\gamma_{mm}}; \quad \sigma_{yzv} = \frac{\sigma_{yz}}{\sigma_{yzm}}; \quad \Delta \Psi_v = \frac{\Delta \Psi}{\Delta \Psi_m}. \quad (40)$$

Таблиця 1

Відносні значення параметрів γ_{mv} , σ_{yzv} , $\Delta \Psi_v$, M_j

No	Марка сталі	γ_{mv}	σ_{yzv}	$\Delta \Psi_v$	M_1	M_2
1	20	0,963	0,672	0,951	0,8703	0,8703
2	12 Х1МФ	1,0	0,586	1,0	0,8758	0,9172
3	20ЮЧ	0,958	0,672	0,942	0,8658	0,8912
4	17ГС	0,959	0,724	0,9435	0,8823	0,9027
5	14ГБ	0,976	0,862	0,9601	0,9354	0,9437
6	14ГБ (зварне з'єднання)	0,973	0,724	0,9638	0,8946	0,9177
7	02 Х20Н6М3	0,972	1,0	0,9753	0,9847	0,9815

Формулюємо критерій оптимальності для параметрів γ_{mv} , σ_{yzv} , $\Delta\Psi_v$:

$$\alpha_1 \cdot \gamma_{mv} + \alpha_2 \cdot \sigma_{yzv} + \alpha_3 \cdot \Delta\Psi_v = M_j \Rightarrow \max, \quad (41)$$

де $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – коефіцієнти вагомості, які визначають експертним методом ($\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1$); j – індекс відповідної комбінації факторного варіанту ($j = 1, 2, 3, \dots$).

Розрахунок M_j проводимо для різних можливих комбінацій коефіцієнтів вагомості, зокрема, в табл. 1 наведено результати розрахунку для двох варіантів:

$$M_1 \Rightarrow \alpha_1 = 0,3; \alpha_2 = 0,3; \alpha_3 = 0,4; \quad M_2 \Rightarrow \alpha_1 = 0,2; \alpha_2 = 0,2; \alpha_3 = 0,6. \quad (42)$$

Максимальні значення параметрів γ_{mv} , σ_{yzv} , $\Delta\Psi_v$ відповідають двом маркам сталі 12 Х1МФ (No 2) і 02 Х20Н6М3 (No 7). З допомогою співвідношень (41) і (42) встановлюємо остаточний оптимальний варіант 02 Х20Н6М3 (No 7).

Ускладнюємо інформаційну задачу, ввівши в розгляд четвертий параметр – ціну P_s (price, економічний показник) (P_m – максимальна ціна). Якщо параметри γ_{mv} , σ_{yzv} , $\Delta\Psi_v$ в (41) бажано вибирати максимальними, то ціну P_s слід вибрати мінімальною. В цьому випадку критерій типу (41) для 4-х параметрів γ_{mv} , σ_{yzv} , $\Delta\Psi_v$, P_s повинен мати вигляд критерію компромісу:

$$\alpha_1 \cdot \gamma_{mv} + \alpha_2 \cdot \sigma_{yzv} + \alpha_3 \cdot \Delta\Psi_v = M_{rj} \Rightarrow \max, \quad P \Rightarrow \min. \quad (43)$$

Щоб спростити ситуацію, відносний параметр для ціни вибираємо оберненим (обернена ціна), тобто максимальну ціну P_m ділимо на P_s :

$$\frac{P_s}{P_m} \Rightarrow \min; \quad P = \frac{P_m}{P_s} \Rightarrow \max. \quad (44)$$

Аналогічно як (41) формулюємо критерій оптимальності для параметрів γ_{mv} , σ_{yzv} , $\Delta\Psi_v$, P :

$$\alpha_1 \cdot \gamma_{mv} + \alpha_2 \cdot \sigma_{yzv} + \alpha_3 \cdot \Delta\Psi_v + \alpha_4 \cdot P = M_{rj} \Rightarrow \max, \quad (45)$$

де $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ – коефіцієнти вагомості, які визначають експертним методом ($\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 = 1$).

Розрахунок M_{rj} проведено для різних можливих комбінацій коефіцієнтів вагомості, зокрема, в табл. 2 наведено результати розрахунку для п'яти варіантів ($M_{r3} \div M_{r7}$):

$$\begin{aligned} M_{r3} &\Rightarrow \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = 0,25; \\ M_{r4} &\Rightarrow \alpha_1 = 0,2; \alpha_2 = 0,2; \alpha_3 = 0,3; \alpha_4 = 0,3; \\ M_{r5} &\Rightarrow \alpha_1 = 0,15; \alpha_2 = 0,15; \alpha_3 = 0,35; \alpha_4 = 0,35; \\ M_{r6} &\Rightarrow \alpha_1 = 0,35; \alpha_2 = 0,35; \alpha_3 = 0,15; \alpha_4 = 0,15; \\ M_{r7} &\Rightarrow \alpha_1 = 0,35; \alpha_2 = 0,3; \alpha_3 = 0,2; \alpha_4 = 0,15. \end{aligned} \quad (44)$$

Таблиця 2.

Відносні значення параметрів $P, M_{r3} \div M_{r7}$

No	Марка сталі	P	M_{r3}	M_{r4}	M_{r5}	M_{r6}	M_{r7}
1	20	1,488	1,018	1,058	1,099	0,937	0,951
2	12 X1MФ	1,707	1,073	1,129	1,185	0,961	0,982
3	20ЮЧ	1,488	1,015	1,055	1,095	0,935	0,949
4	17ГС	1,381	1,002	1,034	1,066	0,938	0,949
5	14ГБ	1,160	0,990	1,036	1,018	0,961	0,966
6	14ГБ (зварне з'єднання)	1,381	1,011	1,043	1,075	0,946	0,958
7	02 X20H6M3	1,00	0,989	0,989	0,989	0,990	0,989

З допомогою співвідношень (43) і (44) встановлюємо оптимальний варіант параметра M_j і відповідну марку сталі в кожному із п'яти варіантів:

$$12 X1M\Phi (No2) \Rightarrow M_{r3} = 1,073; M_{r4} = 1,129; M_{r5} = 1,185;$$

$$02 X20H6M3 (No7) \Rightarrow M_{r6} = 0,99; M_{r7} = 0,989. \quad (45)$$

Оптимальному варіанту марки сталі відповідає максимальна міцність, мінімальна ціна і максимальний бар'єр потенціалу на границі «метал – електроліт, насичений сірководнем». Для встановлення значень коефіцієнтів вагомості (42), (44) використовували експертні оцінки. Для оцінки узгодженості думок експертів найчастіше використовують коефіцієнт конкордації, величина якого вказує на достовірність оцінок. Коефіцієнт конкордації W визначають за формулою:

$$W = \frac{D_f}{D_{\max}} = \frac{\sum_{k=1}^{n_{ob}} \{a_i - 0,5 \cdot n \cdot (m+1)\}^2}{n^2 \cdot m \cdot (m^2 - 1) / 12}, \quad (46)$$

де D_f – фактична дисперсія (середньоквадратичне відхилення) підсумкових (впорядкованих, проранжованих) оцінок, які надані експертами; D_{\max} – дисперсія підсумкових (впорядкованих) оцінок за умови, що думки експертів повністю збігаються; a_i – сумарна оцінка, одержана для i -го об'єкту; m – кількість коефіцієнтів вагомості; n – кількість досліджуваних об'єктів (експертів досліджуваних об'єктів).

Величина коефіцієнта конкордації W коливається в межах від 0 до 1. При нульовому значенні коефіцієнта зв'язок між оцінками різних експертів відсутній, тобто узгодженості немає. Думки експертів збігаються при значенні $W=1$. Перевірка істинності коефіцієнта W реалізується з допомогою критерію згоди Пірсона (χ^2). Такий підхід використовується у тих випадках, коли необхідно встановити відповідність двох множин (розподілів) – емпіричного і теоретичного, або двох емпіричних. При цьому порівнюються частоти відповідних наборів даних, встановлюються невідповідності між

ними і визначаються ймовірності таких невідповідностей. Статистична характеристика для перевірки істинності коефіцієнта W визначається за критерієм Пірсона з допомогою співвідношення:

$$\chi^2 = W \cdot n \cdot (m - 1) \quad (47)$$

і порівнюється з табличними даними. Погодженість думок експертів щодо важливості критеріїв (41), (43), (45), які розглядалися в даній праці, оцінювали за допомогою коефіцієнта конкордації Кендела:

$$W_K = \frac{12 \cdot S}{n^2 \cdot (m_k^3 - m_k)}, \quad (48)$$

де m_k – число аналізованих змінних (коефіцієнтів вагомості); n – кількість об'єктів (експертів); S – сума квадратів рангів –

$$S = \sum_{i=1}^n r_{ij}^2 - \frac{1}{n} \cdot \left(\sum_{i=1}^n r_{ij}^2 \right)^2, \quad (49)$$

r_{ij} – розставлені ранги суджень групи експертів. Коригування фізико-хімічної та експертної інформації проводилось на основі терії опрацювання результатів вимірювань серій експериментальних досліджень. Після обчислення значення коефіцієнтів W , W_K їх перевіряють на значимість, тобто перевіряється гіпотеза про випадковість одержання даного конкретного значення W чи W_K за процедурою статистичної перевірки гіпотез. Відповідні гіпотези можна інтерпретувати або як незалежність оцінок експертів, або як випадковість протиставлення експертами своїх оцінок.

Підсумкову схему інформаційного забезпечення задачі прийняття рішення щодо вибору марки сталі, якій відповідає максимальна міцність матеріалу, мінімальна ціна і максимальний електричний бар'єр на границі «метал – корозійне (електролітичне) середовище» подано на рис. 5. Максимальний електричний бар'єр на границі «метал – корозійне (електролітичне) середовище» забезпечить мінімальний струм у вершині тріщини на поверхні елемента конструкції.

Висновки. Розроблена низка фізико-хімічних параметрів і співвідношень, які характеризують метал і середовище поблизу вершини корозійної тріщини дозволяє проводити оцінювання енергетичних характеристик поверхневих шарів для електрохімічного нарощування і травлення металів в багаторівневих структурах на основі створення та використання нової інформаційної технології. Моделювання і застосування відповідних інформаційних технологій має важливе значення для конструкцій із металів у водних розчинах електролітів із станом міжфазних шарів і фізико-хімічних процесів, що в них відбуваються. Відповідні дослідження щодо підвищення ефективності методів захисту потребували впровадження інформаційних технологій, пов'язаних із відбором інформації про параметри стану і процесів у приповерхневих шарах поблизу границі розділу між металом і агресивним середовищем. Розробка інформаційної технології такого типу є розвиток алгоритмічних підходів щодо вивчення особливостей

міжфазних ефектів та застосування відповідних результатів в методиках визначення енергетичних характеристик поверхневих шарів і створення інформаційного продукту нової якості, з допомогою якого можна вивчати приховані закономірності корозійних процесів за допомогою параметрів та фізико-хімічних характеристик, використовуючи сучасні програмні засоби.



Рис. 5. Структура інформаційно-аналітичної моделі відбору, опрацювання і використання інформації про фізико-хімічні параметри контактуючих середовищ в задачі прийняття рішень щодо вибору оптимального варіанту марки сталі, якому відповідає максимальна міцність, мінімальна ціна і максимальний бар'єр потенціалу на границі «метал – електроліт, насичений сірководнем».

1. Похмурський В. І. Адсорбційно-електрохімічна теорія корозійної втоми металів / В. І. Похмурський // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2010. – № 2. – С. 21-30.
2. Сопрунюк П. М. Автоматизація математичних обчислень для оцінки параметрів поверхневих шарів / П. М. Сопрунюк, В. М. Юзевич, О. І. Огірко, П. В. Луговий // Відбір і обробка інформації. – 2000. – Вип. 14(90) – С. 151-156.

3. *Юзевич В. М.* Інформаційна технологія оцінювання станів об'єктів із сталі в морському середовищі із сірководнем з використанням алгебри алгоритмів / В. М. Юзевич, О. І. Огірко // Наукові записки (Українська академія друкарства). – 2012. – № 4 (41). – С. 160–172.
4. *Сопрунюк П. М.* Оцінка поверхневої енергії сталей у сірководневих середовищах / П. Сопрунюк, В. Юзевич, О. Огірко // Фіз.-хім. механіка матеріалів. Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів. – 2000. – Т. 2, № 1. – С. 726-730.
5. *Юзевич В. М.* Інформаційна технологія оцінювання станів об'єктів із сталі в корозійному середовищі із сірководнем на основі термодинамічної моделі / В. М. Юзевич, О. І. Огірко // Матеріали III Всеукраїнської науково-практичної конференції “Сучасні інформаційні технології в економіці, менеджменті та освіті”. 21 листопада 2012 р., Львів. – С. 71-76.
6. *Юзевич В.М.,* Розрахунок впливу кількісного фактора на деформаційну характеристику поліуретанового зразка /В.М.Юзевич, Я.І Чехман // Поліграфія і видавнича справа. – Львів, 1987. – № 23. – С. 46-50.
7. *Юзевич В.М.,* Роль масштабного фактора при випробуванні поліуретанового зразка різної твердості /В.М.Юзевич, Я.І Чехман // Поліграфія і видавнича справа. – Львів, 1988. – № 24. – С. 47-49.
8. *Олійник Р.В.,* Інформаційна технологія обробки даних інформаційних систем із змінними структурою та параметрами. / Р.В.Олійник, О.І. Огірко // Комп'ютерні технології друкарства, УАД.Львів. 2016.1(35).С.87-97.

Поступила 20.04.2017р.

УДК 621

В.Р. Сподарик, Національний університет «Львівська політехніка»

ПРОЕКТУВАННЯ ГЕОІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ПОШУКУ МАРШРУТІВ

Розглянуто проблему з добором на роботу у містах, проаналізовано варіанти вирішення цієї проблеми за допомогою пошуку попутників. Розроблено алгоритм для пошуку маршрутів за заданими координатами та проведено апробацію його роботи на прикладі веб-рішення. Такий алгоритм є універсальним і підходить для систем, де є робота з пошуком маршрутів.

Ключові слова: час пік, транспорт, пасажиропотік, гео-пошук, попутники, координування руху, оптимізація, маршрут, MongoDB.

I. Постановка проблеми

Кожного дня мільйони людей добираються на роботу громадським транспортом. Більшість з них намагаються їхати з 7 по 9 ранку. Зазвичай коли з'являється дуже багато бажаючих їхати, то громадський транспорт не може справитись і перевезти всіх. Враховуючи регулярність такої проблеми вона