

В. Сухенко, М. Муштрук

МОДЕЛЮВАННЯ СПРАЦЮВАННЯ ОБЛАДНАННЯ РИБОПЕРЕРОБНИХ ПІДПРИЄМСТВ

Побудована математична модель процесу корозійно-механічного зношування деталей обладнання в агресивних технологічних середовищах рибної промисловості. Доведена її адекватність та запропонований спосіб практичного застосування для оцінки довговічності деталей.

Ключові слова: корозія, знос, механічні фактори, каталізатор, втома, довговічність, електрохімія, потенціал, обладнання, рибна промисловість.

Сутність проблеми. Аналіз матеріальних затрат на ремонт обладнання у харчовій і переробній промисловості АПК показує, що на ліквідацію наслідків його корозійно-механічного спрацювання витрачається близько 80% усіх коштів, а питома вага річних витрат перевищує 2% вартості основних фондів [1]. Спрацювання деталей обладнання рибної промисловості є маловивченою специфічною проблемою. Для її вирішення необхідно залучити сучасні методи і засоби фізико-хімічної механіки матеріалів, триботехніки, електрохімії і матеріалознавства.

Робочі вузли машин і апаратів рибної промисловості, перероблювальні речовини й технологічні рідини утворюють складні фізико-хімічні і динамічні системи, в яких закономірності тертя, корозії та інтенсивність спрацювання залежать від багатьох чинників: умов переробки сировини, хімічних і реологічних характеристик робочих середовищ, застосованих конструкційних матеріалів і захисних покриттів, геометричних параметрів робочих органів тощо. Оскільки більшість технологічних процесів рибопереробної промисловості відбувається в рідинних середовищах, багато з яких є корозійно- та поверхнево-активними, значна частина деталей обладнання зазнає дії швидкоплинних потоків рідини, що спричиняє їх інтенсивне корозійно-механічне спрацювання. Не викликає сумніву, що робочі органи технологічного обладнання рибопереробних підприємств повинні мати особливо високу корозіє- та зносостійкість, тому що продукти їх спрацювання можуть потрапити у харчові продукти і зробити їх непридатними для харчових і кормових потреб.

Умови експлуатації обладнання. Технологічне обладнання рибної промисловості найчастіше перебуває в безпосередньому контакті з основними і допоміжними технологічними середовищами. Особливо це стосується різних технологічних апаратів і місткостей. Склад середовищ, які використовуються в рибопереробних виробництвах, досить різноманітний. Умовно їх можна поділити на мінеральні та органічні речовини. Так, в рибопереробній промисловості застосовують різноманітні прісні води (артезіанську, питну з водопроводу, дистильовану) з рН 6,5 - 7,0, а також морські води під час переробки риби безпосередньо в умовах Світового океану (35 г NaCl на 1 літр води), Чорного моря (18 г NaCl на 1 літр води), Азовського моря (13 г NaCl на 1 літр води). Водневі показники морської води змінюються в межах рН 7,5÷8,4.

Для обжарювання риби в печах і заливання в консерви використовують рослинні олії, які за своєю хімічною будовою є поєднанням гліцеридів, триатомних спиртів і високомолекулярних жирних кислот. Загалом в оліях нараховують близько 40 видів жирних кислот. Наприклад, їх вміст у соняшниковій олії досягає, % до загального вмісту: лінолевої-

62, олеїнової - 40, пальмітинової - 6,4, стеаринової - 4,6. Кількість вільних жирних кислот залежить від тривалості та умов зберігання олії або насіння, ступеня його дозрілості й свіжості [2].

Очевидно, що до складу олії входять такі ефективні поверхнево-активні речовини (ПАР), як стеаринова та олеїнова кислоти, що зумовлюють адсорбувальний вплив і беруть безпосередню участь у корозійно-механічному спрацюванні обладнання.

До складу рибного жиру з рН 2÷3 також входить велика кількість жирних, у тому числі і поверхнево-активних, кислот, % до загального вмісту: олеїнової - більше 70, пальмітинової - близько 25, лінолевої - близько 2, арахідонової - 2÷3; ейкозапентенової - 6÷10, докозаенсоєнової - 10÷15 [2].

Крім того, для заливання рибних консервів застосовують соуси з рН 2÷4, які у своєму складі мають томатну пасту, цукор, рослинні олії, сіль, оцтову кислоту, цибулю, спеції і спричиняють швидке корозійно-механічне спрацювання технологічного обладнання [3].

Санітарна обробка обладнання проводиться неорганічними і органічними мийними та очищувальними засобами. До неорганічних мийних засобів відносяться їдкі луги, кальцинована сода, фосфати, силікати, а до очищувальних - неорганічні кислоти (азотна, сірчана, соляна, фосфорна та ін.) [4]. Всі вони негативно впливають не лише на корозійно-механічну стійкість деталей з вуглецевих сталей, але можуть також викликати міжкристалічну корозію високолегованих іржостійких сплавів і зруйнувати високоефективні захисні покриття.

Мета і завдання роботи. На підґрунті аналізу термодинамічної системи процесу корозійно-механічного спрацювання деталей в агресивних технологічних середовищах рибної промисловості треба математично описати механізм зношування, оцінити адекватність і перспективи практичного застосування математичної моделі.

Результати аналітичних і експериментальних досліджень. Механізм корозійно-механічного зношування матеріалів в агресивних харчових середовищах - електролітах рибної промисловості може бути описаний на основі аналізу термодинамічної системи, яка зв'язує макроскопічні параметри трибологічних об'єктів з електрохімічними характеристиками взаємодії і руйнування конструкційних матеріалів в конкретному технологічному середовищі.

При розгляданні сталого процесу корозійно-механічного зношування металів і сплавів в технологічних середовищах рибопереробних виробництв трибологічну термодинамічну систему можна окреслити сукупністю деформованих об'ємів металу і продуктів зносу, які знаходяться в контакті з агресивним середовищем. Ця система може бути поділена на дві частини: в першій протікають лише деформаційні процеси, а друга, крім цього, зв'язана з хімічними реакціями і зміною площі вільних поверхонь внаслідок руйнування.

При корозійно-механічному зношуванні величина розсіяної енергії визначається не лише пластичною деформацією, але й інтенсивністю електрохімічних процесів та величиною зміни площі вільних поверхонь. Сумісний кількісний аналіз різнорідних процесів можливий при введенні універсальних енергетичних критеріїв з використанням методів термодинаміки необоротних процесів. Такі процеси можна описати за допомогою дисипативної функції [7]:

$$\bar{\psi} = T \frac{d_i S}{dt} = \sum \frac{d\bar{W}_{\text{дис}}^i}{dt} + \bar{I}_c A_c, \quad (1)$$

де $\bar{\psi} = \psi/S_k$ – дисипативна функція (швидкість розсіювання енергії в системі) віднесена до одиниці поверхні контакту S_k ;

T – температура системи;

$d_i \bar{S}/dt = d_i S/S_k dt$ – зміни ентропії системи;

$d\bar{W}_{\text{дис}}^i/dt$ – швидкість розсіювання енергії для i - процесу, який реалізується в системі;

$I_c A_c = \frac{I_c}{S_k} A_c$ – потужність хімічної реакції;

\bar{I}_c – швидкість хімічної реакції;

A_c – хімічна спорідненість реакції.

Швидкість розсіювання енергії, пов'язана з пластичним деформуванням і утворенням нових поверхонь, складає:

$$\sum_i \frac{dW}{dt} = \frac{d\bar{W}_{пл}}{dt} + \sum_j \frac{d\bar{W}_s^j}{dt}. \quad (2)$$

Дисипативна функція процесу пластифікації має вигляд [6]:

$$\bar{\psi}_{пл} = \frac{dW}{dt} = \bar{I}dA_a \quad (3)$$

де: $\bar{I}_a = I_a/S_k$ - густина потоку дислокацій;

$A_a = \Delta\tau/\alpha$ - хімічна спорідненість процесу утворення і переміщення дислокацій;

$\Delta\tau$ - знеміцнення матеріалу;

α - кількість дислокацій в одиниці деформованого матеріалу.

Уявляючи процес зношування поверхні як відколювання частинок матеріалу по дислокаційних межах, дисипативну потужність процесу можна виразити таким чином:

$$\sum_j \frac{d\bar{W}_s^j}{dt} = I_{so}\Delta\sigma_0 + \bar{I}_{sm}\Delta\sigma_m, \quad (4)$$

де: $I_{so} = dS_0/S_k \cdot dt$; $I_{sm} = d_{sm}/S_k \cdot dt$ - швидкості зміни площі вільної поверхні оксидів і неокисленого матеріалу;

$\Delta\sigma_0$ і $\Delta\sigma_m$ - відповідно, робота утворення одиниці нової вільної поверхні оксидів і вихідного матеріалу.

З урахуванням виразів (2 - 4), вираз (1) можна записати у вигляді:

$$\bar{\psi} = \bar{I}_a \frac{\Delta\tau}{\alpha} + \bar{I}_{so}\Delta\sigma_0 + I_{sm}\Delta\sigma_m + \bar{I}_c A_c. \quad (5)$$

На основі лінійного закону і співвідношень взаємності Онзагера [7] з рівняння (5) отримуємо систему лінійних феноменологічних рівнянь:

$$\bar{I}_a = C_1 \frac{\Delta\tau}{\alpha} + C_2 A_c + C_3 \Delta\sigma_0 + C_4 \Delta\sigma_m; \quad (6)$$

$$\bar{I}_c = C_2 \frac{\Delta\tau}{\alpha} + C_5 A_c + C_6 \Delta\sigma_0 + C_7 \Delta\sigma_m; \quad (7)$$

$$\bar{I}_{so} = C_3 \frac{\Delta\tau}{\alpha} + C_6 A_c + C_8 \Delta\sigma_0 + C_9 \Delta\sigma_m; \quad (8)$$

$$\bar{I}_{sm} = C_4 \frac{\Delta\tau}{\alpha} + C_7 A_c + C_9 \Delta\sigma_0 + C_{10} \Delta\sigma_m, \quad (9)$$

де $C_1 \dots C_{10}$ - феноменологічні коефіцієнти.

Приведена швидкість зношування \bar{I} повинна визначитися сумою густини потоків маси окислених \bar{I}_0 та неокислених \bar{I}_m продуктів зносу:

$$\bar{I} = \bar{I}_0 + \bar{I}_m. \quad (10)$$

Потоки I_0 та I_m можна отримати, виходячи з рівнянь (5 – 9). Враховуючи, що $\bar{I} = \bar{I}_c \cdot \nu_0$, з рівняння (7) можна визначити величину потоку окисленого металу:

$$\bar{I}_0 = I_c \nu_0 = \nu_0 (C_2 A \alpha + C_5 A_5 + C_6 \Delta \sigma_0 + C_7 \Delta \sigma_m), \quad (11)$$

де ν_0 - стехіометричний коефіцієнт окислу в рівнянні хімічної реакції.

Підставляючи рівняння (6) і (7) у (5) і враховуючи, що $I_m = \bar{I}_{sm} / C_{11}$ (де C_{11} - коефіцієнт, який залежить від властивостей зношуваного матеріалу) [6], отримаємо:

$$\bar{I}_m = \frac{1}{C_{11} \Delta \sigma_m} \left[\bar{\psi} - C_1 \left(\frac{\Delta \tau}{\alpha} \right)^2 \right] - (2C_3 \Delta \sigma_0 + 2C_2 A_c + C_4 \Delta \sigma_m) \frac{\Delta \tau}{\alpha} - (C_5 A_c + C_8 \Delta \sigma_0^2 + 2C_6 \Delta \sigma_0 A_c + C_7 \Delta \sigma_m A_c + C_9 \Delta \sigma_0 \Delta \sigma_m). \quad (12)$$

Вся зовнішня робота, виконана над системою тертя, дорівнює:

$$W = P \cdot f_{mp} \cdot L, \quad (13)$$

де: P - питоме навантаження; f_{mp} - коефіцієнт тертя ковзання; L - шлях тертя.

Тоді розсіяна енергія (дисипативна функція) визначиться так:

$$\psi = K \cdot P \cdot f_{mp} \cdot V. \quad (14)$$

де: K – постійна, яка характеризує долю розсіяної енергії при зношуванні; V – швидкість відносного ковзання частинок зношуючого середовища по поверхні тертя.

З виразів (11), (12) і (14) можна отримати швидкість зношування, приведену до одиниці поверхні:

$$\bar{I} = \bar{I}_0 + \bar{I}_m = K_1 \cdot P \cdot V + K_2 \Delta \tau + K_3 (-\Delta \tau)^2, \quad (15)$$

де K_1, K_2, K_3 - постійні, які включають в себе величини $C_i, f_{mp}, \nu_0, \Delta \sigma_0, \Delta \sigma_m, \alpha$.

З рівняння (15) видно, що швидкість корозійно-механічного зношування лінійно залежить від навантаження і швидкості ковзання і параболічно від знеміцнення матеріалу корозійно-активним середовищем.

З електрохімії відомо [8], що:

$$\Delta \tau = \frac{\Delta \phi_0 \cdot n \cdot F}{V_m}, \quad (16)$$

де: $\Delta \phi_0$ - зміна рівноважного електродного потенціалу при зношуванні; n - валентність металу; F - постійна Фарадея; V_m - мольний об'єм речовини.

Підставляючи вираз (16) в (15), отримаємо:

$$\bar{I} = K_1 \cdot P \cdot V - K_2 \frac{\Delta\varphi_0 \cdot n \cdot F}{V_m} + K_3 \left(\frac{\Delta\varphi \cdot n \cdot F}{V_m} \right)^2 \quad (17)$$

У формулі (17) величини P і V характеризують зовнішню дію на поверхню, що зношується, а зміна потенціалу залежить від властивостей матеріалів пари тертя та характеристик корозійного середовища. Якщо пара тертя буде складатися з різномірних металів або покриттів, то кожен з них має свій електродний потенціал. В цьому випадку пара буде мати сумарний змішаний електродний потенціал [9,10].

Зміщуючи потенціал тертя пари з використанням зовнішнього джерела струму в катодну або анодну область, можна управляти процесом корозійно-механічного зношування в деяких межах, не змінюючи при цьому умов навантаження вузла тертя. Це зміщення також можна здійснити зміною складу матеріалів, що труться, шляхом нанесення захисних покриттів, зміною режимів тертя та інгібуванням технологічного середовища, що підтверджено багатьма дослідженнями [1, 9,10].

Для перевірки правильності вибору термодинамічної моделі корозійно-механічного зношування провели розрахунок коефіцієнтів в формулі (17) з використанням методу найменших квадратів. При розрахунках були вибрані довірчі інтервали для рівня імовірності 0,95. Паралельно були проведені випробування на зношування бронзових зразків (БрОЦС 5-5-5) по схемі «втулка-втулка» на установці торцевого тертя з вимірюванням потенціалів поверхні тертя при занурюванні у середовище та в процесі тертя [1,10] за допомогою потенціостата П-5827. Досліди проводили в середовищах рибопереробного виробництва (таблиця). Швидкість ковзання складала 0,2 м/с, питома навантаження 0,92 МПа. Швидкість розгортання потенціалу при зніманні поляризаційних кривих дорівнювала 2 мВ/с.

Для перевірки адекватності моделі (17) для морської води було проведено 3 досліди (таблиця). Оцінка середньоквадратичної похибки буде такою

$$S = \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 / (n-1)} = 0,25 \quad (18)$$

Таблиця 1

Триботехнічні та електрохімічні параметри експериментальних зразків, отримані розрахунками та вимірюванням

Технологічне середовище	Зміна потенціалу при зношуванні, мВ	Знос зразків в мг на 10 км шляху тертя				
		верхнього	нижнього	середній	середній по всіх експериментах	розрахований
Вода Чорного моря	135	11,20	10,7	10,95	10,95	11,80
		11,22	10,72	10,97		
		11,18	10,68	10,93		
Рафінований рибний жир	25,0	0,33	0,29	0,31	0,30	0,24
		0,32	0,27	0,29		
		0,32	0,28	0,30		

Враховуючи малу величину виборки, помножимо S на коефіцієнт Ст'юдента t . Для $\alpha = 0,05$ і $f = 2$ його табличне значення дорівнює 4,3. Тоді відкорегована S буде: $S = 0,25 \cdot 4,3 = 1,08$. Тобто за результатами вимірювань $S = 10,95 \pm 1,08$. Верхня межа зносу дорівнює 12,03 мг. Таким чином, теоретично визначений результат зносу 11,80 мг попадає в довірчий

інтервал з імовірністю 0,95. Аналогічний хід перевірки адекватності моделі для зношування в рибному жирі: $S = 0,2$, а з врахуванням критерію Ст'юдента $S = 0,02 - 4,3 = 0,086 \gg 0,09$. Отже, з імовірністю 0,95 теоретичний результат розрахунку зносу у 0,24 мг попадає в довірчий інтервал, тому що його нижня межа дорівнює 0,21 мг.

Висновки. Результати аналітичних і експериментальних досліджень підтверджують адекватність отриманої математичної моделі. Вони також свідчать, що технологічне середовище може в десятки разів змінювати інтенсивність зношування матеріалів. Корозійно-механічне зношування поверхонь в агресивних технологічних середовищах рибообробних виробництв не може розглядатися як просте сумування механічного і електрохімічного факторів. Це більш складний процес, в якому електрохімічне розчинення служить каталізатором втомного руйнування. Тертя ж, в свою чергу, сприяє розвитку електрохімічної корозії. У всіх цих процесах суттєву роль відіграє потенціал системи [9] та його зміщення під впливом технологічного середовища в трибологічних системах [9,10].

ЛІТЕРАТУРА

1. Сухенко, Ю. Г. Надійність і довговічність устаткування харчових і переробних виробництв [Текст]: Підручник / Ю. Г. Сухенко, О. А. Литвиненко, В. Ю. Сухенко; під ред. професора Ю. Г. Сухенка. – К.: РВЦ НУХТ, 2010. – 547 с.
2. Технология рыбы и рыбных продуктов [Текст]: "Учебник / Под ред. профессора А. М. Ершова. – Санкт-Петербург: ГИОРД, 2006. – 945 с.
3. Технология продуктов из гидробионтов / [Артюхова С. А., Богданов В. Д., Дацун В. М. и др.]; под ред. Т. М. Сафроновой, В. И. Шендерюка. – М.: Колос, 2001. – 496 с.
4. Кирюткин, Г. В. Мойка и дезинфекция технологического оборудования предприятий молочной промышленности [Текст]: Учебник / Г. В. Кирюткин, В. В. Молочников. – М.: Пищевая промышленность, 1976. – 126 с.
5. Хаазе, Р. Термодинамика необратимых процессов [Текст]: Монография / Рольф Хаазе; Darmstadt; Перевод с немецкого под ред. А.В. Лыкова. – М.: Мир, 1967.
6. Голего, Н. Л. Фреттинг-коррозия металлов [Текст]: Монография / Голего Н. Л., Алябьев А. Я., Шевеля В. В.; Киевский политехнический институт. - К.: Техніка, 1974. – 272 с.
7. Гроот, С. Р. Термодинамика необратимых процессов [Текст]: Монография / С. Р. де Грот. – М.: ГИТТЛ, 1956. – 281 с.
8. Гутман, Э. М. Механохимия металлов и защита от коррозии [Текст]: Монография / Э. М. Гутман. – М.: Металлургия, 1974. – 272 с.
9. Прейс, Г. А. О природе коррозионно-механического изнашивания металлов: Международный научный журнал / Г. А. Прейс; Государственное научное учреждение ИММС НАН Беларуси // Трение и износ. – 1987. – Т.8, № 5. – С.792-797.: КБЫ 0202-4977.
10. Прейс, Г. А. Электрохимические явления при трении металлов [Текст]: Международный научный журнал / Г. А. Прейс, А. Г. Дзюб; Государственное научное учреждение ИММС НАН Беларуси // Трение и износ. – 1980. – Т.1, № 2. – С. 217– 235.: ISSN 0202-4977.

Ю. Сухенко, М. Муштрук **МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗНОС ОБОРУДОВАНИЯ РЫБОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ** **ПРЕДПРИЯТИЙ**

Построена математическая модель процесса коррозионно-механического износа деталей оборудования в агрессивных технологических средах рыбной промышленности. Доказана ее адекватность и предложен способ практического применения для оценки долговечности деталей.

Ключевые слова: коррозия, износ, механические факторы, катализатор, усталость, долговечность, электрохимия, потенциал, оборудование, рыба.

Y. Sukhenko, M. Mushtruk

MODELING TEAR OF EQUIPMENT FISH PROCESSING ENTERPRISES

A mathematical model of corrosion-mechanical wear of equipment parts in corrosive environments technological fishing industry. We prove its adequacy and practical application of the proposed method to assess durability of parts.

Key words: *corrosion, wear, mechanical factors, catalyst, fatigue, durability, electrochemistry, potential, equipment, fishing industry.*

Рецензент: д.т.н., профессор Сухенко Ю.Г., НУБіП

УДК 620.178.14:162.42

Ю. Сухенко, М. Муштрук

ЗАЩИТА ОТ ИЗНОСА И КОРРОЗИИ ОБОРУДОВАНИЯ СВЕКЛОСАХАРНЫХ ЗАВОДОВ

Исследовалась износостойкость и коррозионная стойкость плазменных покрытий в жесткой воде, моделирующей транспортно-моечную воду сахарных заводов. Показана перспективность применения оплавления коррозионностойких и износостойких самофлюсующиеся плазменных покрытий в узлах трения технологического оборудования сахарного производства.

Ключевые слова: *износостойкость, коррозия, завод, трения, оборудования.*

Одним из перспективных направлений повышения износостойкости и коррозионной стойкости технологического оборудования свеклосахарного производства является применение плазменных защитных покрытий на деталях оборудования.

В настоящей работе исследовались оплавленные самофлюсующиеся покрытия ПГ19Н01 и неоплавленные покрытия ПТЮНХ16СР3 с различными пропитками и гранулометрическим составом размером 40-100 мкм. Исследования производились в жесткой воде (6 мг-экв/л), моделирующей транспортно-моечную воду сахарных заводов, в два этапа. На первом этапе оценивалась коррозионная стойкость образцов с покрытиями при отсутствии фрикционного контакта. На втором этапе определялась износостойкость покрытий при абразивном изнашивании в исследуемой среде. Трение осуществлялось при нагрузке 0,3-3 МПа и скорости скольжения 0,8 м/с о жестко закрепленные частицы абразива. Для повышения скорости подвода кислорода к поверхности [2] электролит непрерывно перемешивался магнитной мешалкой.

Коррозионная стойкость исследуемых покрытий оценивалась по плотности коррозионного тока. При этом делалось допущение, что в раствор переходят только двухвалентные ионы железа, которые определялись при помощи железосинеродистого калия.