

271 РІЧКОВИЙ ТА МОРСЬКИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 621.413.3

doi: 10.32782/2225-6733.43.2021.23

© **Ляшенко Б.А.**¹, Агеєв М.С.², Волков В.П.³, Захарчук О.В.⁴,
Устінцев С.М.⁵**ПОБУДОВА МЕТОДОЛОГІЇ ОПТИМАЛЬНОГО ВИКОРИСТАННЯ
БАГАТООПЕРАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ВІДНОВЛЕННЯ ТА ЗМІЦНЕННЯ
ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ СУДНОВИХ МЕХАНІЗМІВ В ПРОЦЕСІ РЕМОНТУ**

Наведено результати з побудови методології встановлення оптимальної послідовності багатоопераційних (адитивних) технологій відновлення та зміцнення поверхонь деталей суднових механізмів в процесі ремонту, при якій досягаються максимальні експлуатаційні властивості деталей за мінімальних витрат на модифікацію їхньої поверхні. Запропоновано математичну формалізацію та постановку завдання забезпечення заданих властивостей поверхневих шарів деталей суднових механізмів в умовах їх технологічної модифікації, а також сукупність базових мінімізуючих функціоналів, які дозволяють встановлювати необхідні параметри та послідовності багатоопераційних технологій, що забезпечують задані властивості поверхонь деталей суднових механізмів в процесі ремонту. Як приклад використання розроблених у роботі підходів, розглянуті завдання щодо підвищення контактної довговічності деталей, що експлуатуються в умовах переважаючого газообразивного зношування, за допомогою формування заданих функціонально-градієнтних параметрів поверхневих шарів відновлюваних поверхонь при азотуванні. З використанням розроблених підходів математичного та комп'ютерного моделювання поведінки функціонально-градієнтних матеріалів розраховано та проаналізовано напружено-деформований стан досліджуваних структурно нелокальних елементів деталей суднових механізмів в умовах фрикційних контактних навантажень, визначено величини зон втрати міцності та показані шляхи управління процесами структуроутворення властивостей одержаних механічних систем.

Ключові слова: багатоопераційні технології, оптимізація, напружено-деформований стан, контактна міцність, деталі суднових механізмів, ремонт.

B.A. Lyashenko, M.S. Ahieiev, V.P. Volkov, O.V. Zaharchuk, S.M. Ustincev. Construction of a methodology for the optimal use of multi-operational technologies for the restoration and hardening of surfaces of parts of ship mechanisms in the process of repair. Solving the problem of hardening and restoring parts of ship mechanisms in the process of repair in order to achieve high reliability indicators requires the introduction of new and improvement of existing repair processes based on scientific research in the field of multi-operational technology process control. The results of constructing a methodology for establishing the optimal sequence of multi-operational (additive) technologies for restoring and hardening the surfaces of parts of ship mechanisms in the repair process, which

¹ д-р техн. наук, професор, Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренко, м. Київ, coating_ipp@kiev.ua

² д-р техн. наук, доцент, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: 0000-0001-5691-8986, taxageev73-73@ukr.net

³ д-р техн. наук, професор, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, ORCID: 0000-0003-2202-3441, volf-949@ukr.net

⁴ канд. техн. наук, доцент, Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, zaharchukov205@gmail.com

⁵ аспірант, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, tustinceva@marad.gov.ua

achieves the maximum performance properties of the parts with minimal costs for modifying their surface, are presented. A mathematical formalization and statement of the problem of providing the specified properties of the surface layers of ship mechanisms parts under the conditions of their technological modification, as well as a set of basic minimization functionals that allow setting the necessary parameters and sequences of multi-operational technologies that provide the specified properties of the surfaces of ship mechanisms parts during the repair process, are proposed. As an example of the use of the approaches developed in the work, the problems of increasing the contact durability of parts operated under the conditions of prevailing gas-abrasive wear are considered by forming the specified functional-gradient parameters of the surface layers of the restored surfaces during nitriding. Using the developed approaches of mathematical and computer modeling of the behavior of functionally graded materials, the stress-strain state of the studied structurally non-local elements of ship machinery parts under frictional contact loads was calculated and analyzed, the values of the hardening zones were determined, and ways to control the processes of structure formation of properties were shown.

Key words: multi-operational technologies, optimization, deformed state, contact strength, parts of ship mechanisms, repair.

Постановка проблеми. Кількість способів поверхневого зміцнення деталей постійно зростає, що дозволяє забезпечувати задані експлуатаційні властивості поверхневих шарів різними методами, в тому числі і з використанням комбінованих методів.

Характерною особливістю методів зміцнення є те, що не вдається отримати одночасно підвищення властивостей деталей для всіх режимів експлуатації. Один і той же матеріал покриття, але нанесений різними способами, дає різні робочі параметри.

В даний час в методології нанесення покриттів розрізняють два напрямки:

- створення багатошарових покриттів, включаючи мультиплікаційні;
- створення багатокомпонентних шарів змінного складу по товщині.

Для технологічної реалізації цих напрямків спостерігаються такі тенденції: розвиток комбінованих методів і нанесення багатошарових, багатофункціональних покриттів.

Основний недолік комбінованих (багатоопераційних) технологій – це їх складність, суворе дотримання технологічних вимог на всіх етапах, що робить неординарною постановку завдань оптимізації конструктивних схем і технологічних режимів їх нанесення.

Тому побудова нової методологічної схеми, що дозволяє проводити оптимізацію технологічних схем отримання покриттів за критеріями їх експлуатаційної міцності, довговічності і стійкості в різних середовищах, є дуже затребуваною науковою проблемою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розробці методики оптимального проектування геометричного і фізико-механічного параметрів приповерхневих шарів для забезпечення їх максимальної контактної міцності з урахуванням силового фактору фрикційного навантаження присвячена робота [1]. Приведені результати та розглянуто задачі механіки деформованого твердого тіла, що присвячені оптимальному проектуванню елементів конструкцій при відомих умовах експлуатації.

Особливості утворення оптимальної методології синтезу комбінованих багатоопераційних технологій та оптимальний вибір послідовності операцій наведено у публікації [2]. В даній роботі звернута увага на явище інверсії, коли зміна послідовності операцій відновлення призводить до результатів, які відрізняються. Оптимальний вибір методів відновлення та їх послідовність визначається підвищенням комплексу експлуатаційних властивостей відновлюваної деталі суднового механізму.

В роботі [3] розроблена загальна методологія вибору оптимальної послідовності операцій, яка базується на застосуванні системного підходу до вирішення наукової проблеми та математичного моделювання процесу відновлення поверхонь деталей суднових механізмів.

Питання математичної формалізації і постановка задачі забезпечення заданих властивостей поверхневих шарів деталей в умовах їх відновлення, а також сукупність базових мінімізуючих функціоналів, які дозволяють встановлювати необхідні параметри і послідовності багатоопераційних технологій, що забезпечують задані властивості відновлюваних поверхонь, висвітлені у [4-7].

Проведений аналіз останніх досліджень і публікацій показує, що неадитивний вплив на деталі суднових механізмів експлуатаційних факторів представляє собою складний процес, який залежить від величини цих факторів. У зв'язку з цим доцільно побудувати методологічні схеми оптимальної послідовності операцій у багатоопераційних технологічних процесах відновлення деталей суднових механізмів.

Метою дослідження є встановлення оптимальної послідовності багатоопераційних технологій відновлювання поверхні, що сприяє досягненню максимальних експлуатаційних властивостей деталей суднових механізмів при мінімальних витратах на відновлення їх поверхні в процесі ремонту.

Виклад основного матеріалу.

Формалізація задачі забезпечення заданих властивостей поверхневих шарів деталей. Деталь D , поверхня якої Π характеризується сукупністю (множиною) параметрів $\{P_i\}_{i=1,\dots,M}$, кожен з яких має свою область допустимих значень $\{A_i\}_{i=1,\dots,M}$ (з позицій інженерної практики під параметрами P_i можна прийняти шорсткість, пористість, зносостійкість, мікротвердість тощо).

При цьому апріорно вважатимемо, що дві поверхні Π^1 і Π^2 є ідентичними із заданою точністю, якщо існує така сукупність $\{\varepsilon_i\}_{i=1,\dots,M}$, для якої $|P_i^1 - P_i^2| < \varepsilon_i$ ($i = 1, \dots, M$), де P_i^1 – параметр, що описує поверхню Π^1 , P_i^2 – параметр, що описує поверхню Π^2 , $|\dots|$ – модуль числа.

Існує N технологій поверхневої обробки деталі $\{T_1, \dots, T_N\}$, кожна з яких має X вхідних (керуючих) параметрів: $\{q_1^i, \dots, q_X^i\}$, $i=1, \dots, N$, які належать своїм допустимим значенням $\{Q_1^i, \dots, Q_X^i\}$.

В результаті використання i -тої технології з параметрами $\{q_1^i, \dots, q_X^i\}$ поверхня деталі зі стану Π^k перейде в стан Π^{k+1} , тобто $T_i(q_1^i, \dots, q_X^i): \Pi^k(P_1^k, \dots, P_M^k) \rightarrow \Pi^{k+1}(P_1^{k+1}, \dots, P_M^{k+1})$ за час $t = F(T_i(q_1^i, \dots, q_X^i), P^k)$, з «ціною даного рішення» $E = G(T_i(q_1^i, \dots, q_X^i), P^k)$ і експлуатаційними параметрами $D = M(T_i(q_1^i, \dots, q_X^i), P^k)$.

Постановка задачі.

В початковий момент часу поверхня деталі D має параметри Π^0 , а потрібно отримати поверхню з параметрами Π^L .

Процес перекладу поверхні зі стану Π^0 в Π^L є не одномоментним, а вимагає використання певної послідовності технологій T_{Z_1}, \dots, T_{Z_L} , яка переведе поверхню Π^0 в Π^L через сукупність проміжних станів:

$$\Pi^0 \xrightarrow{T_{Z_1}} \Pi^1 \xrightarrow{T_{Z_2}} \dots \xrightarrow{T_{Z_{L-1}}} \Pi^{L-1} \xrightarrow{T_{Z_L}} \Pi^L. \quad (1)$$

Відзначимо, що таких послідовностей типу T_{Z_1}, \dots, T_{Z_L} може бути багато.

Для конкретизації послідовності і знаходження кращої послідовності поставимо у відповідність технології $T_{Z_i}: \Pi^{(i-1)} \rightarrow \Pi^i$ час рішення τ_{Z_i} і ціну рішення E_{Z_i} .

При цьому загальний час дорівнює:

$$\tau_0 = \sum_{Z_i} \tau_{Z_i}. \quad (2)$$

Загальна ціна технологічного рішення встановлюється з співвідношення:

$$E_0 = \sum_{Z_i} E_{Z_i} \quad (3)$$

Експлуатаційні параметри дорівнюють:

$$D_0 = D_L(T_i(q_1^i, \dots, q_X^i), \Pi^{L-1}). \quad (4)$$

У загальному випадку функція оптимізації буде наступною:

$$R = R(t_0, E_0, D_0) \rightarrow R_0. \quad (5)$$

При цьому узагальнена постановка завдання використання комбінованого способу нанесення багатофункціональних покриттів матиме такий вигляд: необхідно встановити таку послідовність технологій T_{Z_1}, \dots, T_{Z_L} , які переводять поверхню деталі зі стану Π^0 в Π^L і забезпечують задане значення функціоналу R , що дорівнює R_0 .

Метод вирішення задачі.

Оскільки ці задачі є багатовимірними з відсутністю чітко виражених аналітичних функціональних залежностей, виберемо для вирішення задачі в якості базового підхід, описаний в роботі [4].

Маючи множину базових технологій $\{T_1, \dots, T_N\}$, сформулюємо наступні послідовності їх використання:

$$\begin{aligned} &\langle T_1 \rangle, \dots, \langle T_N \rangle \\ &\langle T_1, T_1 \rangle, \langle T_1, T_2 \rangle, \dots, \langle T_N, T_{N-1} \rangle, \langle T_N, T_N \rangle \\ &\langle T_1, T_1, T_1 \rangle, \dots, \langle T_N, T_N, T_N \rangle \end{aligned} \quad (6)$$

...

Введемо оператор $K(P, \{P_0, P_1\})$, який набуває наступних значень:

$$K(P, \{P_0, P_1\}) = \begin{cases} 1, & \text{якщо послідовність } P \text{ дозволяє перехід } P_0 \rightarrow P_1 \\ 0, & \text{якщо послідовність } P \text{ не дозволяє перехід } P_0 \rightarrow P_1 \end{cases}, \quad (7)$$

де P – задана послідовність базових технологій.

Оператор $K(P, \{P_0, P_1\})$ назвемо оператором компетенції заданої послідовності технологій.

Вибравши послідовності технологій P , для котрих $K(\dots, \{P_0, P_k\})=1$, проводимо вибір параметрів $(q_1^{Z_i}, \dots, q_X^{Z_i})$, які забезпечують задане значення функціоналу R .

При цьому найпростішим і інженерно зрозумілим є знаходження функціоналу R в разі подання його як адитивної суперпозиції за складовими технологічних операцій знайденої послідовності P^* :

$$R = \sum_{i=1}^m R_i, \quad (8)$$

де R_i – функціонал, співвіднесений з i -тою технологією заданої послідовності P^* , $P^* \in P$.

Як приклад запропонованої методології оптимізації методів і режимів технологій поверхневого зміцнення розглянемо вибір технології поверхневого зміцнення за допомогою порівняльного аналізу різних методів азотування – класичного газового азотування, каталітичного азотування «Нітротек Турбо», класичного іонного азотування, термоциклічного іонно-плазмового азотування (проведемо якісну мінімізацію функціоналів (2) і (3) та забезпечення заданого значення функціоналу (5)).

Згідно з даними роботи [4], найбільш оптимальним як з позиції забезпечення максимальної глибини азотування, так і питомої енергоємності та витрати газу, є іонно-плазмове термоциклічне азотування (ІПТА) (рис. 1, рис. 2) (тобто мінімізація функцій (2) та (3) забезпечується технологією ІПТА).

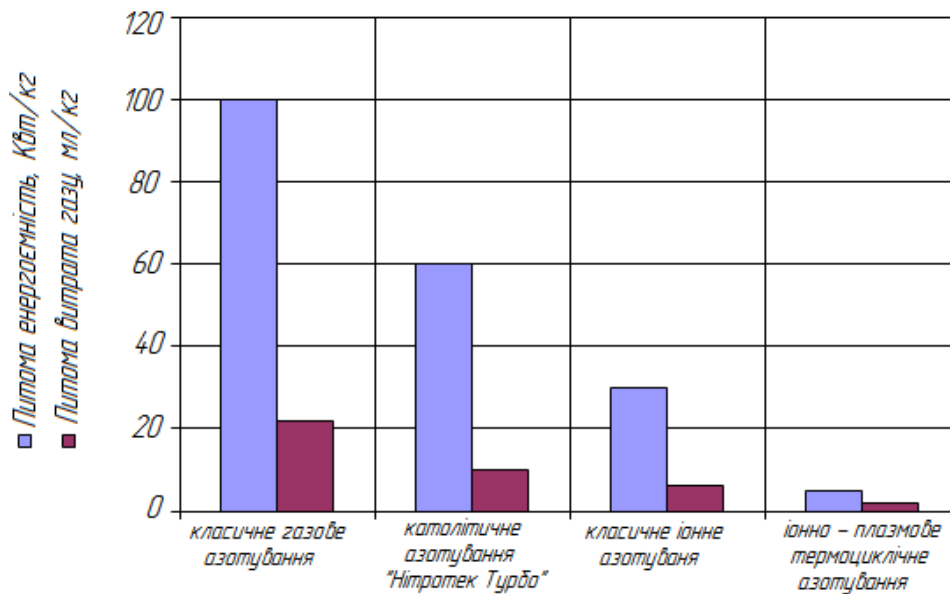


Рис. 1 – Питомі енергоємність та витрата газу при різних способах азотування

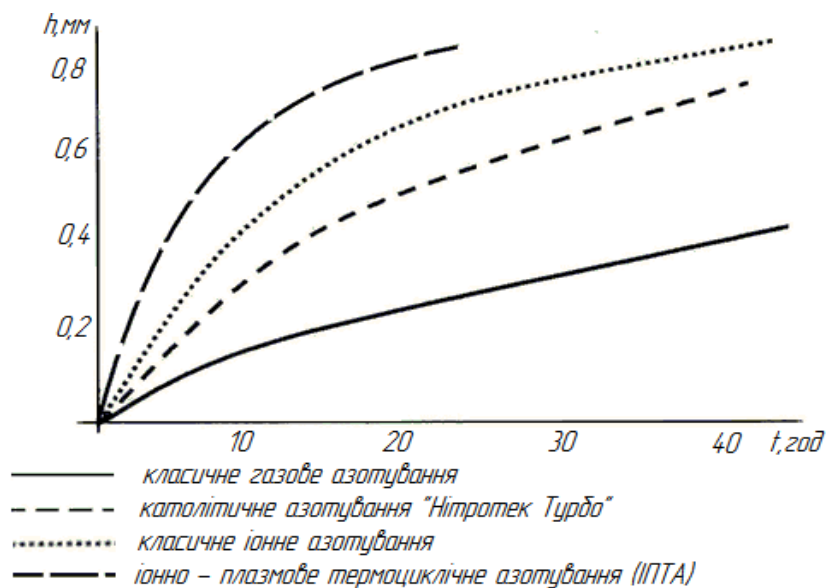


Рис. 2 – Залежність глибини зміцненого шару від часу при різних способах азотування

Після вибору виду технології проведемо оптимізацію технологічних режимів ІПТА.

Для встановлення впливу режимів іонно-плазмове азотування на контактну міцність приповерхневих шарів досліджуємо контактну міцність зразків, виготовлених зі сталі 40Х13, які піддавалися іонно-плазмове термоциклічному азотуванню при різних режимах (при ізотермічному азотуванні, азотуванні в циклі $\pm 25^{\circ}\text{C}$).

Для моделювання поведінки тіл в умовах фрикційних навантажень з чисельною оцінкою їх експлуатаційних параметрів проведемо встановлення функціональної зміни експериментальних характеристик матеріалу за глибиною. Результати визначення мікротвердості сталі після різних режимів азотування показано на рис. 3.

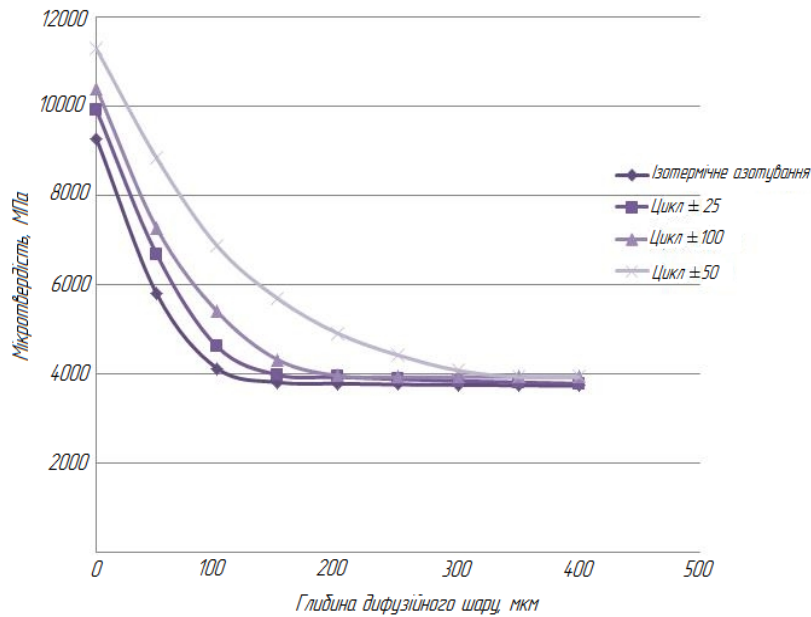


Рис. 3 – Експериментальні дані вимірювання мікротвердості поверхневих шарів для різних режимів іонно-плазмового азотування

При апроксимації отриманих результатів апріорно передбачається, що функціональні залежності механічних характеристик матеріалу в області, що досліджується, належать класу функцій L^2 [5], процедуру інтерполяції проводитимемо за допомогою залежностей експонентного типу:

$$F(x) = A_0 + A_1 e^{-Bx}, \quad (9)$$

де A_0 , A_1 , B – числові константи.

При їх пошуку використовували метод найменших квадратів [5], суть якого полягає в мінімізації квадратичної міри відхилення між дискретними експериментальними та континуальною залежностями:

$$S = \sum_{i=1}^N (Y_i - F(x_i))^2, \quad (10)$$

де x_i – величина глибини від поверхні; Y_i – вимірне значення мікротвердості; $F(x_i)$ – функціональне наближення (9) у точці x_i .

При апроксимації експериментальних даних функціональною залежністю (9) визначення констант A_0 , A_1 проводилося, виходячи з наступних фізичних міркувань:

$$\begin{cases} A_0 + A_1 = Y_0 = Y(x = 0) \\ A = Y_n = Y(x = x_n) \end{cases}, \quad (11)$$

де Y_0 – значення мікротвердості на поверхні; Y_n – мікротвердість на максимально віддаленій від поверхні глибині.

Після визначення, відповідно до співвідношення (11), констант A_0 та A_1 знаходили константу B за допомогою наступного математичного співвідношення:

$$\frac{dS}{dB} = 0. \quad (12)$$

Отримані числові значення величини B перевіряли на оптимальність за умови:

$$\frac{d^2S}{d^2B} > 0. \quad (13)$$

В результаті було отримано такі аналітичні залежності зміни мікротвердості матеріалу за глибиною:

для ізотермічного азотування:

$$F_1 = (3726,508 + 5540,729 \times e^{-0,02185153668 \times x}) \times 10^6, \quad (14)$$

для азотування у термічному циклі $\pm 25^\circ\text{C}$:

$$F_2 = (3775,541 + 6129,125 \times e^{-0,01746421493 \times x}) \times 10^6, \quad (15)$$

для азотування у термічному циклі $\pm 50^\circ\text{C}$:

$$F_3 = (3922,64 + 7354,95 \times e^{-0,009584234361 \times x}) \times 10^6, \quad (16)$$

для азотування у термічному циклі $\pm 100^\circ\text{C}$:

$$F_4 = (3922,64 + 6472,95 \times e^{-0,009584234361 \times x}) \times 10^6. \quad (17)$$

Максимальна відносна похибка при наближенні експериментальних даних (рис. 3) функціональною залежністю (14) складає 5,60%, при наближенні залежністю (15) – 6,30%, залежністю (16) – 6,58%, а залежністю (17) – 7,17%.

Для встановлення механічних властивостей матеріалу використовуємо результати роботи [6], а математичну модель механіки прийемо у формулюванні роботи [1].

Для розрахунків використовували авторське програмне забезпечення, описане у статті [7].

Відповідно до роботи [8], вважатимемо, що контакт поверхонь у даних умовах відбувається в області плям контакту, діаметр яких в середньому дорівнює 30 мкм, а навантаження в плямі контакту наближається до межі плинності.

Фізичні та модельні уявлення про вид локального навантаження в області одиничної плями контакту при різних апріорних припущеннях про параметри шорсткості поверхні тіла та особливості будови контртіла можуть мати серйозні відмінності.

Тому з урахуванням роботи [8], прийемо, що епіюра навантаження в ділянці плями контакту має параболічну структуру (рис. 4), яка характерна в тому числі і при введенні в поверхню тіла твердих сферичних частинок.

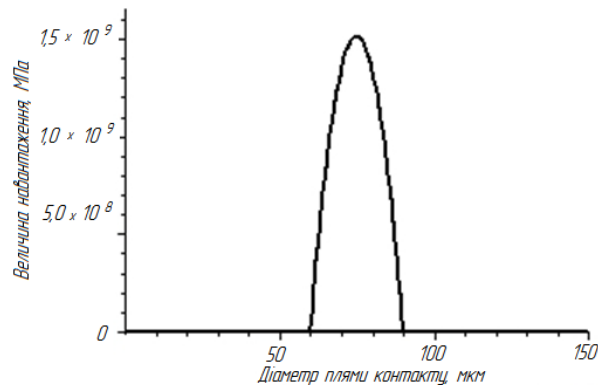


Рис. 4 – Вид функції локального навантаження

Це навантаження (рис. 4) викликає у досліджуваних зразках напруги, розподіл яких показано на рис. 5.

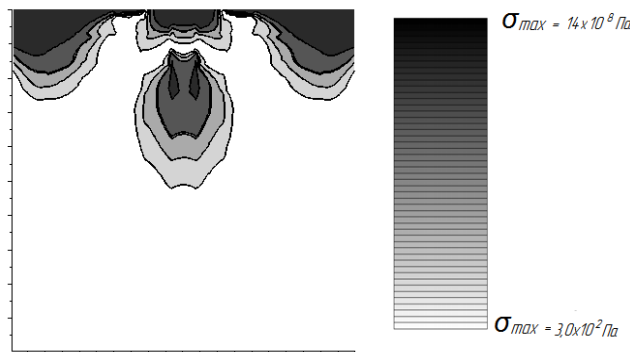


Рис. 5 – Розподіл напруги у зразку після ізотермічного іонно-плазмового азотування

Оскільки напружений стан однозначно визначає контактну міцність поверхневих шарів вузлів тертя, було проаналізовано зміни обсягів зон з різними коефіцієнтами запасу міцності, утворених внаслідок дії навантаження $3,02 \times 10^9 \dots 3,67 \times 10^9$ Па (табл. 1-4).

Таблиця 1

Розподіл зон контактної втрати міцності у зразках після азотування при навантаженні, показаному на рис. 4 ($p_{max} = 3,02 \times 10^9$ Па)

Коефіцієнт запасу контактної міцності	Зразок після ізотермічного іонно-плазмового азотування	Зразок після іонно-плазмового азотування у циклі $\pm 25^\circ\text{C}$	Зразок після іонно-плазмового азотування у циклі $\pm 100^\circ\text{C}$	Зразок після іонно-плазмового азотування у циклі $\pm 50^\circ\text{C}$
	Питомий об'єм матеріалу, що має коефіцієнт запасу контактної міцності, менше			
0,1	0	0	0	0
0,2	0	0	0	0
0,3	0	0	0	0
0,4	0	0	0	0
0,5	0	0	0	0
0,6	0,0008	0,0004	0	0
0,7	0,0038	0,0024	0,0018	0,0004
0,8	0,0108	0,008	0,0066	0,0042
0,9	0,0374	0,0338	0,0316	0,0232
1	1	1	1	1

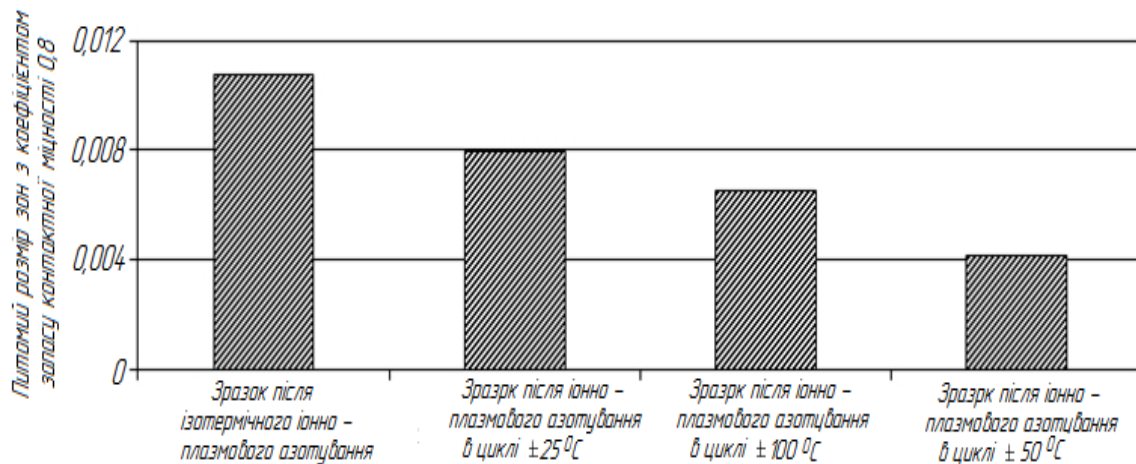


Рис. 6 – Зміна питомого розміру зон із коефіцієнтом запасу контактної міцності 0,8 для поверхонь з різними параметрами функціонально-градієнтного покриття при навантаженні $p_{max} = 3,02 \times 10^9$ Па

Таблиця 2

Розподіл зон контактної втрати міцності у зразках після азотування при навантаженні $p_{max} = 3,23 \times 10^9$ Па

Коефіцієнт запасу контактної міцності	Зразок після ізотермічного іонно-плазмового азотування	Зразок після іонно-плазмового азотування у циклі $\pm 25^\circ\text{C}$	Зразок після іонно-плазмового азотування у циклі $\pm 100^\circ\text{C}$	Зразок після іонно-плазмового азотування у циклі $\pm 50^\circ\text{C}$
	Питомий об'єм матеріалу, що має коефіцієнт запасу контактної міцності, менше			
0,1	0	0	0	0
0,2	0	0	0	0
0,3	0	0	0	0

Продовження таблиці 2

Коефіцієнт за- пасу контакт- ної міцності	Зразок після ізотермі- чного іонно- плазмового азоту- вання	Зразок після іонно- плазмового азоту- вання у циклі ± 25°C	Зразок після іонно- плазмового азоту- вання у циклі ± 100°C	Зразок після іонно- плазмового азоту- вання у циклі ± 50°C
	Питомий об'єм матеріалу, що має коефіцієнт запасу контактної міцності, менше			
0,4	0	0	0	0
0,5	0,0002	0	0	0
0,6	0,0014	0,0008	0,002	0
0,7	0,0046	0,003	0,024	0,0008
0,8	0,0122	0,0098	0,0082	0,005
0,9	0,04	0,0366	0,0334	0,0262
1	1	1	1	1

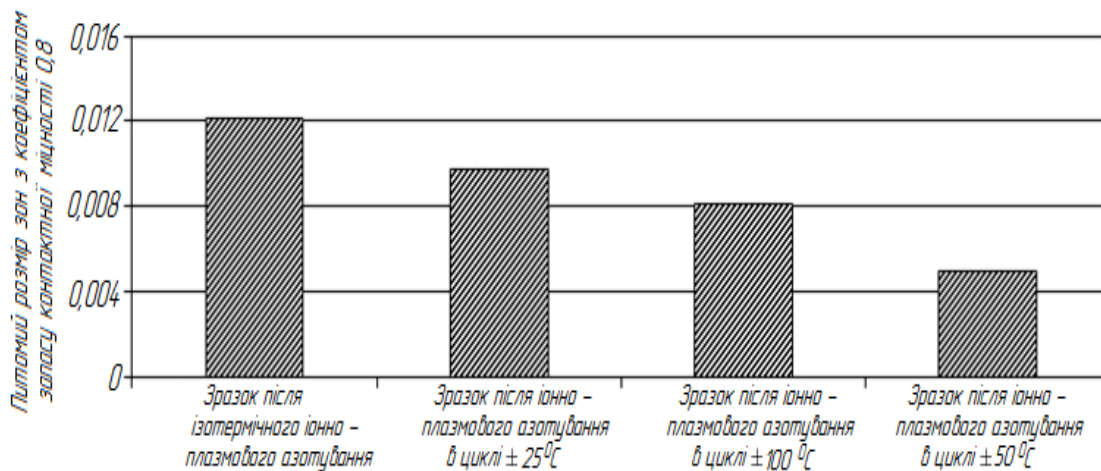


Рис. 7 – Зміна питомого розміру зон із коефіцієнтом запасу контактної міцності 0,8 для поверхонь з різними параметрами функціонально-градієнтного покриття при навантаженні $p_{max} = 3,23 \times 10^9$ Па

Таблиця 3

Розподіл зон контактної втрати міцності у зразках після азотування при навантаженні $p_{max} = 3,38 \times 10^9$ Па

Коефіцієнт за- пасу контакт- ної міцності	Зразок після ізотер- мічного іонно- плазмового азоту- вання	Зразок після іонно-плазмового азотування у циклі ± 25°C	Зразок після іонно- плазмового азоту- вання у циклі ± 100°C	Зразок після іонно- плазмового азоту- вання у циклі ± 50°C
	Питомий об'єм матеріалу, що має коефіцієнт запасу контактної міцності, менше			
0,1	0	0	0	0
0,2	0	0	0	0
0,3	0	0	0	0
0,4	0	0	0	0
0,5	0,0004	0	0	0
0,6	0,0018	0,001	0,0004	0
0,7	0,0052	0,0038	0,0028	0,0012
0,8	0,0136	0,0112	0,0092	0,0058
0,9	0,0416	0,0382	0,035	0,0284
1	1	1	1	1

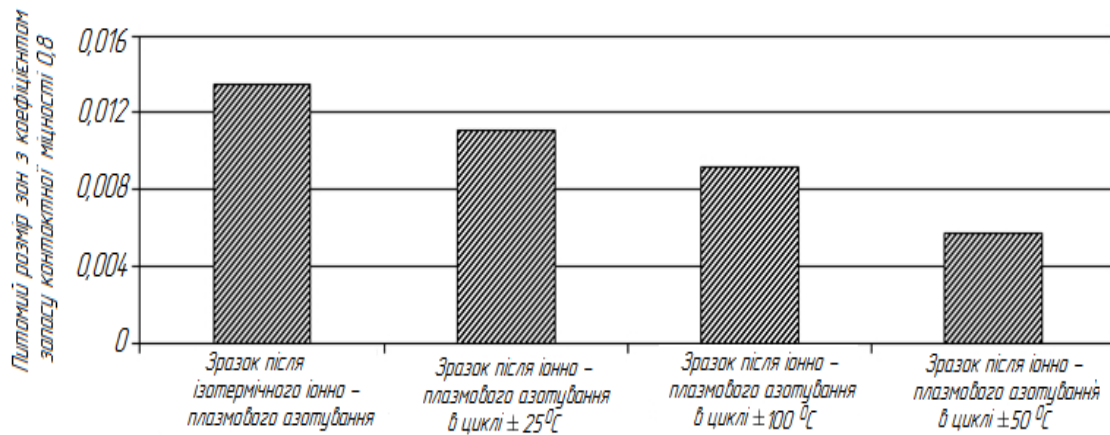


Рис. 8 – Зміна питомого розміру зон із коефіцієнтом запасу контактної міцності 0,8 для поверхонь з різними параметрами функціонально-градієнтного покриття при навантаженні $p_{max} = 3,38 \times 10^9$ Па

Таблиця 4

Розподіл зон контактної втрати міцності у зразках після азотування при навантаженні $p_{max} = 3,67 \times 10^9$ Па

Коефіцієнт запасу контактної міцності	Зразок після ізотермічного іонно-плазмового азотування	Зразок після іонно-плазмового азотування у циклі ± 25°C	Зразок після іонно-плазмового азотування у циклі ± 100°C	Зразок після іонно-плазмового азотування у циклі ± 50°C
	Питомий об'єм матеріалу, що має коефіцієнт запасу контактної міцності, менше			
0,1	0	0	0	0
0,2	0	0	0	0
0,3	0	0	0	0
0,4	0	0	0	0
0,5	0,0008	0,0002	0	0
0,6	0,0026	0,0016	0,001	0
0,7	0,0062	0,0048	0,0038	0,018
0,8	0,017	0,0134	0,0112	0,0072
0,9	0,0452	0,0416	0,0384	0,0328
1	1	1	1	1

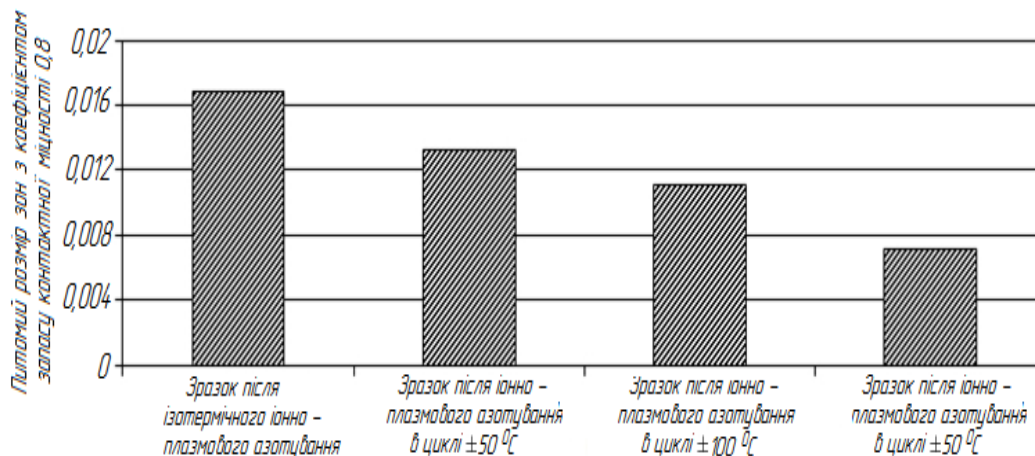


Рис. 9 – Зміна питомого розміру зон із коефіцієнтом запасу контактної міцності 0,8 для поверхонь з різними параметрами функціонально-градієнтного покриття при навантаженні $p_{max} = 3,67 \times 10^9$ Па

Наведені результати у табл. 1-4 та на рис. 6-9 показують, що найкращим чином в умовах тертя будуть поводитися зразки після іонно-плазмового термоциклічного азотування порівняно з ізотермічним азотуванням. Контактна міцність деталей суттєво залежить від режимів поверхневого зміцнення та умов експлуатації. Так, при фрикційних контактних навантаженнях $p_{\max} \leq 3,02 \times 10^9$ Па можна використовувати ізотермічне азотування, при навантаженнях $3,02 \times 10^9 \leq p_{\max} \leq 3,23 \times 10^9$ Па доцільно азотування у циклі $\pm 25^\circ\text{C}$, при навантаженнях $3,23 \times 10^9 \leq p_{\max} \leq 3,38 \times 10^9$ Па – азотування в циклі $\pm 100^\circ\text{C}$, при навантаженнях $3,38 \times 10^9 \leq p_{\max} \leq 3,67 \times 10^9$ Па – азотування в циклі $\pm 50^\circ\text{C}$.

Висновки

1. Вирішено проблему побудови методології використання адитивних (багатоопераційних) технологій відновлення та зміцнення деталей суднових механізмів в процесі ремонту.
2. Запропоновано узагальнена формалізація технологічної схеми забезпечення заданих властивостей деталі, постановка та метод вирішення завдання на вибір оптимальної послідовності технологій відновлення та поверхневого зміцнення деталей суднових механізмів при ремонті.
3. Як приклад, розв'язані задачі підвищення контактної міцності в умовах зношування поверхневих шарів деталей суднових механізмів зі сталі 40X13 методом термоциклічного іонно-плазмового азотування.
4. Показано технологічні методи управління параметрами поверхневих шарів деталей суднових механізмів, що забезпечують підвищення їх експлуатаційних властивостей при ремонтних операціях.

Перелік використаних джерел:

1. Кузін М.О. Визначення оптимальних параметрів структури поверхневих шарів деталей з врахуванням умов експлуатації / М.О. Кузін // Поліграфія і видавнича справа. – 2013. – № 3-4(63-64). – С. 55-64.
2. Агеев М.С. Застосування комбінованих технологій відновлення для підвищення ресурсу деталей засобів транспорту / М.С. Агеев, І. В. Грицук, Е.К. Солових // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту (УкрДУЗТ). – 2020. – Вип. 194. – С. 81-92. – Режим доступу: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.194.2020.230412>.
3. Вигерина Т.В. Оценка влияния параметров газотермического напыления покрытий на их свойства путем использования методов математического планирования / Т.В. Вигерина, М.С. Агеев, К.А. Данько // Вестник Полоцкого государственного университета. – 2017. – № 1. – С. 35-40. – (Серия В. Промышленность. Прикладные науки. Машиноведение и машиностроение).
4. Журавлев Ю.В. Избранные труды / Ю.В. Журавлев. – М. : Магистр, 1998. – 420 с.
5. Корн Г. Справочник по математике / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Наука, 1977. – 832 с.
6. Булычев С.Н. Соотношение между восстановленной и невосстановленной твердостью при испытаниях наномикро-индентированием / С.Н. Булычев // Журнал технической физики. – 1999. – Т. 69, № 7. – С. 42-48.
7. Кузін Н.О. Управление контактной прочностью материалов узлов трения подвижного состава с использованием математических и компьютерных моделей / Н.О. Кузін // Залізничний транспорт України. – 2011. – № 2. – С. 55-60.
8. Крагельский И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
9. Александров В.А. Температурное поле и износ неоднородного алмазного круга при конвективном теплообмене. Ч. II / В.А. Александров, А.Н. Жуковский, В.А. Мечник // Трение и износ. – 1994. – Вып. 15, № 2. – С. 196-201.

References:

1. Kuzin M.O. Vyznachennia optimal'nikh parametriv strukturi poverkhnevikh shariv detalei z vrakhuvanniam umov ekspluatatsii [Determination of optimal parameters of the structure of the surface layers of parts taking into account the operating conditions]. *Poligrafia i vidavnicna sprava – Printing and Publishing*, 2013, № 3-4(63-64), pp. 55-64. (Ukr.)

2. Ageev M.S., Gritsuk I.V., Solovikh E.K. Zastosuvannia kombinovanikh tekhnologii vidnovlennia dlia pidvishchennia resursu detalei zasobiv transportu [Application of combined recovery technologies to increase the life of vehicle parts]. *Zbirnik naukovikh prats' Ukrain'skogo derzhavnogo universitetu zaliznichnogo transportu – Collected scientific works of Ukrainian state university of railway transport*, 2020, vol. 194, pp. 81-92. doi: 10.18664/1994-7852.194.2020.230412. (Ukr.)
3. Vigerina T.V., Ageev M.S., Dan'ko K.A. Otsenka vliianiia parametrov gazotermicheskogo napyleniia pokrytii na ikh svoistva putem ispol'zovaniia metodov matematicheskogo planirovaniia [Evaluation of the influence of the parameters of thermal spraying of coatings on their properties by using methods of mathematical planning]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V. Promyshlennost'. Prikladnye nauki. Mashinovedenie i mashinostroenie – Vestnik of Polotsk State University. Part B. Industry. Applied Sciences*, 2017, №1, pp. 35-40. (Rus.)
4. Zhuravlev Iu.V. *Izbrannye trudy* [Selected writings]. Moscow, Magistr Publ., 1998. 420 p. (Rus.)
5. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike* [Handbook of Mathematics]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 832 p. (Rus.)
6. Bulychev S.N. Sootnoshenie mezhdv vosstanovlennoi i nevosstanovlennoi tverdost'iu pri ispytaniakh nanomikro-indentirovaniem [Ratio between recovered and unrecovered hardness in nanomicro-indentation tests]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki – Technical Physics*, 1999, vol. 69, № 7, pp. 42-48. (Rus.)
7. Kuzin N.O. Upravlenie kontaktnoi prochnost'iu materialov uzlov treniia podvizhnogo sostava s ispol'zovaniem matematicheskikh i komp'iuternykh modelei [Controlling the Contact Strength of Materials of Friction Units of Rolling Stock Using Mathematical and Computer Models]. *Zaliznichnii transport Ukraïni – Railway transport of Ukraine*, 2011, № 2, pp. 55-60. (Rus.)
8. Kragel'skii I.V., Dobychin M.N., Kombalov V.S. *Osnovy raschetov na trenie i iznos* [Fundamentals of Friction and Wear Calculations]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977. 526 p. (Rus.)
9. Aleksandrov V.A., Zhukovskii A.N., Mechnik V.A. Temperaturnoe pole i iznos neodnorodnogo almaznogo kruga pri konvektivnom teploobmene. Ch. II [Temperature field and wear of an inhomogeneous diamond wheel during convective heat transfer. Part II]. *Trenie i iznos – Journal of Friction and Wear*, 1994, vol. 15, № 2, pp. 196-201. (Rus.)

Рецензент: О.В. Шарко,
д-р техн. наук, проф., Херсонська державна морська академія

Стаття надійшла 08.10.2021

УДК 621.436

doi: 10.32782/2225-6733.43.2021.24

© Грицук І.В.¹, Черненко В.В.²

ОСОБЛИВОСТІ ІНФОРМАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ МОНІТОРИНГУ ДИЗЕЛЬНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ У СКЛАДІ СИСТЕМИ ПРОГНОЗУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ

В статті розглядаються особливості інформаційної моделі моніторингу дизельної електростанції у складі системи прогнозування параметрів технічного стану складної системи транспортного засобу. Запропонований підхід до формування складної систем прогнозування параметрів технічного стану суднової енергетичної установки з урахуванням стану операторів системи і їх режимів роботи. В статті розглядається загальний підхід і саме особливості побудови інформаційної системи дизельної електростанції. Показана побудована інформаційна модель дизельної

¹ д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, ORCID: 0000-0001-7065-6820, gritsuk_iv@ukr.net

² ст. викладач, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, chernenko.valentyna@ksma.ks.ua