

В роботі за допомогою методів векторної оптимізації визначені раціональні параметри шаруватого відновлювального покриття. Оптимізацію проводили для тришарового покриття за показниками вартості матеріалів та ресурсу (терміну експлуатації) відновлених деталей.

Ключові слова: відновлення деталей, векторна оптимізація, ресурс

Вступ, постановка проблеми.

Підвищення надійності експлуатації рухомого складу, збільшення його мікрремонтного пробігу, ремонтпридатності та зниження витрат на ремонт є одними з важливих напрямків розвитку залізничного транспорту. Проблема підвищення надійності та ресурсу деталей є важливою та актуальною не тільки для залізничного транспорту, а і для будь-якого транспортного засобу та і взагалі будь-якої галузі. При цьому однією з головних задач вирішення поставленої проблеми є підвищення зносостійкості деталей. Досвід експлуатації механічної частини рухомого складу показав, що основною причиною відмов та несправностей її елементів є знос та пошкодження контактних поверхонь деталей. У загальному випадку тертя спостерігається при контакті двох тіл і русі одного відносно іншого. В результаті зношення деталей можуть виникати несприятливі для експлуатації наслідки, наприклад, вібрації, биття, порушення герметичності та режиму змащування, втрата міцності з'єднання для спряжень з гарантованим натягом. Знос, який супроводжується пошкодженнями робочої поверхні деталей такими, як риски, задири, глибинні вириви та інші, зменшує втому міцність та може приводити до руйнування. На зношування деталей впливає багато факторів, які іноді складно врахувати в математичних моделях. Тому дослідження процесів зношування, моделювання та визначення параметрів моделей з наступною експериментальною перевіркою є важливою складовою у розв'язанні розглядуваних питань.

Існують різні шляхи підвищення зносостійкості деталей: при проектуванні рухомого складу (й інших машин) вдосконалювати конструкцію елементів механічної частини, застосовувати нові матеріали та технології на етапі виготовлення, закладати використання більш ефективних змащувальних матеріалів. У той же час, необхідно враховувати, що і нові деталі будуть зношуватись і через деякий час виникне необхідність їх заміни або відновлення. До того ж, на даний час рухомий склад залізниць застарів, зношений і потребує використання сучасних відновлювальних технологій.

Таким чином постає проблема відновлення деталей: вибору методів відновлення, матеріалів, ефективних режимів і таке інше. Одним із напрямків розвитку сучасних відновлюючих технологій є використання багатошарових покриттів. При цьому дуже важливим є визначення доцільності використання більш складних технологій (відновлення шарами ускладнює процес) з точки зору економічності та зносостійкості. В даній роботі розглянута проблема підвищення зносостійкості багатошарових покриттів.

Дана робота є логічним продовженням і розвитком робіт [1-3].

Метою даної роботи є визначення раціональних параметрів шаруватого покриття при відновленні зношених деталей.

Для розв'язання поставленої задачі застосуємо методи векторної оптимізації [4, 5]. Представимо алгоритм розв'язання поставленої задачі на прикладі тришарового покриття.

Нехай r_0 - радіус зношеної деталі, яку необхідно відновити; c_i - вартість нанесеного матеріалу i -го шару; u_i - інтенсивність зношування i -го шару; h_i - товщина i -го шару; H - загальна товщина (задана) нанесеного покриття (рис. 1).

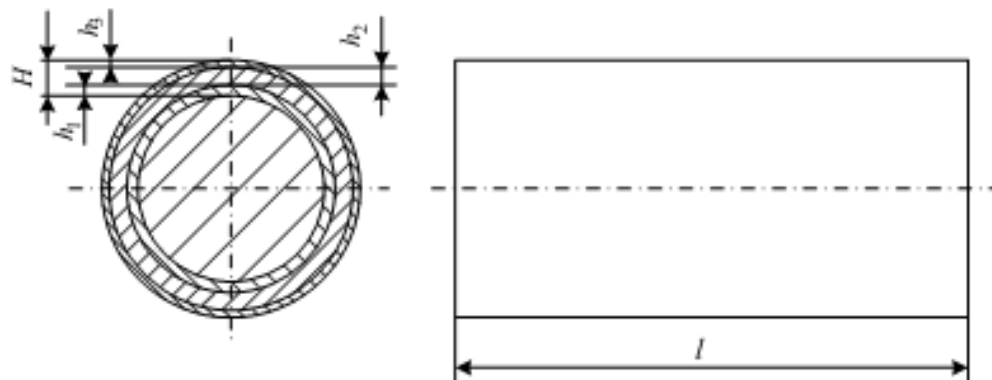


Рисунок 1 – Схема розташування шарів покриття при відновленні зношених валків

Виразимо товщину нанесеного покриття H через складові h_1 , h_2 та h_3 :

$$h_1 + h_2 + h_3 = H \quad (1)$$

Визначимо об'єм матеріалу, що наноситься на відновлювальну деталь

$$\begin{aligned} V_1 &= \pi \left((r_0 + h_1)^2 - r_0^2 \right) \cdot l = \pi \left(2h_1 r_0 + h_1^2 \right) \cdot l \\ V_2 &= \pi \left((r_0 + h_1 + h_2)^2 - (r_0 + h_1)^2 \right) \cdot l = \pi \left(2h_2 (r_0 + h_1) + h_2^2 \right) \cdot l \\ V_3 &= \pi \left((r_0 + h_1 + h_2 + h_3)^2 - (r_0 + h_1 + h_2)^2 \right) \cdot l = \pi \left(2h_3 (r_0 + h_1 + h_2) + h_3^2 \right) \cdot l \end{aligned} \quad (2)$$

Зауважимо, що в даному випадку довжина деталей l немає значення, тому довжину приймаємо одиничною $l = 1$. Останнє можна пояснити тим, що довжина конкретної деталі важлива для врахування витрат відновлювальних матеріалів при визначенні вартості процесу відновлення. А оскільки перед нами стоїть задача пошуку раціональних співвідношень товщини шарів з різними властивостями і відомими вартостями матеріалів, то довжина деталей може бути узята одиничною. У той же час намагатися досягати максимально можливого ресурсу при мінімально можливій вартості процесу в цілому та наповлених матеріалів зокрема. Тому введемо оцінку вартості матеріалів в залежності від геометричних параметрів шарів покриття при одиничній довжині деталі (зразка).

$$z = C_1 \cdot V_1 + C_2 \cdot V_2 + C_3 \cdot V_3 \quad (3)$$

Ресурс (пробіг, термін служби) при цьому визначимо як:

$$T = \frac{h_1}{u_1} + \frac{h_2}{u_2} + \frac{h_3}{u_3} \quad (4)$$

Ресурс деталі може бути виражений у кілометрах пробігу або годинах роботи і залежить від одиниць вимірювання інтенсивності (швидкості) зносу u_j .

При цьому бажано, щоб вартість матеріалів (3) та й всього процесу прагнула до мінімуму, а ресурс (4) – до максимуму. Таким чином приходимо до задачі векторної оптимізації.

Зобразимо графічно область можливих рішень у вигляді трикутника, тільки в межах якого можуть знаходитись точки рішення задачі, тобто опуклу мінімальну локальну оболонку натягнуту на три точки (рис. 2) [6].

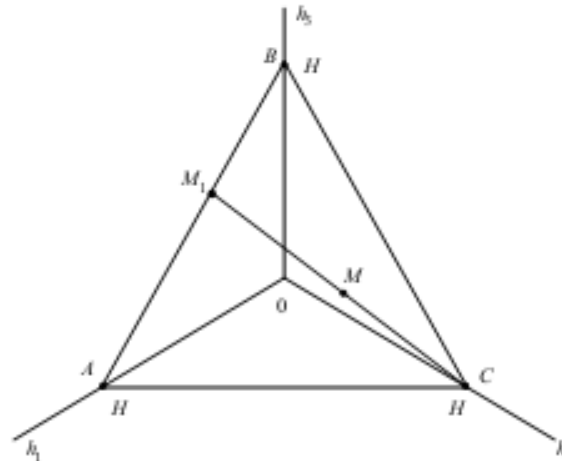


Рисунок 2 – Область рішення задачі

Точки M , M_1 – допустимі рішення задачі векторної оптимізації.

$$M_1 = \alpha A + (1 - \alpha) B,$$

$$M = \beta M_1 + (1 - \beta) C,$$

причому

$$0 \leq \alpha \leq 1$$

$$0 \leq \beta \leq 1$$

де α, β – безрозмірні параметри, за допомогою яких описується будь-яка точка, що знаходиться на даному трикутнику.

Тоді, з урахуванням α, β рівняння (3) прийме вигляд

$$\begin{aligned} z &= C_1 \pi \left(2\alpha\beta H r_0 + \alpha^2 \beta^2 H^2 \right) + C_2 \pi \left(2(1 - \beta) H (r_0 + \alpha\beta H) + (1 - \beta)^2 H^2 \right) + \\ &+ C_3 \pi \left(2\beta(1 - \alpha) H (r_0 + \alpha\beta H + (1 - \beta) H) + \beta^2 (1 - \alpha)^2 H^2 \right) \end{aligned} \quad (5)$$

Графічна інтерпретація залежності (5) представлена на рис. 3 (вартісна складова взята довільно).

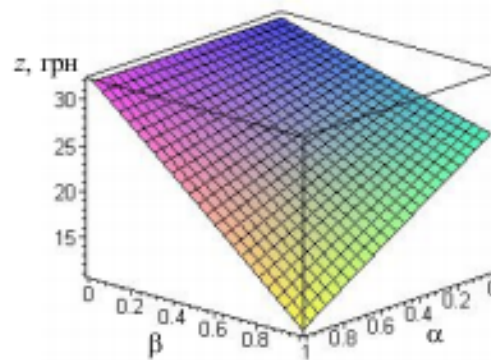


Рисунок 3 – Залежність вартості напilenня за матеріалом від параметрів α та β

А ресурс (рівняння (4)) буде мати вид

$$T = \frac{\alpha\beta H}{u_1} + \frac{(1-\beta)H}{u_2} + \frac{\beta(1-\alpha)H}{u_3} \quad (6)$$

Графічна інтерпретація залежності (6) представлена на рис. 4 (числові значення ресурсу взяті довільно).

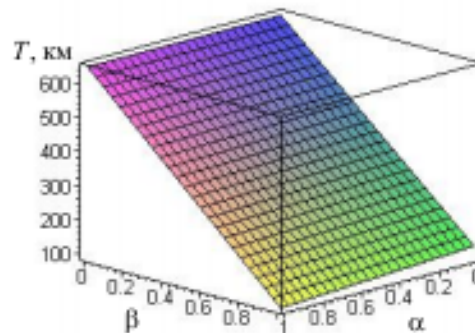


Рисунок 4 – Залежність ресурсу напленої деталі за зносом від параметрів α та β

Якщо параметр α зафіксувати, то отримаємо лінійні залежності вартості та ресурсу від параметру β , після чого можна отримати, наприклад, у графічному вигляді.

Далі будуватиметься набір залежностей ресурсу від вартості матеріалів з урахуванням товщини шарів, а також отримаємо конкретні числові значення товщини шарів, ресурсу та вартості покриття із заданим кроком α та β . Далі, в залежності від фінансових можливостей при інших рівних умовах підприємство може самостійно приймати рішення щодо вибору раціональної технології по відновленню деталей, у даному випадку напilenням.

Розглянемо конкретний приклад.

Згідно статистичних даних середня величина зносу валиків гальмівної важільної передачі (ГВП) локомотивів становить приблизно 2,1 мм, вантажних вагонів – 1,8 мм на діаметр. Розглянемо процедуру пошуку оптимальних економічних та технологічних параметрів на прикладі відновлення валика ГВП локомотиву.

Початкові умови. Однією з операцій попередньої підготовки є проточування валика для надання останньому циліндричної форми, зняття поверхневих та приповерхневих пошкоджень поверхні деталі, активування поверхні і т.д. Тобто до експлуатаційного додається, так званий, технологічний знос, який необхідно враховувати. Також при напilenні обов'язковою є фінішна обробка, як правило, шліфування, рідше проточування з шліфуванням, величина якої може складати 0,15...1,5 мм на сторону. Як видно, величина припуску на кінцеву обробку коливається в широких межах, оскільки залежить від багатьох факторів, наприклад, геометричних параметрів самої деталі, установки, технології напilenня та ін. Припуск на фінішну обробку впливає на собівартість процесу відновлення в цілому, однак, в розглядуваній задачі цим параметром можна знехтувати, оскільки в даному випадку представляє інтерес співвідношення вартості «чистого» покриття та ресурсу деталі з урахуванням техніко-економічних параметрів шарів. Крім того, згідно з ідеологією роботи шар під кінцеву обробку повинен виконувати ще й іншу функцію – прироблення. Тобто залишки після фінішної обробки останнього шару виконують прироблення контактуючих деталей; тому доцільно, щоб цей шар з технологічної точки зору мав гарну оброблюваність, а з експлуатаційної – мав властивості матеріалу з швидким та гарним приробленням. Як показує практика, такі матеріали мають невисоку твердість, задовольняють вищезазначеним вимогам і при цьому відносно дешеві. У той же час необхідно враховувати коефіцієнт використання матеріалу, оскільки відновлювальні технології відрізняються за цим показником, який у свою чергу, суттєво впливає на вартісний показник. Нехай розміри зношеного валика після попередньої обробки будуть такі: діаметр – 37,8 мм; загальна товщина покриття без врахування припуску на фінішну обробку – 1,1 мм на сторону, тобто на виході діаметр обробленого й готового до експлуатації валика має становити 40 мм; довжина напильованої частини валика – 100 мм. Вартість та інтенсивність зношування матеріалів відомі. Необхідно відновити валик таким чином, щоб ресурс його був

максимальним при мінімально можливій вартості. Задача ускладнюється необхідністю отримання максимально можливої міцності зчеплення покриття, а також забезпечення гарної оброблюваності та прироблення верхнього шару. Міцність зчеплення відіграє особливу роль при експлуатації відновленої деталі, суттєво впливаючи на її надійність. Допускається використовувати для напilenня першого та останнього шарів один і той же матеріал. Припустимо, підприємство має у своєму розпорядженні детонаційну установку газотермічного напilenня, наприклад «Перун-С».

Однією з переваг детонаційного методу газотермічного напilenня є можливість використання трьох бункерів з порошками, які можна дозувати на розсуд технолога, комбінувати, отримувати різноманітні комбінації з різним процентним співвідношенням компонентів і т.д. Враховуємо, що прийнятий коефіцієнт використання матеріалу – 50 % [7]. Перший шар будемо наносити на поверхню деталі з дешевого матеріалу, наприклад, типу $Fe-B$; частка бору складає 5...9 % від загального складу. Матеріал відрізняється гарною адгезією, тому може бути використаний у якості підшарку під основний робочий шар. Орієнтовна вартість цього порошку складає до 50 грн/кг. Порошок для робочого шару, зрозуміло, більш складний за компонентним складом та дорожчий. Вибір матеріалів для нанесення робочого шару вельми широкий; наведемо деякі з них: BK-15, PC12HBK, низка аморфізованих, наприклад, сплави $Fe-Cr-B-Ni-C$, $Fe-Ni-Cr-Mo-B$, $Fe-Cr-B-Si$ та інші. Вказані матеріали мають високу зносостійкість та втомну міцність; їх головними недоліками є складність обробки після напilenня та висока вартість. Наведемо порівняльну оцінку вартості та механічних властивостей (мікротвердості та зносостійкості) деяких матеріалів (табл. 1).

Таблиця 1 – Дані для розрахунку надійності та ресурсу роботи деталей з покриттями

Характеристика покриттів	Вартість			Мікротвердість, МПа	Зносостійкість, мм/км
	2000 р., грн/кг	2010 р., грн/кг	2012 р., грн/кг		
BK15(85%WC+15%Co)	20...25	400	430	8500...10500 [8]	1,5 [8]
PC12HBK	18...20	250	260	8500...9500	1,9
Сплав Fe-B	2...3	40	48	2500...3400	12
Аморфний сплав ПГ-Ж2	2,5...4	50	59	2700...3500	9,3
Аморфний сплав Fe-Ni-B	12...16	150	170	6500...8100 [9]	2,5 [9]
Аморфний сплав Ni-Fe-Cr-B-Mo	14...18	190	210	6800...8600 [9]	1,8 [9]
Аморфний сплав $Fe_{70}Cr_{15}B_{11}Si_4$	9...12	130	140	6800...8900	1,7

В таблиці 1 вартість матеріалів представлена за різні роки з метою її можливого оціночного прогнозування в подальшому. Мікротвердість практично у всіх вказаних у таблиці 1 матеріалів висока, що потребує висококомірних оброблюваних матеріалів. Тому логічним є використання верхнього «технологічного» (термін автора) шару.

Також додамо, що і сам робочий шар може складатись з декількох різних за матеріалом шарів. Розроблена методика дозволяє оцінити ефективні товщини цих мікрошарів, звісно, при знанні вартості та зносостійкості матеріалів. В такому разі необхідно виконати процедуру розрахунку двічі, змінюючи відповідно початкові умови. Крім того, знаючи вихідні дані (початкові умови) згідно з поставленою задачею, наприклад, досягнення максимального ресурсу відновленої деталі, ми можемо порівняти між собою ефективність застосування того або іншого матеріалу. Особливо вказане важливо для основного робочого шару, оскільки до матеріалу першого шару ставлять головною метою отримання максимальної міцності зчеплення, а до останнього – мінімальні витрати на фінішну обробку та прироблення деталей.

Враховуючи наведене вище і опускаючи проміжні розрахунки, для початку розглянемо покриття, яке буде складатись з трьох шарів. Причому напilenня першого шару будемо проводити з матеріалу, наприклад, сплаву $Fe-B$, другий шар – робочий з аморфізованого матеріалу $Fe_{70}Cr_{15}B_{11}Si_4$, а третій – $Fe-Ni-B$.

Тоді об'єм напильованих шарів буде мати вигляд

$$\begin{aligned}
 V_1 &= 100\pi(41.58\alpha\beta + 1.21\alpha^2\beta^2) \\
 V_2 &= 100\pi(2(1.1-1.1\beta)(18.9+1.1\alpha\beta) + (1.1-1.1\beta)^2) \\
 V_3 &= 100\pi(2.2\beta(1-\alpha)(20+1.1\alpha\beta-1.1\beta) + 1.21\beta^2(1-\alpha)^2)
 \end{aligned} \quad (7)$$

Вартість напильованого покриття

$$\begin{aligned}
 z &= 314\pi(41.58\alpha\beta + 1.21\alpha^2\beta^2) + 880\pi(2(1.1-1.1\beta)(18.9+1.1\alpha\beta) + (1.1-1.1\beta)^2) + \\
 &+ 314\pi(2.2\beta(1-\alpha)(20+1.1\alpha\beta-1.1\beta) + 1.21\beta^2(1-\alpha)^2)
 \end{aligned} \quad (8)$$

Ресурс покриття знайдемо як

$$T = 91.7\alpha\beta + 647.1 - 647.1\beta + 91.7\beta(1-\alpha) \quad (9)$$

Графічно отримані залежності (8) та (9) можна представити як (рис. 5)

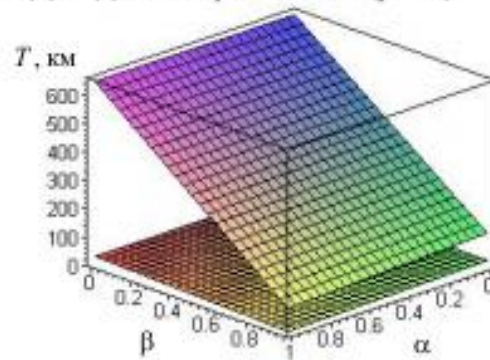


Рисунок 5 – Графічна інтерпретація залежностей вартості та ресурсу

Графічне представлення результату розв'язання задачі знаходження раціональних товщин шарів представлено на рис. 6.

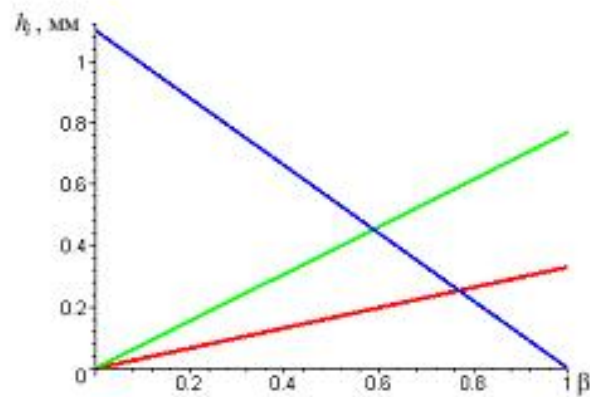


Рисунок 6 – Розподіл товщин шарів при фіксованому значенні α , $\alpha = 0.3$

При цьому залежність ресурсу від вартості при фіксованому значенні α можна представити так (рис. 7).

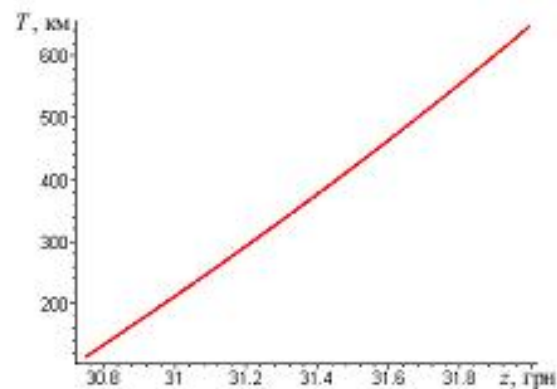


Рисунок 7 – Залежність ресурсу покриття від вартості з урахуванням товщин шарів

Тоді множину можливих рішень можна представити у вигляді (рис. 8).

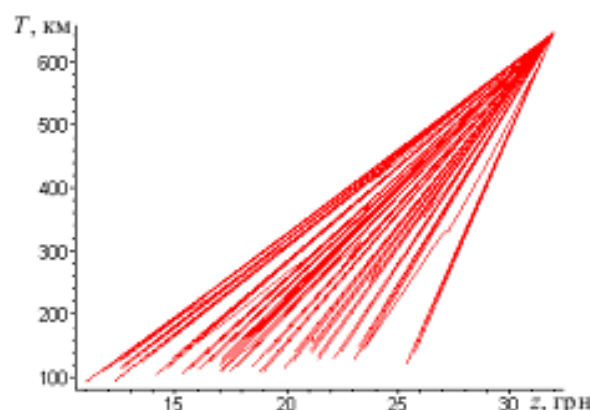


Рисунок 8 – Залежність ресурсу покриття від вартості з урахуванням товщин шарів

Для зручності розв'язання задачі доцільно представляти у формі конкретних значень, які можна оформити у табличній формі, приклад якої наведено у таблиці 2. В представленій таблиці наведені деякі, найбільш значущі результати.

Таблиця 2 – Результати розв'язання задачі векторної оптимізації

№	Товщина шарів, мм			Вартість покриття, грн	Ресурс, км
	h_1	h_2	h_3		
1	0	1,1	0	32	647,1
2	0	0	1,1	25,5	122,2
3	1,1	0	0	11	91,7
4	0,154	0,33	0,616	25,5	275,4
5	0,033	0,99	0,077	30,9	593,7
6	0,11	0,88	0,11	29,3	539
7	0,132	0,77	0,198	28,3	486
8	0,132	0,88	0,088	29	538,4
9	0,198	0,77	0,132	27,5	484,1
10	0,165	0,77	0,165	27,9	485
n	...	...	...	...	...

Аналіз результатів. При розв'язуванні поставленої задачі з кроком α та β рівним 0,1 всього отримаємо 121 варіант, що може ускладнювати вибір задовільного варіанту. Однак при більш детальному аналізі приходимо до висновку, що значна кількість отриманих результатів не представляють інтересу. Наприклад, в таблиці 2 показані результати, які в більшості випадків не можуть бути прийнятними, а саме варіанти № 1, 2, 3. Неприйнятність цих варіантів випливає із пояснень, наведених вище. Тобто, якщо із початкових умов випливає, що товщина будь-якого шару повинна відповідати умові $h > 0$, то варіанти, де товщина якогось шару дорівнює нулю автоматично відпадають. Крім того, частину варіантів можна видаляти з технологічних міркувань, наприклад, якщо в початкових умовах задати, що товщина першого шару має бути не менше за таке-то значення. Або товщина останнього шару – не більше (не менше) такого-то значення. Ці або інші додаткові початкові умови обумовлені технологічними або експлуатаційними особливостями. Таким кроком відфільтровується ще значна кількість варіантів. Далі необхідно із варіантів, що залишилися обрати той, що задовольняє очікуваним техніко-економічним показникам (співвідношення «вартість – ресурс»). Звернемо увагу, що представлена методика дозволяє уникати перерозходу коштів на матеріали, що цілком може бути, оскільки, як видно з рис. 8, при одних й тих же витратах ресурс може відрізнятись у рази.

Висновки та перспективи.

1. Застосована методика векторної оптимізації дозволяє визначати оптимальні товщини шарів покриття.
2. Знаючи вартість та зносостійкість окремих матеріалів можна розрахувати ресурс відновленої деталі та вартість відновлювального покриття.
3. Ремонтне підприємство на основі отриманих результатів розрахунку для конкретної деталі може самостійно підбирати в залежності від фінансових можливостей або з точки зору достатності (за ресурсом) технологічні режими напilenня покриттів.
4. Застосування запропонованого алгоритму визначення раціональних товщин шарів покриття при заданих витратах, ресурсі або затратах і ресурсі одночасно дозволить значно заощадити кошти, при цьому не втрачаючи заданого рівня ресурсу відновленої деталі.
5. Проведення розрахунків при заданих початкових умовах дозволить спрогнозувати ресурс та вартість нанесеного покриття без проведення додаткових, нерідко, дорогих випробувань.

Подальшим розвитком даного напрямку досліджень є знаходження раціональних параметрів λ шарового покриття.

Література

1. Артемчук В.В. Моделювання зносу багатшарового покриття. Міжнародний науковий журнал «Проблеми трибології». №2, 2011. - С. 59-65
2. Артемчук В.В. Побудова математичної моделі зносу з уточненими параметрами. Міжнародний науковий журнал "Проблеми трибології". № 4, 2011. - С. 121-131
3. Артемчук В.В. Теоретичні аспекти моделювання зносу багатшарових покриттів. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. - Дніпропетровськ, Україна, 2011 / Випуск 40. - С. 37-45
4. Нагин В.Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 144 с.
5. Босов А.А. Функции множества и их применение. Монография. – Дніпродзержанськ: «Андрій», 2007. – 182 с.
6. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: «Наука», 1977. – 831 с.
7. Газотермические покрытия из порошковых материалов / Ю.С. Борисов, Ю.А. Харламов, С.Л. Сидоренко, Е.И. Ардаговская / Справ. -К.: Наукова думка, 1987. - 544 с.
8. Ткаченко Ю.Г. Износостойкие твердосплавные покрытия / Ткаченко Ю.Г., Сычев В.В., Апининская Л.М., Каневская Ц.А., Шаривкер С.Ю., Астахов Е.А., Гарда А.П. // Порошковая металлургия. – 1975. № 7. С. 45-48.
9. Куницкий Ю.А., Коржик В.Н., Борисов Ю.С. Некристаллические металлические материалы и покрытия в технике. –Техника, К., 1988 – 198 с