

Артемчук В.В.Дніпропетровський національний
університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна**МОДЕЛЮВАННЯ ЗНОСУ
БАГАТОШАРОВОГО ПОКРИТТЯ****Вступ, постановка проблеми**

Підвищення ефективності використання рухомого складу, збільшення його ресурсу, ремонтно-придатності та надійності експлуатації є одними з важливих напрямків розвитку залізничного транспорту. Безумовно, розв'язання задач пов'язаних з підвищенням надійності та ресурсу є важливим не тільки для залізничного транспорту, а і для будь-якого транспортного засобу та і взагалі будь-якої галузі. Дуже важливим питанням при цьому є проблема підвищення зносостійкості деталей. 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 актуальною проблемою.

Підвищувати зносостійкість деталей можна різними шляхами, наприклад, ще при проектуванні рухомого складу (й інших машин) вдосконалювати конструкцію, застосовувати нові матеріали та технології на етапі виготовлення, закладати використання більш ефективних змашувальних матеріалів. Однак, необхідно враховувати, що і нові деталі будуть зношуватись і через деякий час виникне питання про їх заміну новими або можливість відновлення зношених деталей. Досвід показує, що в багатьох випадках (не менш 70 %) зношені деталі доцільно відновлювати. Крім того, на даний час рухомий склад залізниць неабияк застарів, зношений і потребує використання сучасних відновлювальних технологій. Постає проблема відновлення деталей: вибору методів відновлення, матеріалів, ефективних режимів і таке інше. Одним із напрямків розвитку сучасних відновлюючих технологій є використання багат шарових 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 багат шарових покриттів.

У роботі [1] знос багат шарового покриття розглянута, як зносоконтактна задача теорії пружності. Деформація тонкого покриття описана за допомогою моделі Вінклера, тобто вважається, що пружне осідання покриття дорівнює добутку товщини покриття, контактного тиску і коефіцієнта податливості.

$$B = \frac{(1-2\nu)(1+\nu)}{E(1-\nu)},$$

де ν і E – пружні характеристики покриття.

Наступним важливим положенням роботи [1] є закон зношування, який зв'язує швидкість зносу покриття з поточними параметрами процесу у вигляді:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = F(p, h),$$

де p – контактний тиск;

h – відстань від точки контакту до основи покриття.

Введемо середню податливість $\bar{h}(x, t)$:

$$\bar{B}(x, t) = \frac{1}{h(x, t)} \int_0^{h(x, t)} B(y) dy,$$

де $B(y)$ – змінний коефіцієнт податливості покриття.

У припущенні абсолютної жорсткості основи і контртіла виписується умова контакту у вигляді:

$$\bar{B}(x, t) h(x, t) p(x, t) + h_0 - h(x, t) = g(a(t)) - g(x),$$

де h_0 – початкова товщина покриття;

$g(x)$ – профіль контртіла.

Вважаючи $g(x)$ симетричною функцією профілю контртіла, значення x змінюється в межах $[-a(t), a(t)]$, де $-a(t)$ – ліва абсциса, $a(t)$ – права абсциса точок контакту контртіла з покриттям при $h = h_0$. До наведених співвідношень додамо умову рівноваги контртіла і відповідну початкову умову для $h(0, x)$.

$$\int_{-a(t)}^{a(t)} p(x,t) = Q(t)$$

Отримані співвідношення дозволяють оцінити функції $h(x,t)$, $p(x,t)$ та $a(t)$. Проте алгоритму розрахунку цих функцій в роботі [1] не наведено. Чисельні розрахунки наведені тільки для двошарового покриття. Крім того, контртіло прийняте абсолютно жорстким і не вказана його здатність зношувати багат шарове покриття. Також не відображена залежність руху контртіла як єдиного цілого.

У даній роботі відмічені недоліки частково враховані і запропонована математична модель зносу, в якій в явному вигляді входить число шарів, їх товщина, властивості шарів чинити опір зносу і шорсткість контртіла.

Приведення задачі до безрозмірного вигляду дозволило отримати критерії подібності зносу багат шарового покриття.

Вважаємо, що контртіло абсолютно жорстке і симетричне відносно осі OY (рис. 1).

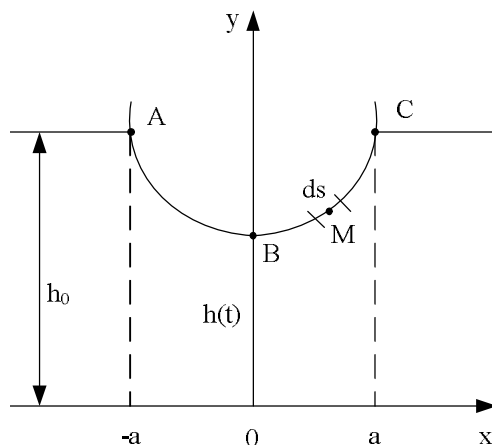


Рис. 1 □ Зона контакту покриття з контртілом

Припускаємо, що швидкість руху контртіла пропорційна навантаженню $Q(t)$ і обернено пропорційна довжині (площі) контакту з багат шаровим покриттям.

Нехай точка M знаходиться на поверхні контакту, а ds – елемент довжини в околиці точки M . Тоді елементарний опір, що оказує цей елемент буде $r(x, y) ds$, а опір від всієї площі контакту ϵ :

$$R = \int_{ABC} r(x, y) ds.$$

У цих припущеннях маємо [2]:

$$\frac{dh(t)}{dt} = - \frac{a Q(t)}{\int_{ABC} r(x, y) ds}.$$

Елементарний опір $r(x, y)$ визначається властивостями багат шарового покриття, а коефіцієнт a – характеризує шорсткість контртіла.

Розглянемо простий випадок, коли покриття однорідне, тобто $r(x, y) = \text{const} = C$ та $Q(t) = \text{const} = Q_0$. В цьому випадку:

$$\frac{dh}{dt} = - \frac{a Q_0}{C \cdot L_{ABC}(t)},$$

де $L_{ABC}(t)$ – довжина контакту у момент часу t і дорівнює:

$$L_{ABC}(t) = \int_{-a(t)}^{a(t)} \sqrt{1 + g^2(x)} dx.$$

Зауважимо, що у будь-який момент часу рівняння контакту описується таким чином:

$$y = g(x) + h(t).$$

Тоді координати точок A і C визначаємо з рівняння:

$$h_0 = g(a(t)) + h(t).$$

Так, наприклад, якщо $g(x) = k_1 x^2$, то отримуємо:

$$h_0 - h(t) = k_1 a^2(t),$$

звідки $a = \pm \sqrt{\frac{h_0 - h(t)}{k_1}}$ та приходимо до наступного рівняння для $h(t)$:

$$\frac{dh}{dt} = - \frac{\alpha Q_0}{C_0 \int_{-\sqrt{\frac{h_0-h(t)}{k_1}}}^{\sqrt{\frac{h_0-h(t)}{k_1}}} \sqrt{1+4k_1^2 x^2} dx} . \quad (1)$$

До даного диференціального рівняння необхідно додати початкову умову:

$$h(0) = y_0, \quad (2)$$

де y_0 – початкова просадка.

Якщо розв'язання рівняння (1) за початкової умові (2) представляє собою $h(t, y_0)$, тоді співвідношення $h(T, y_0) = 0$ дозволяє визначити величину T , при якій контртіло досягає основи покриття і тим самим визначає час зношування покриття.

Приведемо задачу Коші (1), (2) до безрозмірного вигляду, поклавши:

$$\begin{aligned} H &= \frac{h}{h_0}; \\ \tau &= \frac{\alpha Q_0}{C_0 h_0^2} \cdot t; \\ a &= \sqrt{h_0} \sqrt{\frac{1-H}{k}}; \\ H_0 &= \frac{y_0}{h_0}. \end{aligned}$$

Тоді задача (1), (2) приймає вигляд:

$$\frac{dH}{d\tau} = - \frac{h_0}{C \int_{-a}^a \sqrt{1+4k^2 x^2} dx}, \quad (3)$$

з початковою умовою:

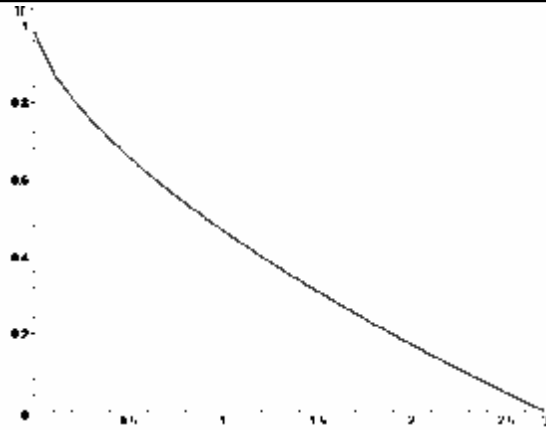
$$H(0) = H_0. \quad (4)$$

Дану задачу необхідно розглядати, як задачу при однорідному покритті. Так, за початкової умови $H_0 = 0,98$ і $C = 1$ знос представлений на рис. 2. Якщо $C = 2$, то знос показано на рис. 3.

Як випливає з (3) термін служби деталі пропорційний безрозмірній величині C – опору зносу. У розглянутому випадку, коли $H_0 = 0,98$ маємо:

$$T = 2,7 \cdot C. \quad (5)$$

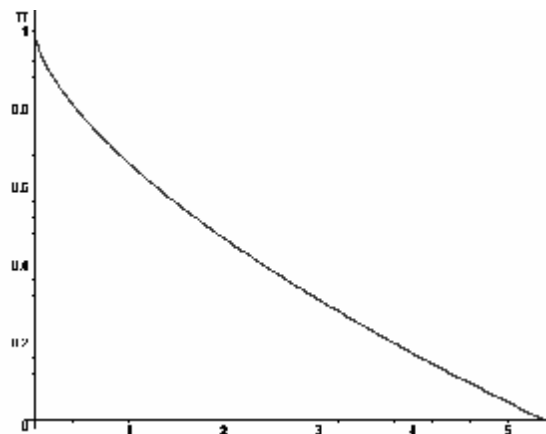
Співвідношення (5) справедливе тільки для однорідного покриття і початковій товщині покриття $h_0 = 3$ мм.

Рис. 2 – Знос при $C = 1$

Перейдемо до багатшарового покриття. В цьому випадку опір зносу $r(x, y)$ суттєво залежатиме від координат точки контакту контртіла з покриттям. Розглянемо ситуацію, коли покриття виконане у вигляді шарів, тоді:

$$r(x, y) = C(y(x)),$$

де $y(x)$ – ордината точки контакту контртіла і покриття.

Рис. 3 – Знос при $C = 2$

Розглянемо детальніше тришарове покриття (рис. 4).

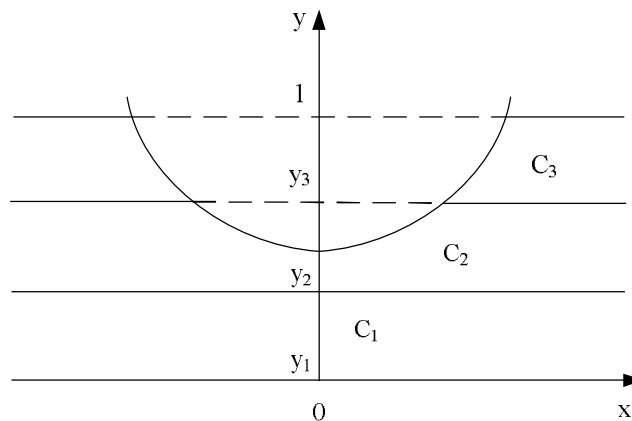


Рис. 4 – Тришарове покриття

C_1 , C_2 та C_3 – значення локальних властивостей покриття. В цьому випадку $C(y(x))$ може бути представлена у вигляді:

$$C(y(x)) = C_3 \mathfrak{N}(\varphi(x) + h(t)y_3) + C_2 (\mathfrak{N}(y_3 - \varphi(x) - h(t)) - \mathfrak{N}(y_2 - \varphi(x) - h(t))) + C_1 (\mathfrak{N}(y_2 - \varphi(x) - h(t)) - \mathfrak{N}(y_1 - \varphi(x) - h(t))),$$

де $\mathfrak{N}(t)$ – функція Хевісайда, тобто:

$$\mathfrak{N}(t) = \begin{cases} 1, & \text{при } t \geq 0; \\ 0, & \text{при } t < 0. \end{cases}$$

У цій ситуації співвідношення (3) приймає вигляд:

$$\frac{dH}{d\tau} = - \frac{h_0}{\int_{-a}^a C(y(x)) \sqrt{1 + \varphi'^2(x)} dx}, \quad (6)$$

а початкова умова залишається такою же, як і в задачі однорідного покриття, тобто:

$$H(0) = H_0. \quad (7)$$

Припустимо $y_1 = 0$; $y_2 = 0,4$; $y_3 = 0,7$; $C_1 = 1$; $C_2 = 2$; $C_3 = 3$. При цих даних крива зносу, як функція безрозмірного часу τ представлена на рис. 5.

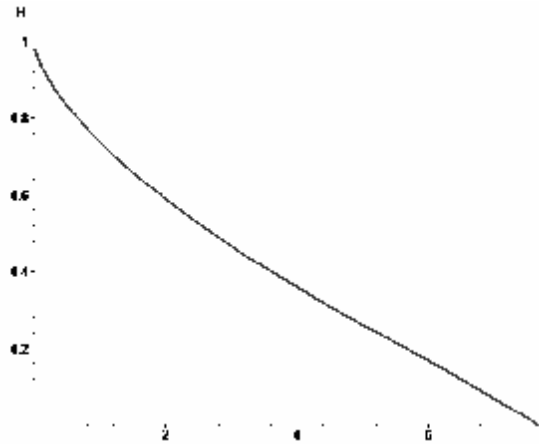


Рис. 5 – Знос при тришаровому покритті:
 $y_1 = 0$; $y_2 = 0,4$; $y_3 = 0,7$; $C_1 = 1$; $C_2 = 2$; $C_3 = 3$

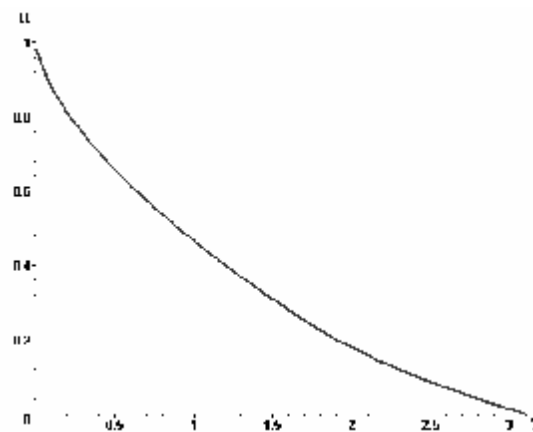


Рис. 6 – Знос при тришаровому покритті:
 $y_1 = 0$; $y_2 = 0,4$; $y_3 = 0,7$; $C_1 = 3$; $C_2 = 2$; $C_3 = 1$

На рис. 6 представлений знос для випадку, коли властивості першого і третього шарів поміняли місцями. Якщо в першому випадку напрацювання по зносу складало $\tau = 7,7$, то в другому випадку напра-

цювання по зносу рівне $\tau = 3,1$, тобто у 2,48 рази менше. Даний факт має пояснення, пов'язане з різними областями зносу.

Розглянемо ситуацію, пов'язану з товщиною шарів покриття, наприклад $y_1 = 0$; $y_2 = 0,4$; $y_3 = 0,5$; $C_1 = 1$; $C_2 = 2$; $C_3 = 3$ (рис. 7).

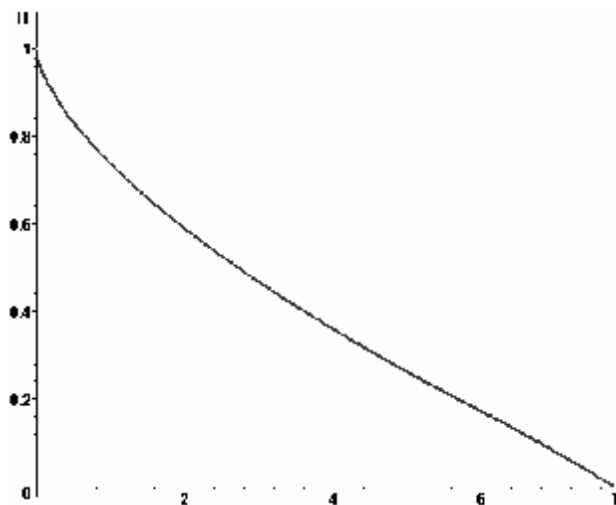


Рис. 7 – Знос при тришаровому покритті
 $y_1 = 0$; $y_2 = 0,4$; $y_3 = 0,5$; $C_1 = 1$; $C_2 = 2$; $C_3 = 3$

Як випливає з рис. 7 тривалість роботи по зносу збільшилася і складає $\tau = 7,8$.

Таким чином, варіюючи товщиною шарів покриттів y_i і властивостями опору зносу C_i , отримуємо можливість визначення як числа шарів, так і їх допустимі властивості, при яких час зношування буде максимальним.

Відзначимо, що розгляд задачі в безрозмірному вигляді дозволяє отримати два критерії подібності процесів зносу. Перший критерій чисто геометричний і представляє собою:

$$H = \frac{h}{h_0};$$

а другий критерій – безрозмірний час:

$$\tau_0 = \frac{\alpha Q_0}{C_0 h_0^2} \cdot t_0,$$

де t_0 – характеристичний час процесу зношування.

На закінчення розглянемо випадок із змінним навантаженням, ввівши безрозмірне навантаження у вигляді:

$$q(t) = \frac{Q(t)}{Q_0},$$

тоді диференціальне рівняння (6) матиме вигляд:

$$\frac{dH}{d\tau} = - \frac{h_0 \cdot q(t)}{\int_{-a}^a C(y(x)) \sqrt{1 + \varphi^2(x)} dx},$$

за початкової умови (7).

Узявши $q(t)$ у вигляді:

$$q(t) = |\sin t|,$$

для тришарового покриття отримуємо рішення, представлене на рис. 8.

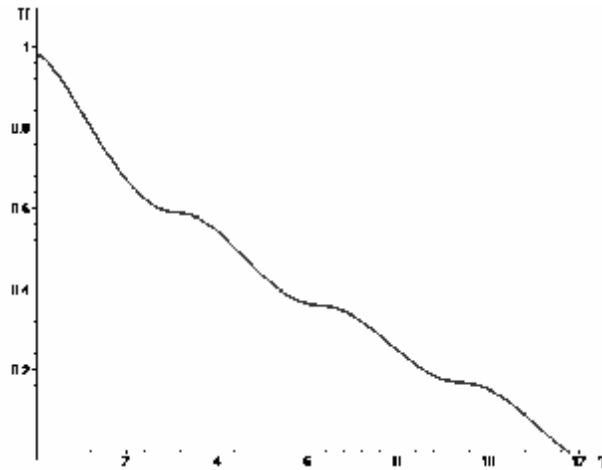


Рис. 8 – Знос тришарового покриття при змінному навантаженні
 $y_1 = 0; y_2 = 0,4; y_3 = 0,5; C_1 = 1; C_2 = 2; C_3 = 3$

Як впливає з порівняння рис. 7 і рис. 8 термін служби даного тришарового покриття із змінним навантаженням склав $T = 11,8$.

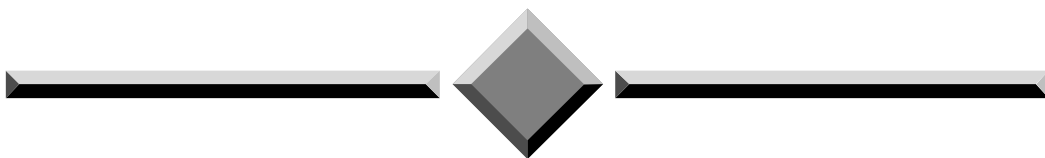
Висновки

Як видно з представлених результатів теоретичних досліджень розроблена математична модель враховує кількість та товщину шарів, а також здатність кожного шару опиратись зношуванню. Показано, що знос залежить не тільки від властивостей кожного шару, але і порядку їх розташування по товщині покриття. Зауважимо, що кожний окремих шар може являти собою сукупність багатьох менших за розмірами шарів, але близьких за умовою чинити опір зношуванню.

Література

1. Солдатенков И.А. К анализу процесса изнашивания многослойного покрытия // Трение и износ. 1991 г., Том 12 № 2. С. 204 – 209.
2. Крагельский И.В. Трение и износ. – М.: Машиностроение, 1968. – 478 с.

Надійшла 22.03.2011



ЧИТАЙТЕ

журнал

“Problems of Tribology”

во всемирной сети

INTERNET !

<http://www.tup.km.ua/science/journals/tribology/>