

УДК.519.651:620.178.16(045)

М.О. ХОДАК, О.А. ВИШНЕВСЬКИЙ*Київський національний авіаційний університет, Україна***НЕТРАДИЦІЙНИЙ СПОСІБ АПРОКСИМАЦІЇ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ
ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ТА ЙОГО ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА З ПРОГРАМАМИ
СИСТЕМИ “MathCAD”**

Розглядаються експериментальні залежності абразивного зносу поверхонь мідних та сталевих матеріалів при нежорстко закріплених абразивних частинках та пропонується нетрадиційний вдосконалений спосіб їх апроксимації підвищеної точності. Крім цього дається порівняльна оцінка запропонованого способу із сучасними програмами системи “MathCAD”.

**Загальна постановка проблеми
та її зв'язок
з науково-практичними задачами**

Відомо, що цілий ряд конструктивних вузлів авіаційної техніки на сучасному етапі характеризується інтенсифікацією процесів, що протікають на робочих поверхнях тертьових деталей у зв'язку з ростом питомих навантажень, змінами швидкостей, якості робочого середовища, взаємним переміщенням деталей, різким перепадом температур у зоні тертя. Надійність і довговічність робочих вузлів тертя залежать від рівня розвитку технології матеріалів та покриттів, серед яких особливе місце займають газотермічні покриття і, зокрема, детонаційні покриття.

На базі аналізу закономірностей експлуатаційних пошкоджень і причин виходу деталей у брак та передчасної їх заміни в умовах експлуатації встановлено, що домінуючою причиною є недопустиме зношення, яке головним чином пов'язане з локальним руйнуванням поверхонь деталей тертя. При цьому триботехнічні показники визначаються не стільки об'ємноструктурними властивостями, скільки станом поверхневих шарів.

Використання науково обґрунтованих необхідних захисних покриттів забезпечує кардинальне та технологічно ефективне розв'язання задачі збільшення надійності і довговічності деталей машин і механізмів. Розробка і впровадження нових високо-

ефективних технологій зміцнення і відновлення поверхонь тертя надає можливість досягти необхідної техніко-економічної доцільності рішення завдань ремонту при забезпеченні в межах експлуатаційних обмежень високого рівня надійності авіаційної техніки (АТ).

При нанесенні детонаційних покриттів на деталі утворюються високоякісні, практично безпористі шари з високим рівнем адгезійної міцності з матеріалом основи [1].

Застосування детонаційних покриттів дозволяє не тільки поліпшити, а навіть цілком змінити поверхневі властивості деталей, одержати заздалегідь прогнозовані характеристики робочих поверхонь, щоб найкраще задовольнити умови експлуатації [2, 3].

У багатьох випадках застосовують детонаційні покриття з оксидів алюмінію, хрому, кремнію, титану, цирконію та інших кісневмісних порошкових матеріалів [2 – 5], які поєднують в собі важливі позитивні характеристики за твердістю, тугоплавкістю, хімічною стійкістю та іншими властивостями.

Крім цього, для відновлення і зміцнення поверхонь тертя застосовують матеріали на основі дорогих металів (нікель, кобальт, вольфрам, молибден та інші, які відрізняються значними енерго- і трудомісткістю технологічних процесів).

У зв'язку з цим до найбільш ефективних напрямків досліджень слід віднести удосконалення газополум'яних технологій напилення з використанням

композиційних матеріалів на основі заліза, що дозволяють отримати покриття з високими триботехнічними й адгезійними властивостями [6]. Визначення закономірностей впливу лігуючих елементів на механізми зміни властивостей матеріалу основи дозволяє отримати значення вмісту елементів композиції і покриття з триботехнічними і фізико-механічними властивостями, наближеними до матеріалів на основі нікелю, кобальту і вольфраму [7, 8].

На основі широкого застосування на сучасному етапі композиційних порошків різних систем і газополум'яного окриття [9] можливо отримати високі триботехнічні властивості поверхонь, наприклад покриття системи $Fe-C-Cr-Al-B+30\%$ тетраборнокислового натрію, крім зазначеного, дає задовільну сумісність з широкою групою конструкційних матеріалів.

Наступним розповсюдженим видом руйнування поверхонь деталей є абразивне зношування у вузлах тертя авіаційних конструкцій, деталей вузлів тертя автомобілів, сільськогосподарських, будівельних і гірських машин шляхом попадання на їх поверхні в процесі експлуатації часток мінерального походження SiO_2 , глинозему, гірських порід тощо.

Для забезпечення більш тривалої працездатності елементів конструкцій і їхніх конструкційних матеріалів, що працюють в умовах абразивного зношування, на їхні робочі поверхні також наносять покриття різними способами [10 – 12], що призводить до істотних змін механізмів і кінетики процесів руйнування поверхневих шарів деталей.

Постійно зростає необхідність підвищення рівня надійності і довговічності авіаційної техніки, економії при цьому матеріальних і трудових ресурсів. Зниження матеріалоемності виробництва потребує науковообґрунтованого прогнозування вказаних характеристик та їх порівняння. В зв'язку з цим різко підвищується також значення вирішення задач побудови їх математичних моделей, оцінки їх достовірності, задач направлених на вирішення обчис-

лювальних та системноорганізаційних проблем побудови засобів моделювання об'єктів авіаційної техніки та процесів, що в них протікають, в тому числі при терті та зношуванні різних видів матеріалів та покриттів і їх оцінки при різних технологічних процесах нанесення.

Огляд публікацій та аналіз невирішених проблем

В загальній проблематиці невирішених питань і задач в галузі тертя і зношування важливе місце займають питання вивчення закономірностей процесів і механізмів, пов'язаних з абразивним зношуванням поверхонь деталей, їх покриттів та питання їх моделювання.

Види і механізми абразивного зношування конструкційних матеріалів описані в роботах [13 – 21].

Дослідники відзначають розмаїтість факторів, що визначають той або інший вид зношування і механізм його розвитку. В основі механізму цього процесу лежить взаємодія абразивної частинки з металом, що складається з двох етапів: 1) укорінення абразивної частинки в метал; 2) поступальне переміщення її уздовж поверхні. У більшості випадків дослідження проводили на залізовуглецевих сплавах. Питання дослідження властивостей покриттів, нанесених на різні сталі, на сьогодні ще недостатньо широко вивчені.

Безпосередньо питаннями моделювання й апроксимації експериментальних залежностей процесів абразивного зносу різних матеріалів займалися найбільш відомі провідні спеціалісти в області тертя і зносу [17, 20, 21].

Зрозуміло, що для моделювання процесів абразивного зношування виникає необхідність розробки прискорених методик і критеріїв оцінки процесів зношування матеріалів і їхніх покриттів, визначення виду апроксимуючих функцій експериментальних залежностей процесу абразивного зношування з метою визначення порівняльних характеристик їхніх

механічних властивостей і показників. При цьому дослідження на основі використання математичних методів моделювання процесів абразивного зношування поверхонь деталей дозволяють проводити порівняльний аналіз і оцінювати матеріали і покриття на абразивну зносостійкість із застосуванням сучасних комп'ютерних технологій. Для цього в першу чергу необхідно мати точні види апроксимуючих функцій експериментальних залежностей, з допомогою яких можна підтвердити або забезпечити вірність моделювання, а досягти точної апроксимації можливо при наявності відповідних способів і прийомів [22].

Мета статті. В даній роботі пропонується удосконалений спосіб, який полегшує процес визначення оптимального виду апроксимуючих функцій експериментальних залежностей абразивного зносу та значно підвищує точність їх апроксимації, що в свою чергу дає можливість підвищити якість прогнозування зносостійкості матеріалів та покриттів при різних умовах експлуатації елементів конструкцій.

Крім зазначеного, в роботі проведена порівняльна оцінка достовірності запропонованого способу з відомими програмами обробки експериментальних даних із застосуванням системи MathCAD [23, 24].

Для перевірки способу були проведені експериментальні випробування ряду матеріалів на абразивну зносостійкість на машині тертя Брінеля (ГОСТ 23.208-79).

Для інженерної практики необхідно прогнозувати величину зносу як при дії абразивних частинок різної твердості і розмірів, так і при зміні швидкості їх переміщення по поверхні матеріалів, а також від протяжності шляху тертя та зусиль взаємодії частинок з поверхнею матеріалів.

На рис. 1 показані експериментальні залежності вагового зносу від протяжності шляху тертя для двох матеріалів, які відрізняються своєю твердістю. Наведені експериментальні залежності отримані за умов стандартного навантаження ($P_0 = 44,1\text{Н}$) згідно

з ГОСТ 23.208-79 і розмірів абразивних частинок $0,2 - 0,25\text{ мм}$ із SiO_2 .

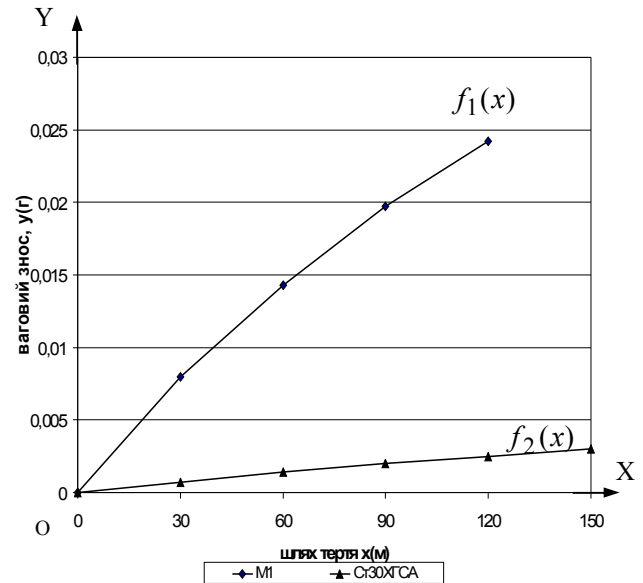


Рис. 1. Експериментальні залежності вагового абразивного зносу поверхонь матеріалів від величини шляху тертя для слідуєчих матеріалів: міді М1 ($f_1(x)$); Ст. 30 ХГСА нормалізованої ($f_2(x)$)

Співвідношення між величиною вагового абразивного зносу поверхонь матеріалів підтверджується відповідними значеннями твердості даних матеріалів, наведених у табл. 1 (виміри твердості проводилися на приладі ТШ-2М).

Таблиця 1

Значення твердості матеріалів

Марка матеріалу	Стан	НВ(d) мм	НВ _{5/750}
Мідь М1М	—	3,95	78,3
30 ХГСА	Нормалізована	2,05	217

Апроксимація функцій експериментальних залежностей, показаних на рис. 1, алгебраїчними поліномами в класичній формі методом найменших квадратів потребує значного об'єму обчислень і часу [22].

Обчислення значно спрощуються, якщо апроксимуюча функція буде знайдена за допомогою програми системи "MathCAD" [23, 24].

Виконаємо обчислення для мідних зразків при даних (1) з точністю 10^{-15} :

$$data = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 30 & 0.0080 \\ 60 & 0.0143 \\ 90 & 0.0197 \\ 120 & 0.0242 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Компоненти апроксимуючої функції задає матриця $F(x)$:

$$F(x) = \begin{pmatrix} 1 \\ x \\ x^2 \\ x^3 \end{pmatrix};$$

$$S = \text{linfit}(X, Y, F),$$

а коефіцієнти – матриця S :

$$S = \begin{pmatrix} 0.000011428571441 \\ 0.000294682539683 \\ -0.000001071428571 \\ 0.000000002469136 \end{pmatrix},$$

де апроксимуюча функція має наступний вигляд:

$$f_{11}(x) = 0,000011428571441 + \\ + 0,000294682539683x - \\ - 0,000001071428571x^2 + \\ + 0,000000002469136x^3. \quad (2)$$

При цьому середньоквадратична похибка апроксимації визначалась за формулою

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2}{n}}, \quad (3)$$

де $\varepsilon = y_{\text{експер.}} - y_{\text{апроксим.}}$ і становить

$$\delta_{11} \approx 0,000042761793695.$$

Для підвищення точності апроксимації розглянемо інші складові компоненти апроксимуючої функції.

При тих самих даних (1) нехай

$$F(x) = \begin{pmatrix} 1 \\ x \\ x^2 \\ \ln(x+1) \end{pmatrix},$$

тоді коефіцієнти шуканої функції $f_{12}(x)$ покаже матриця S :

$$S = \begin{pmatrix} 0,000000154545232 \\ 0,000245431417031 \\ -0,00000046679116 \\ 0,000306985138846 \end{pmatrix},$$

а апроксимуюча функція має наступний вигляд:

$$f_{12}(x) = 0,000000154545232 + \\ + 0,000245431417031 \cdot x - \\ - 0,00000046679116 \cdot x^2 + \\ + 0,000306985138846 \cdot \ln(x+1). \quad (4)$$

При цьому згідно формули (3) величина середньоквадратичної похибки становить

$$\delta_{12} = 0,000005,$$

яка на порядок менша за δ_{11} . Цю точність можна збільшити.

Для знаходження оптимальних компонент апроксимуючої функції розглянемо удосконалений нами спосіб, який значно підвищує точність апроксимації в залежності від вибору виду емпіричної залежності. Для цього розглянемо особливий клас монотонних двопараметричних функцій $f(x, a, b)$ [25].

Нехай ці функції будуть визначені одним із наступних рівнянь:

$$y = (ax^p + b)^{\frac{1}{q}}, \text{ якщо } p \neq 0, q \neq 0; \quad (5)$$

$$y = (a \ln x + b)^{\frac{1}{q}}, \text{ якщо } q \neq 0; \quad (6)$$

$$y = e^{ax^p} + b, \text{ якщо } p \neq 0; \quad (7)$$

$$y = bx^q. \quad (8)$$

Як видно, функції (5 – 8) об'єднані за формою в один клас.

Узагальнені середні від додатних величин z_1, z_2, \dots, z_n визначимо, як

$$M_z(t) = \left(\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n z_k^t \right)^{\frac{1}{t}}. \quad (9)$$

Для визначення середнього гармонічного формула має вигляд

$$H_z = \left(\frac{1}{n} \left(\frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2} + \dots + \frac{1}{z_n} \right) \right)^{-1} = M_z(-1), \quad (10)$$

а для середнього геометричного

$$G_z = (z_1 \cdot z_2 \cdot \dots \cdot z_n)^{\frac{1}{n}} = \lim_{t \rightarrow 0} M_z(t) = M_z(0). \quad (11)$$

Відповідно формули для обчислення значень середнього арифметичного мають вигляд

$$A_z = \frac{z_1 + z_2 + \dots + z_n}{n} = M_z(1), \quad (12)$$

а для обчислення середнього квадратичного

$$S_z = \sqrt{\frac{z_1^2 + z_2^2 + \dots + z_n^2}{n}} = M_z(2). \quad (13)$$

Розглянемо наступні класи середніх величин:

$$K_z = \sqrt[3]{\frac{z_1^3 + z_2^3 + \dots + z_n^3}{n}} = M_z(3) \quad (14)$$

При $t = -2$ маємо

$$F_z = \left(\frac{1}{n} \left(\frac{1}{z_1^2} + \frac{1}{z_2^2} + \dots + \frac{1}{z_n^2} \right) \right)^{-\frac{1}{2}} = M_z(-2). \quad (15)$$

При цьому має місце співвідношення між вище визначеними середніми додатних величин за формулами (10 – 13):

$$\min z \leq F_z \leq H_z \leq G_z \leq A_z \leq S_z \leq K_z \leq \max z.$$

Визначимо основну властивість класу функцій (5 – 8), яка полягає у рівності значення функції від узагальненого середнього від p узагальненому середньому від q :

$$f(M_x(p)) = M_y(q).$$

Для функції $y = bx^q$ p і q візьмемо рівними нулю та отримаємо $f(M_x(0)) = M_y(0)$.

Аналогічно можна показати, що $f(G_x) = G_y$.

Розглянемо даний клас функцій зі змінними p і q , які будуть приймати значення $-2; -1; 0; 1; 2; 3$. Далі визначимо 25 різних функцій, які часто використовуються у інженерній практиці при моделюванні різних процесів. Види запропонованих нами функцій і функцій, взятих з [25], зведені в табл. 2.

Для визначення оптимального виду апроксимуючої залежності (формули) треба відмітити параметри p і q на рис. 2 і відповідні середні

$$F_x, H_x, G_x, A_x, S_x, K_x, F_y, H_y, G_y, A_y, S_y, K_y.$$

Після цього на відповідних координатних осях треба провести через них прямі лінії, паралельні осям. Ці лінії перетнуться в тридцяти шести точках, кожна з яких відповідає одній із функцій, наведених в табл. 2.

Таблиця 2

Види функцій

№	$y = f(x, a, b)$	p	q	$M_x(p)$	$M_y(q)$
1	$ax + b$	1	1	A_x	A_y
2	ba^x	1	0	A_x	G_y
3	$1/(ax + b)$	1	-1	A_x	H_y
4	$A \ln x + b$	0	1	G_x	A_y
5	$b + a/x$	-1	1	H_x	A_y
6	bx^a	0	0	G_x	G_y
7	$x/(bx + a)$	-1	-1	H_x	H_y
8	$\frac{1}{ba^x}$	-1	0	H_x	G_y
9	$1/(a \ln x + b)$	0	-1	G_x	H_y
10	$ax^2 + b$	2	1	S_x	A_y
11	ba^{x^2}	2	0	S_x	G_y
12	$1/(ax^2 + b)$	2	-1	S_x	H_y
13	$\sqrt{ax^2 + b}$	2	2	S_x	S_y
14	$\sqrt{ax + b}$	1	2	A_x	S_y
15	$\sqrt{a \ln x + b}$	0	2	G_x	S_y
16	$\sqrt{a/x + b}$	-1	2	H_x	S_y
17	e^{ax+b}	1	0	A_x	G_y
18	e^{ax^2+b}	2	0	S_x	G_y
19	$\sqrt[3]{ax^2 + b}$	2	3	S_x	K_y
20	$\sqrt[3]{ax + b}$	1	3	A_x	K_y
21	$\sqrt[3]{a \ln x + b}$	0	3	G_x	K_y
22	$\sqrt[3]{a/x + b}$	-1	3	H_x	K_y
23	$ax^3 + b$	3	1	K_x	A_y
24	e^{ax^3+b}	3	0	K_x	G_y
25	$\sqrt[3]{\frac{a}{x^2} + b}$	-2	3	F_x	K_y

За наведеним алгоритмом визначимо оптимальні компоненти для експериментальної залежності абразивного зносу поверхні мідного зразка $f_1(x)$ на рис. 2.

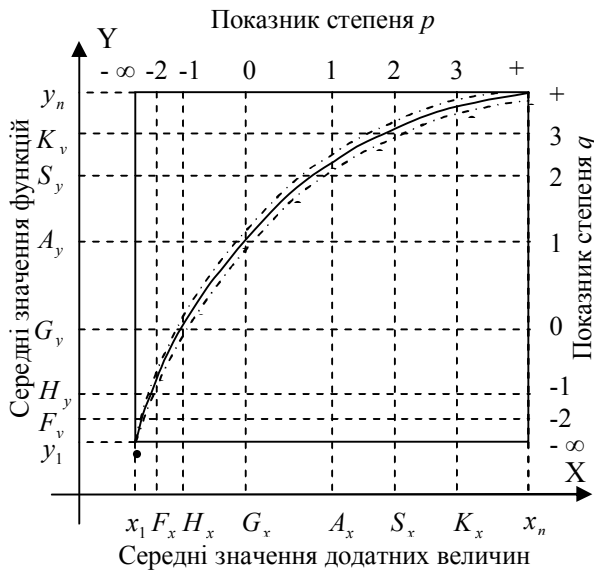


Рис. 2. Алгоритм знаходження оптимального виду апроксимуючої функції

Знайдемо $A_x, A_y, G_x, G_y, S_x, S_y$ згідно (9 – 13).

Нанесемо отримані значення на вісі OX і OY на рис. 3. Проведемо графік експериментальної залежності $f_1(x)$.

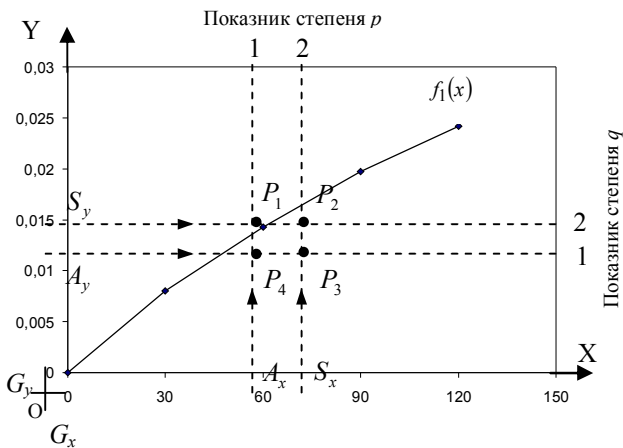


Рис. 3. Метод знаходження оптимальних компонент апроксимуючої функції

Знаходимо точки перетину прямих $y = S_y, y = A_y, x = S_x, x = A_x$. Серед чотирьох точок перетину цих прямих P_1, P_2, P_3, P_4 шукаємо точку найближчу до графіка експериментальної за-

лежності, яка розташована на перетині прямих $y = S_y, y = A_y, x = S_x, x = A_x$, тобто точку P_1 .

Потім за табл. 2 визначаємо оптимальну компоненту $\sqrt{ax+b}$ для апроксимуючої функції, де $p = 1$, а $q = 2$.

Для визначення параметра b скористуємося тим фактом, що графік проходить через точку $(0; 0)$, тобто $b = 0$.

Коефіцієнт a буде знайдений за допомогою програми “MathCAD-2001” [24].

При реалізації даного методу знайшли оптимальну компоненту $x^{\frac{1}{2}}$ та x , тобто

$$F(x) = \begin{pmatrix} 1 \\ x \\ x^2 \\ x^{\frac{1}{2}} \\ x^2 \end{pmatrix}, \text{ а } S = \begin{pmatrix} 3.1342585 \times 10^{-7} \\ 0.000229 \\ -4.3865154 \times 10^{-7} \\ 0.0002776 \end{pmatrix},$$

де апроксимуюча функція має вигляд

$$f_{13}(x) = 3.1342585 \times 10^{-7} + 0.000229 \cdot x - 4.3865154 \times 10^{-7} \cdot x^2 + 0.0002776 \cdot x^{\frac{1}{2}}. \quad (16)$$

При цьому середньоквадратична похибка становить $\delta_{13} \approx 0,0000070815$.

При такій апробації компонент і відповідній апроксимації δ_{13} і δ_{12} залишаються одного порядку, в зв'язку з цим, необхідно продовжити підбір інших оптимальних компонент.

Якщо спробувати в складові компоненти шуканої функції ввести функцію, яка не пропонується за розглянутим алгоритмом, то точність апроксимації зменшується. Наприклад, якщо взяти не рекомендовану компоненту $\ln(x+1)$ разом з рекомендованою

$x^{\frac{1}{2}}$, то маємо для міді M1:

$$data = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 30 & 0.0080 \\ 60 & 0.0143 \\ 90 & 0.0197 \\ 120 & 0.0242 \end{pmatrix}.$$

Складові компоненти апроксимуючої функції $f_{14}(x)$ задає матриця $F(x)$, а коефіцієнти цієї функції матриця S :

$$F(x) = \begin{pmatrix} 1 \\ x \\ \frac{1}{x^2} \\ \ln(x+1) \end{pmatrix}; S = \begin{pmatrix} 6.1327244 \times 10^{-7} \\ -0.0000237 \\ 0.0045159 \\ -0.0046713 \end{pmatrix},$$

де апроксимуюча функція має вигляд

$$f_{14}(x) = 6.1327244 \times 10^{-7} - 0.0000237 \cdot x + 0.0045159 \cdot x^{\frac{1}{2}} - 0.0046713 \cdot \ln(x+1). \quad (17)$$

При застосуванні апроксимуючої функції (17) будемо мати похибку

$$\delta_{14} \approx 0.000039495328838.$$

Порівнюючи значення середньоквадратичної похибки δ_{14} з δ_{13} видно, що точність апроксимації за функцією (17) на порядок менша, ніж за функцією (16).

Для значного підвищення точності апроксимації необхідно включати у склад апроксимуючої функції тільки ті компоненти, які можна знайти за новим запропонованим алгоритмом, наведеним на рис. 3.

Визначені оптимальні компоненти за алгоритмом, наведеним на рис. 3, представлені матрицею

$$f(x) = \begin{pmatrix} 1 \\ x^{\frac{1}{2}} \\ \frac{2}{x^3} \\ x \\ x^2 \end{pmatrix}, \quad (18)$$

а коефіцієнти апроксимуючої функції показує матриця

$$S = \begin{pmatrix} 0,001075360784466 \\ 0,000304601392055 \\ -0,000678576681345 \\ -0,000000529388364 \end{pmatrix}. \quad (19)$$

Тоді оптимальна апроксимуюча функція для процесу абразивного зносу мідних зразків буде мати наступний вигляд:

$$f_{15}(x) = 0,001075360784466 \cdot x^{\frac{1}{2}} + 0,000304601392055 \cdot x - 0,000678576681345 \cdot x^{\frac{2}{3}} - 0,000000529388364 \cdot x^2. \quad (20)$$

Аналіз похибки отриманої оптимальної апроксимації

$$\delta_{15} \approx 0,000000000002873$$

показує, що запропонований метод в цьому випадку в мільйон разів перевищує точність апроксимації за програмою системи "MathCAD-2001" алгебраїчним поліномом.

При апроксимації залежності абразивного зносу $f_2(x)$ для зразків із сталі 30ХГСА через алгебраїчний поліном в програмі системи "MathCAD-2001" за експериментальними даними, наведеними на рис. 1, маємо матрицю

$$data = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 30 & 0,0075 \\ 60 & 0,0014 \\ 90 & 0,0020 \\ 120 & 0,0026 \\ 150 & 0,0030 \end{pmatrix}. \quad (21)$$

Компоненти апроксимуючої функції задає матриця

$$F(x) = \begin{pmatrix} 1 \\ x \\ x^2 \\ x^3 \\ x^4 \end{pmatrix}. \quad (22)$$

Коефіцієнти шуканої функції показує матриця S , яка представлена у вигляді

$$S = \begin{pmatrix} -0,000000992063255 \\ 0,00002942680776 \\ -0,000000189429018 \\ 0,000000001808985 \\ -0,00000000000643 \end{pmatrix}. \quad (23)$$

Апроксимуючий поліном матиме вигляд

$$\begin{aligned}
 f_{21}(x) = & -0,000000992063255 + \\
 & + 0,00002942680776 \cdot x - \\
 & - 0,000000189429012 \cdot x^2 + \\
 & + 0,000000001808985 \cdot x^3 - \\
 & - 0,0000000000643 \cdot x^4.
 \end{aligned} \quad (24)$$

При апроксимації (24) отримаємо похибку

$$\delta_{21} \approx 0,000006429385663.$$

При використанні нового алгоритму пошуку компонент для оптимальної апроксимуючої функції залежності абразивного зносу для сталі 30ХГСА від шляху тертя, за запропонованим алгоритмом (рис. 3) маємо більш оптимальні компоненти, в порівнянні з класичним поліномом (24), отриманим із застосуванням системи “MathCAD-2001” і записаним матрицею

$$F(x) = \begin{pmatrix} \frac{1}{x^2} \\ x^2 \\ x^3 \\ x \\ x^2 \\ x^3 \end{pmatrix}, \quad (25)$$

а коефіцієнти оптимальної функції можна знайти через матрицю S , яка представлена у вигляді

$$S = \begin{pmatrix} -0,004247324827642 \\ 0,003865537954231 \\ -0,000476207136139 \\ 0,000001166442304 \\ -0,000000002643942 \end{pmatrix}. \quad (26)$$

Тоді оптимальна апроксимуюча функція прийме наступний вид:

$$\begin{aligned}
 f_{22}(x) = & -0,004247324827642 \cdot x^{\frac{1}{2}} + \\
 & + 0,003865537954231 \cdot x^{\frac{2}{3}} - \\
 & - 0,000476207136139 \cdot x + \\
 & + 0,000001166442304 \cdot x^2 - \\
 & - 0,000000002643942 \cdot x^3.
 \end{aligned} \quad (27)$$

При такій апроксимації отримаємо похибку

$$\delta_{22} \approx 0,000000000585302,$$

що на декілька порядків менша за δ_{21} .

Висновки

В даній роботі розглянуто нетрадиційний вдосконалений спосіб, який полегшує процес визначення виду оптимальної апроксимуючої функції експериментальних залежностей процесів абразивного зношування з нежорстко закріпленими абразивними частинками.

На основі отриманих оптимальних видів апроксимуючих функцій експериментальних залежностей показано значне збільшення точності моделювання процесу абразивного зношування, що дає можливість на ранніх стадіях обґрунтовано і найбільш точно прогнозувати термін зношування деталей або його покриттів, а також призначати періоди проведення регламентно-ремонтних робіт.

В результаті порівняння точностей виконаних апроксимацій в даній роботі та за відомими програмами системи MathCAD [24] можна констатувати, що розглянутий нами удосконалений спосіб апроксимування експериментальних залежностей абразивного зношування поверхонь деталей та їх покриттів з нежорстко закріпленими абразивними частинками значно підвищує точність, а в окремих випадках на 4–6 порядків.

Література

1. Газотермические покрытия из порошковых материалов: Справ. / Ю.С. Борисов, Ю.А. Харламов, С.Л. Сидоренко, Е.Н. Арнавская. – К.: Наук.думка, 1978. – 544 с.
2. Хасуй А.Д., Моригаки О. Наплавка и напыление / Пер. с япон. – М.: Машиностроение, 1982. – 212 с.
3. Щепетов В.В., Лабунец В.Ф. Трибостойкие детонационные боросодержащие покрытия // Технология и организация производства. – 1991. – №4. – С. 43–45.
4. Кацуца А.А., Семенов А.П. Высокотемпературное трение окисных керамик на основе корунда. – М.: Наука, 1974. – 120 с.

5. Борисова А.Л. Совместимость тугоплавких соединений с металлами и графитом: Справ. – К.: Наук. думка, 1985. – 247 с.
6. Кутьков А.А. Износостойкие антифрикционные покрытия. – М.: Машиностроение, 1976. – 152 с.
7. Федоренко И.М., Пугина Л.И. Композиционные спеченные антифрикционные материалы. – Мн.: Навука і тэхніка, 1980. – 403 с.
8. Витязь П.А., Ивашко В.С. и др. Теория и практика газопламенного напыления. – Мн.: Наука и техника, 1993. – 388 с.
9. Пат. 2000021109 Україна, МПК C23C14/14, B22F9/00. Порошок для газополуменового напыления: Пат. 2000021109 Україна, МПК C23C14/14, B22F9/00 / М.М. Мусієнко, В.О. Комаров, В.І. Колесников, О.І. Щепотьєв (Україна); Київський інститут ВПС. – Заявл. 25.02.2000.
10. Малышкин В.В., Ходак Н.А., Дмытренко В.Н., Лубяный В.В. Повышение сроков эксплуатации деталей авиационной техники путем восстановления размеров их геометрических форм и упрочнения газотермическим напылением жаростойкими покрытиями // Труды IV Международной НТК АВИА-2002. – К.: НАУ, 23-25 апреля, 2002. – Т. 3, секция 31. – С. 31.101 – 31.103.
11. Лабунець В.Ф., Ходак М.О., Марчук В.Е., Братиця Л.С. Застосування детонаційних покриттів для зміцнення і відновлення тертьових деталей авіаційної техніки // Вісник НАУ. – 2002. – № 1. – С. 183 – 187.
12. Костецкий Б.И., Носовский И.Г., Караулов А.К. Поверхностная прочность материалов при трении. – К.: Техника, 1986. – 296 с.
13. Хрущев М.М., Бабичев М.А. Абразивное изнашивание. – М.: Наука, 1970. – 251 с.
14. Кашеев В.Н. Сопротивление металлической поверхности абразивному разрушению // Долговечность трущихся деталей машин. – М.: Машиностроение, 1990. – Вып. 4. – С. 279 – 295.
15. Добровольский А.Г., Кошеленко Г.И. Абразивная износостойкость материалов. – К.: Техника, 1989. – 128 с.
16. Костецкий Б.И. Трение, смазка и износ в машинах. – К.: Техника, 1970. – 390 с.
17. Крагельский И.Г. Трение и износ. – М.: Машгиз, 1962. – 383 с; 1968. – 480 с.
18. Зорин В.А. Основы долговечности строительных и дорожных машин. – М.: Машиностроение, 1986. – 248 с.
19. Тененбаум М.М. Износостойкость конструкционных материалов и деталей машин при абразивном изнашивании. – М.: Машиностроение, 1966. – 331 с.
20. Тененбаум М.М., Бернштейн Д.Б. Моделирование процесса абразивного изнашивания. Моделирование трения и износа // Материалы I межотраслевого научного семинара по моделированию трения и износа. – М.: НИИмаш. – 1967. – С. 81 – 92.
21. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбаров В.С. Основы расчетов на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977. – С. 319 – 326.
22. Фильчаков П.Ф. Численные графические методы прикладной математики. – К.: Наук. думка, 1970. – 720 с.
23. Дьяконов В.П. Справочник по MathCAD PLUS 6.0 PRO. – М.: СКПресс, 1997. – 336 с.
24. Дьяконов В.П. MathCAD-2001: специальный справочник. – С.-Пб.: Питер, 2002. – 832 с.
25. Poljaev V. Choice of optimum form of the relation between two variables // Proceeding of 10th ICGG. – Kyiv, Ukraine. – 28 July – 2 August 2002. – P. 226 – 227.

Надійшла до редакції 2.10.2004

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.П. Юрчук, Національний технічний університет України „КПІ”, Київ.