

УДК 519.876.5:620.178.16(045)

**М.О. ХОДАК, О.А. ВИШНЕВСЬКИЙ***Київський національний авіаційний університет, Україна***ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ВИПРОБУВАННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ  
ХАРАКТЕРИСТИК АБРАЗИВНОЇ ЗНОСОСТОЙКОСТІ  
МАТЕРІАЛІВ АВІАЦІЙНИХ ГТД**

Розглядаються результати експериментальних випробувань на зносостійкість групи матеріалів авіаційних ГТД із постійним навантаженням при не жорстко закріплених абразивних частинках.

Проводиться аналіз апроксимуючих функцій експериментальних залежностей на основі програм MathCAD та їх застосування до прогнозування характерних параметрів абразивної зносостійкості і до вибору матеріалів в залежності від умов їх експлуатації.

**абразивна зносостійкість матеріалів і покриттів, випробування матеріалів на абразивну зносостійкість, апроксимація експериментальних залежностей, прогнозування характерних параметрів абразивної зносостійкості**

**Вступ**

**Загальна постановка проблеми і її зв'язок з науково-практичними задачами.** Як відомо, сучасні ринкові відносини пред'являють підвищені вимоги до надійності деталей авіаційних ГТД, жорсткі вимоги до підтримки потрібних технічних параметрів в процесі експлуатації, економічності незалежно від кліматичних умов роботи, можливостей швидкого запуску виробу у виробництво.

Для забезпечення надійної працездатності високоефективних двигунів нових поколінь необхідно розробляти нові жаростійкі і жароміцні матеріали, а також удосконалювати нові методи захисту деталей всього газоповітряного тракту ГТД за допомогою стійких покриттів за своїми характеристиками до дії як високих навантажень, температур, так і до дії поверхневої ерозії компресорних лопаток. Ерозія викликається пилом, піском, водою та іншими включеннями, що містяться в повітряному потоці. Особливо цей вплив поширюється на авіаційні ГТД, що встановлюються на гелікоптерах, які в більшій мірі експлуатуються на ґрунтових аеродромах.

Поверхнева ерозія компресорних лопаток приводить до зменшення товщини профільної частини лопаток, особливо тих, які виготовлені із алюмініє-

вих сплавів, до зниження їх міцності, пониження загального каскадного коефіцієнта корисної дії компресора та значного пониження запасу стійкості компресора ГТД і економічності двигуна взагалі

Як відомо, у зв'язку з цим в умовах експлуатації проводяться огляди лопаток інженерно-технічним складом за допомогою цистоскопа, який вводиться в спеціальні люки, виконані на корпусах компресорів. При цьому ротор обертають від руки, а тому перед об'єктивом цистоскопа пройдуть всі робочі лопатки. При встановленні перевищення допустимих розмірів подряпин, ерозії, встановленими технічними нормами викликає за собою на дострокову відправку двигуна для проведення повного розбирання і ремонтування. Одночасна ерозія і корозія на границях матеріалу приводить до появи розтріскувань на лопатках. Особливо часто тріщини з'являються на тонких вихідних кромках лопаток. Поява таких тріщин небезпечна тим, що при вібрації лопатки дають початок розвитку втомлювальних тріщин матеріалу. Для підвищення стійкості матеріалів їх властивості підвищують термообробкою та за рахунок різних видів покриттів.

Крім цього абразивне зношування газоповітряного тракту, особливо на гелікоптерних ГТД змінює геометричні характеристики поперечних перерізів

лопаток, і це в свою чергу приводить до змін силових факторів, що діють на лопатки компресорів і турбін ГТД, які обумовлені розтягненням, згинанням і крученням лопаток в робочому стані. Визначення напружень, що діють на лопатку при всіх цих видах навантажень, як відомо, пов'язано з обчисленням величин силових параметрів і геометричних характеристик поперечних перерізів лопаток, які поступово змінюються в процесі експлуатації від дії абразивного зношування.

Таким чином, вплив зношування на зміну геометричних параметрів проточної частини може порушити існуючу витрату газу, що може привести до серйозних проблем, пов'язаних із ефективністю ГТД і вплинути на стійкість газового потоку. Крім цього зношування впливає на зміну величин напружень розтягнення від дії на лопатку відцентрових сил і на площу поперечних перерізів лопаток. Зміна величин моментів згинання впливає на зміну напружень згинання, що діють на лопатку в характерних перерізах. Змінюються і такі важливі геометричні характеристики, як момент інерції перерізів, нейтральна вісь перерізу, координати точок контуру профілю по відношенню до головних центральних осей інерції або по відношенню до нейтральної осі перерізу.

Крім зазначеного, дослідження мікроструктури сплавів і захисних покриттів виконаних на основі металографічного, електронно-мікроскопічного, а також мікро-рентгеноспектрального аналізу хімічного складу зроблено висновок, що на поверхнях лопаток мається дефектний шар, в структурі спостерігається розвиток експлуатаційної мікропористості, маються порушення структури сплава-основи.

В зв'язку з цим спеціалістами і дослідниками розробляються нові види технологічних процесів зняття дефектних шарів та відновлення структури сплаву, з одночасним нанесенням нових захисних шарів на зовнішніх і внутрішніх поверхнях лопаток із застосуванням, наприклад, іонно-плазмових покриттів та ін.

Широкого поширення набувають нові види багатошарових захисних покриттів [1].

Для проведення порівняльного аналізу необхідно мати достовірні дані з апроксимації залежностей абразивного зношування поверхонь матеріалів та їх покриттів в залежності від шляху тертьової взаємодії абразивних частинок з поверхнями деталей газоповітряного тракту ГТД гелікоптера, величини абразивних частинок та величини сили їх взаємодії з поверхнями деталей.

Підвищення точності апроксимації експериментальних залежностей є невід'ємною складовою процесу обробки результатів наукових досліджень. Більш точна апроксимуюча функція дозволяє передбачити результати абразивного зносу поверхонь матеріалів з вищою вірогідністю. Абразивний знос елементів авіаційних конструкцій, деталей вузлів тертя автомобілів, деталей сільськогосподарських, будівельних, гірських і інших машин відіграє важливу роль у визначенні працездатності цих машин і механізмів. Для забезпечення більш високої зносостійкості елементів конструкцій і їхніх конструкційних матеріалів, що працюють в умовах абразивного зношування, на їхні робочі поверхні наносять покриття різними способами [1 – 5], що приводить до істотних змін механізмів і кінетики процесів руйнування поверхневих шарів деталей. У зв'язку з цим виникає необхідність розробки прискорених методик випробування матеріалів на абразивну зносостійкість 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, а також всебічного дослідження на основі використання математичних методів моделювання процесів абразивного зношування поверхонь деталей, що дає можливість науково обґрунтовано здійснити правильний вибір матеріалу та прогнозувати зносостійкість.

**Огляд публікацій і аналіз невирішених проблем.** Види і механізми абразивного зношування

конструкційних матеріалів описані в роботах [5 – 18].

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 залізобіаглицевих сплавах. Питання дослідження властивостей покриттів, нанесених на різні сталі, на сьогодні ще недостатньо широко вивчені.

Безпосередньо питаннями моделювання й апроксимацій експериментальних залежностей процесів абразивного зносу різних матеріалів займалися найбільш відомі провідні спеціалісти в області тертя і зношування [9, 12, 13] та інші.

Відомо, що задачі на встановлення зв'язку між ваговим зносом і максимальною глибиною лунки або зносом і площею поверхні лунки не знаходили рішення дослідниками при випробуваннях матеріалів на абразивну зношувальність з нежорстко закріпленими частинками. У роботі [14] зроблена спроба знайти розв'язок цієї задачі. Однак отриманий результат виявився громіздким і незручним у використанні.

У роботі [15] отримана модель абразивного зносу, що не враховує залежності вагового зносу від лінійного. У ній вказані методи побудови універсальної моделі для всіх матеріалів, тобто відсутній універсальний узагальнений принцип побудови моделі абразивного зношування.

У деяких існуючих моделях [16, 17] основу складає ймовірно-статистичний підхід, але недоліком зазначених моделей є громіздкість і незручність у використанні, так як вони включають обмежене число характерних параметрів, які впливають на зносостійкість. У зв'язку з цим виникає необхідність створення універсальної і узагальноної моделі, яка повинна враховувати вплив багатьох характерних

факторів на процес зношування [18]. Зрозуміло, що для моделювання процесів абразивного зносу, проведення порівняльного аналізу та оцінки матеріалів і покриттів на абразивну зносостійкість необхідно мати точні види апроксимуючих функцій експериментальних залежностей, за допомогою яких можна підтвердити або заперечити вірність розробленого виду моделювання.

### **Мета статті та результати досліджень**

В даній роботі пропонується підхід, який достатньо швидко забезпечує проведення експериментальних випробувань матеріалів та різних видів покриттів на поверхнях деталей авіаційних ГТД на абразивну зносостійкість з нежорстко закріпленими частинками, що в свою чергу сприяє конструктору проводити аналіз властивостей і характеристик по вибору матеріалів, досліджувати якість застосування різних технологій покриттів поверхонь деталей, 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, тобто прогнозувати зносостійкість матеріалів при різних умовах експлуатації елементів конструкцій з абразивним зношуванням ще на ранніх стадіях руйнування.

При цьому проведення експериментальних випробувань матеріалів на абразивну зносостійкість базується на застосуванні машини тертя Бринеля (ГОСТ 23.208-79 «Метод испытання материалов на износостойкость при трении о не жестко закрепленные абразивные частицы»).

Проведену модернізацію її обладнання і засобів для розширення можливостей дослідження процесів абразивного зношування матеріалів та їх покриттів показано в роботі [19].

У процесі експлуатації зносостійких покриттів для деталей різного функціонального призначення важливе значення має передбачення величини зносу

при взаємодії зразка з не жорстко закріпленими абразивними частинками різної твердості і величини. При наявності моделі зносу об не жорстко закріплені абразивні частки можна передбачити величину зносу по масі в залежності від параметрів, які впливають на зносостійкість лінійного зносу, площі поверхні стикання гумового ролика зі зразком, навантаження  $P_0$ , твердості, пластичності і температури, електромагнітної взаємодії молекул та атомів. На рис. 1 показана схема установки експериментального дослідження випробувань матеріалів на абразивний знос при не жорстко закріплених абразивних частинках на машині тертя Бринеля.

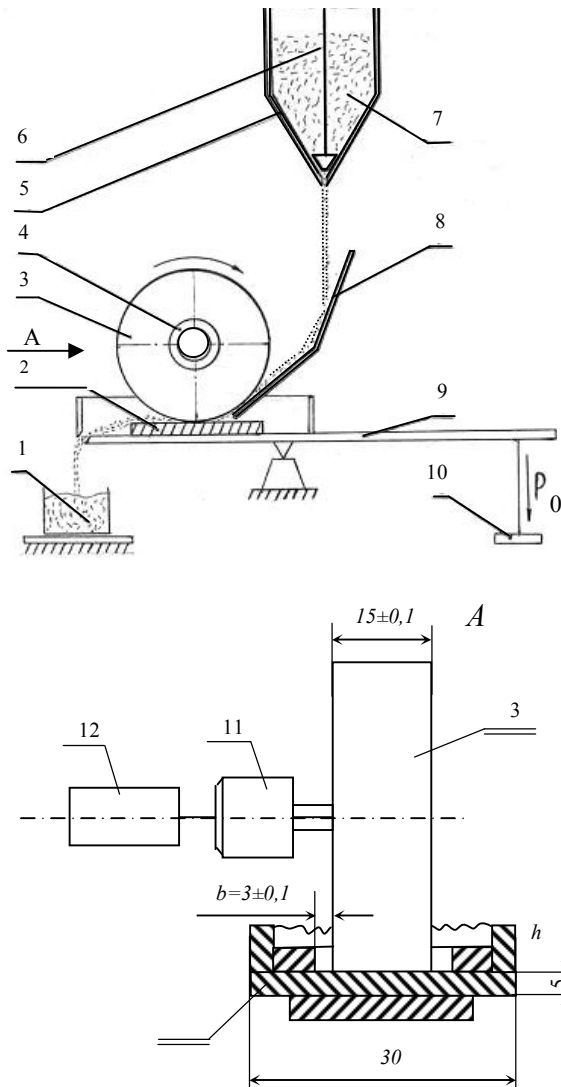


Рис. 1. Схема експериментальної установки Бринеля

На рисунку такі позначки: 1 – бункер для збору відпрацьованого абразиву; 2 – зразок досліджуваного

матеріалу; 3 – гумовий ролик; 4 – втулка для ролика; 5 – бункер для вільного абразиву; 6 – важіль для регулювання швидкості подання абразиву; 7 – вільний абразив; 8 – лоток для подачі абразиву; 9 – важіль для регулювання зусилля притискування ролика до поверхні зразка; 10 – навантаження  $P_0$ ; 11 – привід, який забезпечує обертання навколо горизонтальної вісі гумового ролика 3; 12 – пристрій для контролю сумарної кількості обертів ролика в процесі випробувань який виконано у вигляді шестирозрядного механічного рахівника з кулачковим механізмом.

Для проведення експериментальних досліджень використовували квадратні зразки з розмірами  $30 \times 30$  мм і товщиною 5 мм. Результати експериментальних випробувань поширеної групи матеріалів авіаційних гелікоптерних ГТД показано на рис. 2, 3. На рис. 2 показані експериментальні залежності вагового зносу від протяжності шляху тертя для двох матеріалів, які відрізняються своєю твердістю. Наведені експериментальні залежності отримані при умовах стандартного навантаження ( $P_0 = 44,1$  Н) згідно з ГОСТ 23.208-79 з розмірами абразивних частинок 160 – 200 мкм.

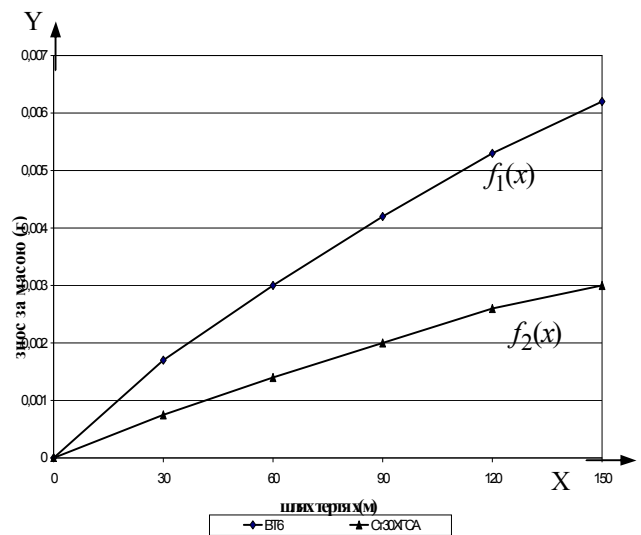


Рис. 2. Експериментальні залежності абразивного зносу за масою поверхонь матеріалів від величини шляху тертя для наступних матеріалів:

$f_1(x)$  – для титанового сплаву ВТ6;

$f_2(x)$  – для Ст. 30 ХГСА нормалізованої

Співвідношення між величиною вагового абразивного зносу поверхонь матеріалів підтверджується відповідними значеннями твердості даних матеріалів, наведених у табл. 1.

Таблиця 1

Виміри твердості проводилися на приладі ТШ-2М

Марка матеріалу	Стан	НВ(d), мм	НВ <sub>5/750</sub>
ВТ6	Загартований	1,77	287
30 ХГСА	Нормалізована	2,05	217

Розглянемо один із способів визначення видів апроксимуючих функцій експериментальних залежностей показаних на рис. 2.

Як відомо, застосування методу найменших квадратів для апроксимації показаних експериментальних залежностей на рис. 1 алгебраїчними поліномами базується на знаходженні коефіцієнтів полінома  $A_0, A_1, A_2, \dots$  [20, 21]:

$$Y = A_0 + A_1x + A_2x^2 + \dots + A_mx^m. \quad (1)$$

Коефіцієнти  $A_0, A_1, A_2, \dots, A_m$  визначають положення апроксимуючої кривої, при якому крива (1) найближче проходить від усіх  $n$  заданих точок  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ , отриманих експериментально. Значення коефіцієнтів  $A_0, A_1, A_2, \dots, A_m$  можна знайти [20, 21], розв'язуючи лінійну систему рівнянь:

$$\begin{cases} nA_0 + [x]A_1 + [x^2]A_2 + \dots + [x^m]A_m = [y]; \\ [x]A_0 + [x^2]A_1 + [x^3]A_2 + \dots + [x^{m+1}]A_m = [xy]; \\ [x^2]A_0 + [x^3]A_1 + [x^4]A_2 + \dots + [x^{m+2}]A_m = [x^2y]; \\ \dots \\ [x^m]A_0 + [x^{m+1}]A_1 + [x^{m+2}]A_2 + \dots + [x^{2m}]A_m = [x^m y], \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} [x] &= x_1 + x_2 + \dots + x_n; \\ [x^m] &= x_1^m + x_2^m + \dots + x_n^m; \\ [x^m y] &= x_1^m y + x_2^m y + \dots + x_n^m y. \end{aligned} \quad (3)$$

За допомогою методу скінчених різниць [20] визначаємо степінь полінома  $m = 5$ , який найкращим чином апроксимує результати досліджень зношування робочих поверхонь деталей і графік  $f_1(x)$  на рис. 2. Базові точки графіка  $f_1(x)$ :  $0(0; 0)$ ,  $F_1(30;$

$0,0017)$ ,  $F_2(60; 0,0030)$ ,  $F_3(90; 0,0042)$ ,  $F_4(120; 0,0053)$ ,  $F_5(150; 0,0062)$ .

У зв'язку з тим, що степінь апроксимуючого полінома  $m = 5$ , то рішення системи лінійних рівнянь виду (2) слід виконувати із застосуванням системи MathCAD [22, 23].

Тоді матриці для обчислення коефіцієнтів апроксимуючого полінома (1) для визначення величини абразивного зносу для зразків із сплаву ВТ6 ( $f_1(x)$ ) з врахуванням (4)

$$f(t) = A_0 + A_1 \cdot t + A_2 \cdot t^2 + A_3 \cdot t^3 + A_4 \cdot t^4 + A_5 \cdot t^5, \quad (4)$$

де  $t = 0, 1 \cdot x$  (5)

мають наступний вигляд:

$$A := \begin{pmatrix} 6 & 45 & 495 \\ 45 & 495 & 6075 \\ 495 & 6075 & 79299 \\ 6075 & 79299 & 1075275 \\ 79299 & 1075275 & 14955435 \\ 1075275 & 14955435 & 211756275 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$B := \begin{pmatrix} 0,0204 \\ 0,2175 \\ 2,6217 \\ 33,8391 \\ 6298,6815 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Коефіцієнти  $A_0, A_1, \dots, A_5$  знайдемо з розв'язку матричного рівняння:

$$X = \begin{pmatrix} A_0 \\ A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \\ A_5 \end{pmatrix}; \quad X := A^{-1} \cdot B, \quad (8)$$

де маємо

$$X = \begin{pmatrix} 0,000000000000094 \\ 0,000704999999952 \\ -0,000063425925922 \\ 0,000006790123457 \\ -0,000000360082305 \\ 0,000000006858711 \end{pmatrix}. \quad (9)$$

З урахуванням (4) – (9) апроксимуючий поліном буде мати наступний вигляд:

$$f_1(t) = 9,4 \cdot 10^{-14} + 7,0499999999 \cdot 10^{-4} \cdot t - 6,3425925922 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 + 6,790123457 \cdot 10^{-6} \cdot t^3 - 3,60082305 \cdot 10^{-7} \cdot t^4 + 6,858711 \cdot 10^{-9} \cdot t^5. \quad (10)$$

Для переходу до початкового аргументу  $x$  використаємо заміну (5), тоді

$$f_{11}(x) = 9,4 \cdot 10^{-14} + 7,0499999999 \cdot 10^{-5} \cdot x - 6,3425925922 \cdot 10^{-7} \cdot x^2 + 6,790123457 \cdot 10^{-9} \cdot x^3 - 3,60082305 \cdot 10^{-11} \cdot x^4 + 6,858711 \cdot 10^{-14} \cdot x^5. \quad (11)$$

Знайдемо середньоквадратичну похибку  $\delta_{11}$  апроксимації кривою  $y_1 = f_{11}(x)$  експериментальної залежності  $f_1(x)$  на рис. 1 за формулою:

$$\delta = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{\varepsilon_i^2}{n}}, \quad (12)$$

де  $\varepsilon = y_{\text{експерим.}} - y_{\text{апроксим.}}$

При цьому похибка становить  $\delta_{11} = 1,32979 \cdot 10^{-10}$ .

Практика показує, що апроксимація графіків експериментальних залежностей на рис. 2 алгебраїчними поліномами в класичній формі за методом найменших квадратів потребує значного об'єму і часу.

Обчислення значно спрощуються, якщо апроксимуюча функція буде знайдена за допомогою програми системи «MathCAD-2001».

Розглянемо виконання обчислення для зразків з титанового сплаву ВТ6 при даних (13) з точністю  $10^{-15}$  з використанням системи «MathCAD-2001»:

$$data := \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 30 & 0.0017 \\ 60 & 0.0030 \\ 90 & 0.0042 \\ 120 & 0.0053 \\ 150 & 0.0062 \end{pmatrix}, \quad (13)$$

де компоненти апроксимуючого полінома задає матриця  $F(x)$ :

$$F(x) := \begin{pmatrix} 1 \\ x \\ x^2 \\ x^3 \\ x^4 \end{pmatrix}, \quad S := \text{linfit}(X, Y, F),$$

а коефіцієнти апроксимуючої функції задає матриця  $S$ :

$$S = \begin{pmatrix} 0,000000793651337 \\ 0,000067402998236 \\ -0,000000456790123 \\ 0,00000000010288 \end{pmatrix},$$

звідки апроксимуюча функція має вигляд:

$$f_{12}(x) := 7,93651337 \cdot 10^{-7} \cdot x + 6,7402998236 \cdot 10^{-5} \cdot x - 4,56790123 \cdot 10^{-7} \cdot x^2 + 3,429355 \cdot 10^{-9} \cdot x^3 - 1,0288 \cdot 10^{-11} \cdot x^4. \quad (14)$$

При цьому середньоквадратична похибка апроксимації становить  $\delta_{12} \approx 5,143465098 \cdot 10^{-6}$ .

Порівнюючи похибку  $\delta_{12}$  і попередню  $\delta_{11}$ , можна зробити висновок, що остання має значно меншу точність на декілька порядків.

Апроксимуюча функція (14) має меншу точність тому, що включає неоптимальний набір компонент, які призводять до більшої похибки в порівнянні з класичним методом найменших квадратів.

Для підвищення точності апроксимуючої функції розглянемо інші її складові компоненти.

При тих самих даних (13) нехай

$$F(x) := \begin{pmatrix} x \\ x^2 \\ x^3 \\ x^4 \\ \ln(x+1) \end{pmatrix},$$

тоді

$$S = \begin{pmatrix} 0,00005039093532 \\ -0,000000017119271 \\ 0,000000001298641 \\ -0,00000000000463 \\ 0,000090574805868 \end{pmatrix},$$

а апроксимуюча функція при цьому має вигляд:

$$f_{13}(x) := 5,039093532 \cdot 10^{-5} \cdot x - 1,7119271 \cdot 10^{-8} \cdot x^2 + 1,298641 \cdot 10^{-9} \cdot x^3 - 4,63 \cdot 10^{-13} \cdot x^4 + 9,0574805868 \cdot 10^{-5} \cdot \ln(x+1). \quad (15)$$

Тоді похибка становить  $\delta_{13} = 9,7491672 \cdot 10^{-8}$ . Порівнюючи величини середньоквадратичних похибок бачимо, що  $\delta_{13}$  на два порядки менша від похибки  $\delta_{12}$ , але на два порядки більше ніж похибка  $\delta_{11}$ , яка отримана за класичним поліноміальним методом.

При апроксимації залежності  $f_2(x)$  абразивного зносу сталі 30ХГСА в класичній формі методом найменших квадратів через алгебраїчний поліном з даними (16) маємо

$$data := \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 30 & 0.00075 \\ 60 & 0.0014 \\ 90 & 0.0020 \\ 120 & 0.0026 \\ 150 & 0.0030 \end{pmatrix}; A := \begin{pmatrix} 6 & 45 \\ 45 & 495 \\ 495 & 6075 \\ 6075 & 79299 \\ 79299 & 1075275 \\ 1075275 & 14955435 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 495 & 6075 & 79299 & 1075275 \\ 6075 & 79299 & 1075275 & 14955435 \\ 79299 & 1075275 & 14955435 & 211756275 \\ 1075275 & 14955435 & 211756275 & 3037605219 \\ 14955435 & 211756275 & 3037605219 & 44000657595 \\ 211756275 & 3037605219 & 44000657595 & 642115064475 \end{pmatrix};$$

$$B := \begin{pmatrix} 0,00975 \\ 0,10485 \\ 1,26855 \\ 16,39845 \\ 220,78575 \\ 3054,25485 \end{pmatrix}; X := A^{-1} \cdot B. \quad (16)$$

Коефіцієнти функції подано у матриці  $X$

$$X := \begin{pmatrix} 0,000000000000046 \\ 0,000255555555532 \\ 0,00003240740743 \\ -0,000002391975309 \\ 0,000000257201646 \\ -0,00000000873388 \end{pmatrix}$$

Тоді апроксимуюча функція має вигляд:

$$f_{21}(t) = +0,000000000000046 + \\ + 0,000255555555532 \cdot t + \\ + 0,00003240740743 \cdot t^2 - \\ - 0,000002391975309 \cdot t^3 + \\ + 0,000000257201646 \cdot t^4 - \\ - 0,00000000873388 \cdot t^5. \quad (17)$$

Для переходу до початкової змінної зробимо заміну  $t = 0,1x$  і отримуємо (18)

$$f_{21}(x) = 0,000000000000046 + \\ + 0,000255555555532 \cdot x + \\ + 0,000003240740743 \cdot x^2 - \\ - 0,0000002391975309 \cdot x^3 + \\ + 0,0000000257201646 \cdot x^4 - \\ - 0,00000000873388 \cdot x^5 \quad (18)$$

Похибка апроксимації експериментальної залежності  $f_2(x)$  функцією (18) становить

$$\delta_{21} \approx 6,0689425755234 \cdot 10^{-11}$$

Застосування способу, який дозволяє значно підвищити точність апроксимації представлених експериментальних залежностей на рис. 2 викладено в роботах [24, 25].

На рис. 3 показані експериментальні дані залежності зносу п'яти матеріалів від шляху тертя для здійснення порівняльного аналізу.

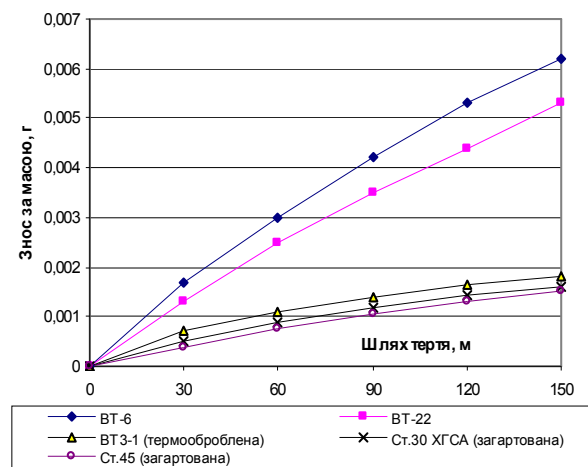


Рис. 3. Порівняльний характер зміни експериментальних залежностей випробувань матеріалів на абразивну зносостійкість при нежорстко закріплених абразивних частинках за масою поверхонь матеріалів від величини шляху тертя

Далі розглянемо методику прогнозування однієї з важливих характеристик матеріалу або покриття, тобто визначення екстремальних швидкостей зношування, яка базується на експериментальних кривих, побудованих в координатах – знос за масою від шляху тертя.

Даний підхід розглянемо на прикладі експериментальної залежності величини зносу за масою боридного покриття В від шляху тертя в абразивному середовищі SiO<sub>2</sub> (пісок) із зернистістю 160 – 200 мкм та із застосуванням програми «MathCAD-2001».

Для цього вводили координати експериментальних точок (19) і компоненти апроксимуючої функції (20):

$$data := \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 10 & 0.0002 \\ 20 & 0.0004 \\ 30 & 0.0006 \\ 40 & 0.00075 \\ 50 & 0.0009 \\ 60 & 0.0010 \\ 70 & 0.00105 \end{pmatrix}; \quad (19)$$

$$F(x) = \begin{pmatrix} 1 \\ x \\ x^2 \\ x^3 \\ x^4 \end{pmatrix}. \quad (20)$$

Перший стовпчик матриці *data* складається із абсцис експериментальних точок, другий із кількісних значень вагового зносу покриття В, що в даній програмі записується у вигляді:

$$X := data^{<0>} ; \quad Y := data^{<1>}. \quad (21)$$

З допомогою програми «List-Squares Curve Fitting» пакета програм «MathCad» [23] отримаємо коефіцієнти апроксимуючої функції:

$$S = \begin{pmatrix} -7,5757577 \cdot 10^{-7} \\ 0,0000201 \\ 3,4090909 \cdot 10^{-8} \\ -1,5151515 \cdot 10^{-9} \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (22)$$

Таким чином аналітична залежність зносу борированого покриття в піску має вигляд:

$$f_B(x) = -7,5757577 \cdot 10^{-7} + 0,0000201 \cdot x + 3,4090909 \cdot 10^{-8} \cdot x^2 - 1,5151515 \cdot 10^{-9} \cdot x^3, \quad (23)$$

де *x* – шлях, м; *f*(*x*) – знос за масою, г.

Графік залежності *f<sub>B</sub>*(*x*) показано на рис. 4.

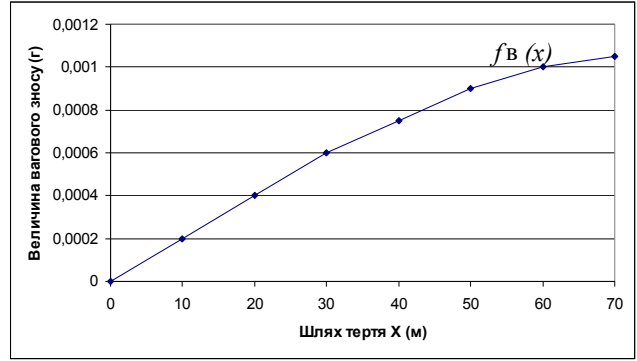


Рис. 4. Залежність величини зношування від шляху тертя боридного покриття в абразивному середовищі SiO<sub>2</sub> (пісок) із зернистістю 160 – 200 мкм

Розглянемо приклад застосування експериментальних залежностей до прогнозування часового моменту найбільшої швидкості зношування [19] і для цього виконаємо дослідження функції *V<sub>L</sub>*(*x*) на екстремум на відрізьку [0;100].

$$V_1(x) := f_1(x) = 0,0000201 + 6,8181818 \cdot 10^{-8} \cdot x - 4,5454545 \cdot 10^{-9} \cdot x^2,$$

де *x* – шлях в метрах.

Визначимо похідну від швидкості і прирівняємо її до нуля. Тоді отримаємо наступні значення швидкості і вагового зносу:

$$V_1' = 6,8181818 \cdot 10^{-8} - 9,090909 \cdot 10^{-9} \cdot x = 0;$$

$$x = 7,5;$$

$$V_L(0) = 0,0000202 \text{ (мгм/м)};$$

$$V_L(100) = 0,00002012 + 6,8181818 \cdot 10^{-6} - 4,5454545 \cdot 10^{-5} = 0,0000201 + 0,0000068181818 - 0,000045454545 = -0,000018536.$$

В результаті у точці *x* = 7,5 м від початку шляху тертя спостерігається максимальна швидкість зношування, а мінімальна швидкість спостерігається в точці *x* = 100, що пояснюється більшою площею дотику ролика із зразком у порівнянні з початковою площею дотикання ролика і даного зразка, і, відповідно, меншим питомим тиском при даному навантаженні *P* = 44,1 Н, а значить реальним зменшенням зношування.



У зв'язку з цим бачимо, що визначення часового моменту найбільшої швидкості зношування дає можливість передбачити інтенсивне збільшення швидкості зношування покриття в реальних умовах експлуатації в момент часу, отриманий із співвідношення:  $T_p / (100/0,163)$ , що еквівалентне  $0,00163 \cdot T_p$  ( $T_p$  – реальний час зношування застосованого покриття).

### Висновки

Проведено експериментальне дослідження і показано спосіб апроксимації експериментальних залежностей двох матеріалів ВТ6 і 30ХГСА на визначення величини зносу і встановлено, що матеріал ВТ6 має в два рази більший знос за масою в порівнянні із сталлю 30ХГСА при однакових умовах експериментального дослідження.

У загартованого сплаву ВТ: значно більша твердість ніж у нормалізованої сталі 30ХГСА, але знос у два рази більший, що пояснюється крихкістю в результаті технології загартування, тобто на абразивну зносостійкість значною мірою впливає пластичність матеріалу.

Виконано порівняльний аналіз апроксимації двох експериментальних залежностей абразивного зношування для титанового сплаву ВТ6 ( $f_1(x)$ ) і сталі 30ХГСА ( $f_2(x)$ ) за класичним поліноміальним методом найменших квадратів.

Показано результати порівняльних досліджень на зносостійкість поширеної групи матеріалів, що застосовуються на ГТД гелікоптерів. Викладено спосіб прогнозування значень екстремальних швидкостей зношування (max, min) матеріалів і покриттів із застосуванням пакету математичних програм «MathCad-2001».

### Література

1. Формирование многослойных многокомпонентных защитных покрытий / Н.В. Белан,

В.В. Колесник и др. // Авиационно-космическая техника и технологии. – Х.: Государственный аэрокосмический ун-т «ХАИ», 2004. – Вып. 7/15. – С. 231-235.

2. Малышкин В.В., Ходак Н.А., Дмытренко В.Н. Особенности восстановления геометрических форм и номинальных размеров поверхностей деталей и их упрочнение газотермическим напылением жаростойкими покрытиями // В сб. тр. IV Международного симпозиума по трибофатике, 23-27 сентября, 2002. – Тернополь: Тернопольский государственный технический университет им. Ивана Пулюя. – Т. 2. – С. 557-561

3. 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 // В сб. трудов IV Международной научно-технической конференции АВИА-2002. – К.: НАУ, 23-25 апреля, 2002. – Т. 3, секция 31. – С. 31.101-31.103.

4. Лабунец В.Ф., Ходак М.О., Марчук В.Е., Братица Л.С. Застосування детонаційних покриттів для зміцнення і відновлення тертьових деталей авіаційної техніки // Вісник НАУ. – 2002. – № 1. – С. 183-187.

5. Костецкий Б.И., Носовский И.Г., Караулов А.К. Поверхностная прочность материалов при трении. – К.: Техника, 1986. – 296 с.

6. Хрущев М.М., Бабичев М.А. Абразивное изнашивание. – М.: Наука, 1970. – 251 с.

7. Кашеев В.Н. Сопrotивление металлической поверхности абразивному разрушению // Долговечность трущихся деталей машин. – М.: Машиностроение. – 1990. – Вып. 4 – С. 279-295.

8. Добровольский А.Г., Кошеленко Г.И. Абразивная износостойкость материалов. – К.: Техника, 1989. – 128 с.

9. Костецкий Б.И. Трение, смазка и износ в машинах. – К.: Техника, 1970. – 390 с.
10. Крагельский И.Г. Трение и износ. – М.: Машгиз, 1962. – 383 с; 1968. – 480 с.
11. Зорин В.А. Основы долговечности строительных и дорожных машин. – М.: Машиностроение, 1986. – 248 с.
12. Тененбаум М.М. Износостойкость конструкционных материалов и деталей машин при абразивном изнашивании. – М.: Машиностроение, 1966. – 331 с.
13. 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.
14. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбатов В.С. Основы расчетов на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977. – С. 319-326.
15. Гавриков М.В., Мазинг Р.И. Применение наследственно-стареющей модели изнашивания к осесимметричной контактной задаче // Трение и износ. – 1989. – Т. 10, № 6. – С. 981-986.
16. Рыжиков А.Л., Гронянов В.М., Тараканчиков Л.Т. Модель абразивного износа алюминиооксидной керамики. // Трение и износ. – 1991. – Т. 12, № 2. – С. 361-364.
17. Сорокатый Р.В. Моделирование поведения трибосистем методом трибозлементов. // Трение и износ. – 2002. – Т. 23, № 1. – С. 16-22.
18. Федоров С.В. Обобщенная модель трения // Трение и износ. – 1993. – Т. 14, № 3. – С. 460-470.
19. Ходак Н.А., Вишневецкий О.А., Шолопов В.А. Модернизация оборудования и средств для исследования процессов абразивного изнашивания и их моделирование // Двигатели внутреннего сгорания: Всеукраинский научно-технический журнал. – 2004. – Вып. № 2. – С. 114-122.
20. Фильчаков П.Ф. Численные и графические методы прикладной математики. – К.: Наук. думка, 1970. – С. 42, 51, 665.
21. Ходак М.О., Ситниченко В.В. Геометричне моделювання обводів характерних перерізів повітрозабірників авіаційних ГТД з використанням поліномів // Прикладна геометрія та інженерна графіка. – К.: КНУБА., 1999. – Вип. 66. – С. 144-148.
22. Дьяконов В.П. MathCAD-2001: специальный справочник. – С.-Пб.: Питер, 2002. – 832 с.
23. Дьяконов В.П. Справочник по MathCAD PLUS 6.0 PRO. – М.: СКПресс, 1997. – 336 с.
24. Ходак М.О., Вишневецкий О.А. Нетрадиційний спосіб апроксимації експериментальних залежностей та його порівняльна оцінка з програмами системи «MathCAD» // Авиационно-космическая техника и технология: Научн.-техн. журнал. – 2004. – № 6 (14). – С. 15-23.
25. Ходак М.О., Вишневецкий О.А. Порівняльна оцінка нетрадиційного удосконаленого та класичного поліноміального методів апроксимації експериментальних залежностей абразивного зносу поверхонь матеріалів // Вісник Житомирського державного технологічного університету. – Житомир: ЖДТУ, 2005. - № 3 (11). – С. 17-24.

Надійшла до редакції 17.06.2006

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.В. Щепетов, АКІ Київського національного авіаційного університету, Київ.