

що час роботи першого стабілізуючого каскаду до моменту припустимого введення другого залежить від швидкості й висоти і на середніх висотах складає 1–3 с.

Отже, отримані результати дають досить чітке уявлення про методику визначення початкових умов і режимів при введенні в дію стабілізуючих каскадів ПС катапультного крісла з метою забезпечення можливості наступного аналізу процесів їхнього функціонування.

Список літератури

1. Лобанов Н.А. Основы расчета и конструирования парашюта. – М.: Машиностроение, 1965. – 363 с.
2. Иванов П.И. Летные испытания парашютных систем. – Феодосия: Гранд-С, 2001. – 332 с.
3. Бардонов В.В. Парашютные системы для спасения летного состава скоростных самолетов: Сб. докл. НТК. Вып.4. – М.: НИИ АУ, 1972. – 288 с.
4. ГОСТ 4401-81. Атмосфера стандартная. Параметры. – М., Изд-во стандартов, 1981. – 179 с.

Стаття надійшла до редакції 01.07.02.

К 223.062.8+052-083.051.610

УДК 621.793

Матеріал жаростійкий, жаростійкість матеріалів, жаростійкість покриття жаростійке, покриття газотермічні сплав

В.В. Малишкін, асист.,

М.О. Ходак, канд. техн. наук, доц.,

М.М. Голего, канд. техн. наук, проф.

О.А. Вишневський, старш. викл.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЗНОШУВАННЯ МАТЕРІАЛІВ ІЗ ЖАРОСТІЙКИМ ПОКРИТТЯМ ТА ЙОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Розглянуто результати досліджень триботехнічних характеристик газотермічних покриттів типу ВКНА та сплав ЖС6К. Наведено апробовані технологічні режими відновлення та зміцнення поверхонь деталей із застосуванням плазмового нанесення жаростійких покриттів з метою їхнього використання при розробці рекомендацій для конкретних умов у ремонтному виробництві. Математичним моделюванням отримано емпіричні залежності процесу зношування. Показано перспективність застосування наведених покриттів для зміцнення і відновлення деталей вузлів тертя авіаційної техніки.

Розвиток 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.

Відомо, що триботехнічні показники визначаються не стільки об'ємно-структурними властивостями, скільки станом поверхневих шарів [1]. Поверхнєве зміцнення відіграє значну роль у загальному комплексі методів, що направлені на продовження ресурсу деталей авіаційної техніки.

Використання захисних покриттів дає координальне та технологічно ефективне розв'язання задачі збільшення надійності та довговічності деталей машин і механізмів. При нанесенні покриттів на деталі утворюються високоякісні, практично безпористі шари з високим рівнем адгезійної міцності з матеріалом основи.

Застосування покриттів дозволяє поліпшити і навіть цілком змінити поверхневі властивості деталей, одержати заздалегідь прогнозовані властивості робочих поверхонь для того, щоб якнайкраще задовольнити умови експлуатації [2–4]. Захисні покриття повинні бути жаростійкими і мати високу міцність зчеплення з основою.

Експериментальне дослідження процесу зношування покриттів ВКНА по ВКНА при кімнатних умовах та ВКНА по ВКНА при температурах $T_{\min} = 700^{\circ}\text{C}$, $T_{\max} = 800^{\circ}\text{C}$, ВКНА по ЖС6К при температурах $T_{\min} = 800^{\circ}\text{C}$, $T_{\max} = 1000^{\circ}\text{C}$, ЖС6К по ЖС6К при температурах $T_{\min} = 800^{\circ}\text{C}$, $T_{\max} = 1000^{\circ}\text{C}$ проводили на установці, показаній на рис. 1.

Електродвигун 2 установки (рис. 1) забезпечує обертання ексцентрика 1 із регульованим ексцентриситетом [5].

Частота обертання і кількість обертів регулюється приладом 3. Ексцентрик 1 через шатун 5 пов'язаний з кулісою 6 валу 7 привода зворотно-обертального руху контрзразка 8; амплітуда переміщення контрзразка 8 регулюється ексцентриком 1 та підладнювальним пристроєм 4. Нерухомий зразок 9 закріплюється в самоорієнтуючій цанзі 10, встановленій на валу рухомої бабки 11. Навантаження зразків здійснюється за допомогою пристрою 12, 13. Зразки розташовані всередині кільцевої термопечі і нагріваються струмом, підведеним до селітів за заданою програмою. У процесі експерименту реєструються сила тертя та середня поверхнева температура в контактній парі «зразок-контр тіло». Захисні покриття наносилися на кільцеві зразки, які притискаються торцевими робочими поверхнями з необхідним осьовим зусиллям та переміщенням один відносно одного із заданою амплітудою та частотою.

Випробування на зношування при вібраційно-контактному навантаженні з накладанням підвищених температур проводилися на парі зразків з однойменним покриттям та попереднім шліфуванням покриття до шорсткості поверхні $R_z = 1 - 1,25$ мкм при амплітуді вібраційного переміщення $A = 1$ мм, частотою $F = 30$ Гц, при кімнатній температурі та підвищених температурах термоцикловання $T_{\min} = 700^{\circ}\text{C}$, $T_{\max} = 800^{\circ}\text{C}$; $T_{\min} = 800^{\circ}\text{C}$, $T_{\max} = 1000^{\circ}\text{C}$, в умовах реверсивного тертя при навантаженні $P = 12,5$ МПа, а також з базою випробувань $N = 1,1 \cdot 10^5$ циклів.

Креслення контактної пари зразків для випробувань на зношування показано на рис. 2.

Обробку результатів випробувань проводили зніманням профілограми з восьми рівновіддалених ділянок робочої поверхні зразка в радіальному напрямку, як показано на рис. 3.

Для ділянок кожної з восьми профілограм, відповідних незношуваній поверхні і робочій поверхні тертя зразка, проводили середні лінії профілю згідно з ГОСТ 2789-73 [6] і визначали відстань h_i між ними з похибкою $\pm 0,5$ мкм (рис. 4).

Середнє зношування j -го зразка h_j обчислювали за формулою:

$$h_j = \frac{\sum_{i=1}^8 h_i}{8}.$$

На основі проведених експериментів отримано графічні залежності лінійного зношування від параметрів навантаження та температурного циклу (рис. 5).

Виконаємо інтерполяцію функцій $y_i(x)$, показаних на рис. 3, у вигляді полінома:

$$y(x) = A_0 + A_1x + A_2x^2 + A_3x^3 + \dots + A_mx^m. \quad (1)$$

Коефіцієнти поліному (1) визначаємо з розв'язку системи рівнянь:

$$C_0A_0 + C_1A_1 + C_2A_2 + C_3A_3 + \dots + C_mA_m = D_0;$$

$$C_1A_0 + C_2A_1 + C_3A_2 + C_4A_3 + \dots + C_{m+1}A_m = D_1;$$

$$\dots$$

$$C_mA_0 + C_{m+1}A_1 + C_{m+2}A_2 + C_{m+3}A_3 + \dots + C_{2m}A_m = D_m,$$

де

$$C_j = \sum_{i=1}^N x_i^j, \quad j = 0, 1, 2, \dots, 2m;$$

$$D_k = \sum_{i=1}^N x_i^k y_i, \quad k = 0, 1, 2, \dots, m.$$

Поліном (1) забезпечує апроксимацію та інтерполяцію таблично заданої функції $y_i(x_i)$ з мінімальною середньоквадратичною похибкою:

$$E = \sqrt{\sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2 / (N+1)}$$

при степені $m < N$, де N – число пар $x_i - y_i$.

При квадратичній інтерполяції за методом найменших квадратів $m=2$ задача зведеться до побудови параболу

$$y = A_0 + A_1x + A_2x^2,$$

яка менше всього відхиляється від n заданих точок ($n > 3$).

Розв'яжемо систему рівнянь з трьома невідомими:

$$\begin{cases} C_0A_0 + C_1A_1 + C_2A_2 = D_0; \\ C_1A_0 + C_2A_1 + C_3A_2 = D_1; \\ C_2A_0 + C_3A_1 + C_4A_2 = D_2. \end{cases}$$

Розглянемо лінійну залежність зношування від часу, яка задана графіком $y_i(x)$ на рис. 3. Базові точки графіка: $O(0; 0)$, $F_1(1800; 16)$, $F_2(3600; 24)$, $F_3(5400; 32)$, $F_4(7200; 34)$. Визначаємо коефіцієнти C_j і D_k : $C_0=5$, $C_1=1,8 \cdot 10^4$, $C_2=9,72 \cdot 10^7$, $C_3=5,832 \cdot 10^{11}$, $C_4=3,7162 \cdot 10^{15}$, $D_0=1,06 \cdot 10^2$, $D_1=5,328 \cdot 10^5$, $D_2=3,0585 \cdot 10^9$. Отримаємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} 5A_0 + 18000A_1 + 97200000A_2 = 106; \\ 18000A_0 + 97200000A_1 + 583200000000A_2 = 532800; \\ 97200000A_0 + 583200000000A_1 + 3716150400000000A_2 = 3058560000. \end{cases} \quad (2)$$

Результатом розв'язання системи (2) будуть значення: $A_0=0,4$, $A_1=0,0091$, $A_2=-0,00000062$. Апроксимуюча функція $y_1(x)$ матиме вигляд:

$$y_1(x) = 0,4 + 0,0091x - 0,00000062x^2. \quad (3)$$

Величина похибки в точці x_i становить

$$\varepsilon_i = y_p(x_i) - y_{ек}(x_i).$$

Результати визначення похибки експерименту та апроксимації в базових точках зведено в таблицю.

Похибки експерименту та апроксимації в базових точках

x	x^2	$y_{ек}$	y_p	ε	ε^2
0	0	0	0,4	0,4	$1,6 \cdot 10^{-1}$
1800	$3,24 \cdot 10^6$	16	14,7712	-1,2288	1,50994944
3600	$1,296 \cdot 10^7$	24	25,1248	1,1248	1,26517504
5400	$2,916 \cdot 10^7$	32	31,8608	-0,1392	0,01937664
7200	$5,184 \cdot 10^7$	34	33,7792	-0,2208	0,04875264

$$\text{Знайдемо } \sum_{i=1}^5 \varepsilon_i^2 \approx 3,00325376.$$

Середньоквадратична похибка становитиме

$$E = \sqrt{\sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2 / (N+1)} \approx 0,70749.$$

Рис. 1. Принципова схема експериментальної установки для комплексного дослідження зношування матеріалів з покриттями:

1 – ексцентрик; 2 – електродвигун; 3 – прилад; 4 – підладнювальний пристрій; 5 – шатун; 6 – куліса; 7 – вал; 8 – контрзразок; 9 – нерухомий зразок; 10 – цанз; 11 – бабка; 12, 13 – пристрій

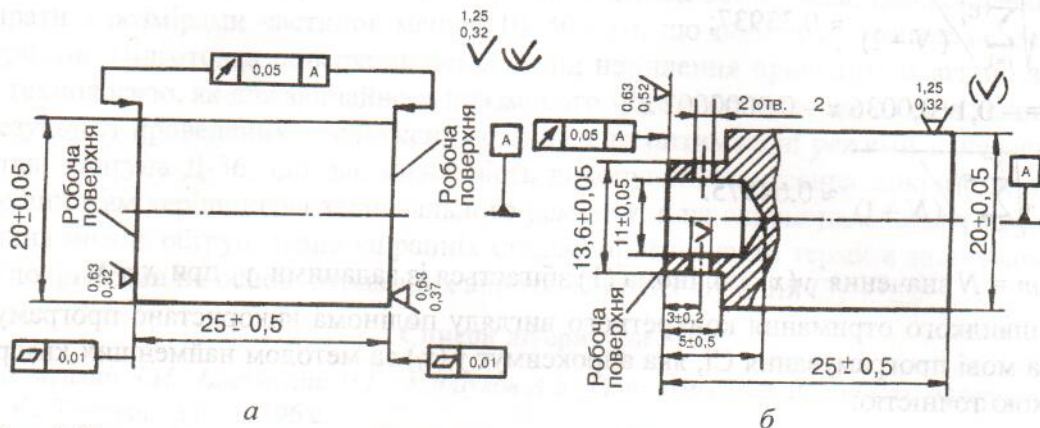
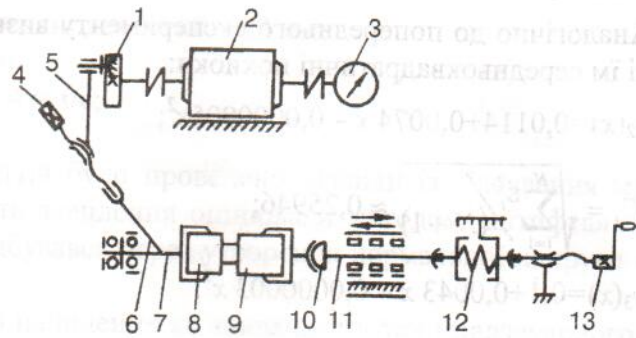


Рис. 2. Креслення контактної пари зразків для випробувань на зношування: а – перший зразок; б – другий зразок

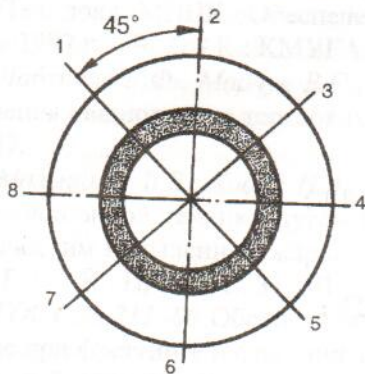


Рис. 3. Схема зняття профілограм із восьми рівновідданих ділянок робочої поверхні зразка в радіальному напрямку

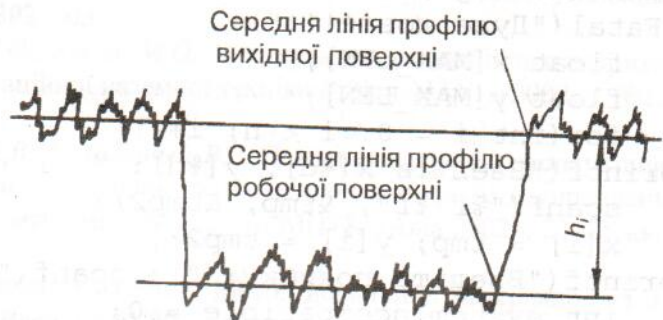
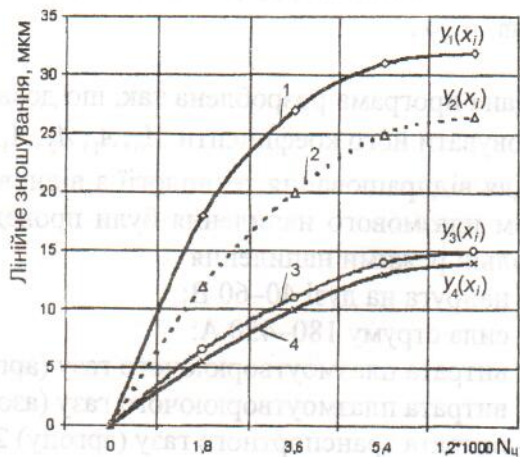


Рис. 4. Схема визначення зношування на восьми рівновідданих ділянках робочої поверхні на зразку тертя

Рис. 5. Залежності лінійного зношування покриття матеріалом ВКНА поверхонь деталей при високих і кімнатних температурах в умовах реверсивного тертя при навантаженні $P=12,5$ МПа:

- 1 – ВКНА по ВКНА при $T = 20^\circ\text{C}$;
- 2 – ЖС6К по ЖС6К при $T = 800^\circ\text{C}$;
- 3 – ВКНА по ЖС6К при $T = 800^\circ\text{C}$;
- 4 – ВКНА по ВКНА при $T = 800^\circ\text{C}$



Аналогічно до попереднього експерименту визначаємо такі апроксимуючі функції та відповідні їм середньоквадратичні похибки:

$$y_2(x) = 0,0114 + 0,0074x - 0,0000005x^2; \quad (4)$$

$$E_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2 / (N+1)} \approx 0,25946;$$

$$y_3(x) = 0,1 + 0,0043x - 0,0000003x^2; \quad (5)$$

$$E_3 = \sqrt{\sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2 / (N+1)} \approx 0,33937;$$

$$y_4(x) = -0,1 + 0,0036x - 0,0000002x^2; \quad (6)$$

$$E_4 = \sqrt{\sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2 / (N+1)} \approx 0,64575.$$

При $m = N$ значення $y(x)$ полінома (1) збігається із заданими y_i при $x = x_i$.

Для швидкого отримання конкретного вигляду полінома використано програму [7], розроблену на мові програмування Сі, яка апроксимує $y_i(x_i)$ за методом найменших квадратів з досить високою точністю:

```
#pragma argsused
int
main(int argc, char **argv)
    Fatal("Дуже довге!!!");
    float x[MAX_LEN];
    float y[MAX_LEN];
    for(int i = 0; i < n; i++) {
    printf("Введіть x[%d], y[%d]: ", i + 1, i + 1);
    scanf("%f %f", &tmp, &tmp2);
    x[i] = tmp; y[i] = tmp2;}
    printf("Введіть похибку: "); scanf("%f", &e0);
    int systemIncompatible = 0;
    m = 15;
    for(i = 0; i <= m; i++)
    {for(int j = 0; j <= m; j++)
        matrix[i][j] = 0;
        matrix[i][m+1] = 0;}
    m = 0.
```

Дана програма розроблена так, що дозволяє автоматично зробити вибір степеня полінома, підраховувати його коефіцієнти $A_0, A_1, A_2, A_3, \dots, A_m$ за наперед заданою похибкою ε .

Для відпрацювання технології з відновлення зношених деталей авіаційного двигуна Д-36 методом плазмового напилення були проведенні дослідні роботи. У результаті отримано такі оптимальні режими напилення:

- напруга на дузі 40–60 В;
- сила струму 180–450 А;
- витрата плазмоутворюючого газу (аргону) 25–50 л/хв;
- витрата плазмоутворюючого газу (азоту) 10–20 л/хв;
- витрата транспортного газу (аргону) 2–5 л/хв;

- відстань від сопла до напиленої поверхні деталі 80–120 мм;
- частота обертання деталі 2–70 об/хв;
- поздовжня подача плазмотрона 3,5–4 мм/с;
- витрата порошку 1,5–2 кг/год.

Для оцінки якості плазмових покриттів було проведено досліди із з'ясування міцності зчеплення та твердості покриттів. Міцність зчеплення оцінювали методом «штифта». За цим методом відрив покриття від підкладки відбувався через утворення нормальної напруги на границі розділу покриття з підкладкою.

При використанні методу плазмового напилення як звичайного, так і надзвукового, використовуються композиційні порошки з розмірами частинок 60–80 мкм. Важкоплавкі матеріали слід вибирати з розмірами частинок менше 10–40 мкм, що полегшує розплавлення при нанесенні покриттів. Підготовка поверхонь деталей під напилення проводиться згідно з існуючою серійною технологією, як для звичайного плазмового методу (струмо-абразивна технологія).

У результаті проведених досліджень встановлено оптимальні режими нанесення покриттів на деталі двигуна Д-36, що дає можливість виконувати нанесення покриттів, якість яких відповідає вимогам керівництва з капітального ремонту, а на основі наведеного математичного моделювання можна обґрунтовано на ранніх стадіях прогнозувати терміни зношування деталей з різними покриттями на основі отриманих апроксимуючих функцій (3) – (6).

Список літератури

1. Костецкий Б.И., Носовский И.Г., Караулов А.К. Поверхностная прочность материалов при трении и др. – К.: Техніка, 1986. – 296 с.
2. Мальшикин В.В., Ходак Н.А., Голего Н.Н. Обеспечение безопасности полётов воздушных судов при сертификации технологических процессов, применяемых при восстановлении деталей авиационной техники // Тез. докл. МНПК «Обеспечение безопасности полётов в новых экономических условиях», 27–29 мая 1997 г. – Ч. 2. – К.: КМУГА, 1997. – С. 302–303.
3. Лабунець В.Ф., Марчук В.Є., Братиця Л.С., Ходак М.О. Застосування детонаційних покриттів для зміцнення і відновлення тертьових деталей авіаційної наземної техніки // Вісн. НАУ. – 2002. – №1. – С. 183–187.
4. Мальшикин В.В., Ходак Н.А., Дмитренко В.Н., Лубяный В.В. Повышение сроков эксплуатации деталей авиационной техники путём восстановления размеров их геометрических форм и упрочнения газотермическим напылением жаростойкими покрытиями // Зб. пр. 4-ї МНТК «Авіа-2002», 23–25 квіт. 2002 р. – Т. 1. – К.: НАУ. – С. 31.101–31.103.
5. ГОСТ 23.211–80 Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытаний материалов на изнашивание при фреттинге и фреттинг-коррозии. – Введ. 01.01.80.
6. ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры, характеристики и обозначения. – М.: Изд-во стандартов, 1973.
7. 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.

Стаття надійшла до редакції 02.09.02.