

УДК 629.735.018.4:620.178.16(045)

В.В. Варюхно, канд. техн. наук
А.Г. Довгаль
Л.В. Бурдюженко
Є.М. Лісовий

МОДЕЛЮВАННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ЕЛЕКТРОІСКРОВИХ ПОКРИТТІВ ПРИ ВІДСУТНОСТІ МАЩЕННЯ

Інститут транспортних технологій НАУ, e-mail: itt@nau.ua

Наведено експериментальні дані про зносостійкість електроіскрових покриттів алюмінієвого сплаву Ал-25 мідним електроодом. Виконано планування експерименту та побудовано математичну модель зносу та коефіцієнта тертя.

Вступ

Одним з актуальних завдань машинобудування є надійність і довговічність машин сучасної техніки, що в основному характеризується зносостійкістю деталей, пар тертя. При цьому зносостійкість цих деталей підвищується застосуванням різних конструктивних, технологічних і експлуатаційних заходів. Численні технологічні методи поверхневого зміцнення деталей – один з ефективних засобів розроблення методів підвищення зносостійкості, особливо тих пар, які працюють у складних умовах тертя (граничне тертя, високі температури, великі питомі навантаження та ін.).

Одним з методів підвищення зносостійкості є електроіскрове легування (ЕІЛ), що застосовується для зміцнення деталей машин і крайок різального інструмента. Неповнота відомостей про зносостійкість електроіскрових шарів та про загальні області їх оптимального техніко-економічного застосування – одна з причин що не дозволяє широко впроваджувати цей прогресивний метод поверхневого зміцнення, зокрема в авіаційній промисловості.

Аналіз останніх досліджень

Аналіз публікацій [1–7], показав що ЕІЛ застосовували переважно для легування конструкційних та швидкорізальних сталей, а алюмінієві сплави як основні конструкційні матеріали авіаційної промисловості залишилися поза увагою дослідників.

Формулювання цілей

Дослідники ставили такі цілі:

– дослідити зносостійкість силуміну Ал-25, зміцненого електроіскровим легуванням мідним електроодом;

– побудувати математичні моделі другого порядку, які відображають залежності зносу та коефіцієнта тертя від контрольованих факторів, а саме: швидкості ковзання, навантаження і температури.

Виклад основного матеріалу

Зносостійкість деталей машин, зміцнюваних електроіскровим легуванням, значно залежить від режимів зміцнення та матеріалу зміцнювального електрода.

Досліди проводили на зразках модифікованого силуміну Ал-25, які піддавали електроіскровому легуванню на установці “Елітрон-22”. Режим обробки – струм короткого замикання $I_{кз}=130$ А, робочий струм $I_p=80\dots100$ А. Матеріал електрода – мідь. Зразки мали призматичну форму з площею контакту 4×5 мм, більша сторона розміщувалась у напрямку ковзання.

Випробування на зносостійкість виконували в умовах сухого тертя на машині тертя ПВКЗ з можливістю підігріву зразка та контролю температури.

Схема контакту – “ролик–зразок”, де ролик виготовлено з чавуну ВЧ45-0. Для точнішої оцінки результатів дослідів виконували припрацювання зразків на першому етапі. Середній час припрацювання визначали експериментально при швидкості ковзання $V=1$ м/с, навантаженні $P=1$ МПа і температурі $T=20$ °С.

Досліди на зносостійкість проводили за умов, наведених в табл. 1.

Таблиця 1

Умови проведення дослідів на зносостійкість алюмінієвого сплаву Ал-25 з електроіскровим покриттям мідним електроодом

Фактор	Швидкість X_1 V , м/с	Навантаження X_2 P , МПа	Температура X_3 T , °С
Верхній рівень (+1)	1,5	10	170
Нижній рівень (-1)	0,5	0,3	20
Основний рівень (0)	1	5,15	95
Інтервал варіювання (J)	0,5	4,85	75

Для більш повного вивчення впливу швидкості ковзання, навантаження і температури середовища на зносостійкість сплаву Ал-25, зміцненого електроіскровим методом мідним електродом та побудови математичних моделей залежності коефіцієнта тертя та зносу від варійованих факторів використовувались методи математичного планування експерименту, зокрема, центральний некомпозиційний ротатабельний план другого порядку для кількості факторів $K=3$.

Як показано в праці [8], він є найменшим ротатабельним планом другого порядку, більш економічний щодо кількості дослідів, ніж відповідний композиційний план. Цей план являє собою певну вибірку з повнофакторного експерименту 3^k (табл. 2).

Параметри оптимізації цього експерименту служили: ваговий знос Y_1 і коефіцієнт тертя Y_2 .

Моделювання зводиться до пошуку поліноміальної функції відгуку другого порядку, що має вигляд:

$$Y = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + B_3X_3 + B_{12}X_1X_2 + B_{23}X_2X_3 + B_{13}X_1X_3 + B_{11}X_1^2 + B_{22}X_2^2 + B_{33}X_3^2.$$

визначення оцінок коефіцієнтів регресії, перевірки їх статистичної значущості та адекватності отриманої моделі.

Аналіз даних, отриманих в результаті проведених експериментів багатофакторного планування, проводився за відомими методиками та формулами математичної статистики [8].

Виходячи з розрахункових параметрів, рівняння регресії мають вигляд:

Таблиця 2

Центральний некомпозиційний ротатабельний план другого порядку для кількості факторів $K=3$

Номер експерименту	Фактори										Дослідні параметри оптимізації		Розрахункові параметри оптимізації	
	X_0	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	X_1^2	X_2^2	X_3^2	Y_1	Y_2	Y_1	Y_2
1	+1	+1	+1	0	+1	0	0	+1	+1	0	36,3	0,32	33,7	0,32
2	+1	+1	-1	0	-1	0	0	+1	+1	0	25,4	0,24	27,3	0,23
3	+1	-1	+1	0	-1	0	0	+1	+1	0	40,1	0,38	38,1	0,38
4	+1	-1	-1	0	+1	0	0	+1	+1	0	15,2	0,27	17,7	0,27
5	+1	+1	0	+1	0	+1	0	+1	0	+1	32,1	0,25	31,7	0,26
6	+1	+1	0	-1	0	-1	0	+1	0	+1	20,5	0,31	21,4	0,30
7	+1	-1	0	+1	0	-1	0	+1	0	+1	26,4	0,29	25,4	0,30
8	+1	-1	0	-1	0	+1	0	+1	0	+1	22,2	0,37	22,5	0,35
9	+1	0	+1	+1	0	0	+1	0	+1	+1	40,1	0,39	43,1	0,37
10	+1	0	+1	-1	0	0	-1	0	+1	+1	32,1	0,41	33,7	0,41
11	+1	0	-1	+1	0	0	-1	0	+1	+1	28,5	0,27	26,9	0,26
12	+1	0	-1	-1	0	0	+1	0	+1	+1	26,2	0,3	23,2	0,31
13	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27,6	0,35	27,3	0,32
14	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27,4	0,32	27,3	0,32
15	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27,1	0,3	27,3	0,32

$$Y_1 = 27,4 + 1,3X_1 + 6,66X_2 + 3,26X_3 - 3,5X_1X_2 + 1,42X_2X_3 + 1,85X_1X_3 - 2,27X_1^2 + 4,15X_2^2;$$

$$Y_2 = 0,32 - 0,023X_1 + 0,052X_2 - 0,023X_3 - 0,027X_1^2 - 0,012X_3^2.$$

Отримані моделі найбільш імовірно відбивають залежності значення зносу і коефіцієнта тертя в певній області факторного простору.

Адекватність моделі перевіряли за допомогою критерію Фішера. [9]. Результати розрахунку наведено в табл. 3.

Для аналізу результатів за даними рівнянь регресії було побудовано ряд поверхонь (рис. 1) при цьому для аналізу впливу температури її фіксували постійною на трьох рівнях.

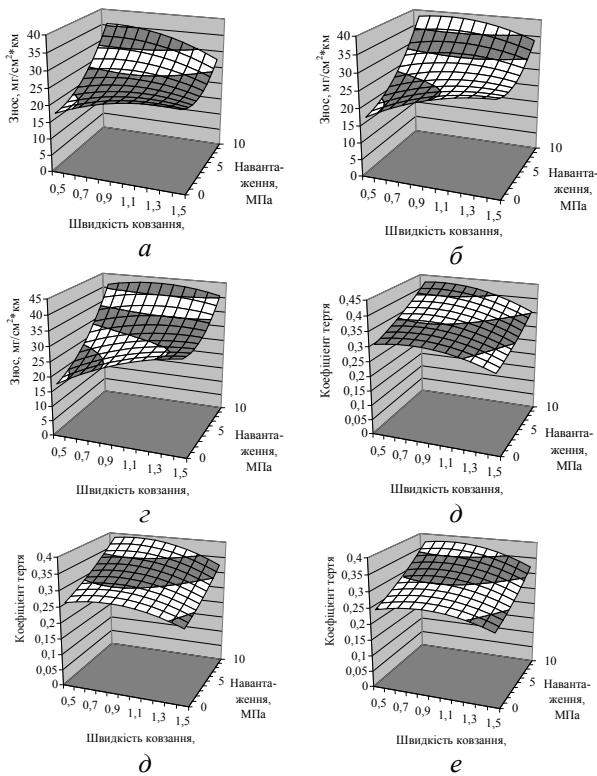


Рис. 1. Діаграми залежності зносу (а, б, в) і коефіцієнта тертя (г, д, е) від швидкості ковзання і навантаження при температурі 20 °C (а, г), 95 °C (б, д), 170 °C (в, е)

Як показали досліди, одна з важливих переваг електроіскрового легування – це можливість дифузійного нанесення будь-якого струмопровідного матеріалу без надмірної дії високих температур в зоні іскрового розряду [10]. Це виключає можливість фазових перетворень в приповерхневих шарах деталі.

Натомість легувальний елемент, активований енергією розряду, дифузійно проникає в приповерхневі шари й утворює з ними зміцнювальні фази підвищеної твердості.

Таблиця 3

Розрахункові значення коефіцієнтів регресії, дисперсії, довірчих інтервалів

Параметр	Розрахункові значення	
	для зносу	для коефіцієнта тертя
B_0	27,4	0,32
B_1	1,30	-0,023
B_2	6,66	0,052
B_3	3,26	-0,023
B_{12}	-3,50	-0,0075
B_{23}	1,42	0,0025
B_{13}	1,85	0,0050
B_{11}	-2,27	-0,0275
B_{22}	4,15	0,010
B_{33}	0,20	0,0125
S_y^2	0,063333	0,000100
ΔB_0	$\pm 0,3095$	$\pm 0,0123$
ΔB_i	$\pm 0,1895$	$\pm 0,0075$
ΔB_{ij}	$\pm 0,2680$	$\pm 0,0107$
ΔB_{ii}	$\pm 0,3095$	$\pm 0,0123$
$S_{ад}^2$	11,59063	0,000175
F_{f2f1}^T	224,6	8,84
F_{f2f1}^P	183	1,75
f_1	2	2
f_2	4	7

Як показує металографічний аналіз легованих поверхонь, в процесі легування з поверхні силуміну вигорає кремій, що значно зменшує поверхневу частку м'якої евтектичної фази і утворюються інтерметалідні сполуки підвищеної мікротвердості типу CuMgAl, CuAl₂, CuNiAl і т.ін.

Вони і створюють армовану сітку, що екранує поверхню від надмірного зносу (рис. 2).

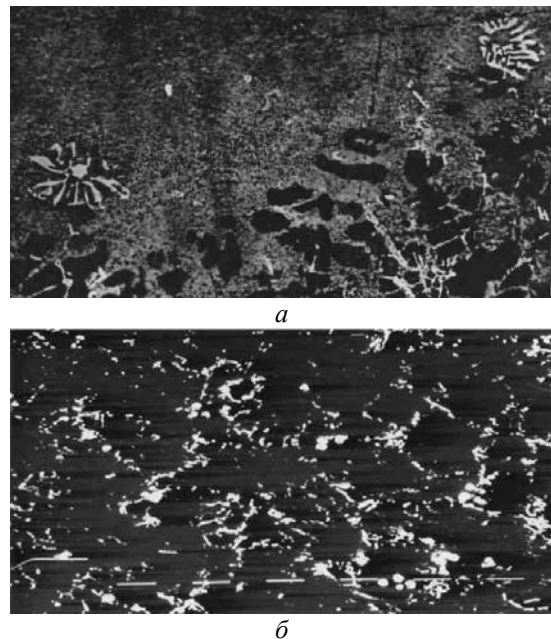


Рис. 2. Структура поверхневих шарів (×160): а – вихідна структура силуміну Ал-25; б – зміцнююча фаза після ЕЛТ

Аналіз отриманих даних показує, що характер розвитку процесів тертя та зношування на робочих поверхнях, залежить від швидкості ковзання, навантаження і температури. Цілком природно, що зі збільшенням навантаження збільшується величина зносу та коефіцієнта тертя, оскільки пружний контакт мікронерівностей насичується і поглиблюються явища пошкоджуваності. Швидкість ковзання, щоправда, менш інтенсивно впливає на ріст величини зносу, а у разі великих навантажень навіть приводить до його зменшення, що дозволяє зробити висновок про встановлення деякої динамічної рівноваги процесів руйнування та відновлення в трибосистемі. Коефіцієнт тертя зі збільшенням швидкості зменшується, що узгоджується з висновками [11; 12]. Збільшення температури призводить до прискорення окислювальних та деструктивних процесів на трибоповерхні, і зміцнювальна фаза руйнується інтенсивніше, про що свідчить зростання зносу і коефіцієнта тертя та їх градієнтів.

Висновки

На підставі дослідів та за допомогою використання математичних методів планування експерименту показано, що досліджена зносостійкість силуміну Ал-25 зміцненого електроіскровим легуванням мідним електродом в умовах сухого тертя ковзання залежить від зовнішніх змінних контрольованих параметрів: швидкості ковзання, навантаження та температури, але трудомісткість описаного підходу до вивчення зносостійкості значно менша, ніж традиційного однофакторного експериментування, а отримані результати надійніші, оскільки враховують ефекти взаємодії діючих факторів.

Отримані й описані результати можуть бути використані для формулювання практичних рекомендацій щодо впровадження проведених досліджень в авіаремонтну галузь.

Список літератури

- Мулин Ю.И., Климова Л.А., Дмитриев Д.А., Власенко В.Д. Определение технологических параметров процесса электроискрового легирования для образования заданной толщины покрытия // Электронная обработка материалов. – 2002. – №3. – С. 19–23.
- Голубець В.Б., Білоус О.В. Розробка нового електродного сплаву для нанесення зносостійких покриттів на ріжучий інструмент електроіскровим легуванням та лазерною обробкою // Проблеми трибології. – 2001, №2. – С. 83–89.
- Структура и износостойкость покрытий на титановом сплаве и сталях, полученных при электроискровом легировании материалом Al-ZrB₂ / М.А. Тепленко, И.А. Подчерняева, А.Д. Панасюк и др. // Порошковая металлургия. – 2002. – №3/4. – С. 48–58.
- Трибологические свойства тонкодисперсных покрытий при электроискровом легировании материалами системы Ti-Al-N / И.А. Подчерняева, А.Д. Панасюк, М.А. Тепленко и др. // Порошковая металлургия. – 2002. – №11/12. – С. 49–60.
- Подчерняева И.А., Панасюк А.Д., Каташинский В.П., Тепленко М.А. Формирование, структура и свойства покрытий на основе TiB₂-AlN, полученных электроискровым и лазерным методами // Порошковая металлургия. – 2000. – №11/12. – С. 39–46.
- Кириленко С.М. Формування внутрішніх напружень в електроіскрових покриттях і вплив на них термообробки // Порошковая металлургия. – 2000. – №1/2. – С. 34–37.
- Ковальченко М.С., Паустовский А.В., Ботвинко В.П. Фазовый состав электроискровых покрытий на основе карбидов вольфрама после нагрева и изотермической выдержки // Порошковая металлургия. – 2001. – №3/4. – С. 100–105.
- Новик Ф.С. Математические методы планирования экспериментов в металловедении. – В 2-х ч. – М.: МИС. – I ч., 1970, 110 с.; II ч., 1972, 118 с.
- Евдокимов Ю.А., Колесников В.И., Тетерин А.И. Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа. – М.: Наука, 1980. – 288 с.
- Верхотуров А.Д., Муха И.М. Технология электроискрового легирования. – К.: Техніка, 1980. – 187 с.
- Гаркунов Д. М. Триботехника износ и безызносность. – М.: МСХА, 2001. – 614 с.
- Гаркунов Д. М. Триботехника конструирования, изготовление, эксплуатация машин. – М.: МСХА, 2002. – 629 с.

Стаття надійшла до редакції 15.12.03.

V.V. Varyukhno, A.G. Dovgal, L.V. Burdyuzhenko, Ye.M. Lisoviy

Modeling of wear-resistance of electro-spark coatings without lubricant

Приведены экспериментальные данные по износостойкости электроискровых покрытий алюминиевого сплава Ал-25 медным электродом. Выполнено планирование эксперимента и построена математическая модель износа и коэффициента трения.

V.V. Varyukhno, A.G. Dovgal, L.V. Burdyuzhenko, Ye.M. Lisoviy

Modeling of wear-resistance of electro-spark coatings without lubricant

In the article experimental data on wear-resistance of electro-spark coatings an aluminum alloy Al-25 by copper electrode is given. Planning of experiment and mathematical modeling wear-resistance and friction factor is made. An analysis of models is performed.