

УДК 623.746:629.7.083.003.13(045)

О.В. Радько¹, А.К. Скуратовський², А.В. Рутковський³, О.І. Крешний⁴¹ Національний авіаційний університет, Київ² Національний технічний університет України «КПІ ім. І. Сікорського», Київ³ Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України, Київ⁴ Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ НАНЕСЕННЯ ЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ ТРИБОТЕХНІЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ НА ДЕТАЛІ АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ

У статті наведено результати оптимізації за триботехнічними критеріями технологічного процесу імпульсного газотермоциклічного іонного азотування деталей авіаційної техніки зі сталі 18X2H4BA. Запропонована математична модель дозволяє обирати оптимальні значення технологічних параметрів процесу залежно від реальних умов експлуатації конструкційних елементів літальних апаратів з метою підвищення ресурсних показників та заданого рівня справності бойової авіаційної техніки.

Ключові слова: оптимізація, газотермоциклічне іонне азотування, триботехнічні критерії, деталі авіаційної техніки.

Вступ

Постановка проблеми. Необхідність підтримання заданого рівня справності бойової авіаційної техніки (АТ) в умовах обмеженого фінансування висуває до числа найбільш пріоритетних завдань сучасного авіаремонтного виробництва розробку нових енергозберігаючих методів інженерії поверхні для цілеспрямованого управління ресурсними показниками конструкційних елементів літальних апаратів (ЛА).

Терміни служби та ресурсні показники АТ значною мірою залежать від довговічності її трибосполучень. Конструкційні елементи ЛА працюють у широкому діапазоні навантажень, швидкостей тертя та температур, що обумовлює необхідність використання матеріалів зі складним комплексом фізико-механічних властивостей та робить актуальною задачу розробки нових й удосконалення існуючих технологій поверхневого зміцнення.

Розробка будь-якого технологічного процесу неминує пов'язана з вирішенням оптимізаційних задач. У галузі створення зміцнювальних захисних покриттів питання оптимізації займає основне місце, адже значна кількість технологічних параметрів у поєднанні з великою номенклатурою матеріалів дають технологам широкий ряд альтернативних варіантів. У такій ситуації ефективність рішень, що приймаються, буде залежати від правильного вибору критеріїв оцінки працездатності зміцнених матеріалів у конкретних умовах експлуатації.

Перспективним методом поверхневого зміцнення деталей АТ вважається іонне азотування [1], зокрема його удосконалений варіант – газотермоциклічне іонне азотування (ГТЦ ІА) у пульсуючому режимі [2–3]. Аналіз досліджень і публікацій щодо використання ІА на авіавиробництві [4–5] свідчить про те, що, не дивлячись на переваги методу, застосування його зараз

обмежене через недостатню кількість інформації стосовно впливу параметрів технологічного процесу на фізико-механічні та експлуатаційні характеристики зміцнених деталей. Крім того, аналіз робіт з оптимізації технологічних процесів поверхневого зміцнення показує, що у більшості робіт оптимізація відбувається за одним критерієм [6–7]. Такий підхід призводить до серйозного спрощення задачі. Сформулювати математичну оптимізаційну задачу за наявності декількох критеріїв якості складніше, адже вони часто суперечать один одному, проте практика підтверджує очевидну необхідність саме такого підходу до вирішення задачі вибору оптимальних режимів ГТЦ ІА для різноманітних умов експлуатації деталей АТ.

Мета дослідження – вирішення задачі багато-критеріальної оптимізації технологічного процесу імпульсного ГТЦ ІА деталей АТ зі сталі 18X2H4BA за триботехнічними критеріями (інтенсивністю зношування та коефіцієнтом тертя).

Виклад основного матеріалу

Зміцнення дослідних зразків зі сталі 18X2H4BA розміром 5×5×10 мм за допомогою імпульсного технологічного процесу імпульсного ГТЦ ІА здійснювалося на установці ВІПА-1 [8].

Триботехнічні характеристики іонноазотованих шарів визначалися на машині тертя [9] за наступних умов: мастильне середовище – ЦІАТИМ-201; питома навантаження $P = 2,5 \dots 25$ МПа; швидкість ковзання $V = 0,4; 0,7; 1,0; 1,3$ м/с. Контакт пари тертя відбувався за схемою «диск-колодка». Критеріями оптимізації було обрано інтенсивність зношування та коефіцієнт тертя.

Зважаючи на недостатню кількість відомостей щодо механізму процесу ГТЦ ІА, значну кількість параметрів, що визначають умови його протікання,

наявність декількох критеріїв оптимізації, для скорочення часу та матеріальних витрат на проведення експериментальних досліджень було застосовано теорію планування експерименту.

З використанням методів експертної оцінки та серії відсіюючих експериментів, було отримано середній апіорний ранжирований ряд факторів, що впливають на технологічний процес ГТЦ ІА. На під-

ставі аналізу проведеного ранжування визначено групу факторів, що найбільше впливають на величину критеріїв оптимізації. До матриці планування як керовані фактори увійшли: час дифузійного насичення, тиск та склад реакційного газу, температура азотування, швидкість ковзання та питома навантаження, за яких експлуатуються досліджувані сталеві деталі (табл. 1).

Таблиця 1

Фактори та рівні їх варіювання

№	Фактори	Позначення	Рівні варіювання									
1	Час дифузійного насичення, хв	X ₁	90...240 (крок 30)									
2	Тиск реакційного газу, Па	X ₂	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250
3	Склад реакційного газу, %	X ₃	50%N ₂ + 50% Ar			30%N ₂ + 70%Ar			15%N ₂ + 85%Ar			
4	Температура процесу, °С	X ₄	400			500			600			
5	Швидкість ковзання, м/с	X ₅	0,4...1,3 (крок 0,3)									
6	Навантаження, МПа	X ₆	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0	17,5	20,0	22,5	25,0

Під час проведення досліджень використовували план експерименту, згенерований на основі ЛП_T-чисел, що мають ряд переваг [8]: вони одночасно є і планами пошуку оптимальних умов і дозволяють більш глибоко аналізувати область, що досліджується; вони можуть бути використані як послідовні, тобто затрати можуть збільшуватися поступово і попередні результати поєднуються з наступними; при "випаданні" одного з експериментів властивості плану погіршуються в межах, що дозволяють його використовувати. -

Матриця планування експерименту в кодованих значеннях наведена в табл. 2.

Таблиця 2

Робоча матриця планування експерименту

X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆
0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
0,25	0,75	0,25	0,75	0,25	0,75
0,75	0,25	0,75	0,25	0,75	0,25
0,125	0,625	0,875	0,875	0,625	0,125
0,625	0,125	0,375	0,375	0,125	0,625
0,375	0,375	0,625	0,125	0,875	0,875
0,875	0,875	0,125	0,625	0,375	0,375
0,0625	0,9375	0,6875	0,3125	0,1875	0,0625
0,5625	0,4375	0,1875	0,8125	0,6875	0,5625
0,3125	0,1875	0,9375	0,5625	0,4375	0,8125
0,8125	0,6875	0,4375	0,0625	0,9375	0,3125
0,1875	0,3125	0,3125	0,6875	0,5625	0,1875
0,6875	0,8125	0,8125	0,1875	0,0625	0,6875
0,4375	0,5625	0,0625	0,4375	0,8125	0,9375
0,9375	0,0625	0,5625	0,9375	0,3125	0,4375
0,03125	0,53125	0,40625	0,21875	0,46875	0,28125

В результаті проведення експериментальних досліджень встановлено, що поверхневе зміцнення сталі 18X2H4BA за допомогою ГТЦ ІА дозволяє підвищити її зносостійкість у 1,6...2,1 разу залежно від режиму обробки. Одержані значення триботехнічних характеристик зміцнених поверхневих шарів наведені у табл. 3.

Таблиця 3
Результати експериментальних досліджень

№ з/п	Інтенсивність зношування, I _п · 10 ⁻⁵ кг·см ⁻² на 1000 м шляху		Коефіцієнт тертя, μ	
	Y ₁₁	Y ₁₂	Y ₂₁	Y ₂₂
1	0,67	0,75	0,0450	0,0495
2	1,27	1,22	0,0650	0,0690
3	0,80	0,87	0,0600	0,0609
4	0,71	0,69	0,0500	0,0505
5	0,91	1,04	0,0525	0,0520
6	2,23	2,20	0,1025	0,1016
7	0,71	0,72	0,0483	0,0515
8	1,06	1,08	0,0630	0,0641
9	0,95	0,92	0,0500	0,0507
10	0,98	0,91	0,0510	0,0505
11	1,15	1,25	0,0711	0,0721
12	0,69	0,68	0,0400	0,0481
13	1,19	1,23	0,0710	0,0675
14	2,95	3,14	0,1309	0,1400
15	0,70	0,76	0,0411	0,0535
16	0,68	0,74	0,05000	0,0512

Регресійний аналіз отриманих результатів та перевірка одержаних математичних моделей проводилися згідно з методикою [7]. Розрахунок моделей здійснювався на ПЕОМ з використанням пакету прикладних програм ПРІАМ (планування, регресія і аналіз моделей). За результатами регресійного статистичного аналізу одержано залежності інтенсивності зношування Y₁ та коефіцієнту тертя Y₂ від технологічних та експлуатаційних факторів:

$$\begin{aligned}
 Y_1 = & 1,1641 + 1,7263x_6 - 0,781103z_6 + \\
 & + 0,241444z_5 + 0,129405x_5 + 0,410003x_1x_3x_6 - \\
 & - 0,0375308z_3x_4 + 0,0661872z_2z_4; \\
 Y_2 = & 0,0725402 + 0,0770153x_4x_6 - \\
 & - 0,019109z_3x_4z_5 + 0,013329x_2z_4z_5 + \\
 & + 0,0218935x_3x_4x_6 - 0,0403555x_1x_4z_5,
 \end{aligned}$$

де $x_1 = 0,0109934(X_1 - 177,25)$;
 $x_2 = 0,00887889(X_2 - 129,5)$;
 $z_2 = 1,4567(x_2^2 - 0,29932)$;
 $x_3 = 1(X_3 - 1)$;
 $z_3 = 1,59(x_3^2 - 0,775)$;
 $x_4 = 0,00895631(X_4 - 421,43)$;
 $z_4 = 1,55221(x_4^2 - 0,0933154x_4 - 0,499122)$;
 $x_5 = 1,97644(X_5 - 0,675)$;
 $z_5 = 2,2005(x_5^2 - 0,123453x_5 - 0,409243)$;
 $x_6 = 3,19624e - 0,089(X_6 - 1,626547e + 0,05)$;
 $z_6 = 6,49794(x_6^2 - 0,902846x_6 - 0,0688029)$.

Перевірка отриманих моделей за відповідними критеріями [8] показала їх адекватність, інформативність та стійкість.

На основі отриманих результатів за допомогою побудови відповідних геометричних поверхонь отримано наочне уявлення про графічний образ функції відгуку. По горизонталі обирали змінну, залежність відгуку від якої бажано дослідити. Опорною (такою, що приймає декілька значень) обирали змінну, що або входила у взаємодію з раніше обраною, або мала важливе значення при дослідженні. Решту змінних фіксували на визначених рівнях (рис. 1, 2).

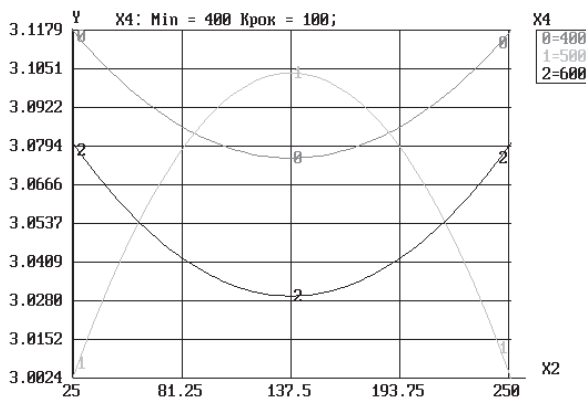


Рис. 1. Графік дослідження поверхні відгуку $Y_1 = f(X_2, X_4)$

З огляду на наявність двох критеріїв оптимізації та багатопараметричність технологічного процесу ГТЦ ІА, задача проведення багатокритеріальної оптимізації вирішувалася шляхом визначення ком-

промісної точки, яка повинна в рівній мірі задовольняти усім вимогам (компроміс за Парето). Ідея компромісу за Парето полягає в пошуку таких умов функціонування системи, за якими узагальнений критерій її оптимальності досягає екстремального значення. Як правило, результати по кожному окремому критерію є гіршими, ніж у випадку однокритеріальної оптимізації. Важливим є правильне визначення вагових коефіцієнтів критеріїв оптимізації, адже дуже часто важливість показників якості є нерівнозначною. У нашому випадку, застосовуючи метод експертних оцінок, встановлено наступні вагові коефіцієнти: для інтенсивності зношування – 0,75, для коефіцієнту тертя – 0,25.

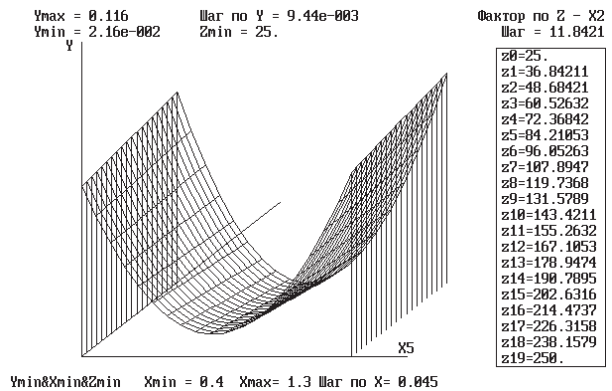


Рис. 2. Графік дослідження поверхні відгуку $Y_2 = f(X_5, X_2)$ у тривимірному просторі

При оптимізації технологічного процесу ГТЦ ІА в роботі використовувався метод випадкового пошуку на основі ЛП_r – рівномірно розподілених випадкових точок [10].

Після проведення багатокритеріальної оптимізації за моделлю було проведено серію перевірочних експериментів в областях трьох найкращих точок. Підсумкові результати наведено у таблиці 4. Аналіз результатів оптимізації показав, що найкращими (за умови мінімумів інтенсивності зношування та коефіцієнту тертя) параметрами технологічного процесу ГТЦ ІА є: тривалість процесу – 210...240 хв.; тиск реакційного газу – 115...130 Па; склад реакційної суміші – 15...30%N₂ + 70...85%Ar; температура у камері – 575...600°C.

Таблиця 4

Результати багатокритеріальної оптимізації

Значення факторів						Значення критеріїв		Відносна ефективність
X_1 , хв.	X_2 , Па	X_3 , %	X_4 , °C	X_5 , м/с	X_6 , МПа	$I_n \cdot 10^{-5}$ кг·см ⁻² на 1000 м шляху	μ	ν
240	125	15%N ₂ + 85% Ar	600	0,7	19,0	0,78946	0,03087	0,86332
220	130	30%N ₂ + 70% Ar	550	0,4	17,0	1,01989	0,1491	0,81987
210	115	30%N ₂ + 70% Ar	575	0,8	19,0	0,94113	0,06381	0,80099

Висновки

В результаті проведення експериментальних досліджень встановлено, що поверхнєве зміцнення сталі 18X2H4BA імпульсним ГТЦ ІА дозволяє підвищити її зносостійкість у 1,6...2,1 разу залежно від режиму обробки.

Використання результатів моделювання надає можливість вибору технологічних режимів ГТЦ ІА при відновленні та зміцненні сталевих деталей АТ на авіапідприємствах України. При цьому технологом будуть визначатися значення параметрів технологічного процесу, які, у поєднанні з експлуатаційними факторами, задовольнятимуть будь-які наперед задані вимоги до експлуатаційних властивостей зміцнюваних деталей АТ. Застосування створених моделей на виробництві дозволить уникнути витрат часу, людських та матеріальних ресурсів на проведення додаткових експериментів при зміні умов експлуатації або вимог до властивостей оброблених деталей.

Зважаючи на позитивний вплив підвищення триботехнічних характеристик елементів авіаконструкцій зі сталі 18X2H4BA після застосування ГТЦ ІА на ресурсні показники АТ, вважається за доцільне проведення подальших досліджень щодо оптимізації параметрів технологічного процесу для більш широкої номенклатури авіаматеріалів.

Список літератури

1. Пастух І.М. Модифікація металів з застосуванням азотування в тлеючому розряді: стан і перспективи / І.М. Пастух // Проблеми трибології. – 2004. – № 3. – С. 42-55.
2. Пат. 10014 Україна, МПК 7 C23C 8/06. Спосіб поверхневого зміцнення сталевих деталей іонно-плазмовим азотуванням у пульсуючому тліючому розряді / Б.А. Ляшенко, А.В. Рутковський, В.І. Мірненко, О.В. Радько; заявник та патентовласник Національна академія

оборони України. – № 19782; Заявл. 19.09.06; Опубл. 15.12.06, Бюл. № 12 – 5 с.

3. Особенности азотирования стали 30ХГСА в пульсирующем тлеющем разряде / Б.А. Ляшенко, В.И. Мирненко, О.В. Радько, С.А. Бобырь // Вісник Черкаського національного університету. Серія «Фізико-математичні науки». – 2007. – Вип. 117. – С. 107-112.

4. Кудрин А.П. Перспективные направления в области поверхностного упрочнения и восстановления деталей авиационной техники / А.П. Кудрин, В.Ф. Лабунец // Наукоємкіе технологии. – 2002. – № 5. – С. 14-18.

5. Мельников О.В. Ионно-плазменное азотирование деталей АТ, изготовленных из сталей и сплавов, в полом катоде / О.В. Мельников, А.О. Гаврелюк, О.А. Галабурда // Соверш. технол. процессов ремонта авиац. техн. / Моск. Гос. Техн. Ун-т гражданской авиации. – М.: Транспорт, 1997. – С. 39-51.

6. Бродский В.Э. Многофакторные регулярные планы / В.Э. Бродский. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1972. – 218 с.

7. Радченко С.Г. Математическое моделирование технологических процессов в машиностроении / С.Г. Радченко. – К.: Укрспецмонтажпроект, 1998. – 274 с.

8. Триботехнічні властивості зміцнених газотермоциклічним іонним азотуванням сталевих деталей авіаційної техніки / Б.А. Ляшенко, В.І. Мірненко, А.К. Скуратовський, О.В. Радько // Наукові вісті національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». – 2007. – № 5. – С. 98-102.

9. Пат. 24695 Україна, МПК (2006) G01N3/56. Машина тертя: Скуратовський А.К.; Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». – № у 200702330; Заявл. 03.03.2007; Опубл. 10.07.2007, Бюл. № 10 – 4 с.

10. Лапач С.Н. Статистические методы в фармакологии и маркетинге фармацевтического рынка / С.Н. Лапач, М.Ф. Пасечник, А.В. Чубенко. – К.: Укрспецмонтажпроект, 1999. – 312 с.

Надійшла до редколегії 23.05.2017

Рецензент: канд. техн. наук проф. Ю.І. Миргород, Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НАНЕСЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ТРИБОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ДЕТАЛИ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

О.В. Радько, А.К. Скуратовский, А.В. Рутковский, А.И. Кремешный

В статье приведены результаты оптимизации по триботехническим критериям технологического процесса импульсного газотермоциклического ионного азотирования деталей авиационной техники из стали 18X2H4BA. Предложенная математическая модель позволяет выбирать оптимальные значения технологических параметров процесса в зависимости от реальных условий эксплуатации конструктивных элементов летательных аппаратов для повышения ресурсных показателей и заданного уровня исправности боевой авиационной техники.

Ключевые слова: оптимизация, газотермоциклическое ионное азотирование, триботехнические критерии, детали авиационной техники.

OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES OF TRIBOTECHNICAL APPLICATION PROTECTIVE COATINGS TREATMENT FOR AVIATION TECHNIQUE DETAILS

O.V. Radko, A.Y. Skuratovsky, A.V. Rutkovsky, A.I. Kremeshnyy

The article presents the results of optimization of the technological process of pulsed gas-thermocyclic ionic nitriding of aircraft components from steel 18X2H4BA according to tribotechnical criteria. The suggested mathematical model allows to choose optimal values of process technological parameters depending on actual operating conditions of structural elements of flying machines for increasing resource indices and a given level of serviceability of combat aviation technique.

Keywords: optimization, gas-thermocyclic ion nitriding, tribotechnical criteria, aviation technique details.