

## ЗАСТОСУВАННЯ МЕТАЛЕВИХ ТА НЕМЕТАЛЕВИХ ПОКРИТТІВ

УДК 623.746: 629.7.083.003.13 (045)

О. В. Радько, канд. техн. наук

### ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ФОРМУВАННЯ ЗАХИСНИХ СТРУКТУР ТРИБОТЕХНІЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Національний авіаційний університет

*Наведено результати оптимізації за триботехнічними критеріями технологічного процесу імпульсного газотермоциклічного іонного азотування деталей машин та механізмів на прикладі сталі 38Х2МЮА. Запропонована математична модель дозволяє обирати оптимальні значення технологічних параметрів залежно від умов експлуатації зміцнених деталей.*

**Вступ.** Терміни служби сучасних машин та механізмів значною мірою залежать від довговічності їх трибосполучень, які працюють у широкому діапазоні навантажень, швидкостей тертя та температур. Це 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.

Одним з перспективних методів поверхневого зміцнення на сучасному етапі є іонне азотування [1], зокрема його удосконалений варіант – імпульсне газотермоциклічне іонне азотування (ГТЦ ІА) [2]. Аналіз досліджень і публікацій щодо використання ІА на практиці [3–5] 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 щодо 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 ці критерії 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 машин та механізмів.

**Постановка завдання.** Метою роботи є вирішення задачі багатокритеріальної оптимізації технологічного процесу імпульсного ГТЦ ІА конструкційних елементів літальних апаратів зі сталі 38Х2МЮА за триботехнічними критеріями (інтенсивністю зношування та коефіцієнтом тертя).

**Методика досліджень.** Зміцнення імпульсним ГТЦ ІА зразків розміром  $5 \times 5 \times 10$  мм зі сталі 38Х2МЮА здійснювалося за допомогою установки ВПА-1 [2].

Триботехнічні характеристики іонноазотованих шарів визначалися на машині тертя [3] за наступних умов: мастильне середовище – мастило ЦИАТИМ-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».

У якості критеріїв оптимізації було обрано інтенсивність зношування та коефіцієнт тертя.

**Результати досліджень.** З огляду на недостатню кількість відомостей щодо механізму процесу ГТЦ ІА, значну кількість параметрів, що визначають умови його протікання, та наявність декількох критеріїв оптимізації, для скорочення часу та матеріальних витрат на проведення експериментальних досліджень було застосовано теорію планування експерименту. При цьому технологічний процес ГТЦ ІА було представлено у вигляді кібернетичного ящика [6].

Використовуючи методи експертної оцінки та зробивши серію відсіюючих експериментів, отримано середній апріорний ранжирований ряд факторів, що впливають на технологічний процес ГТЦ ІА. На підставі аналізу проведеного ранжування визначено

групу факторів, що найбільше впливають на величину критеріїв оптимізації. В матрицю планування у якості керованих факторів увійшли: час дифузійного насичення, тиск та склад реакційного газу, температура процесу азотування, швидкість ковзання та питоме навантаження, за яких експлуатуються досліджувані сталеві трибоелементи (табл. 1).

Таблиця 1

**Фактори і рівні їх варіювання**

Фактори	Час дифузійного насичення, хв	Тиск реакційного газу, Па	Склад реакційного газу, %	Температура процесу, °С	Швидкість ковзання, м/с	Навантаження, МПа		
Позначення	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$		
Рівні варіювання	90	2,5	95%N <sub>2</sub> + 5%C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	400	0,4	25		
		7,5				75		
	120	10,0			90%N <sub>2</sub> + 5%C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> + 5%Ar	500	0,7	100
	150	12,5						125
	180	15,0	80%N <sub>2</sub> +5%C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> + 15%Ar	600			1,0	150
		17,5						175
	210	20,0			200			
		22,5				225		
	240	25,0	250					

Під час проведення досліджень використовували план експерименту, згенерований на основі ЛП<sub>т</sub> – чисел, тому що такі плани 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 поверхневих шарів зразків зі сталі 38Х2МЮА (згідно з планом експерименту) одержано значення триботехнічних характеристик зміцнених поверхневих шарів при різних значеннях технологічних та експлуатаційних факторів (табл. 3).

Регресійний аналіз результатів експериментальних досліджень та перевірка одержаних математичних моделей проводились 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  $Y_1$  та коефіцієнту тертя  $Y_2$  від технологічних та експлуатаційних факторів:

$$Y_1 = 1,1743 + 1,8274x_6 - 0,771001z_6 + 0,231453z_5 + 0,131406x_5 + 0,410003x_1x_3x_6 - 0,0375308z_3x_4 + 0,0661872z_2z_4;$$

$$Y_2 = 0,0623403 + 0,0760156x_4x_6 - 0,021019z_3x_4z_5 + 0,013423x_2z_4z_5 + 0,0209753x_3x_4x_6 - 0,0503345x_1x_4z_5$$

де  $x_1 = 0,0115931(X_1 - 156,25)$ ;  $x_2 = 0,00887679(X_2 - 129,5)$ ;  $z_2 = =1,4883(x_2^2 - 0,33967)$ ;  $x_3 = 1(X_3 - 1)$ ;  $z_3 = 1,63(x_3^2 - 0,675)$ ;  $x_4 = =0,00935676(X_4 - 497,35)$ ;  $z_4 = 1,65551(x_4^2 - 0,0912163x_4 - 0,0605111)$ ;  $x_5 = 2,05248(X_5 - 0,7125)$ ;  $z_5 = 2,1305(x_5^2 - 0,111523x_5 - 0,410332)$ ;  $x_6 = 3,26514e - 0,076(X_6 - 2,62787e + 0,05)$ ;  $z_6 = 6,49794(x_6^2 - 0,902846x_6 - -0,0688029)$ .

Таблиця 3

**Результати експериментальних досліджень**

№ з/п	Інтенсивність зношування, $I_{п} \cdot 10^{-5}$ кг·см <sup>-2</sup> на 1000 м шляху		Коефіцієнт тертя, $\mu$	
	$Y_{11}$	$Y_{12}$	$Y_{21}$	$Y_{22}$
1	0,71	0,78	0,0480	0,0511
2	1,21	1,18	0,0600	0,0710
3	0,84	0,91	0,0611	0,0621
4	0,71	0,69	0,0530	0,0500
5	0,97	1,01	0,0530	0,0520
6	2,52	2,40	0,1010	0,1023
7	0,70	0,70	0,0420	0,0523
8	1,10	0,98	0,0620	0,0625
9	0,90	0,92	0,0513	0,0528
10	0,91	0,90	0,0530	0,0500
11	1,16	1,26	0,0761	0,0736
12	0,73	0,80	0,0411	0,0501
13	1,12	1,21	0,0720	0,0628
14	3,23	3,20	0,1380	0,1476
15	0,71	0,72	0,0453	0,0501
16	0,64	0,72	0,05000	0,0512

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

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

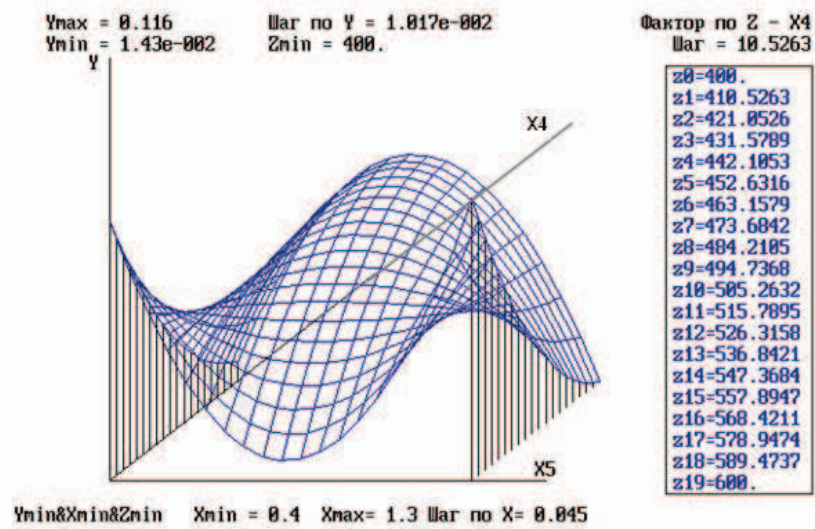


Рис. 1. Графік дослідження поверхні відгуку  $Y_2 = f(X_5, X_4)$

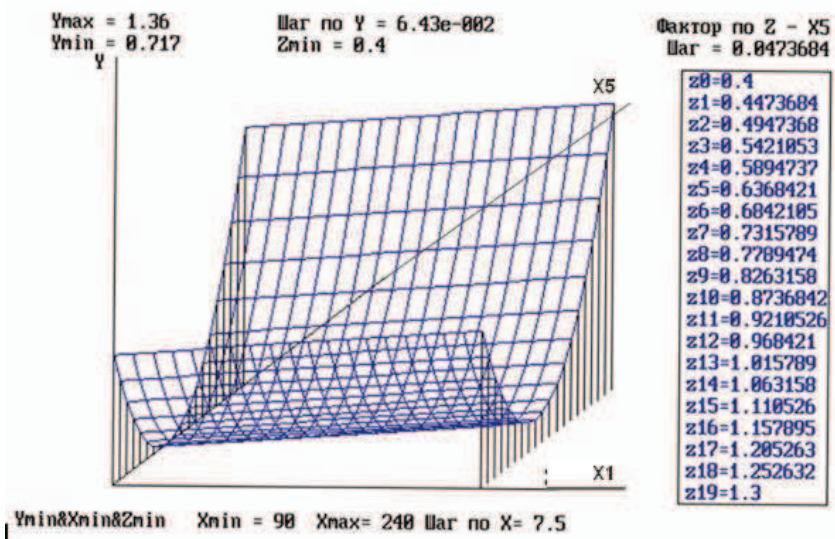


Рис. 2. Графік дослідження поверхні відгуку  $Y_2 = f(X_1, X_5)$

Враховуючи наявність двох критеріїв оптимізації та багато-параметричність технологічного процесу ГТЦ ІА, виникає задача проведення багатокритеріальної оптимізації шляхом визначення деякої компромісної 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.

При оптимізації технологічного процесу ГТЦ ІА в роботі використовувався метод випадкового пошуку на основі ЛП<sub>т</sub> – рівномірно розподілених випадкових точок [8].

Після проведення багатокритеріальної оптимізації за моделлю було проведено серію перевірочних експериментів в областях трьох найкращих точок. Підсумкові результати наведено у табл. 4.

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 <sup>-2</sup> на 1000 м шляху	$\mu$	$\nu$
160	110	90%N <sub>2</sub> + +5%С <sub>3</sub> Н <sub>8</sub> + + 5%Ar	600	0,7	19,0	0,88532	0,03010	0,85951
180	115	80%N <sub>2</sub> + +5%С <sub>3</sub> Н <sub>8</sub> + + 15%Ar	575	0,4	17,0	1,08412	0,15138	0,81987
200	125	80%N <sub>2</sub> + +5%С <sub>3</sub> Н <sub>8</sub> + + 15%Ar	595	0,8	19,0	0,94113	0,06381	0,80267

Аналіз результатів оптимізації показує, що найкращі (за умови досягнення мінімальних значень інтенсивності зношення та коефіцієнту тертя) параметри технологічного процесу ГТЦ ІА знахо-

дяться у наступних межах: тривалість процесу – 160...200 хв.; тиск реакційного газу – 110...125 Па; склад реакційної суміші – 80...90%N<sub>2</sub> + 5%С<sub>3</sub>Н<sub>8</sub> + 5...15%Ar; температура у вакуумній камері – 570...600°С (в районі критичної точки діаграми залізо – азот - температури евтектоїдного перетворення  $T = 591^{\circ}\text{C}$ , яка відокремлює області з різним фазовим складом).

**Висновки.** Використання результатів моделювання та багатокритеріальної оптимізації надає можливість вибрати технологічні режими ГТЦ ІА при відновленні та зміцненні поверхонь деталей машин і механізмів на машинобудівних підприємствах України. При цьому технологом будуть визначатися саме такі значення параметрів технологічного процесу, які, у поєднанні з експлуатаційними факторами, задовольнять будь-які наперед задані вимоги до експлуатаційних, зокрема триботехнічних, властивостей зміцнюваних деталей. 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.

З огляду на позитивний вплив підвищення триботехнічних характеристик деталей зі сталі 38Х2МЮА після застосування ГТЦ ІА на надійність машин і механізмів, вважається за доцільне проведення подальших досліджень щодо оптимізації параметрів технологічного процесу формування дифузійних іонноазотованих шарів для більш широкої номенклатури матеріалів.

### Список літератури

1. *Пастух И.М.* Модификация металлов с применением азотирования в тлеющем розряде: состояние и перспективы // Проблемы трибологии – 2004. – № 3. – С. 42–55.
2. Пат. 10014 Україна, МПК 7 С23С 8/06. Спосіб поверхневого зміцнення сталевих деталей іонно-плазмовим азотуванням у пульсуючому тліючому розряді: Ляшенко Б.А., Рутковський А.В., Мірненко В.І, Радько О.В.; заявник та патентовласник Національна академія оборони України. – № 19782; Заявл. 19.09.06; Опубл. 15.12.06, Бюл. №12 – 5 с.
3. *Кедрин А.П., Лабунец В.Ф.* Перспективные направления в области поверхностного упрочнения и восстановления деталей авиационной техники // Научноёмкие технологии. – 2002. – № 5. – С. 14–18.



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

5. Бень В.П. Несущая способность материала и конструктивных элементов с покрытиями в экстремальных условиях эксплуатации: Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.07.04/ВАТ УНДИАТ. – К., 2004. – 20 с.

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

7. Радченко С.Г. Математичне моделювання та оптимізація технологічних систем: Навчальний посібник. – К.: ІВЦ “Політехніка”, 2001. – 88 с.

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

**Ключові слова:** оптимізація, триботехнічні критерії, іонне азотування, інтенсивність зношування.

**Радько О.В. Оптимизация технологических процессов формирования защитных структур триботехнического назначения // Проблемы тертя та зношування: Наук.-техн. зб. – К.: Вид-во НАУ «НАУ-друк», 2011. – Вип. 55. – С.173–181.**

Приведены результаты оптимизации по триботехническим критериям технологического процесса импульсного газотермоциклического ионного азотирования деталей машин и механизмов на примере стали 38Х2МЮА. Предложенная математическая модель позволяет выбирать оптимальные значения технологических параметров в зависимости от условий эксплуатации упрочненных деталей.

Рис. 2, табл. 4, список лит.: 8 наим.

**Ключевые слова:** оптимизация, триботехнические критерии, ионное азотирование, интенсивность изнашивания.

**Radko O.V. Optimization of technological processes of tribotechnical application protective structures formation**

The results of optimization by tribotechnical criteria for pulsed gasthermocyclic ionic nitriding technological process of machine parts and mechanisms on an example of steel 38X2MЮA are given. The mathematical model allows to select the optimal values of process parameters depending on the hardened parts operating conditions.

Стаття надійшла до редакції 9.03.2011