

УДК 620.621.539.669

Бабак В. П.¹, Щепетов В. В.¹, Мірненко В. І.², Недайборщ С. Д.³

¹ Інститут технічної теплофізики НАН України. Україна, м. Київ

² Національний університет оборони України ім. Івана Черняховського. Україна, м. Київ

³ Державне підприємство «Завод 410 ЦА». Україна, м. Київ

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФОРМУВАННЯ ДЕТОНАЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ

Запропоновано математичну модель аналізу причинно-наслідкових залежностей між технологічними та експлуатаційними факторами при формуванні зносостійких детонаційних покриттів. Показано, що проведення багатокритеріальної оптимізації детонаційних покриттів дозволяє поєднати технологічні та експлуатаційні фактори, які забезпечують отримання покриттів з заданими властивостями. В результаті серії експериментів підтверджено, що адгезійну міцність можна розраховувати з високою точністю за інтенсивністю.

Ключевые слова: детонаційні покриття; зносостійкість; інтенсивність зношування.

Вступ

Теоретичною основою побудови математичних моделей за емпіричними даними є, як відомо, планування експериментів і регресійний аналіз [1]. При загальній позитивній ефективності та доцільності впровадження детонаційних технологій, розширення потенціальних можливостей методу пов'язано з проблемою побудови адекватних математичних моделей, що враховують комплекс факторів та їх вплив на формування якісних покриттів. Відсутність рекомендацій щодо кваліфікаційного наукового аналізу емпіричних результатів ускладнює можливості оптимізації режимів нанесення покриттів з відповідними триботехнічними властивостями [2, 3].

Мета роботи

Побудова математичної моделі, яка б враховувала комплексний підхід до оцінювання якості зносостійких детонаційних покриттів у поєднанні з визначенням кількісних закономірностей, що характеризують вплив як технологічних факторів формування покриттів, так і вплив умов їх експлуатації.

Результати досліджень та обговорення результатів

Набутий досвід підтверджує, що вивчення впливу технологічних та експлуатаційних факторів на критерії оптимізації процесу формування зносостійких покриттів дає реальні можливості врахувати вплив основних факторів, що інтегрально оцінюють, з одного боку, вплив технологічних факторів, з іншого і значення експлуатаційних факторів.

Критеріями оптимізації технологічного процесу формування детонаційних покриттів є інтенсивність зношування (Y_1), адгезійна міцність зчеплення покриття з основою (Y_2) та мікротвердість сформованих покриттів (Y_3). Для оцінки адекватного впливу технологічних та експлуатаційних факторів була проведена серія експериментів, в результаті яких визначені найбільш значимі фактори та рівні їх варіювання (табл. 1).

Для забезпечення побудови регресійних моделей при встановлених вимогах (кількість факторів і рівнів варіювання) використовувалися робастні плани експерименту на основі ЛП-последовностей [4, 5, 6]. Використання яких має переваги перед іншими типами планів, а саме:

довільна кількість рівнів варіювання (може дорівнювати кількості дослідів);

можливість побудови плану зі збереженням всіх попередніх дослідів;

план одночасно є планом для пошуку оптимуму.

Зазначені переваги дають можливість при відносно невеликій кількості дослідів підвищити їх надійність.

Робоча матриця експерименту наведена в табл. 2.

На основі проведених експериментальних досліджень та отриманих результатів побудовано математичні моделі, що характеризують вплив факторів на критерії оптимізації. При побудові математичних моделей використовували пакет прикладних програм «ПРІАМ (планування, регресія та аналіз моделей)» [7, 8]. При пошуку структури регресійної моделі аналізувалися степені факторів до третьої включно, а також подвійні і потрійні взаємодії, всього 1366 ефектів. Для підвищення ймовір-

Таблиця 1

Фактор та їх рівні варіювання

Фактор	Назва фактору	Умовне позначення і одиниці вимірювання	Мінімальне значення	Максимальне значення	Крок зміни
X_1	Дистанція напилення	L , мм	140	220	20
X_2	Подача порошку	G , мг/в	180	300	30
X_3	Сумарна витрата суміші	W , л/хв.	35	95	15
X_4	Температура напилення	T° , К	280	340	15
X_5	Матеріал	M	M_1 (Cr-Si-B)	M_2 (Ni-Cr-Al-B)	
X_6	Швидкість ковзання	V , м/с	0,1	1,1	0,2
X_7	Навантаження	P , МПа	0,2	2,2	0,2
X_8	Експлуатаційна температура	t° , С	60	160	20

Таблиця 2

Робоча матриця експерименту в натуральних координатах

№ експерименту	Фактори							
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8
1	180	240	65	310	M_1	0,5	1	100
2	160	270	50	325	M_1	0,9	0,6	140
3	200	210	80	295	M_2	0,3	1,8	80
4	140	270	95	340	M_2	0,1	1	100
5	200	180	50	295	M_1	0,7	2,2	160
6	160	210	80	280	M_2	1,1	0,2	120
7	220	300	35	325	M_1	0,5	1,4	60
8	140	300	80	295	M_1	0,1	1	120
9	180	240	35	340	M_2	0,7	2,2	60
10	160	180	95	310	M_1	0,9	0,6	80
11	220	270	65	280	M_2	0,3	1,8	140
12	140	210	50	325	M_2	0,3	0,2	160
13	200	300	95	280	M_1	0,9	1,4	100
14	180	240	35	310	M_2	1,1	0,6	80
15	220	180	65	340	M_1	0,5	1,8	140
16	140	240	65	295	M_1	0,3	2,2	80
17	180	180	95	325	M_2	0,9	1,0	140
18	160	210	35	340	M_1	0,7	1,8	120
19	200	270	80	310	M_2	0,1	0,6	60
20	140	180	65	340	M_2	0,5	1,4	60
21	200	270	35	295	M_1	1,1	0,2	120
22	180	300	80	280	M_2	0,7	2,2	160
23	220	240	50	310	M_1	0,1	1,0	100
24	140	240	95	310	M_1	0,5	1,4	160
25	180	300	50	340	M_2	1,1	0,2	100
26	160	270	65	325	M_1	0,7	1,8	60
27	220	210	35	280	M_2	0,1	0,6	120
28	160	300	50	310	M_2	0,5	2,2	140
29	200	210	80	280	M_1	1,1	1,0	80
30	180	180	65	295	M_2	0,9	1,4	100
31	220	240	95	325	M_1	0,3	0,2	160
32	140	270	95	325	M_2	1,1	1,8	160

ності правильного визначення структури і поліпшення обчислювальної стійкості попередньо виконувалося перетворення з використанням поліномів Чебишева і нормування [9].

Отримані наступні регресійні моделі:
Інтенсивність зношування I (мм³/км·см²):

$$Y_1 = 0,727706 + 0,464883x_1^2x_6^2 + 0,249706x_7 + 0,144657x_8^2.$$

Адгезійна міцність σ (МПа):

$$Y_2 = 101,797 - 12,9269x_6^2x_7^2 - 10,7977x_6^2x_7^3 + 6,87175x_1^2x_8 + 11,1787x_1^2x_2x_3^3 + 5,01613x_6^3 + 5,017x_1^2x_2^2x_3^3 + 4,43211x_2x_3 + 3,67725x_6^3x_8^3.$$

Мікротвердість Нμ (МПа):

$$Y_3 = 7902,24 + 883,829x_4 + 1259,82x_1x_2 + 1029,81x_4x_7 + 572,278x_6x_8^3 - 369,151x_2^3x_8 + 495,122x_1^2x_6^3 + 481,52x_2x_3^3 - 307,163x_3^2x_7^3 + 156,288x_2x_7 + 375,108x_2^3x_7^3 + 311,243x_3^2x_7.$$

Формули переходу від кодованих значень до натуральних:

$$x_1 = 0,0242424(X_1 - 178,75);$$

$$x_1^2 = 1,99793(X_1^2 - 0,0302437X_1 - 0,469238);$$

$$x_2 = 0,0164103(X_2 - 240,938);$$

$$x_2^2 = 1,94345(X_2^2 + 0,038087X_2 - 0,461775);$$

$$x_2^3 = 3,40976(X_2^3 + 0,034274X_2^2 - 0,814547X_2 + 0,00176048);$$

$$x_3 = 0,0323232(X_3 - 65,9375);$$

$$x_3^2 = 1,99793(X_3^2 + 0,0302437X_3 - 0,469238);$$

$$x_3^3 = 3,58752(X_3^3 + 0,0789957X_3^2 - 0,805428X_3 - 0,0228763);$$

$$x_4 = 0,0328205(X_4 - 310,469);$$

$$x_6 = 1,95122(X_6 - 0,6125);$$

$$x_6^2 = 1,83664(X_6^2 + 0,00876875X_6 - 0,446758);$$

$$x_6^3 = 3,78268(X_6^3 + 0,0676657X_6^2 - 0,777002X_6 - 0,0263127);$$

$$x_7 = 0,987654(X_7 - 1,2125);$$

$$x_7^2 = 1,85727(X_7^2 + 0,0227702X_7 - 0,438805);$$

$$x_7^3 = 3,93761(X_7^3 + 0,0446811X_7^2 - 0,774628X_7 - 0,00961461);$$

$$x_8 = 0,0195122(X_8 - 111,25);$$

$$x_8^3 = 3,78268(X_8^3 + 0,0676657X_8^2 - 0,777002X_8 - 0,0263127).$$

У формулах переходу x, x^2, x^3 є формулами побудови ортогональних контрастів (перетворення до ортогональних поліномів Чебишева). Всі моделі інформативні ($F_{r\text{розр.}} > F_{r\text{кр.}}, \gamma \geq 2$), адекватні ($F_{\text{розр.}} > F_{\text{кр.}}$) та стійкі (cond близьке до 1). Гіпотези перевірялися при рівні значимості $\alpha = 0,05$. Адекватність без повторних дослідів перевіряли за методикою [5]. Апроксимаційні властивості задовільні. Основні характеристик моделей приведені в табл. 3.

Аналіз моделей та обчислювальний експеримент

Інтенсивність зносу. Основний вплив на інтенсивність зношування чинить нелінійна взаємодія дистанції напилювання X_1 і швидкості ковзання X_6 (48,6%) та навантаження X_7 (22,2%) і значно менша експлуатаційна температура X_8 (5,1%).

Таблиця 3

Статистичні характеристики регресійних моделей

Характеристики		Регресійна модель		
		Y_1	Y_2	Y_3
Інформативність	R	0,851	0,968	0,991
	F_r розрахункове	29,45	43,19	99,84
	F_r критичне (ν_1, ν_2)	2,95 (3,28)	2,37 (8,23)	2,31 (20,5)
	γ критерію Бокса-Веца	2	3	11
Адекватність	F розрахункове	3,87	11,96	28,2
	F критичне	1,19	1,35	1,46
Стійкість	Число обумовленості (cond)	1,734	1,55	1,61
Описові властивості	Похибка апроксимації (%)	7,67	2,39	1,47

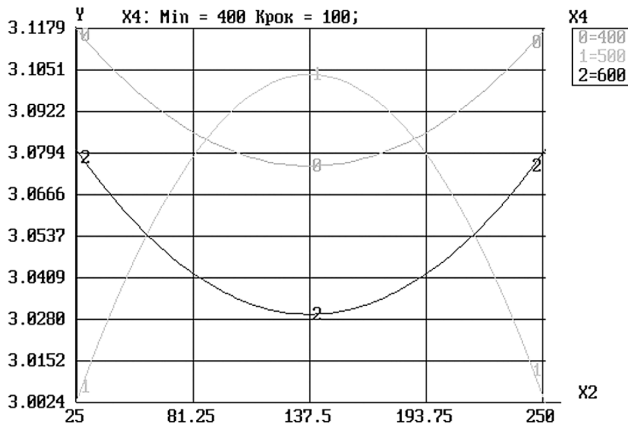


Рис. 1. Залежність інтенсивності зношування Y_1 від X_2 та X_4 ($X_7 = 0,2$; $X_8 = 60$)

Характер впливу окремих факторів на відгук добре видно з графіків часткових рівнянь регресії (рис. 1) та поверхонь відгуку для окремих факторів (рис. 2).

Адгезійна міцність. Основний вплив на адгезійну міцність чинять нелінійні взаємодії швидкості ковзання X_6 та навантаження X_7 факторів (60,7% розсіяння), взаємодія дистанції напилювання X_1 та експлуатаційної температури X_8 факторів (12,3%) і залежність 3 степені від швидкості ковзання X_6 фактору (8,3%). Всі ніші ефекти мають вплив в межах 1,7–4,2% розсіяння.

Характер впливу окремих факторів на відгук проілюстровано на графіках часткових рівнянь регресії (рис. 3) та поверхні відгуку (рис. 4).

Мікротвердість. Мікротвердість значною мірою залежить від X_4 фактору (30,1% розсіяння) та нелінійних взаємодій X_1 та X_2 факторів (22,2%), X_4 та X_7 факторів (20,1%), X_6 та X_8 факторів (6,8%). Всі інші ефекти мають вплив в межах 0,95–5,6% розсіяння.

На рис. 5 (часткові рішення регресії) та рис. 6 (поверхня відгуку) представлено вплив на відгук деяких факторів.

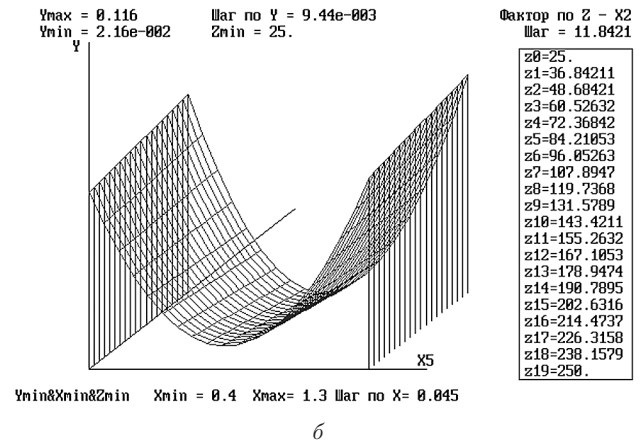
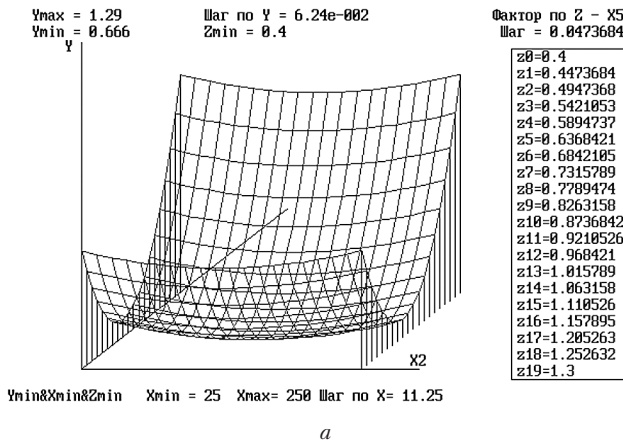


Рис. 2. Залежність інтенсивності зношування Y_1 :
а – від X_1 та X_7 ($X_6 = 1$; $X_8 = 60$); б – від X_1 та X_8 ($X_6 = 1,1$; $X_7 = 2,2$)

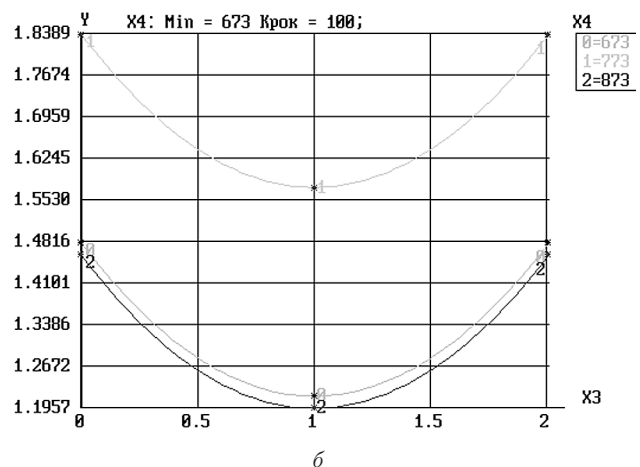
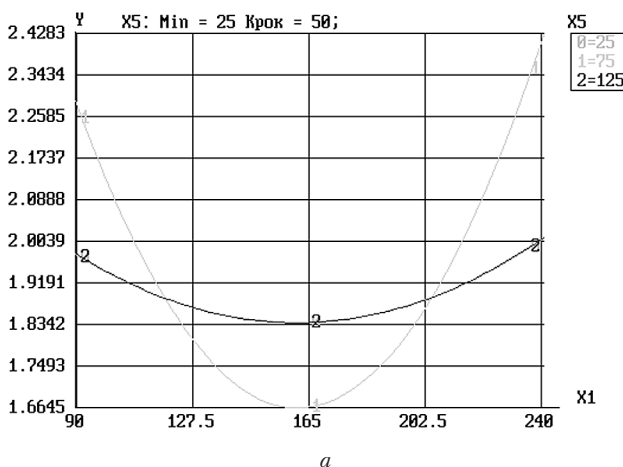


Рис. 3. Залежність адгезійної міцності Y_2 :
а – від X_1 та X_5 ($X_2 = 300$; $X_3 = 35$; $X_8 = 60$); б – від X_3 та X_4 ($X_1 = 220$; $X_2 = 300$; $X_6 = 0,1$; $X_7 = 0,2$; $X_8 = 60$)

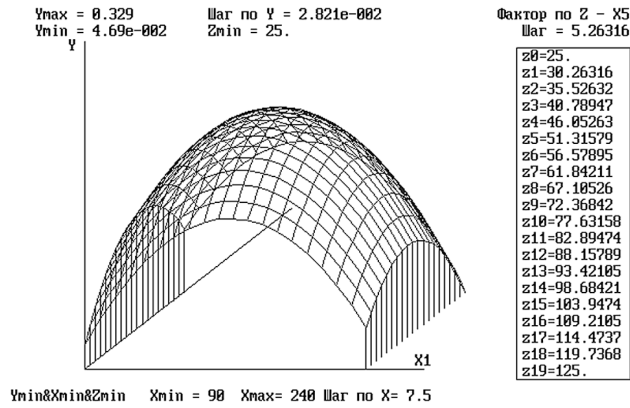
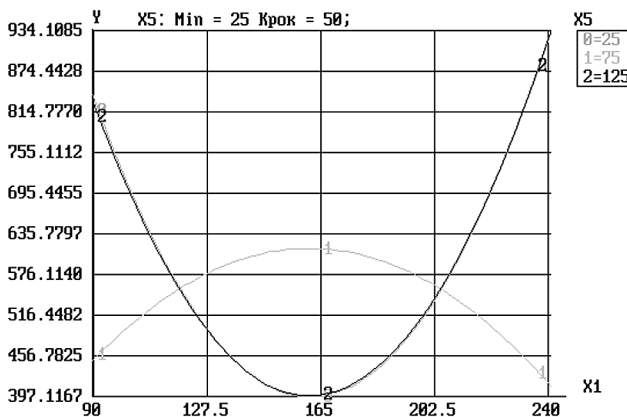


Рис. 4. Залежність адгезійної міцності Y_2 від X_1 та X_5 ($X_2 = 300$; $X_3 = 35$; $X_4 = 0,2$; $X_8 = 60$)

Дослідження залежності між показниками

Проведено дослідження прогнозування інтенсивності зношування Y_1 від адгезійної міцності Y_2 . За експериментальними даними була побудована залежність $Y_1 = F(Y_2)$.

$$Y_1(Y_2) = 49,1667 - 41,0714x_1 + 2,97619x_1^2,$$



$$\text{де: } x_1 = 0,0266667(X_1 - 102,5); \quad x_1^2 = 1,875(X_1^2 - 0,466667X_1 + 0,372591).$$

Модель інформативна ($R = 0,998$; $F_{\text{розн.}} = 399,25 > F_{\text{кр.}} = 9,55$; $\gamma = 6$), адекватна ($F_{\text{розн.}} = 160,3 > F_{\text{кр.}} = 9,55$), стійка ($\text{cond} = 1$) з похибкою апроксимації 4,17%.

Нелінійність моделі незначна: лінійна складова пояснює 99% розсіяння, нелінійна – 0,6%. На рис. 7 наведено графік часткового рішення регресії, який побудований за моделлю, та показано експериментальні точки.

Проведено дослідження прогнозування адгезійної міцності Y_2 за інтенсивністю зношування Y_1 . За експериментальними даними була побудована залежність $Y_2 = F(Y_1)$.

$$Y_2(Y_1) = 102,5 - 41,4301x_1 + 3,08978x_1^2,$$

$$\text{де: } x_1 = 0,0218182(X_1 - 49,1667); \quad x_1^2 = 2,07577(X_1^2 - 0,139738X_1 - 0,378512).$$

Модель адекватна ($F_{\text{розн.}} = 281,13 > F_{\text{кр.}} = 9,55$), стійка ($\text{cond} = 1$) з похибкою апроксимації 1,11%.

Нелінійність моделі незначна: лінійна складова пояснює 99% розсіяння, нелінійна – 0,8%. На рис. 8

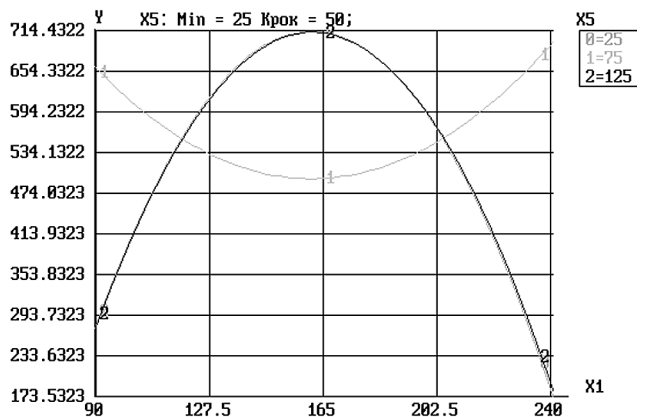


Рис. 5. Залежність мікротвердості Y_3 :

a – від X_1 та X_5 ($X_2 = 300$; $X_3 = 35$; $X_4 = 280$; $X_6 = 0,1$; $X_7 = 0,2$; $X_8 = 60$); b – від X_1 та X_5 ($X_2 = 300$; $X_4 = 280$; $X_6 = 0,1$; $X_7 = 0,2$; $X_8 = 60$)

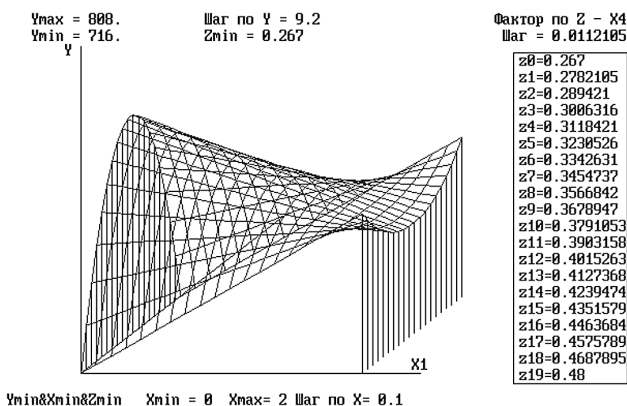


Рис. 6. Залежність мікротвердості Y_3 від X_1 та X_4 ($X_2 = 300$; $X_3 = 35$; $X_6 = 0,1$; $X_7 = 0,2$; $X_8 = 60$)

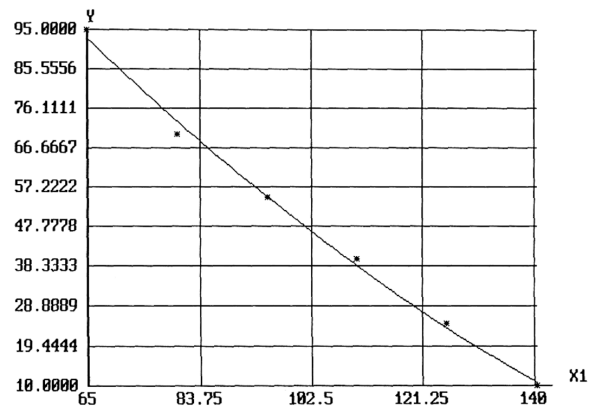


Рис. 7. Залежність інтенсивності зношування Y_1 від адгезійної міцності Y_2

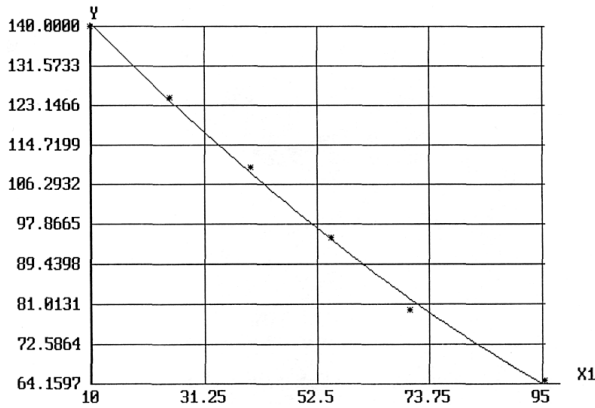


Рис. 8. Залежність адгезійної міцності Y_2 від інтенсивності зношування Y_1

приведений графік часткового рішення регресії, який побудований за моделлю, та показано експериментальні точки.

В табл. 4 приведені зведені статистичні характеристики моделей.

гічних та експлуатаційних факторів, які забезпечують отримання покриттів з заданими властивостями.

Література

- [1] Радченко С.Г. Устойчивые методы оценивания статистических моделей — К.: ПП «Санпарель». — 2001. — 504 с.
- [2] Ляшенко Б.А., Соловых Е.К., Мирненко В.И. и др. Оптимизация технологии нанесения покрытий по критериям прочности и износостойкости: монография. / К.: ИПП НАН Украины. — 2010. — 193 с.
- [3] Сорокатый Р.В. Анализ современного состояния методов расчета износа и прогнозирования ресурса узлов трения Проблемы трибологии. — 2007. — №3. — С. 22-36.
- [4] Бабак В.П. Статистична обробка даних: монографія / В.П. Бабак, А.Я. Білецький, П.О. Приставка / К.: МІВВЦ. — 2001. — 388 с.
- [5] Щепетов В.В. Повышение износостойкости детонационных покрытий путем оптимизации режимов

Таблица 4

Статистичні характеристик регресійних моделей

Характеристики		Регресійна модель	
		$Y1 = F(Y2)$	$Y2 = F(Y1)$
Інформативність	R	0,998	0,998
	Fg розрахункове	399,25	701,33
	Fg критичне (1, 2)	9,55	9,55
	критерію Бокса-Веца	6	8
Адекватність	F розрахункове	160,3	281,13
	F критичне	9,55	4,42
Стійкість	Число обумовленості (cond)	1	1
Описові властивості	Похибка апроксимації (%)	4,17	1,11

З аналізу моделей можна зробити висновок, що адгезійну міцність Y_2 можна розраховувати за інтенсивністю зношування Y_1 з високою точністю.

Висновки

Побудовані за результатами експерименту регресійні залежності характеристик залежно від умов експлуатації і технологічних параметрів нанесення покриття мають адекватні статистичні властивості і дозволяють проводити обчислювальні розрахунки з метою дослідження та розробки оптимальних механічних властивостей детонаційних покриттів. Таким чином, проведення багатокритеріальної оптимізації технологічного процесу формування детонаційних покриттів дозволяє встановити поєднання техно-

- напыления Трение и износ. — 1999. — Т11. — №5. — С. 844-848.
- [6] Dauxois T., Peyrard M. A nonlinear model for DNA melting// Nonlinear excitation in biomolecules. Ed. M.Peyrard. — Berlin: Springer-Verlag. — 1995. — Pp. 127-136.
- [7] Marko J.F., Siggia E.D. Statistical mechanics of supercoiled DNA // Physical Review D. — 1995. — V.52. — № 3. — Pp. 2912-2938.
- [8] Peyrard M. The pathway to energy localization in nonlinear lattices // Physica D. — 1998. — V.119. — Pp.184-199.
- [9] Peyrard M. Using DNA to probe nonlinear localized excitations? // Europhys. Lett. — 1998. — V.44. — № 3. — Pp.271-277.

Babak V.P.¹, Shchepetov V.V.¹, Mirnenko V.I.², Nedayborshch S. D.³

¹ Institute for Engineering Thermophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Ukraine, Kiev.

² National Defence University of Ukraine named after Ivan Chernyakhovsky, Ukraine, Kiev

³ State Enterprise «PLANT 410». Ukraine, Kiev.

MATHEMATICAL DESIGN OF FORMING OF DETONATION COATINGS

A mathematical model offers analysis of cause-effect relationships of between technological and operational factors in the formation of wear resistant detonation coatings. In the formation of wear resistant detonation coatings. It is shown that the conduct optimization detonation coating allows you to combine technological and operational factors ensuring receipt of specified properties. As a result of a series experiments confirmed, that the adhesive strength can be expected with high accuracy the intensity.

Keywords: detonation coatings; wear resistance; the intensity of wear.

References

- [1] Radchenko S. Gh. Sustainable methods of evaluation statistical models – K.: PP «Sanparelj». – 2001. – 504 p.
- [2] Lyashenko B.A., Soloviyh E.K., Mirnenko V.I. i dr. Optimizatsiya tehnologii naneseniya pokrytivy po kriteriyam prochnosti i iznosostoykosti: monografiya. / K.: IPP NAN Ukrainyi. – 2010. – 193 p.
- [3] Sorokatyj R.v Analysis of the current state of the methods of calculating depreciation and resource prediction of friction units / Problems of Tribology. – 2007. – №3. – Pp. 22-36.
- [4] Babak v.p. Statistical data processing: monograph / v.p.Babak, a.j.Bilecjkyj, p.o.Prystavka //: K.: MIVVC. – 2001. – 388 p.
- [5] Shchepetov V.V. increase of wear resistance coating by detonation spraying modes optimization / Friction and wear. – 1999. – T11. – №5. – Pp. 844-848.
- [6] Dauxois T., Peyrard M. A nonlinear model for DNA melting// Nonlinear excitation in biomolecules. Ed. M.Peyrard. - Berlin: Springer-Verlag. – 1995. – Pp. 127-136.
- [7] Marko J.F., Siggia E.D. Statistical mechanics of supercoiled DNA // Physical Review D. – 1995. – V.52. – № 3. – Pp. 2912-2938.
- [8] Peyrard M. The pathway to energy localization in nonlinear lattices // Physica D. – 1998. –V.119. – Pp. 184-199.
- [9] Peyrard M. Using DNA to probe nonlinear localized excitations? // Europhys. Lett. – 1998. V.44. – № 3. – Pp. 271-277.