

УДК 62-783.67:66.046.51

І.Б.Прунько

**Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
АНАЛІЗ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОІСКРОВОГО
ЛЕГУВАННЯ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ ШВИДКОЗНОШУВАНИХ
ДЕТАЛЕЙ НАФТОГАЗОВОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

У роботі розглянуто питання впливу технологічних параметрів (режимів) електроіскрового легування на величину внутрішніх напружень легуваного шару. Визначено коефіцієнти рівняння регресії, яке пов'язує об'єм конденсаторної батареї та амплітуду напруги імпульсу з величиною залишкових напружень.

Ключові слова: трибосистема, поверхнєве зміцнення, електроіскрове легування, енергетичний вплив, шорсткість, мікротріщина.

Табл. 5. Форм. 18. Літ. 10

И.Б.Прунько

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО
ЛЕГИРОВАНИЯ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА
БЫСТРОИЗНАШИВАЮЩИХСЯ ДЕТАЛЕЙ НЕФТЕГАЗОВОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО
ТРАНСПОРТА**

В работе рассмотрены вопросы влияния технологических параметров (режимов) электроискрового легирования на величину внутренних напряжений легированного слоя. Определены коэффициенты уравнения регрессии, которое связывает объем конденсаторной батареи и амплитуду напряжения импульса с величиной остаточных напряжений.

Ключевые слова: трибосистемы, поверхностное упрочнение, электроискровое легирования, энергетическое воздействие, шероховатость, микротрещина.

I.Prunko

**ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF PROCESS PARAMETERS ON PERFORMANCE
ELECTRIC-DOPING PROPERTIES OF HIGH-TECHNOLOGY COMPONENTS OF OIL AND
GAS TRANSPORTATION**

Modern methods of surface hardening of tribosystems allow for the friction surface with predetermined properties, significantly increasing the wear resistance of friction pairs. One promising avenue is the surface treatment of friction concentrated flow of energy, including electric-discharge. The processes of restructuring of processed material occurring in thermodynamically nonequilibrium conditions. The process of saturation of the treated surface of the electrode material and its oxides, nitrogen compounds saturation etc.. It enables the surface layers, which have a whole set of unique physical and mechanical properties. In the works of earlier authors have shown that technological modes of treatment have a significant influence on the hardness of the deposited layer. Microhardness of coating can 1.5 - 3.0 times the hardness of the base material. However, little known is the issue of the combined effect of process parameters electricspark doping on the stress strain state of the modified layer. This option also has a significant influence on the properties of the obtained Tribotechnical surfaces.

We consider the impact of technological parameters (modes) electric-doping on the value of internal stresses doped layer. A coefficients of the regression equation which relates the amount of capacitor bank and the amplitude of the voltage pulse with the magnitude of residual stresses. The impact of technological regimes on residual stresses obtained by multivariate experiment planning. As the plan of the experiment using a full factorial experiment. As the response function was chosen dependence of residual stresses on the parameters. Factors effect on the object of research was adopted: capacity accumulation, pulse amplitude, doping profiles.

Keywords: tribological system, surface hardening, spark alloying, impact energy, roughness, microcracks.

Постановка проблеми

Сучасні методи поверхневого зміцнення деталей трибосистем дозволяють отримувати поверхні тертя з наперед заданими властивостями, істотно підвищуючи зносостійкість пар тертя. Перспективним напрямком є обробка поверхонь тертя концентрованими потоком енергії, зокрема електроіскровим розрядом [1]. Процеси перебудови структури оброблюваного матеріалу відбуваються в термодинамічно нерівноважних умовах. Відбувається процес насичення оброблюваної поверхні матеріалом електроду та його окисами, насичення сполуками азоту та ін.. Це дозволяє отримувати поверхневі шари, які володіють цілим комплексом унікальних фізико-механічних властивостей [2 – 7].

Аналіз результатів застосування електроіскрового легування (ЕІЛ) для зміцнення робочих поверхонь швидкозношуваних деталей нафтогазового технологічного транспорту показує, що

режими енергетичного впливу на оброблювані сталі поверхні мають неоднозначний вплив на механічні і триботехнічні властивості оброблюваного шару, його шорсткість і напружено-деформований стан.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У раніше виконаних роботах [3 – 5] автори показали, що технологічні режими обробки мають істотний вплив на твердість нанесеного шару. Мікротвердість покриття може в 1,5 – 3,0 рази перевищувати твердість матеріалу основи [5]. Разом з тим маловивченим залишається питання комплексного впливу технологічних параметрів ЕІЛ на напружено деформований стан модифікованого шару. Даний параметр також має істотний вплив на триботехнічні властивості отриманих поверхонь.

Мета роботи – оптимізація технологічних режимів електроіскрового легування на основі досліджень їх впливу на внутрішні напруження модифікованого шару з метою отримання оптимальних триботехнічних властивостей оброблених поверхонь.

Обладнання і методика експерименту. Зразки для обробки ЕІЛ виготовлялися з матеріалу сталь 40Х Геометричні розміри зразка 2500x25x5. Поверхню зразка нарощували в 4 проходи. За електроди для електроіскрового легування використали твердосплавні пластинки ВК8 (82 % WC та 8 % Co). Для здійснення електроіскрового нарощування і зміцнення штоків насосів використовувалась установка «Елітрон – 24А» [8]. Обробка деталі проводилася на різних режимах, при цьому ємність накопичувача змінювали від 40 до 300 мкФ, амплітуда імпульсів від 48 до 75 В.

Для визначення внутрішніх напружень у покритті використали схему, при якій поверхневий шар наноситься на вільнонезашемлену пластину, рівноважна форма якої встановлюється під час нанесення цього шару. Залишкові напруження вираховуються за формулою [9]:

$$\sigma_{\max} = [E \cdot h_1 \cdot (h_1 - h_2) / 6 \cdot \rho_k \cdot h_2], \quad (1)$$

$$\rho_k = L^2 / 8 \cdot \delta_{\max}, \quad (2)$$

де σ_{\max} – максимальні внутрішні напруження у поверхневому шарі;

E – модуль пружності матеріалу пластини;

L – довжина пластини;

h_1 – товщина пластини;

h_2 – товщина нарощеного шару;

ρ_k – радіус кривизни пластини;

δ_{\max} – максимальний прогин пластини.

Результати досліджень та їх аналіз

Вплив технологічних режимів на залишкові напруження одержали методом планування багатофакторного експерименту. В якості плану експерименту використовували повний факторний експеримент 2^3 . В якості функції відгуку була вибрана залежність залишкових напружень від параметрів.

Факторами дії на об'єкт досліджень було прийнято:

X_1 – ємність накопичування, мкФ;

X_2 – амплітуда імпульсів, В;

X_3 – режими легування.

Математичну модель впливу технологічних факторів обробки на залишкові напруження прийняли у вигляді полінома першої степені, що враховує основні ефекти сумісної дії [10]:

$$y = b_0 + \sum_i b_i X_i + \sum_{ij} b_{ij} X_{ij}, \quad (3)$$

де b_0 , b_i , b_{ij} – експериментальні оцінки теоретичних коефіцієнтів регресії.

Вибір основного рівняння та інтервалів зміни факторів виконано на основі результатів попередніх експериментів. В задачі з трьома факторами ($k = 3$) кількість дослідів повного факторного експерименту складає $N = 2^3 = 8$.

В таблиці 1 задано рівні факторів та основні значення параметрів.

Таблиця 1.

Рівні факторів та основні значення параметрів

Умови планування	Фактори		
	X_1 С, мкФ	X_2 U, В	X_3
Основний рівень	170	61,5	3
Інтервал зміни	130	13,5	1
Верхній рівень	300	75	4
Нижній рівень	40	48	2

Складаємо робочу матрицю планування експерименту (таблиця 2).

Таблиця 2

Матриця планування та значення факторів

Номер досліджу	Значення факторів								Фактична величина		
	Умовна одиниця								Ємність накопичення, С	Амплітуда імпульсів, В	Режим легування
	X_0	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	$X_1X_2X_3$			
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	40	48	2
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	300	48	2
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	40	75	2
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	300	71	2
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	40	48	4
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	300	48	4
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	40	75	4
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	300	71	4

Проведемо для нашого випадку паралельні дослідження, в результаті яких отримаємо значення функції відгуку. Результати заносимо в таблицю 3.

Таблиця 3.

Результати паралельних дослідів

Номер досліджу	Експериментальне значення у			\bar{y}_i
	y_{i1}	y_{i2}	y_{i3}	
1	-27	-28	-29	-28
2	105	107	103	105
3	-4	1	3	0
4	68	72	70	70
5	-29	-28	-27	-28
6	107	105	103	105
7	1	2	-3	0
8	69	70	71	70

Середнє значення параметра оптимізації визначаємо за формулою [10]:

$$\bar{y}_u = \frac{1}{m} \sum_{v=1}^m y_{uv}. \quad (4)$$

Результати заносимо в таблицю 3.

Обчислюємо коефіцієнти рівняння регресії (3) за формулами:

$$b_0 = \frac{\sum_{u=1}^N x_0 \bar{y}_u}{N}, \quad (5)$$

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N x_i \bar{y}_u}{N}, \quad (6)$$

$$b_{ij} = \sum_{u=1}^N x_i x_j \bar{y}_u. \quad (7)$$

Таким чином рівняння регресії запишеться:

$$y = 36,75 + 50,75x_1 - 1,75x_2 - 15,75x_1x_2. \quad (8)$$

Помилки досліду, або дисперсії S_0^2 оцінимо паралельними дослідями.

Обчислимо рядкові дисперсії, використовуючи дані таблиці 3:

$$S_k^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{k=1}^m (y_{uk} - \bar{y}_k)^2. \quad (9)$$

Перевіримо на однорідність дисперсій S_0^2 за критерієм Кохрена:

$$G_p = \frac{S_u^2 \max}{\sum_{u=1}^N S_u^2}. \quad (10)$$

Значення Критерію Кохрена, згідно розрахунків $G_p = 0,371$. Табличне значення критерію Кохрена при $f_1 = m - 1 = 3 - 1 = 2$ і $f_2 \neq N = 8$ знайдемо за таблицями [10] і воно буде рівне $G_T = 0,5157$. Так, як $G_T > G_p$ то дисперсія однорідна і визначимо похибку дослідів S_0^2 за формулою:

$$S_0^2 = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N S_u^2. \quad (11)$$

Згідно наших даних $S_0^2 = 4,375$. Середньоквадратичне відхилення, або похибка відповідності буде рівна: $S_0 = \sqrt{S_0^2} = 2,092$.

Виконаємо перевірку коефіцієнтів рівняння регресії. Спочатку визначимо дисперсію коефіцієнтів регресії за формулою:

$$S_{bi}^2 = \frac{S_0^2}{N \cdot m}, \quad (12)$$

де $N=8$ – число експериментів;

$m=3$ – число паралельних дослідів.

Тоді: $S_{bi}^2 = 0,182$; $S_{bi} = \sqrt{S_{bi}^2} = 0,427$.

Знайдемо розрахункові значення критерію Стюдента за формулою:

$$t_{ip} = \frac{|b_i|}{S_{bi}}. \quad (13)$$

Результати обчислень наступні: $t_{0p} = 86,06$; $t_{1p} = 118,86$; $t_{2p} = 4,098$; $t_{3p} = 36,88$.

Знайдемо табличні значення критерію Стьюдента за таблицею 8.7 [10], за числом ступенів вільності $f_0 = N(m-1) = 16$ і рівні значущості $q = 0,005$, він буде рівний $t_T = 2,12$.

Так, як всі $t_{ip} > t_T$, то всі коефіцієнти рівняння регресії (8) значимі.

Перевіримо придатність лінійного рівняння регресії (8) для пошуку області оптимуму. Для цього порівняємо дві дисперсії: S_{ad}^2 – дисперсія адекватності та S_0^2 – помилки досліду.

Обчислимо дисперсію адекватності S_{ad} , яка показує розсіювання середніх дослідних даних змінної стану \bar{y}_u відносно тих значень змінної стану \hat{y}_u , які розраховуються за отриманим рівнянням регресії.

Дисперсію адекватності знайдемо за формулою:

$$S_{ad}^2 = \frac{m}{N-l} \sum_{u=1}^m (\bar{y}_u - \hat{y}_u)^2, \quad (14)$$

де l – число членів у рівнянні регресії, що залишилися, після перевірки їх значущості. В нашому випадку $l = 4$.

Обчислимо значення функції відгуку y_u для кожного рядка таблиці 1.3 за отриманим рівнянням регресії (8).

Дисперсія адекватності буде рівна: $S_{ad}^2 = 0$.

Знаходимо розрахункове значення критерію Фішера:

$$F_p = \frac{S_{ad}^2}{S_0^2}, \quad (15)$$

Розрахункове значення даного параметру: $F_p = 0$. За таблицею 8.8 [10] при ступенях вільності $f_{ad} = N-l = 4$ і $f_0 = 16$ та при рівні значущості $q = 0,005$ знаходимо табличне значення F_T . Так, як $F_T = 3,01 > 0$, тобто $F_T > F_p$, то умова про адекватність регресії виконується.

Аналіз одержаних результатів дозволяє зробити наступні висновки про вплив технологічних факторів (ємність, амплітуда, режими легування) на залишкові напруження. Так при збільшенні ємності накопичувача залишкові напруження зростають, а при збільшенні амплітуди імпульсів – зменшуються. Режим легування впливу на залишкові напруження немає. Поряд із лінійним ефектом значний вплив має також ефект взаємодії $X_1 X_2$, тобто сумісна дія ємності накопичувача і амплітуди імпульсів веде до зменшення залишкових напружень.

Аналізуючи одержані рівняння регресії, можна зауважити, що найбільший вплив на залишкові напруження має ємність накопичувача. Вплив амплітуди X_2 також є, але значно менший ніж X_1 .

Аналіз результатів першої серії дослідів дозволяє вибрати найбільш ефективний фактор, яким є ємність накопичувача. Для цього параметра було вибрано напрямку руху в область оптимуму. Рух в багатовимірному просторі факторів проводимо дискретно (покроково). Для знаходження оптимального шляху використовують один з градієнтних методів оптимізації – метод крутого сходження (метод Бока-Уілсона) [10].

Якщо фактори X_i пропорційні значенням відповідних їм коефіцієнтів, то буде збережено рух вздовж лінії крутого сходження. Значення факторів оптимізації приведено в таблиці 4.

Таблиця 4.

Значення факторів оптимізації досліджень

Параметр дослідження	фактори		
	Ємність x_1 , мкФ	Амплітуда напруги x_2 , В	Режими легування x_3
Коефіцієнт рівняння b_i	50,75	-1,75	0
Добуток $b_i \Delta x_i$	6597,5	-23,625	0
Крок (заокруглений) z	52	-0,2	0

З метою руху по лінії крутого сходження визначаємо крок руху по кожному із факторів, для чого знайдемо величину Δx_i :

$$\Delta x_i = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2} \quad (16)$$

Обчислюємо величини $b \cdot \Delta x_i$, значення яких подано в таблиці 4. Найбільшим є добуток $b \cdot \Delta x_i = 6597,5$, тому фактор x_1 приймемо, як базовий.

Обчислюємо параметр λ за формулою:

$$\lambda = \frac{\mu}{|b_{\max}|} \quad (17)$$

де μ може приймати значення від нуля до одиниці. Приймаємо $\mu = 0,4$;

b_{\max} – найбільше із значень коефіцієнтів. Тоді: $\lambda = 0,0079$.

Обчислимо кроки при крутому сходженні.

Для фактора x_1 крок буде рівний $\lambda(b_1 \Delta x_1) \approx 52$, для фактора x_2 крок буде рівний $\lambda(b_2 \Delta x_2) \approx -0,2$.

Далі проводимо уявні досліди, які полягають в обчисленні значень функції відгуку в точках факторного простору, що лежать на шляху до оптимуму, тобто здійснюємо уявний рух до оптимуму. В таблиці 5 представлено результати руху по лінії крутого сходження. Для зручності розрахунків кодові значення факторів переведемо в натуральні шляхом декодування. Для цього

рівняння (8) переписеться з врахуванням того, що $x_1 = \frac{C - 170}{130}$, $x_2 = \frac{U - 61,5}{13,5}$:

$$y = -115,74 + 0,94C + 1,4U - 0,01C \cdot U \quad (18)$$

Таблиця 5.

Умови та результати досліджень

Досліди на лінії крутого сходження	Фактори			Параметр оптимізації F, кг·с/мм ²
	Ємність C, мкФ	Амплітуда напруги U, В	Режим легування	
1 Уявний	222	61,3	2	42,67
2 Уявний	274	61,1	2	59,95
3 Уявний	300	59,9	2	70,42
4 Реалізований	300	59	2	72,2

Висновки.

Круте сходження було припинене при ємності конденсаторної батареї 300 мкФ. Подальше дослідження лімітується пороговим значенням ємності конденсаторної батареї, встановленої на установці «Елітрон – 24А».

Зі зростанням ємності конденсаторної батареї зростають і внутрішні напруження в поверхневому шарі, що, в свою чергу, сприяє зародженню і росту мікротріщин і знижує зносостійкість обробленої поверхні. Зі зростанням жорсткості енергетичних режимів електроискрової обробки зносостійкість до певної межі зростає, а надалі знижується.

Отримане рівняння дозволить підбирати оптимальні по зносостійкості режими обробки поверхонь методом ЕІЛ.

1. Тематические научно-технические обзоры «Повышение долговечности тарельчатых клапанов и уплотнительных узлов буровых насосов» Серия машины и оборудование нефтяной промышленности. ВНИИ ОЭНГ – М, 1973.-91 с.
2. Лазаренко Б.Р. Электрическая теория искровой электрической эрозии металлов / Б.Р. Лазаренко, Н.И. Лазаренко // Проблемы электрической обработки материалов. – М.: Изд-во АН СССР, 1962. – С. 33 – 36.
3. Верхотуров А.Д. Технология электроискрового легирования / А.Д. Верхотуров, И.М. Муха. – К.: Техника, 1982. – 181 с.
4. Верхотуров А.Д. Электродные материалы на основе карбидов вольфрама и титана для электроискрового легирования стали / А.Д. Верхотуров, С.Н. Кириленко, В.Т. Бондарь // Электрофизические и электрохимические методы обработки. – М.: НИИмаш, 1980. – №4. – С. 3 – 5.

5. Назарец В.С. Влияние электроискровой обработки на эксплуатационные свойства валиков прокатных станов / В.С. Назарец // Электронная обработка материалов. – 1979. – № 1. – С. 88 – 90.
6. Петросьянц А.А. Повышение долговечности деталей нефтепромыслового оборудования / Петросьянц А.А., Белоусов В.Я., Саркисов В.С. – М.: Недра, 1976. – 211 с.
7. Пашечко М.И. Формирование и фрикционная стойкость евтектических покрытий / Пашечко М.И., Голубец В.М., Чернец М.В. – К: Наук. Думка, 1993. – 344 с.
8. Установка “Элитрон -24А”: Паспорт. – Кишинев: Академия наук МССР, 1989. – 21с.
9. Напряжение и деформации в элементах микросхем / В.С. Сергеев, О.А. Кузнецов, Н.П. Захаров, В.А. Летягин. – М.: Радиосвязь, 1987. – 88 с.
10. Евдокимов Ю.А. Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа / Ю.А. Евдокимов, В.И. Колесников, А.И. Тетерин. – М.: Наука, 1980. –228 с.

Стаття надійшла до редакції 29.04.2014