

УДК 621.432

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2018.48.45-53>**А.В. Рудковський**, канд. техн. наук, ст. наук. співр.*Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренко НАН України, м. Київ, Україна**e-mail: coating@ipp.kiev.ua***С.І. Маркович**, доц., канд. техн. наук, **С.С. Михайлюта**, асп.*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна**e-mail: markob0@ukr.net; e-mail: sergejmihajluta2@gmail.com*

## Методика планування експерименту та побудови математичної моделі процесу зміцнення поршнів автотракторних двигунів вакуумним азотуванням у пульсуючому пучку плазми

В роботі розроблена методика планування експерименту та побудови математичної моделі за допомогою обчислювального експерименту, що дозволить провести пошук оптимальних технологічних режимів формування дифузійних шарів вакуумним азотуванням у пульсуючому пучку плазми, які забезпечать підвищення опору ізотермічній та термоциклічній повзучості поршнів.

Вирішення задачі проводилось за наступними етапами: формалізація задачі, конструювання плану експерименту, проведення експерименту, попередній статистичний аналіз результатів експерименту, побудова математичних моделей за результатами експерименту, аналіз якості отриманої моделі, проведення розрахункового експерименту, формування висновків та рекомендацій.

На останньому етапі проводиться узагальнення досліджень, формуються висновки та рекомендації щодо впровадження технологічного процесу.

**вакуумне азотування, математична модель, вакуумне азотування, критерій**

**А.В. Рудковський**, канд. техн. наук, ст. научн. сотр.*Інститут проблем прочності ім. Г. С. Писаренко НАН України, г. Киев, Украина***С.І. Маркович**, доц., канд. техн. наук, **С.С. Михайлюта**, асп.*Центральноукраїнський національний технічний університет, г. Кропивницький, Украина*

## Методика планирования эксперимента и построения математической модели процесса укрепления поршней автотракторных двигателей вакуумным азотированием в пульсирующем пучке плазмы

В работе разработана методика планирования эксперимента и построения математической модели с помощью вычислительного эксперимента, который позволит провести поиск оптимальных технологических режимов формирования диффузионных слоев вакуумным азотированием в пульсирующем пучке плазмы, которые обеспечат повышение сопротивления изотермической и термоциклической ползучести поршней.

Решение задачи проводилось за следующими этапами: формализация задачи, конструирования плана эксперимента, проведения эксперимента, предыдущий статистический анализ результатов эксперимента, построение математических моделей за результатами эксперимента, анализ качества полученной модели, проведения расчетного эксперимента, формирования выводов и рекомендаций.

На последнем этапе проводится обобщение исследований, формулируются выводы и рекомендации относительно внедрения технологического процесса.

**вакуумное азотирование, математическая модель, вакуумное азотирование, критерий**

**Постановка проблеми.** Для ефективного аналізу механізму явищ та управління технологічним процесом зміцнення поршнів, що виготовлені із алюмінієвих сплавів необхідно виявити взаємозв'язок факторів, що визначають хід процесу, і представити їх у кількісній формі - в вигляді математичної моделі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Планування експерименту відноситься до статистичного методу ідентифікації складних систем [1,2]. Вирішення задачі щодо побудови математичної моделі технологічного процесу вакуумного азотування у пульсуючому пучку плазми проводилось за наступними етапами [3]: формалізація задачі, конструювання плану експерименту, проведення експерименту, попередній статистичний аналіз результатів експерименту, побудова математичних моделей за результатами експерименту, аналіз якості отриманої моделі, проведення розрахункового експерименту, формування висновків та рекомендацій.

При виконанні робіт досягається компроміс між метою та виділеними ресурсами. Результатом роботи є остаточний вибір рівнів варіювання незалежних змінних і видача завдання на генерацію плану у виді виразу [4]:

$$2^{k_1} \times 3^{k_2} \times 4^{k_3} / N, \quad (1)$$

де  $k_1, k_2, k_3$  – число змінних, що варіюються відповідно на рівнях 2, 3... і т.д.;  
 $N$  – число дослідів.

Після проведення формалізації виконується конструювання плану експерименту. Питаннями конструювання експерименту займається теорія планування експерименту [5,6].

**Постановка завдання.** Розробити методику планування експерименту та побудови математичної моделі за допомогою обчислювального експерименту, що дозволить провести пошук оптимальних технологічних режимів формування дифузійних шарів вакуумним азотуванням у пульсуючому пучку плазми, які забезпечать підвищення опору ізотермічній та термоциклічній повзучості поршнів 260-1004021-СБ, що виготовлені із алюмінієвих сплавів, автотракторного двигуна Д-260.

**Виклад основного матеріалу.** У даній роботі пропонується використовувати план експерименту, що згенерований на основі ЛПт – чисел, через те, що такі плани мають ряд переваг [2,4]:

- ці плани одночасно є і планами пошуку оптимальних умов і дозволяють більш глибоко аналізувати область, що досліджується;
- плани 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.

Вихідними даними для генерації матриці плану (матриці пробних точок) є:

$N$  – максимальна кількість пробних дослідів, яка може бути проведена на даному кроці оптимізації;

$M$  – кількість факторів (незалежних змінних), що впливають на критерії якості;

$NFI[M]$  – масив числа рівнів варіювання за кожним фактором;

$FN[K, M]$  – таблиця опису кодованих значень рівнів факторів.

Виходом має бути матриця пробних точок  $X \setminus Y$ , кожен рядок якої є умовами одного пробного дослідів.

Матриця  $XW$  будується за наступним алгоритмом.

Крок 1. Побудова матриці пробних точок з  $N$  дослідів для  $M$  змінних, що змінюються кожна безперервно на відрізьку  $[0, 1]$ .

Розрахунок значень здійснювали за наступною формулою [7]:

$$x_{ij} = \sum_{k=1}^m 2^{-k+1} \left\{ \frac{1}{2} \sum_{l=k}^m [2\{i2^{-l}\}] \cdot [2\{r_j^{(l)} \cdot 2^{k-1-l}\}] \right\}, \quad (2)$$

де  $m = 1 + \left\lceil \frac{\ln i}{\ln 2} \right\rceil$ ;

[.] – добуток цілої частини числа;

{.} – добуток дробової частини числа;

$r_j^{(l)}$  – значення з таблиці опорних чисел;

$i$  – номер досліду;

$j$  – номер змінної.

Крок 2. Переведення одержаної матриці XW з кодованих змінних до натуральних. Після переведення всіх точок робота алгоритму завершується.

Конструювання плану експерименту в роботі проводилося за допомогою ППП ПРИАМ (пакет прикладних програм «Планування, регресія й аналіз моделей»). Отриманий план представляє собою матрицю, кожний рядок якої містить кодовані значення незалежних змінних для кожного рівня. Для планів на базі ЛПт кодовані значення рівнів представляють собою десятковий дріб в інтервалі від 0 до 1. Для цих планів перехід від кодованих значень до натуральних здійснюється за формулою:

$$X_{ij} = X_{\min j} + Q_{ij} \times (X_{\max j} - X_{\min j}), \quad (3)$$

де  $X_{ij}$  – натуральне значення  $j$ -го фактору в  $i$ -му досліді;

$Q_{ij}$  – кодоване значення  $j$ -го фактору для  $i$ -го досліду;

$X_{\max j}$  – максимальне значення  $j$ -го фактору;

$X_{\min j}$  – мінімальне значення  $j$ -го фактору.

Після проведення експерименту проводили попередній статистичний аналіз або попередню обробку результатів, що дозволить оцінити рівень «шуму» та відкинути грубі помилки. На цьому етапі розраховується середнє значення відгуку та дисперсії за кожним дослідом. Після цього, використовуючи критерій Кохрена, перевіряємо однорідність дисперсій та розраховуємо дисперсію відтворюваності. Розрахунок значення критерію Кохрена проводиться за формулою:

$$G = \frac{S_{\max}^2}{\sum_{i=1}^N S_i^2}, \quad (4)$$

де  $S_{\max}^2$  – максимальна з дисперсій;

$S_i^2$  – дисперсії, що розраховані в кожному експерименті за повторним (дублюючим) дослідом по формулі:

$$S_i^2 = \frac{\sum_{j=1}^n (Y_{ij} - \bar{Y}_i)^2}{n-1}, \quad (5)$$

де  $n$  – кількість дубльованих дослідів;

$\bar{Y}_i$  – середнє значення відгуку в  $i$ -му досліді;

$Y_{ij}$  – значення відгуку в  $i$ -му досліді при  $j$ -му повторенні.

Результат порівнюється з табличним, і якщо  $G_{роз} < G_{таб\alpha, n-1, N}$ , то гіпотеза про однорідність приймається і дисперсія відтворюваності розраховується за формулою:

$$S_{відтвор.}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n (Y_{ij} - \bar{Y}_i)^2}{(n-1)N}, \quad (6)$$

де  $N$  – кількість дослідів;

$n$  – кількість дослідів, що дублюють, в  $i$ -ій строчці матриці планування;

$\bar{Y}_i$  – середнє значення функції відгуку з  $n$  дослідів.

Якщо дисперсія дослідів неоднорідна, то експеримент необхідно повторити для отримання нормального результату.

Побудова математичної моделі за результатами експерименту проходили у два етапи: вибір структури рівняння регресії та отримання значень коефіцієнтів регресії і їх статистичних характеристик. Отримання моделі і її характеристик в ПППІ ПРІАМ представляє собою двоетапну процедуру. На першому етапі з початкової безлічі регресорів, що включають всі головні ефекти і всі взаємодії заданих типів, вибирається деяка кількість, яка повинна включати пошукову структуру моделі. На другому етапі за допомогою процедури покрокового регресивного аналізу визначається кінцева структура моделі. Розрахунок коефіцієнтів математичної моделі проводили за формулами:

$$b_0 = \frac{\sum_{u=1}^N \bar{Y}_u}{n},$$

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N \bar{Y}_u \bar{X}_{iu}}{n}, \quad b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^N \bar{X}_{iu} \bar{X}_{ju} \bar{Y}_u}{n}. \quad (7)$$

Перевірка значущості коефіцієнтів рівняння регресії виконується за допомогою критерію Ст'юдента, розрахункове значення якого дорівнює:

$$t_{роз} = \frac{|b_i|}{S_{b_i}}, \quad (8)$$

де  $b_i$  – значення  $i$ -го коефіцієнта регресії;

$S_{b_i}$  – дисперсія коефіцієнтів регресії,

$$S_{b_s} = \frac{1}{N \cdot n} S^2. \quad (9)$$

Коефіцієнт вважається значущим, якщо  $t_{роз} \geq t_{табл.}$ . Табличне значення критерію вибирається при кількості степенів свободи  $nuf = N \cdot (n-1)$  та рівня значущості  $\alpha$ . При  $t_{роз} < t_{табл.}$  гіпотеза щодо незначущості відповідного коефіцієнту приймається, тобто значення цього коефіцієнту знаходиться на рівні похибки експерименту, його можна прирівняти нулю і не включати в рівняння регресії.

Аналіз якості отриманої моделі проводиться з метою визначення придатності її для використання. Обов'язково необхідно перевірити такі властивості як інформативність, адекватність та стійкість моделі.

Найбільш часто оцінкою інформативності є величини множинного коефіцієнта кореляції  $R$  (коефіцієнт кореляції між експериментальним значенням відгуку й значенням відгуку, що розрахований за моделлю). Чим ближче він до одиниці, тим інформаційність моделі вища. Величина  $R^2$  представляє собою

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^N (\bar{Y}_i - \bar{Y})^2}, \quad (10)$$

де  $\hat{Y}_i$  – значення функції відгуку, що розраховане для  $i$ -го дослідження за моделлю.

Емпірично встановлено, що для активного експерименту величина  $R$  повинна бути не менше 0,96...0,97. Але це не є необхідною і достатньою умовою. Достатньою умовою є перевірка значимості коефіцієнту множинної кореляції за критерієм Фішера.

$$F_R = \frac{S_R^2}{S_{зал.}^2} > F_{\alpha, V_R, V_{зал.}}, \quad (11)$$

де  $V_R, V_{зал.}$  – представляють собою ступіні свободи для дисперсії, що пояснюється моделлю і залишковою дисперсією відповідно:

$$S_R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{(k-1)}, \quad S_{зал.}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\bar{Y}_i - \hat{Y}_i)^2}{(N-k)}, \quad (12)$$

де  $k$  – кількість членів моделі.

Якщо розрахункове значення більше табличного із заданим рівнем значимості, то модель інформативна. Для того щоб оцінити рівень інформативності кількісно, можна використати критерій Бокса-Веца. Хороша модель повинна мати параметр  $\gamma$  критерію не нижче, ніж 2...3.  $\gamma$  визначається з наступного рівняння:

$$F_0 \cong (1 + \gamma) F_{\alpha, V_0, V_{зал.}}, \quad (13)$$

$$\text{де } V_0 = \frac{V_R(1 + \gamma)^2}{1 + 2\gamma^2}.$$

Перевірка адекватності одержаної моделі зводиться до перевірки за критерієм Фішера. Розрахункове значення критерію визначається за формулою:

$$F_{роз.} = \frac{S_{ад}^2}{S^2}, \quad (14)$$

де  $S_{ад}^2$  – дисперсія адекватності,

$$S_{ад}^2 = \frac{n}{N-1} \sum_{i=1}^N (\bar{Y}_i - Y_i)^2, \quad (15)$$

де  $l$  – кількість значущих коефіцієнтів у рівнянні регресії.

Табличне значення критерію адекватності вибирається при степені свободи чисельника  $f_1 = N - 1$ , знаменника  $f_2 = N(n - 1)$  та рівня значимості  $\alpha$  ( $\alpha = 0,05$ ).

Якщо  $F_{роз} \leq F_{табл}$ , то можна з вибраною довірчою ймовірністю вважати, що модель адекватно описує процес, що досліджується. У протилежному випадку – модель неадекватна й потрібні неформальні дії для одержання адекватної моделі. Для цього можна перейти від лінійної моделі до моделі, в якій враховується не лінійність у вигляді добутку факторів

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^k b_{ij} x_i x_j, \quad (16)$$

а потім до моделі другого порядку

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ij} x_i^2. \quad (17)$$

Якщо і цього не досить, то можна змінити шкалу вихідної величини  $Y$ , або збільшити степінь поліному за допомогою ортогональних поліномів Чебишева та за допомогою плану третього порядку. Можна також провести новий експеримент, змінивши діапазони варіювання факторів, тобто область допустимих значень вхідних параметрів  $x_i, i=1, 2, \dots, k$ .

При аналізі стійкості розглядається таблиця мультиколінеарності та число обумовленості. Вона складається з: імен регресорів, що входять у модель; максимальний за абсолютною величиною коефіцієнт парної кореляції, який даний регресор (його стовпчик) має з іншими регресорами, що входять у модель; ім'я цього регресора; коефіцієнт кореляції з відгуком. Таблиця мультиколінеарності дозволяє проаналізувати стійкість структури рівняння регресії. Для цього бажано, щоб виконувалися наступні умови:

- максимальний коефіцієнт парної кореляції між регресорами не перевищував би за абсолютною величиною 0,3...0,4;
- коефіцієнт парної кореляції з відгуком за абсолютною величиною повинен бути істотно більшим. Ніж максимальний коефіцієнт кореляції з іншим регресором.

Проведення розрахункового експерименту представляє собою вже безпосереднє використання моделі для вивчення процесу. При цьому фізичний об'єкт замінюється побудованою моделлю. Тобто, для пошуку найоптимальнішої точки на основі експериментальних даних будуються багатфакторні математичні моделі критеріїв якості, потім за цими моделями та результатами проводиться багатопараметрична компромісна оптимізація.

Процедура визначення рангів та вагових коефіцієнтів полягала в використанні експертних оцінок, згідно яких експерт оцінює важливість критеріїв оптимізації в порівнянні між собою. Після визначення вагових коефіцієнтів проводиться обробка одержаних результатів на предмет їх узгодженості

Визначення рангів проводилося за формулою:

$$P_i = \frac{\sum_{i=1}^{n_i} M_i}{n_i}. \quad (18)$$

де  $M_i$  – місце значимості  $i$ -го показника;

$n_i$  – кількість експертів в оцінці даного показника.

Вагові коефіцієнти визначалися за формулою:

$$K_i = 1 - \frac{P_i - P_{i\min}}{m-1} \cdot d. \quad (19)$$

де  $P_i$  – ранг поточного  $i$ -го показника;  
 $P_{i\min}$  – ранг  $i$ -го показника, що має найважливіше значення;  
 $m$  – кількість показників;  
 $d$  – діапазон зміни вагових коефіцієнтів показників (0,5...1);  
 $K_i$  – ваговий коефіцієнт  $i$ -го показника.

Для перевірки узгодженості висновків експертів розроблено спеціальну методику, яка використовує для цієї мети коефіцієнт конкордації, запропонований свого часу Кендалом:

$$W = \frac{12}{m^2(n^3 - n)} \sum_{j=1}^n \left( \sum_{i=1}^m \left( R_{ij} - \frac{n+1}{2} \right) \right)^2, \quad (20)$$

де  $n$  – кількість параметрів (об'єктів), що оцінюють експерти;  
 $m$  – кількість експертів;

$R_{ij}$  – ранг  $j$ -го об'єкта (параметра), призначений йому  $i$ -м експертом.

Для перевірки статистичної значущості вибіркового значення коефіцієнта конкордації скористаємося величиною  $\chi^2_{\alpha}$ ;  $n-1$  –  $\alpha$ -процентна точка  $\chi^2$ -розподілу зі ступенями вільності  $(n - 1)$ , її беруть з таблиці. Наближене значення  $\chi^2_{\alpha}$ ;  $n-1$ -роподіленої величини дорівнює  $m(n - 1)W$ . Якщо станеться так, що умова  $m(n - 1)W > \chi^2_{\alpha}$ ;  $n-1$  виконується, то гіпотеза про відсутність рангового множинного зв'язку між оцінками експертами параметрів має бути відкинута.

Якщо задано кілька критеріїв оптимізації, то їх спільні значення вибирають використовуючи принцип компромісу за Парето

$$Y[x_1, x_2, \dots, x_k] = Y[y_1 = \min, y_2 = \max, \dots, y_k = \min] = opt, \quad (21)$$

де  $Y$  – узагальнений критерій оптимальності об'єкту оптимізації, одержаний шляхом використання принципу компромісу за Парето.

Ідея компромісу за Парето полягає в пошуку таких умов функціонування системи, за якими узагальнений критерій оптимальності її досягає екстремального значення.

При оптимізації за моделями в роботі використано метод випадкового пошуку на основі ЛПт рівномірно розподілених випадкових точок. Крім того, при ЛПт пошуку пробні точки в багатомірному просторі розміщені найкращим чином з точки зору зондування цього простору. Алгоритм пошуку оптимальної точки у факторному просторі виглядає таким чином.

Крок 1. Розрахунок значень критеріїв за моделями на основі одержаної матриці натуральних значень.

Крок 2. Розрахунок узагальненого критерію оптимізації  $y_{узаг}$ .

$$y_{узаг} = \sqrt{\sum_{j=1}^m [1 - D_{jr}]^2 \cdot W_j^2}, \quad (22)$$

де  $y_{узаг}$  – значення узагальненої цільової функції для  $r$ -го досліду експерименту, яка у випадку пошуку оптимальних умов прагне до 0 ( $y_{узаг} \rightarrow 0$ ) і є оцінкою близькості цієї точки до гіпотетичного оптимального значення, що дорівнює 1;

$D_{jr}$  – зведене до інтервалу 0...1 значення  $j$ -го відгуку (критерію оптимізації) у  $r$ -му досліді експерименту, залежно від обраної для певного критерію оптимізації мети це значення обчислюється за різними формулами;

$W_j$  – вага  $j$ -го критерію оптимізації (відгуку);

$m$  – кількість критеріїв якості (відгуків).

Значення  $D_{jr}$  обчислюють за допомогою таких формул:

а) метою  $j$ -го критерію оптимізації (відгуку) є МАКСИМУМ

$$D_{jr} = 1 - \frac{y_{j\max} - y_{jr}}{y_{j\max} - y_{j\min}}, \quad (23)$$

$$D_{jr} = 1 + \frac{y_{j\max} - y_{jr}}{y_{j\max} - y_{j\min}}. \quad (24)$$

де  $y_{j\max}$  і  $y_{j\min}$  – відповідно максимальне та мінімальне значення  $j$ -го критерію якості (відгуку) серед  $N$  дослідів (пробних точок);

б) метою  $j$ -го критерію оптимізації (відгуку) є МІНІМУМ

Крок 3. Пошук найменшого значення, обчисленого у кожній пробній точці узагальненого критерію оптимізації, якому відповідає максимальне значення  $y_{\text{ефект}}$   
 $y_{\text{ефект}} = 1 - y_{\text{узаг}}$ . Точка факторного простору, якій відповідає найменше значення узагальненого критерію оптимізації, є оптимальною, а відповідний рядок з матриці натуральних значень є оптимальним значенням параметрів (факторів), що впливають на технологічний процес.

У зв'язку з тим, що розрахунок за математичними моделями та результатами експериментальних досліджень значень критеріїв оптимізації у пробних точках є трудомістким в роботі використано ППП ПРИАМ.

На останньому етапі проводиться узагальнення досліджень, формулюються висновки та рекомендації щодо впровадження технологічного процесу.

**Висновок.** В роботі розроблена методика планування експерименту і побудови математичної моделі процесу зміцнення поршнів автотракторних двигунів вакуумним азотуванням в пульсуючому пучку плазми з використанням методу випадкового пошуку на основі ЛПТ рівномірно розподілених випадкових точок, пакету прикладних програм “Планування, регресія й аналіз моделей», теорія планування експерименту та математичної статистики.

## Список літератури

1. Толбатов Ю.А. Математична статистика та задачі оптимізації в алгоритмах і програмах. Київ: Вища школа, 1994. 399 с.
2. Радченко С.Г. Математическое моделирование технологических процессов в машиностроении. Киев: ЗАО «Укрспецмонтажпроект», 1998. 274 с.
3. Радченко С.Г. Математичне моделювання та оптимізація технологічних систем: навч. посібн. Київ: ІВЦ “Політехніка”, 2001. 88 с.
4. Адлер Ю.П. Введение в планирование эксперимента. Москва: Металлургия, 1969. 158 с.
5. Соболев И.М., Статников Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. Москва: Наука, 1981. 111 с.
6. Ермаков С.М., Бродский В.З., Жигляевский А.А. Математическая теория планирования эксперимента. Москва: Наука, 1983. 392 с.
7. Программные продукты Украины. Планирование, регрессия и анализ модели ПРИАМ / НТУ КПИ; под ред. С.Н. Лапач, С.Г. Радченко, П.Н. Бабич. Киев: СП «Текпор», 1993. С. 24-27.



## References

1. Tolbatov, Yu.A. (1994). Matematychna statystyka ta zadachi optymizatsii v alhorytmakh i prohramakh [Mathematical statistics and optimization problems in algorithms and programs]. Kyiv: Vyscha shkola [in Ukrainian].
2. Radchenko, S.G. (1998). Matematicheskoe modelirovanie tehnologicheskikh processov v mashinostroenii [Mathematical modeling of technological processes in mechanical engineering]. Kyiv: ZAO «Ukrspesmontazhproekt» [in Russian].
3. Radchenko, S.H. (2001). Matematychno modeliuвання ta optymizatsiia tekhnolohichnykh system: Navchal'nyj posibnyk [Mathematical Modeling and Optimized Technological Systems]. Kyiv: IVTs “Politekhnikha” [in Russian].
4. Adler, Ju.P. (1969). Vvedenie v planirovanie zksperimenta [Introduction to Experiment Planning]. Moskow: Metallurgija [in Russian].
5. Sobol', I.M., Statnikov, R.B. (1981). Vybor optimal'nykh parametrov v zadachah so mnogimi kriterijami [The choice of optimal parameters in problems with many criteria]. Moskow: Nauka [in Russian].
6. Ermakov, S.M., Brodskij, V.Z., Zhigljavskij, A.A. (1983). Matematicheskaja teorija planirovanija zksperimenta [Mathematical theory of experiment planning]. Moskow: Nauka [in Russian].
7. Lapach, S.N., Radchenko, S.G., Babich, P.N. (Eds.). (1993). Programmnye produkty Ukrainy. Planirovanie, regressija i analiz modeli PRIAM [Model planning, regression, and analysis]. Kiev: SP «Tekpor» [in Russian].

**Anatoly Rudkovsky**, PhD tech. sci, Senior Researcher

*National Academy of sciences of Ukraine G.S. Pisarenko institute for problems of strength, Kyiv, Ukraine*

**Sergiy Markovych**, Assos. Prof., PhD tech. sci., **Sergiy Myhajlyta**, post-graduate

*Central Ukrainian National Technical University, Kropivnitskiy, Ukraine*

### **Method of Planning of Experiment and Construction of Mathematical Model of Process of Strengthening of Pistons of Auto of Tractor Engines a Vacuum Nitriding in the Pulsating Bunch of Plasma**

In-process developed method of planning of experiment and construction of mathematical model by a calculable experiment, which will allow to conduct the search of the optimum technological modes of forming of diffusive layers a vacuum nitriding in a pulsating bunch plasma which will provide the increase of resistance the isothermal and thermal-cycle creep of pistons.

The decision of task was conducted after the followings stages: formalization of task, constructing of plan of experiment, leadthrough of experiment, previous statistical analysis of results of experiment, construction of mathematical models as a result of experiment, analysis of quality of the got model, leadthrough of calculation experiment, forming of conclusions and recommendations.

After the leadthrough of formalization constructing of plan of experiment is executed.

In this work it is suggested to utilize the plan of experiment which is generated on the basis of  $LP_f$ –numbers.

Constructing of plan of experiment was in-process conducted by PPP PRIAM (application “Planning, regression and analysis of models package»). The got plan is a matrix every line of which contains the encoded values of independent variables for every level.

Construction of mathematical models as a result of experiment passed in two stages: choice of structure of equalization of regression and receipt of values of coefficients of regression and them statistical descriptions.

For that, to estimate the level of informing in number, utilized the criterion of Boksa-Veca. Verification of adequacy of the got model is taken to verification after the criterion of Fishera.

On the last of peat-time conducted generalization of researches, conclusions and recommendations are formulated in relation to introduction of technological process.

**vacuum nitriding, mathematical model, plan of experimen, criterion**

*Одержано (Received) 20.11.2018*

*Прорецензовано (Reviewed) 5.12.2018*

*Прийнято до друку (Approved) 20.12.2018*