

**Петрищев А.С. Оптимізація техніко-економічних показників технології металізації окалини швидкорізальних сталей**

*Виконано розробку та оптимізацію багатофункціональної системи залежностей техніко-економічних показників металізації окалини швидкорізальних сталей. Знайдено та досліджено оптимальні області техніко-економічних показників та витратних коефіцієнтів, у результаті чого виявлено можливість підвищення якості одержаної сировини з найбільш вигідним вмістом легувальних елементів у ній та зниження собівартості виплавки сталі з його використанням.*

**Ключові слова:** *техніко-економічні показники, техногенні відходи, легування, сталь, математична модель, собівартість, легувальні елементи.*

**Petryshchev A. Optimization of technical and economic indexes of fast-cutting steels scale metallization technologies**

*Development and optimisation of multipurpose system dependences of technical-and-economic indexes of scale of fast-cutting steels metallization was made. Optimum areas of technical-and-economic indexes and account factors and therefore possibility of improvement in quality of the received raw materials with the most favourable contents of alloying elements in it and lowerings steel smelting cost price with its use was discovered and examined.*

**Key words:** *technical-and-economic indexes, technogenic waste, alloying, steel, mathematical model, cost price, alloying elements.*

---

УДК 669.14.018.025

Д-р техн. наук В. Ю. Ольшанецький<sup>1</sup>, канд. техн. наук О. В. Нестеров<sup>1</sup>,  
д-р техн. наук С. І. Гоменюк<sup>2</sup>, канд. техн. наук С. М. Гребенюк<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Національний технічний університет, <sup>2</sup> Національний університет;  
м. Запоріжжя

## **АНАЛІТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ФАКТОРІВ ЙОННОГО АЗОТУВАННЯ МАЛОВУГЛЕЦЕВОЇ НЕІРЖАВІЮЧОЇ СТАЛІ НА ПОКАЗНИКИ ЇЇ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ**

*Проведено кількісний аналіз результатів йонно-плазмового азотування зразків (твердість та ширина поверхневого шару) феритних хромових сталей з метою подальшої оптимізації технології використовуваного процесу хіміко-технічної обробки.*

**Ключові слова:** *азотований шар, йонно-плазмовий процес, дифузійне насичення, хромовая сталь, поліноми залежностей.*

Для виготовлення виробів для згоряння різних видів палив та систем випуску відпрацьованих газів у світовій практиці пропонується ряд листових матеріалів: високохромисті феритні сталі типу 08X18T1, 15X25T, металокомпозитні матеріали, зокрема алюмініовані конструкційні вуглецеві сталі. Але світовий досвід розробки матеріалів для використання у техніці показує, що з метою підвищення конкурентоздатності є можливість виробництва економнолегованих листових сталей, хімічний склад, структура і комплекс властивостей яких відповідає суто умовам експлуатації таких виробів і систем. Наприклад, у Японії і Німеччині розроблені низь-

ковуглецеві хромисті сталі типу YUS-409D, WRN 4512, які додатково леговані алюмінієм, азотом і титаном, що дозволило знизити вміст хрому до 10–12 %. Ці сталі широко використовуються для виготовлення систем випуску відпрацьованих газів автомобілів.

Для отримання підвищення корозійної стійкості маловуглецевої феритної сталі, наприклад з 8 % (мас.) хрому, яка була б здатна забезпечити ресурс експлуатації виробів, не менший за світові аналоги, нами було проведено дослідження можливостей зміни стану поверхні виробів шляхом йонного азотування в атмосфері тліючого розряду маловуглецевої сталі з саме таким вмістом хрому.

Азотування отриманих зразків проводили на установці ИОН-20-И2 фірми «ЭФТОМ-ИОН» (Болгарія). Як насичувальний газ використовували аміак. Температуру азотування та тиск аміаку варіювали в границях від 500 до 580 °С і від 3 до 5,5 mbar відповідно. Витримка зразків при йонному азотуванні становила в середньому 4 год.

Для визначення оптимальних технологічних параметрів процесу при отриманні азотованих шарів з  $\gamma'$  та  $\epsilon$ - фазами у складі структури були розроблені математичні (загальний та лінійні) плани експериментів, які б урахували співвідношення температур, тисків насичувального газу та часи витримки.

**Таблиця 1** – Глибина легування

Температура $T, ^\circ\text{C}$	Тривалість $t, \text{ год}$	Тиск $p, \text{ mbar}$	Глибина поверхневого легування $h, \text{ мкм}$
580	2	3	55
580	2	5,5	70
580	6	5,5	100
500	6	3	110
500	2	5,5	25
540	4	4,25	150
500	6	5,5	20
520	2	6	25
540	4	4,3	150
580	6	3	150
620	10	7	150
640	12	8	200
480	10	7	15
460	12	8	10

**Таблиця 2** – Твердість матеріалу

Температура $T, ^\circ\text{C}$	Тривалість $t, \text{ год}$	Тиск $p, \text{ mbar}$	Твердість, HV
1	2	3	4
580	2	3	873,5
580	2	5,5	927
580	6	5,5	873,5
500	6	3	832
500	2	5,5	1340,5
540	4	4,25	911,5
500	6	5,5	1739,5
520	2	6	1034
540	4	4,3	908,5
580	6	3	890
540	4	4,25	908

**Загальна математична обробка результатів дослідження режимів йонного азотування**

Для такої обробки скористалися методом найменших квадратів, який дозволяє, окрім надання потрібної інформації, ще й усунути деякі неточності самих експериментальних досліджень. Враховуючи, що досліджувані величини в нашому випадку залежать від трьох вказаних вище чинників, надамо ці залежності у вигляді моделей другого порядку:

$$h = a_0Ttp + a_1Tt + a_2Tp + a_3T + a_4tp + a_5t + a_6p + a_7 + a_8T^2t^2p^2. \quad (1)$$

$$HV = b_0Ttp + b_1Tt + b_2Tp + b_3T + b_4tp + b_5t + b_6p + b_7 + b_8T^2t^2p^2. \quad (2)$$

де  $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8$ ,

$b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7, b_8$  – невідомі постійні коефіцієнти.

Після застосування традиційної процедури методу найменших квадратів, користуючись таблицями 1 та 2, отримуємо такі залежності з числовими коефіцієнтами:

$$h = -0,117Ttp + 0,769Tt + 0,976Tp - 5,275T + 63,466tp - 416,137t - 60,168p + 3087,07 + 0,43 \cdot 10^{-7} T^2 t^2 p^2, \quad (3)$$

$$HV = -0,926Ttp + 2,535Tt - 0,163Tp + 1,226T + 455,89tp - 1319,436t + 203,947p - 0,301 + 0,363T^2 t^2 p^2. \quad (4)$$

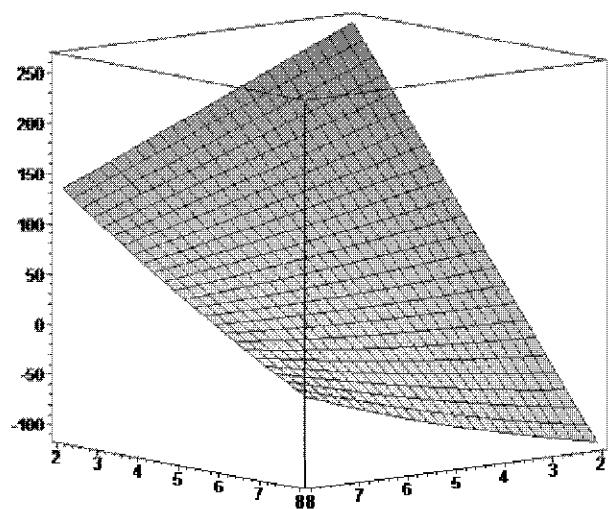


Рис. 1.1. Залежність для глибини легування при  $T = 500$  °C

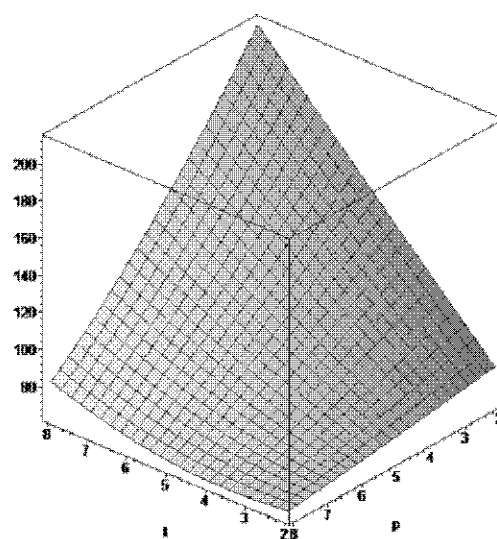


Рис. 1.2. Залежність для глибини легування при  $T = 600$  °C

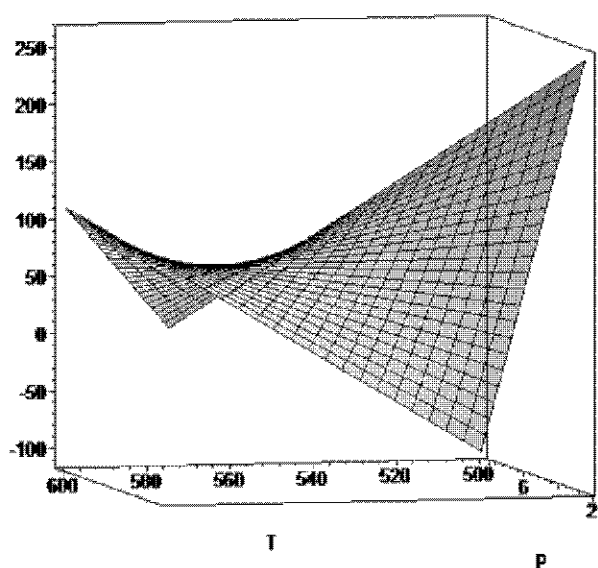


Рис. 1.3. Залежність для глибини легування при  $t = 2$  год

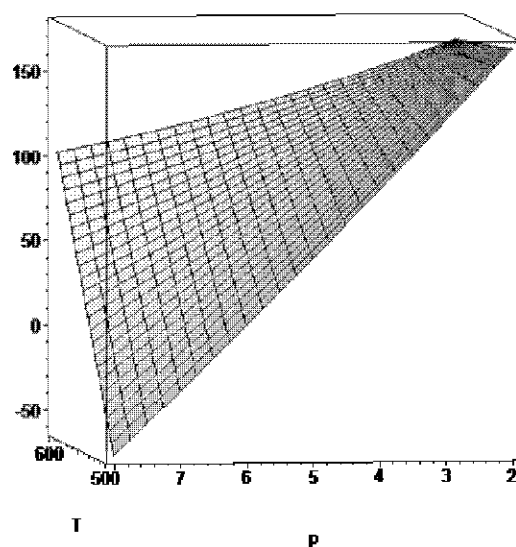


Рис. 1.4. Залежність для глибини легування при  $t = 6$  год

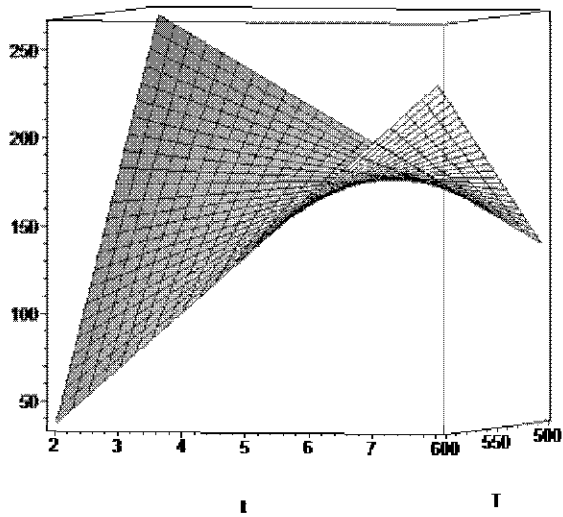


Рис. 1.5. Залежність для глибини легування при  $p = 2$  mbar

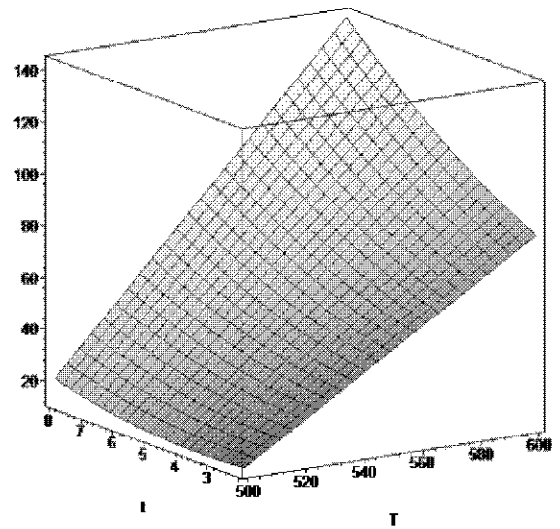


Рис. 1.6. Залежність для глибини легування при  $p = 6$  mbar

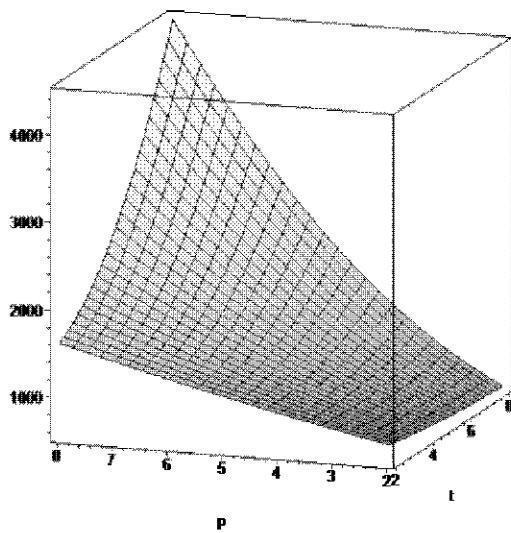


Рис. 2.1. Залежність для твердості при  $T = 500$  °C

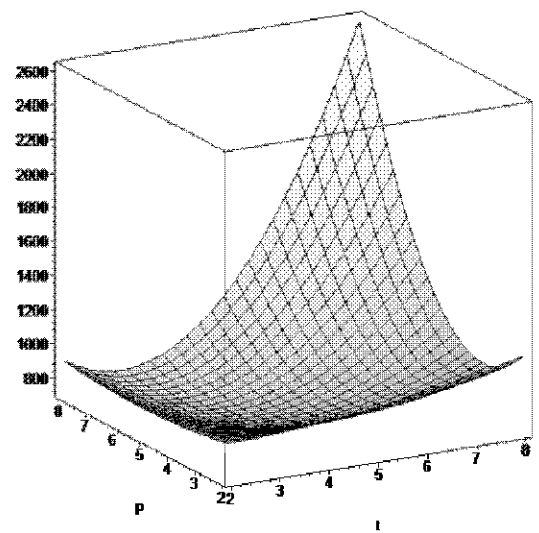


Рис. 2.2. Залежність для твердості при  $T = 600$  °C

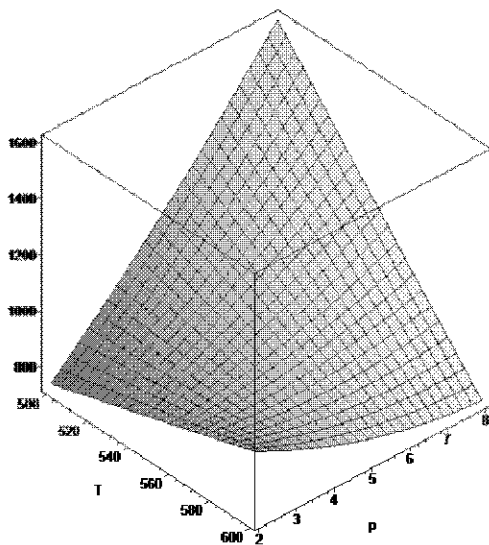


Рис. 2.3. Залежність для твердості при  $t = 2$  с

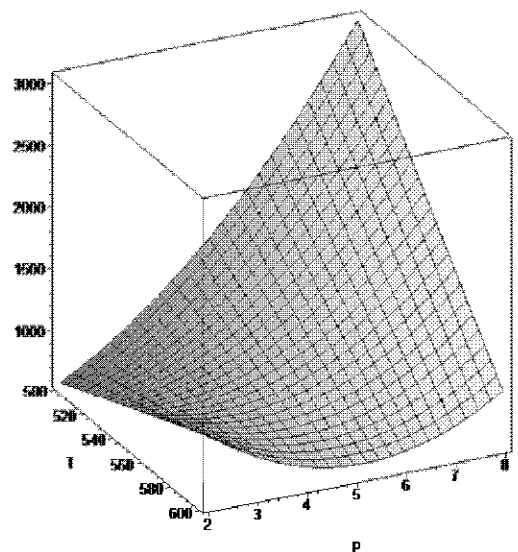


Рис. 2.4. Залежність для твердості при  $t = 6$  с

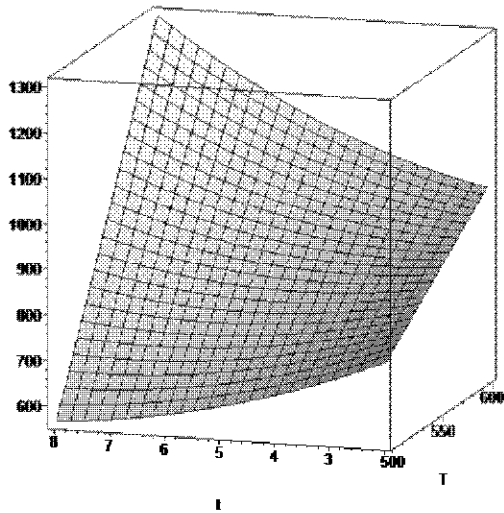


Рис. 2.5. Залежність для твердості при  $p = 2$  mbar

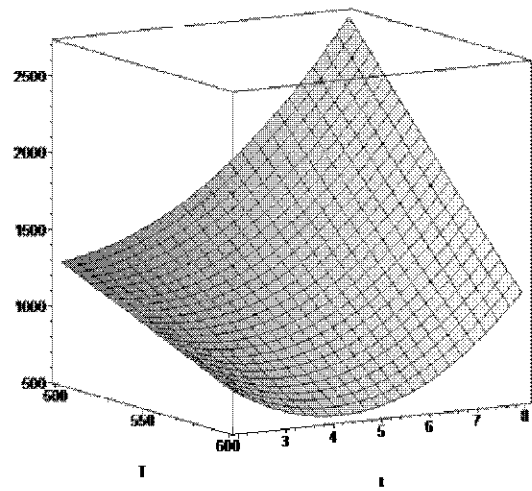


Рис. 2.6. Залежність для твердості при  $p = 6$  mbar

Для цього складемо загальну матрицю планування (табл. 3) та як приклад загальну таблицю факторів впливу (табл. 4) для розрахунків глибини азотованого шару та його твердості). Багатофакторну лінійну модель у кодованих координатах спочатку задали співвідношенням

$$y = b_0x_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3. \quad (5)$$

де  $b_0, b_1, b_2, b_3$  – кутові коефіцієнти моделі.

Чисельні значення кутових коефіцієнтів моделі для глибини азотованого шару без урахування подвійних факторів впливу були визначені у цьому випадку за формулами:

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N} = \bar{y} = 69,375, \quad (6)$$

де  $y_i$  –  $i$ -ті експериментальні значення глибини азо-

Таблиця 3 – Зміна температури, часу витримки та тиску при азотуванні

Номер дослідження	$X_1$	$X_2$	$X_3$
Одиниця вимірювання	Температура, °C	Тривалість процесу, год	Тиск газу в камері, mbar
Інтервал варіювання	40	2	1,25
Основний рівень (0)	540	4	4,25
І верхній рівень (+1)	580	6	5,5
І нижній рівень (-1)	500	2	3

Таблиця 4 – Загальна таблиця факторів впливу та результатів дослідження з урахуванням подвійних факторів впливу

Номер дослідження	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1 x_2$	$x_2 x_3$	$x_1 x_3$	$\bar{h}$ , МКМ ( $y^{ек}$ )	HV, МКМ ( $y^{ек}$ )
1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	25	795
2	+1	-1	+1	-1	-1	+1	70	927
3	-1	+1	+1	-1	+1	-1	20	909
4	+1	+1	+1	+1	+1	+1	100	874
5	-1	-1	-1	+1	+1	+1	25	1147
6	+1	-1	-1	-1	+1	-1	55	874
7	-1	+1	-1	-1	-1	+1	110	832
8	+1	+1	-1	+1	-1	-1	150	890

тованого шару;

$\bar{y}$  – середнє значення цієї глибини;

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N y_i x_{ij}}{N}, \quad (7)$$

де  $N$  – кількість дослідів;

$x_{ij}$  –  $i$ -тий фактор впливу;

$j$  – номер фактору.

Значення цих коефіцієнтів моделі згідно розрахунками за формулами (6) і (7), приводять до лінійного рівняння:

$$y = 69,375 + 24,375x_1 + 25,625x_2 + 15,625x_3, \quad (8)$$

для якого коефіцієнт множинної кореляції ( $R$ ) дорівнює 0,8736, відповідно формулі [1]:

$$R_{y/x_1, x_2, x_3} = \sqrt{\frac{N(b_1^2 + b_2^2 + b_3^2)}{\sum_{i=1}^N y_i^2 - N\bar{y}^2}}. \quad (9)$$

Далі було використано багатофакторну модель в кодованих координатах, враховуючи на попарний вплив температури, тривалості процесу або тиску газу в камері у певних знакових співвідношеннях, і відповідно до кожного випадку знайдено коефіцієнти кореляції. Додаткові коефіцієнти математичної моделі у цьому випадку будуть визначатись формулою

$$b_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^N y_i \cdot (x_j x_u)_i}{N}, \quad (10)$$

де  $b_{ij}$  – кутовий коефіцієнт багатофакторного впливу,  $a, j = 1, 3; u = 1, 3$ .

Коефіцієнти кореляції при багатофакторному впливі були розраховані за формулами аналогічними (9).

Тоді згідно з наведеними вище формулам будемо мати рівняння з коефіцієнтами множинної кореляції:

$$Y_{(12)} = 69,375 + 24,375x_1 + 25,625x_2 - 15,625x_3 + 5,625x_1x_2, \quad (11)$$

$$R_{y/x_1, x_2, x_3, x_1, x_2} = \sqrt{\frac{N(b_1^2 + b_2^2 + b_3^2 + b_{12}^2)}{\sum_{i=1}^N y_i^2 - N\bar{y}^2}} = 0,8828; \quad (12)$$

$$Y_{(23)} = 69,375 + 24,375x_2 + 25,625x_3 - 15,625x_1 + 19,375x_2x_3, \quad (13)$$

$$R_{y/x_1, x_2, x_3, x_2, x_3} = \sqrt{\frac{N(b_1^2 + b_2^2 + b_3^2 + b_{23}^2)}{\sum_{i=1}^N y_i^2 - N\bar{y}^2}} = 0,9771; \quad (14)$$

$$Y_{(13)} = 69,375 + 24,375x_1 + 25,625x_2 - 15,625x_3 + 6,875x_1x_3, \quad (15)$$

$$R_{y/x_1, x_2, x_3, x_1, x_3} = \sqrt{\frac{N(b_1^2 + b_2^2 + b_3^2 + b_{13}^2)}{\sum_{i=1}^N y_i^2 - N\bar{y}^2}} = 0,8873. \quad (16)$$

Розрахунки показали, що найкращий коефіцієнт кореляції відповідає одночасному впливові тривалості процесу і тиску газу в камері на експериментальні значення. У результаті приходимо до нової робочої матриці (табл. 5).

**Таблиця 5** – Конкретна робоча матриця лінійного «планування» кодованих значень факторів варіювання для розрахунків глибини та твердості азотованого шару

Номер дослідів	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_2x_3$
1	-1	-1	+1	-1
2	+1	-1	+1	-1
3	-1	+1	+1	+1
4	+1	+1	+1	+1
5	-1	-1	-1	+1
6	+1	-1	-1	+1
7	-1	+1	-1	-1
8	+1	+1	-1	-1

Знайдемо нові розрахункові значення функцій відгуку, а саме:

$$I \quad y_h = 69,375 + 24,375x_1 + 25,625x_2 - 15,625x_3 + 5,625x_2x_3, \quad (17)$$

$$II \quad y_{HV} = 906 - 14,75x_1 - 29,75(x_2 + x_3) + 45x_2x_3. \quad (18)$$

При цьому за умови рототабельності дисперсії  $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \dots = \sigma_j^2$ , де  $j$  змінюється від 0 до 4, середньоквадратична похибка (наприклад, для випадку глибини  $h$ ) відповідає залежностям:

$$\sum_{i=1}^N (\Delta y_i)^2 = N \cdot (m+1) \cdot \sigma_j^2 \quad (19)$$

і

$$\sigma_j = (\Delta b_j) = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta y_i)^2}{N \cdot (m+1)}} = \pm 4,288, \quad (20)$$

Аналогічна ситуація має місце і у випадку лінійної регресії для HV.

Подальші результати досліджень підтвердили логіку розрахунків. При всіх режимах йонного азотування спостерігалась явно виражена дифузійна зона з твердістю, що значно відрізнялася від твердості основного матеріалу ( $HV_{0,05}$  250–300). Так, поверхня зразків, які були азотовані на  $\gamma'$ -фазу, мала твердість  $HV_{0,05}$  800–870 при глибині азотованого шару 70–120 мкм. Поверхня інших зразків, що були азотовані на  $\epsilon$ -фазу, мала твердість  $HV_{0,05}$  900–1100 при глибині азотованого шару 20–60 мкм.

Отримання дифузійної нітридної зони будь-якого складу позитивно впливає на підвищення корозійної

стійкості. Дифузійна зона з  $\epsilon$ -фазою значно підвищує зносостійкість поверхні, але при динамічних навантаженнях можливі сколи азотованого шару. Тому оптимальним сполученням у складі йонно-азотованого шару вважається суміш  $\gamma'$  +  $\epsilon$ -фаз, яку було отримано на трьох зразках дослідної сталі за режимом: температура 540 °C, тривалість ~ 4 год, тиск аміаку ~ 4 mbar.

#### Список літератури

1. Ольшанецкий В. Е. О физических подходах к математическому моделированию функциональных связей / В. Е. Ольшанецкий // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2003. – № 1. – С. 80–86.

*Одержано 27.04.2012*

**Ольшанецкий В.Е., Нестеров А.В., Гоменюк С.И., Гребенюк С.Н. Аналитическое исследование влияния технологических факторов ионно-плазменного азотирования малоуглеродистой нержавеющей стали и показатели ее поверхностного слоя**

*Проведен количественный анализ результатов ионно-плазменного азотирования образцов (твердость и ширина полученного поверхностного слоя) ферритных хромистых сталей с целью последующей оптимизации технологии используемого процесса химико-термической обработки.*

*Ключевые слова: азотированный слой, ионно-плазменный процесс, диффузионное насыщение, хромистая сталь, полиномы зависимостей.*

**Ol'shanetskiy V., Nesterov A., Gomenyuk S., Grebenyuk S. Analytical research of ion-plasma nitriding technological factors influence of low carbon stainless steel and indicators of its surface layer**

*Quantitative analysis of samples ion-plasma nitriding (hardness and width of the resulting surface layer) of ferritic chromium steels for the purpose of optimizing technology process using chemical and thermal treatment was done.*

*Key words: nitrided layer, ion-plasma process, diffusion saturation, chromium steel, dependency polynomials.*