

*О. С. КОВАЛЬ*, аспірант, НТУ «ХПІ»;  
*П. С. ПЕНЗЄВ*, аспірант, НТУ «ХПІ»;  
*Є. П. ДИМКО*, аспірант, НТУ «ХПІ»;  
*А. А. ПУЛЯЕВ*, аспірант, НТУ «ХПІ»

## УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ КОНСТРУКЦІЙНОГО ЧАВУНУ ДЛЯ ФАСОННИХ ВИЛИВКІВ НА ОСНОВІ МОДЕЛЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЙОГО МОДИФІКУВАННЯ

У статті описані результати визначення ефективності модифікування чавуну двома типами модифікаторів – феросиліцієм та Si-Ba лігатурою, що можуть бути використані при розробці критеріїв якості сплаву. Зокрема, отримані математичні моделі розподілу розміру графіту в залежності від координат в перетині зразку можуть бути враховані по формуванню документів, що регламентують якість чавуну, та методику оцінювання якості сплаву за його мікроструктурою.

**Ключові слова:** якість сплаву, методика оцінювання якості, модифікування чавуну

**Вступ.** Управління якістю чавуну для фасонних виливків машинобудівного призначення передбачає реалізацію низки заходів по вибору раціональних режимів виготовлення сплавів та ливарних форм. Однак, слід зауважити, що якою б якісною не була ливарна форма, без якісного металу немає сенсу говорити про якість виливків взагалі. Таким чином, можна вважати, що пріоритети при вирішенні питань управління якістю фасонних виливків слід віддати заходам, що стосуються саме виготовлення сплавів. В цьому контексті слід визнати, що можливість ефективного управління процесами виготовлення сплавів є основою для реалізації можливостей ефективного управління якістю фасонних виливків. При цьому слід враховувати, що вибір того чи іншого заходу по управлінню якістю процесів виготовлення сплавів повинен враховувати енергоємність та ресурсоємність цих процесів. Саме тому, розробка перспективних заходів щодо управління якістю сплаву є сьогодні для України дуже актуальною задачею.

**Аналіз існуючих даних та постановка проблеми.** Управління якістю конструкційного чавуну для фасонних виливків передбачає знання характеру впливу технологічних режимів його виплавки на вихідні характеристики. Намагаючись підвищити якість чавуну, розробники вдаються до використання модифікаторів, що дозволяють оптимальним чином впливати на формування мікроструктури сплаву. Серед відомих ефективних модифікаторів, що розглядаються як фактори управління якістю чавуну [1-3], слід виділити модифікатори Superseed® Extra Inoculant [4], Reseed® Inoculant [5] и SMZ® Inoculant [6]. Авторами цих робіт, відмічено, що модифікатор Superseed® Extra Inoculant максимально знижує відбіл у виливках з сірого чавуну та сприяє формуванню рівномірно розподіленого графіту, що призводить не тільки до покращення якості чавуну при оцінюванні його мікроструктури, а й зменшує викрошування графіту в процесі механічної обробки.

Модифікатор Reseed® Inoculant сприяє попередженню утворення мікроусадкової пористості у виливках, що позитивно впливає на формування якісного чавуну за критеріями оцінювання механічних властивостей.

Модифікатор SMZ® Inoculant при використанні в пізньому модифікуванні в струмені металу (MSI-процес), стабілізує відхилення по хімічному складу та позитивно впливає на процес регулювання вмісту в чавуні азоту.

Таким чином, можна констатувати той факт, що використання названих модифікаторів окремо дозволяє впливати на процес управління якістю чавуну за всіма можливими критеріями: за мікроструктурою, механічними властивостями та хімічним складом. Але досягти компромісного варіанту, який дозволяв би вирішувати задачу комплексного управління якістю за усіма названими критеріями одночасно, не вдається.

Крім цього, управління якістю не може не враховувати економічну складову, що визначається фактичними витратами при виборі того чи іншого заходу управління якістю. Саме цьому проблема підбору модифікатора для чавуну з урахуванням особливостей його застосування та економічної складової не може вважатися вирішеною. Так, наприклад, енергоємність отримання модифікаторів, що є невід'ємним атрибутом складних енергомістких технологічних процесів [7-9], повинні обов'язково враховуватись при виборі заходів, що пов'язані з управлінням якістю конструкційного чавуну для фасонних виливків машинобудівного призначення.

**Мета та задачі дослідження.** Метою дослідження було визначення можливостей використання відносно не дорогих та недефіцитних модифікаторів як заходу для управління якістю конструкційного чавуну для фасонних виливків машинобудівного призначення. Для досягнення цієї мети було поставлено наступні задачі:

- провести експериментально-промислові дослідження в умовах діючого виробництва,
- побудувати математичну модель, що дозволяє визначити вплив досліджуваних модифікаторів на розмір графіту в перетині виливків.

**Матеріали та методи дослідження.** Дослідження проводились в чавуноливарному цеху в чугунолитейном цехе ВАТ «Кременчуцький завод дорожніх машин». Чавун виготовлювали в індукційній печі ІСТ-1/0.8М5 та модифікували в двох серіях плавко двома типами модифікаторів: феросиліцієм ФС75 та феросілікобарієм ФС65Ба4. Температура чавуна перед модифікуванням знаходилась в діапазоні 1380–1420 °С. Обробка розплаву модифікаторами здійснювалась в ковші фракцією 1-10 мм в кількості 0,3 % від маси рідкого металу (3 кг на 1 т) після заповнення ковша на 100–150 мм. Модифікатори ФС75 використовувались фракцією 3–10 мм, модифікатори ФС65Ба4 в формі пластин з тощиною 0,5–3 мм та максимальними розмірами до 50 мм, по технології «чипс - модифікування».

За результатами експериментальних плавок заливалися проби клинової форми для виготовлення в подальшому шліфів та визначення мікроструктури за стандартними методиками, передбаченими ДСТУ ГОСТ 3443-87.

Результати визначення мікроструктури у вигляді фотографій наведені на рис. 1 та рис. 2.

При оцінюванні якості за стандартною методикою, передбаченою ДСТУ ГОСТ3443-87 було виявлено, що металічна матриця складається з перліту та фериту (П96), графіт пластинчастий, прямолінійний, структура графіту із рівномірно розподіленим пластинчастим графітом ПГф1, ПГр1, на поверхні бачиться междендритна пластинчаста орієнтація графіту ПГр9. На поверхні зразка довжина включень графіту ПГд 90-45, кількість включень ПГ6. Площа включень фосфідної евтектики сягає близько ФЭП 2000.

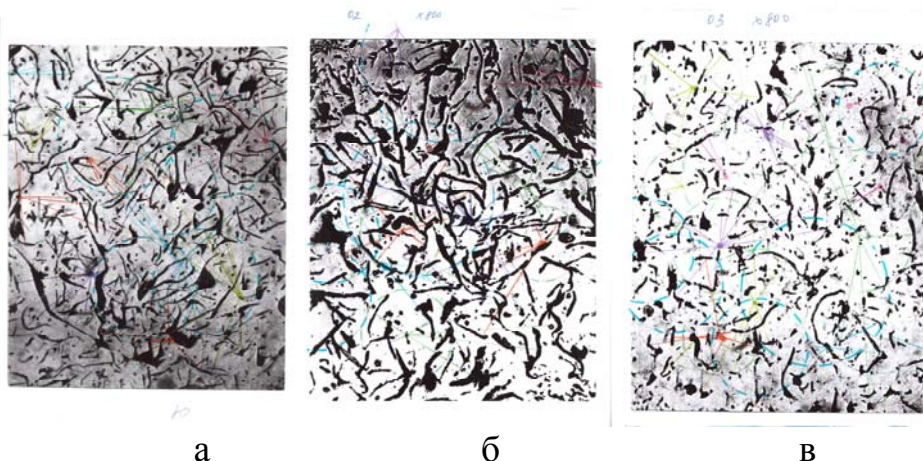


Рис. 1– Мікроструктури чавуну, модифікованого феросиліцієм ФС75, x100 а – початковий момент модифікування, б – через 5 хв. після модифікування, в – через 10 хв. після модифікування

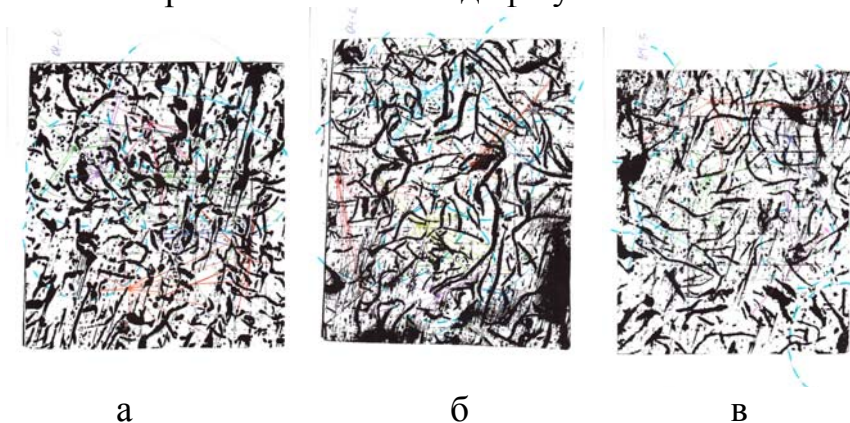


Рис. 2 – Мікроструктури чавуну, модифікованого феросиліцієм ФС65Ба4, x100 а – початковий момент модифікування, б – через 10 хв. після модифікування, в – через 15 хв. після модифікування

Після дослідження мікроструктури на зразку з чавуну, модифікованого ФС65Ба4, виявлено, що металічна матриця – перліт пластинчастий (до 92 % перліта) та ферит до 8 %. Графіт пластинчастий завихреної форми ПГф2, розподілення розеточне, довжина включень ПГД90.

Для порівняння ефективності модифікування з точки зору можливості забезпечення заданого рівня якості за критерієм розміру графіту ставилась задача побудови математичної моделі, що описує розподіл величини розміру графіту в різних перетинах клинового зразку.

**Математичне моделювання якості сплаву при виборі критерієм якості розміру графіту.** В якості вхідних змінних вибиралася координата по осі абсцис ( $x_1$ ) і координата по осі ординат ( $x_2$ ) точок, в яких проводилися металографічні дослідження мікроструктури. В якості вихідних змінних вибиралася значення розміру графіту у відповідній точці шліфа за планом експерименту ( $y_1$  - при модифікуванні чавуну модифікатором ФС65Ба4 і  $y_2$  - при модифікуванні чавуну модифікатором ФС75).

Враховуючи, що з даних експериментального матеріалу можна «зняти» значення вхідних і вихідних змінних в точках плану повного факторного експерименту ( $N = 2^k$ ), в якості методу побудови моделі був використаний метод побудови повного ортогонального центрального композиційного плану другого порядку. Нормування значень вхідних змінних здійснювалося за формулами:

$$x_1 = \frac{x_1^* - \bar{x}_1}{I_1}, \quad (1)$$

$$x_2 = \frac{x_2^* - \bar{x}_2}{I_2}, \quad (2)$$

де  $x_1, x_2$  – нормовані значення вхідних змінних,  $x_1^*, x_2^*$  – натуральні значення вхідних змінних,  $\bar{x}_1 = 20, \bar{x}_2 = 6$  – середні значення вхідних змінних ( $\bar{x}_1 = 20, \bar{x}_2 = 6$ ),  $I_1, I_2$  – інтервали варіювання вхідних змінних ( $I_1 = 10, I_2 = 1$ ).

Математична модель представляється поліномом виду:

$$y_i = b_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3(x_1^2 - \beta) + a_4(x_2^2 - \beta) + a_5x_1x_2 \quad (3)$$

де  $a_i$  – оцінювані коефіцієнти,  $\beta$  – параметр, що розраховується залежно від числа точок ядра композиційного плану  $2^{n-p}$ , плеча «Зоряний» точок  $\alpha$  і числа точок плану по формулі:

$$\beta = \frac{\sum_{j=1}^N (x_i^j)^2}{N} = \frac{2^{n-p} + \alpha}{N} \quad (4)$$

Загальний вигляд таблиці вхідних змінних для розрахунку коефіцієнтів моделі  $a_i$  наведений в табл. 2.

Таблиця 2 – Представлення даних для побудови центрального ортогонального композиційного плану

Номер експерименту	$x_1$	$x_2$	$x_1^2 - \beta$	$x_2^2 - \beta$	$y_{ij}$
1	91	91	0,3333	0,3333	0,33
2	-93	93	-0,3067	0,3333	0,33
3	119	-119	-0,6267	0,3333	0,33
4	-100	-100	-0,6267	0,3333	0,33
5	17	0	-0,3067	0,3333	0,33
6	-62	0	0,3333	0,3333	0,33
7	0	121	0,3333	0,3333	-0,67
8	0	-78	-0,3067	0,3333	-0,67
9	0	0	-0,6267	0,3333	-0,67

Коефіцієнти  $a_i$  визначені за формулами:

$$a_i = c_1 \sum_{j=1}^N x^j y^j, i = 1, \dots, n \quad (5)$$

$$a_i = c_2 \sum_{j=1}^N [(x_{i-n}^j)^2 - \beta] y^j, i = n + 1, \dots, 2n \quad (6)$$

$$a_i = c_3 \sum_{j=1}^N x_\mu^j x_\lambda^j y^j, \lambda = 1, \dots, n, \mu \neq \lambda, i = 2n + 1, \dots, k \quad (7)$$

$$a_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y^j - \beta \sum_{i=1}^n a_{n+i} \quad (8)$$

В формулах (5)–(8)  $c_1, c_2, c_3$  – це коефіцієнти для лінійних, квадратичних та парних взаємодій незалежних змінних відповідно,  $n$  – число лінійних членів моделі,  $N$  – число експериментів.

Для оцінки точності отриманої моделі обчислювалися суми квадратів відхилень експериментальних значень вихідних змінних від розрахункових, отриманих за моделлю ( $S_R$ ), і оцінки дисперсій ( $s_R^2$ ):

$$S_R = (y_{\text{експ}} - y_{\text{расч}})^2, \quad (9)$$

$$s^2 = \frac{S_R}{\varphi}, \quad (10)$$

де  $\varphi = N - (k + 1)$  – число ступенів свободи,  $N$  – число експериментів ( $N=16$ ),  $k$  – число вхідних змінних ( $k=2$ ).

Оцінка значущості коефіцієнтів моделі проводилася на основі критерію:

$$|a_i| \geq t_{кр} s_i, \quad (11)$$

де  $t_{кр}$  – критичне значення розподілу Стюдента для довірчою ймовірністю 95% і числа ступенів свободи  $\varphi=13$ ,  $s$  – середнє квадратичне відхилення, визначається з формули (10).

Результати моделювання представлені у вигляді поверхні відгуку (рис. 3 та рис. 4).

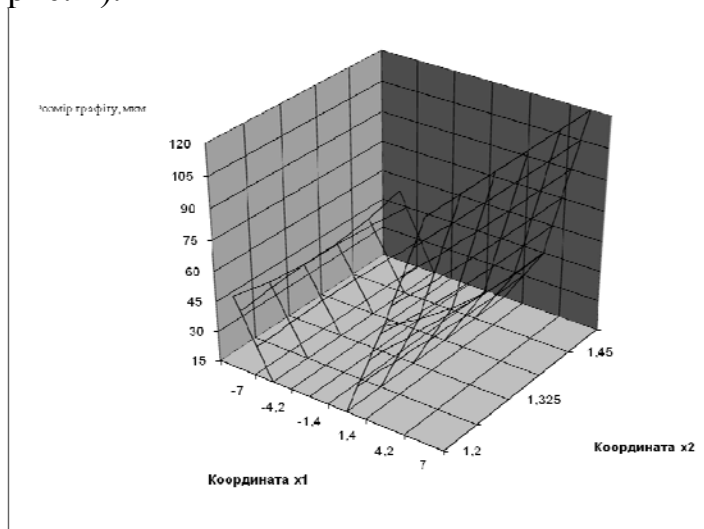


Рис. 4– Поверхня відгуку, що описує розподіл розміру графіту в перетині зразку №1

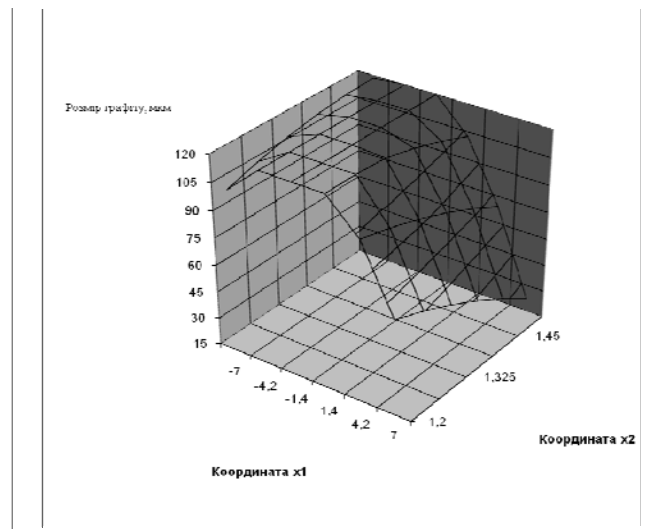


Рис. 5– Поверхня відгуку, що описує розподіл розміру графіту в перетині зразка зразку №2

З наведених на рис. 3 та рис. 4 результатів видно, що використання модифікатору ФС65Ба4 забезпечує менші значення розміру графіту, що може позитивно впливати на механічні властивості чавуну.

Обираючи нижню та верхню допустимі межі розміру графіту, критерій для оцінювання доли годного чавуну (тобто такого, що відповідає заданій якості за розміром графіту), може бути представлений у вигляді:

$$P = 1 - \left[ \Phi \left( \frac{x_v - \bar{x}}{S} \right) - \Phi \left( \frac{x_n - \bar{x}}{s} \right) \right], \quad (12)$$

де  $P$  – ймовірність браку чавуну по розміру графітових включень,  $x_v, x_n$  – верхня та нижня межа поля допуску на параметр розміру графіту,  $S$  – оцінка середньоквадратичного відхилення,  $\bar{x}$  – математичне очікування величини розміру графіту – параметру якості сплаву,  $\Phi \left( \frac{x_v - \bar{x}}{S} \right), \Phi \left( \frac{x_n - \bar{x}}{s} \right)$  – функція

Лапласу.

Обираючи координати визначення розміру графіту в бажаному перетині виливку та підставляючи їх значення в отриману математичну модель, може бути розраховане математичне очікування розміру графіту  $\bar{x}$  та далі за критерієм (12) визначено долю браку при використанні відповідного модифікатору.

**Перспективи використання запропонованого критерію оцінювання якості для автоматизації управління якістю сплаву.** Впровадження запропонованого критерію оцінювання якості сплаву у вигляді (12) для розміру графітових включень та математична модель розподілу цього параметру може бути здійснено в системах автоматизації плавильно-заливальної ділянки ливарного цеху. Один з можливих варіантів такого впровадження запропоновано в роботі [10] (рис. 6). Ливарний конвеєр 2 генерує потік заявок на розплав з деякою інтенсивністю  $\lambda_{ji}$ . Електропіч 1 видає на конвеєр розплав з деякою інтенсивністю  $\lambda_{ij}$ . Якщо в заданий момент часу надходження заявки вона не може бути виконана (піч не видає розплав на ливарний конвеєр), ливарна форма залишається не залитою, тобто має місце відмова. Заливка здійснюється тільки тієї подальшої форми, до надходження якої на ділянку заливки розплав може бути випущений з печі. Отже, систему «піч – ливарний конвеєр» можна представити СМО з відмовами.

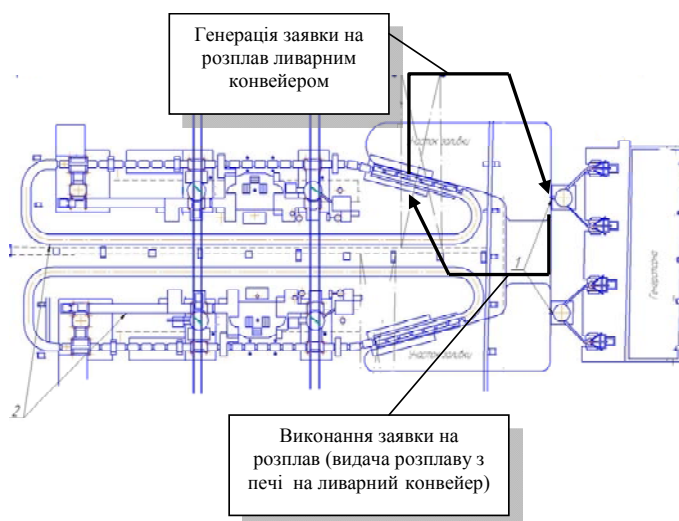


Рис. 6– Схема до визначення СМО «піч – ливарний конвеєр» як основа для розробки системи автоматизації плавки за критерієм якості

Задача вибору оптимальної технологічної схеми для подальшого синтезу алгоритму оптимального управління на етапі модифікування розплаву зводиться

до оптимізації по сумарних витратах кількості розплаву в печі в кожен момент часу з урахуванням необхідної потреби в розплаві ливарного конвеєра та невизначеності вхідних параметрів процесу на цьому етапі.

**Висновки.** Експериментальні дослідження для визначення можливостей управління якістю чавуну шляхом використання модифікаторів повинні проводитись безпосередньо в умовах промислового виробництва, бо тільки так можуть бути враховані його специфічні особливості. Отримання за допомогою цих експериментів результатів дозволяє визначити на зразках фактичну мікроструктуру чавуну, модифікованого досліджуваними модифікаторами, та побудувати за допомогою планування експерименту математичну модель, що описує розподіл досліджуваного параметру мікроструктури в бажаному перетині зразку. Отримані при цьому результати можуть бути використані для оцінки фактичної якості чавуну на основі критерію, що має в своїй структурі функції Лапласа та дозволяє визначити ймовірність знаходження параметру якості сплаву в заданому діапазоні.

**Список літератури:** 1. Химичева, А. И. Методология оценки конкурентоспособности наукоемкой продукции [Текст] / А. И. Химичева, Аль Зарей Аммар, А. С. Зенкин // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2006. – Т. 4, № 3 (22). – С. 69–72. 2. Зенкин, А. С. Оценка степени наукоемкости продукции на основе кластерного анализа [Текст] / А. С. Зенкин, А. И. Химичева, В. А. Годик, И. Т. Пухлик, П. В. Иванов // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2010. – Т. 4, № 3 (46). – С. 72–74. 3. Зенкин, А. С. Математическая модель процесса поиска решений в системе менеджмента качества предприятия [Текст] / А. С. Зенкин, В. А. Годик, П. В. Иванов, А. И. Химичева // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2010. – Т. 6, № 4 (48). – С. 46–49. 4. Elkem ASA Research. Модификатор Superseed®Extra Inoculant [Текст] / ИТБ "Литьє України", 2003. – № 12 (40). 5. Elkem ASA Research. Модификатор Reseed®Inoculant [Текст] / ИТБ "Литьє України", 2004. – № 7 (47). 6. Elkem ASA Research. Модификатор SMZ®Inoculant [Текст] / ИТБ "Литьє України", 2004. – № 5 (45). 7. Гунько, И. М. Анализ техногенных источников и технологических схем производства пентаоксида ванадия [Текст] / И. М. Гунько, И. Ф. Червоный, С. Г. Егоров // Металургія : наукові праці Запорізької державної інженерної академії. – 2011. – Вип. 25. – С. 59–67. 8. Криворучко, Н. П. Температурный режим поточной линии электролиза магния титанового производства [Текст] / Н. П. Криворучко, Д. В. Бачурский, И. Ф. Червоный, Д. М. Хабров, Е. А. Матвеев, Е. П. Щербань // Металургія: Збірник наукових праць. – 2012. – Вип. 1(26). – С. 58–61. 9. Червоный, И. Ф. Порционно-периодическая подача магния в процессе магниетермического восстановления тетрахлорида титана [Текст] / И. Ф. Червоный, Д. А. Листопад, В. И. Иващенко и др. // Металургія: наукові праці ЗДІА. – 2009. – Вип. 20. – С. 63–70. 10. Дьомін, Д. О. Моделювання та оптимізація управління процесами електроплавки в умовах невизначеності [Текст] дис. ... д-р техн. наук. / Д. О. Дьомін // Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 2014. – 36 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Himicheva, A. I., Al' Zarej Ammar, Zenkin, A. S. (2006). Metodologija ocenki konkurentosposobnosti naukoemkoj produkcii. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4/3(22), 69–72. 2. Zenkin, A. S., Himicheva, A. I., Godik, V. A., Puhlik, I. T., Ivanov, P. V. (2010). Estimation high-tech products on the basis of cluster analysis. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4/3(46), 72–74. 3. Zenkin, A. S., Godik, V. A., Ivanov, P. V., Himicheva A. I. (2010). The mathematical model of finding solutions process in quality management system of the enterprise. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6/4(48), 46–49. 4. Elkem ASA Research. Modifikator Superseed®Extra Inoculant (2003). ITB "Lit'e Ukraini", 12 (40). 5. Elkem ASA Research. Modifikator Reseed®Inoculant (2004). ITB "Lit'e Ukraini", 7 (47). 6. Elkem

ASA Research. Modifikator SMZ®Inoculant (2004). ITB "Lit'e Ukraini", 5 (45). 7. Gun'ko, I. M., Chervonyj, I. F., Egorov, S. G. (2011). Analiz tehnogennyh istochnikov i tehnologicheskikh shem proizvodstva pentaoksida vanadija. Metalurgija : naukovyi prac'i Zaporiz'koi' derzhavnoi' inzhenernoi' akademii', 25, 59–67. 8. Krivoruchko, N. P., Bachurskij, D. V., Chervony, I. F., Habrov, D. M., Matveev, E. A., Shherban', E. P. (2012). Temperaturnyj rezhim potочноj linii jelektroliza magnija titanovogo proizvodstva. Metalurgija: Zbirnik naukovih prac', 1 (26), 58–61. 9. Chervonyj, I. F., Listopad, D. A., Ivashhenko, V. I. (2009). Porcionno-periodicheskaja podacha magnija v processe magnietermicheskogo vosstanovlenija tetrahlorida titana. Metalurgija: naukovyi prac'i ZDIA, 20, 63–70. 10. Demin, D. O. (2014). Modeljuvannja ta optymizacija upravlinnja procesamy elektroplavky v umovah nevyznachenosti. National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", 36.

Надійшла (received) 25.09.2014

## УДК 621.785.53

**К. О. КОСТИК**, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПІ»;

**В. О. КОСТИК**, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПІ»

### МОДЕЛЮВАННЯ ГЛИБИНИ БОРИДНОГО ШАРУ СТАЛІ 4Х5МФС ПРИ ЗМІНІ ТРИВАЛОСТІ БОРУВАННЯ ПО НАНОТЕХНОЛОГІЇ

Отримана модель глибини боридного шару при заданій температурі при зміні тривалості часу борування легованої сталі по нанотехнології, яка спрямована на скорочення тривалості хіміко-термічної обробки при одержанні високоякісних дифузійних шарів, які забезпечують необхідні експлуатаційні властивості виробів. Модель отримана знаходженням рівняння апроксимації з використанням метода найменших квадратів та матричного підходу до регресивного аналізу.

**Ключові слова:** сталь, борування, хіміко-термічна обробка, дифузійний шар, глибина шару, модель.

**Вступ.** Хіміко-термічна обробка, при якій здійснюється зміцнення поверхні деталей, є найбільш ефективним та розповсюдженим методом підвищення стійкості деталей, які працюють в складних умовах випробування найвищих напружень від зовнішніх сил, що відповідають за зародження і розвиток втомного та корозійного руйнування і зносу [1–2].

Останнім часом все більше уваги надається тому, як саме параметри хіміко-термічної обробки та склад насичувального середовища впливають на формування і властивості дифузійного шару сплавів. Це пов'язано з необхідністю розробки нових, більш вигідних з економічної точки зору способів зміни властивостей поверхневих шарів деталей. Таким чином, серед нових процесів дифузійного насичування все більше значення має борування [3–6].

**Аналіз публікацій.** Існує багато різних за технологією способів борування. Вибір методу диктується його технологічністю, обладнанням, яке є на виробництві, конфігурацією, розмірами, умовами роботи і ступенем досягнутого підвищення стійкості зміцнених виробів. У масовому виробництві обробка нескладних, середніх за розмірами виробів переважно здійснюється електролізним і газовим боруванням. При обробці дрібних складних за конфігурацією виробів доцільніше використовувати рідкий або порошковий методи борування. Порошковий метод більш прийнятний, якщо зміцнені вироби не вимагають

© К. О. КОСТИК, В. О. КОСТИК, 2014