

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 : naukovi prac'i Zaporiz'koj' derzhavnoj' inzhenernoj' 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: naukovi 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

подальшої термообробки. Крупногабаритні вироби, особливо при необхідності їх місцевого борування або поєднання борування з термічною обробкою, доцільно насичувати в обмазках (в пастах).

Процес борування здійснюється з порошків, розплавів солей і газового середовища залежно від форми, розмірів і кількості деталей, що піддаються боруванню, а також від наявності необхідного устаткування. Кожен з названих технологічних процесів борування має свої переваги в тих або інших умовах застосування, а тому не можна віддати перевагу якому-небудь одному способу насичення [7–9].

**Мета роботи.** Метою роботи є моделювання глибини боридного шару при заданій температурі та зміні тривалості часу борування легованої сталі по нанотехнології, яка спрямована на скорочення процесу хіміко-термічної обробки при одержанні високоякісних боридних шарів, що забезпечують необхідні експлуатаційні властивості виробів.

**Методика експерименту.** Матеріалом дослідження є легована сталь 4Х5МФС. Для борування в пастах застосовувалася суміш на основі нанодисперсних боровмісних речовин [10]. Нагрівання здійснювали в камерній печі при температурі 1000 °С тривалістю від 15 до 120 хв з шагом 15 хв.

**Обговорення результатів.** За експериментальними даними отримано залежність товщини боридів від тривалості борування для досліджуваної сталі. Для кожного технологічного параметру процесу ХТО брали по три зразки, товщина дифузійних шарів яких майже співпадала.

Знаходили рівняння апроксимації методом найменших квадратів з використанням матричного підходу до регресивного аналізу. Модель глибини боридного шару при заданій температурі при зміні тривалості борування сталі 4Х5МФС від 15 до 120 хв має вигляд:

$$y = a_0 + a_1 \cdot \tau + a_2 \cdot \tau^2, \quad (1)$$

де  $y$  – глибина дифузійного шару;  $\tau$  – тривалість борування;  $a_0, a_1, a_2$  – коефіцієнти апроксимації.

У моделі змінювалися два фактори –  $\tau$  та  $\tau^2$ , тому модель розглядали як повний факторний експеримент типу  $N=2^k$ , а саме  $N=2^2$ .

Для знаходження коефіцієнтів апроксимації необхідно було знайти матрицю  $A$ , яка має вигляд:

$$A = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Матрицю  $A$  знаходили методом найменших квадратів по формулі:

$$A = (f' \cdot f)^{-1} \cdot f' \cdot Y, \quad (3)$$

де  $f$  – матриця, яка має вигляд:

$$f = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{21} \\ 1 & x_{12} & x_{22} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{1n} & x_{2n} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

де  $x_1$  – перший фактор, який варіювали, дорівнює  $\tau$ ,  $x_2$  – другий фактор, який варіювали, дорівнює  $\tau^2$ ;  $n$  – кількість варіювання.

$f'$  – транспонована матриця  $f$ ;  $Y$  – матриця, яка має вигляд:

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}, \quad (5)$$

де  $y$  – експериментальне середнє значення боридного шару при конкретній тривалості обробки.

Для рішення рівняння 3 в математичному пакеті Matcad була написана програма (рис. 1), знайдена матриця  $A$ , рівняння апроксимації, яке дозволяє прогнозувати товщину боридного шару для сталі 4X5МФС в діапазоні тривалості від 15 до 120 хв, має вигляд:

$$y = 6,0059 + 0,1653 \cdot \tau + 0,0023 \cdot \tau^2. \quad (6)$$

Перевірку адекватності отриманої моделі робили за допомогою критерію Фішера:

$$F = \frac{S_d^2}{S_E^2} \leq F_{кр}, \quad (7)$$

де  $F$  – критерій Фішера;  $F_{кр}$  – критичне значення критерію Фішера, табличне значення;  $S_d^2$  – дисперсія неадекватності моделі;  $S_E^2$  – дисперсія помилки експерименту.

$$S_d^2 = \frac{S_D}{\varphi_1}, \quad (8)$$

де  $\varphi_1$  – число ступеня свободи:

$$\varphi_1 = N - (k + 1), \quad (9)$$

де  $N$  – кількість факторів експерименту,  $N = 2^k = 2^2 = 4$ ;  $k$  – число параметрів, які оцінювали,  $k = 2$ .

$$S_D = \sum_{i=1}^n v(\bar{y}_i - y_i)^2, \quad (10)$$

де  $v$  – кількість експериментів при кожному конкретному значенні тривалості;  $\bar{y}_i$  – розрахункове значення глибини боридного шару за отриманою моделлю (рівняння 6).

$$S_E^2 = \frac{S_E}{v\varphi_2}, \quad (11)$$

де  $\varphi_2$  – число ступеня свободи:

$$\varphi_2 = N(v - 1), \quad (12)$$

$$S_E = \sum_{i=1}^n (y_{ij} - y_i)^2, \quad (13)$$

де  $y_{ij}$  – кожне експериментальне значення боридного шару.

Згідно розрахунків (рис. 2)  $F = 2,225529$ , тоді як табличне значення при  $\varphi_1 = 6$  та  $\varphi_2 = 16$ ,  $F_{кр} = 2,74$  (при рівні значення 0,05). Таким чином, умови рівняння 7 виконуються, згідно – модель (рівняння 6) адекватна та коефіцієнти апроксимації знайдені вірно.

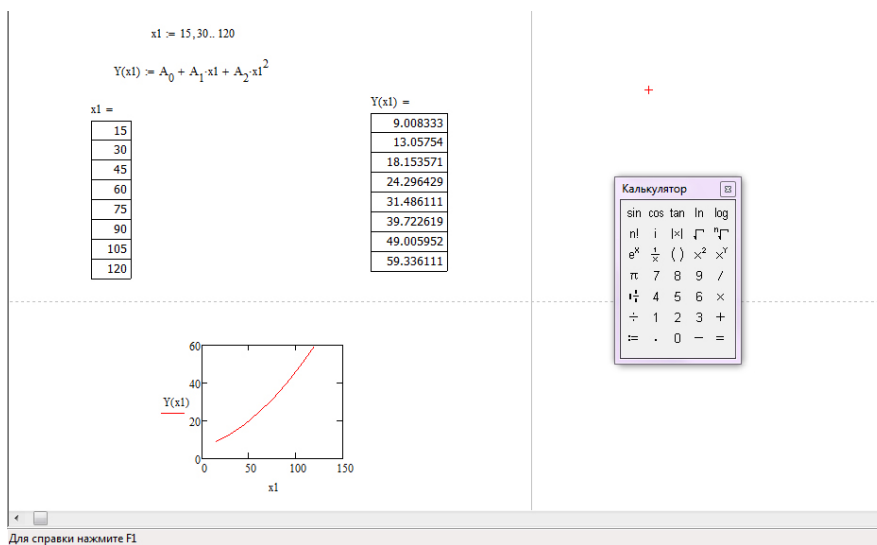
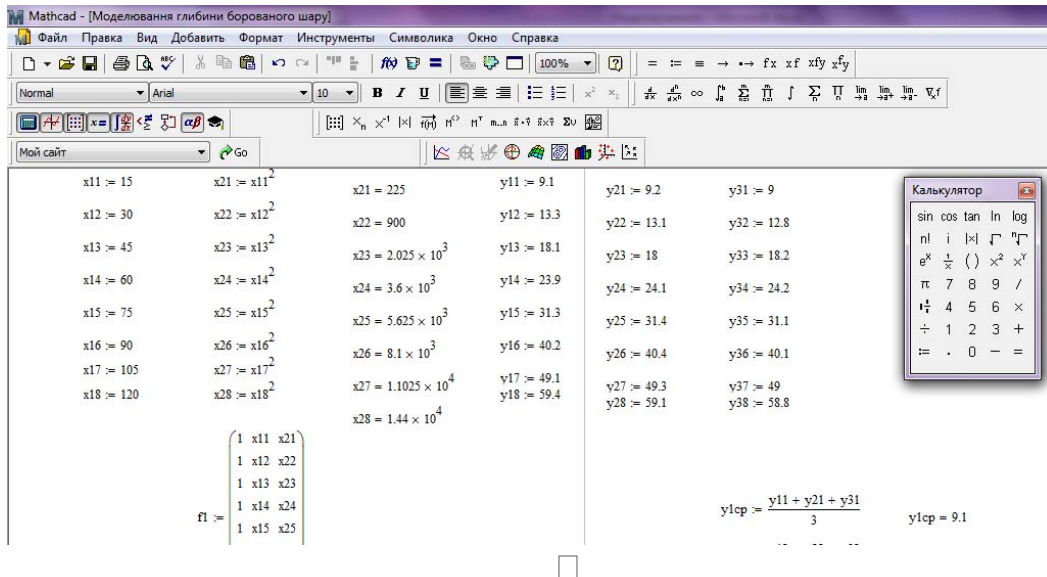


Рис. 1 – Рішення рівняння 3 в математичному пакеті Matcad

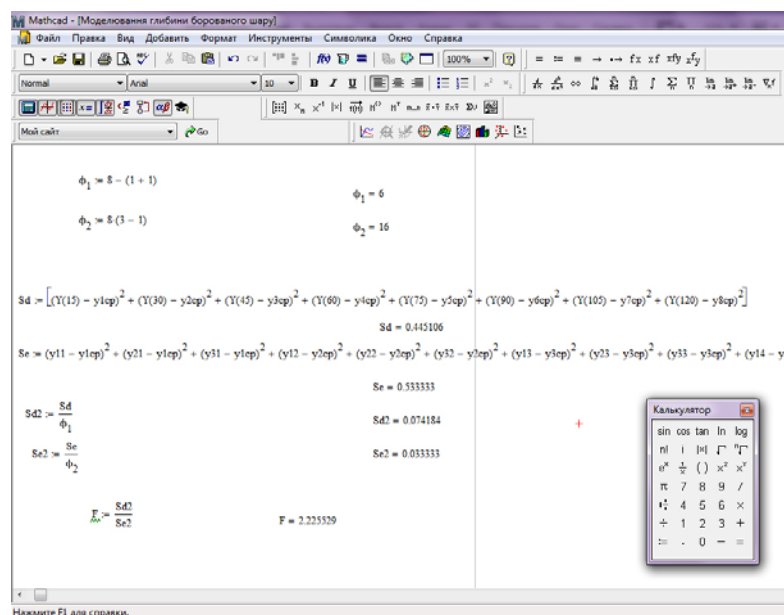


Рис. 2 – Перевірка адекватності моделі за критерієм Фішера в математичному пакеті Matcad

**Висновки.** Отримана модель глибини боридного шару при заданій температурі при зміні тривалості борування легованої сталі 4Х5МФС від 15 до 120 хв, яка має вигляд:

$$y = 6,0059 + 0,1653 \cdot \tau + 0,0023 \cdot \tau^2.$$

**Список літератури:** 1. Шмыков А. А. Термодинамика и кинетика процессов взаимодействия контролируемых атмосфер с поверхностью стали [Текст] / А. А. Шмыков, В. Г. Хорошайлов, Е. Л. Гюлиханданов – М. : Metallurgy. – 1991. – 160 с. 2. Смирнов М. А. Основы термической обработки стали: учебное пособие [Текст] / М. А. Смирнов, В. М. Счастливцев, Л. Г. Журавлев. – М. : «Наука и технологии», 2002. – 519 с. 3. Костик В. О. Формирование микроструктуры борированного слоя на поверхности углеродистой конструкционной и инструментальной сталей из обмазок при печном нагреве [Текст] / В. О. Костик, О. В. Сапуцкая, Е. А. Костик // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2005. – № 5/1 (17). – С. 63–68. 4. Райцес, В. Б. Химико-термическая обработка деталей / В. Б. Райцес, В. М. Литвин. – К. : Техніка, 1980. – 152 с. 5. Лахтин, Ю. М. Химико-термическая обработка металлов : учебное пособие [для вузов] [Текст] / Ю. М. Лахтин, Б. Н. Арзамасов. – М. : Metallurgy, 1985. – 256 с. 6. Kulka, M. The influence of carbon content in the borided Fe-alloys on the microstructure of iron borides [Текст] / M. Kulka, A. Pertek, L. Klimek // Mater. Charact. – 2006. – T. 56(3). – P. 232–240. 7. Genel, K. Kinetics of boriding of AISI W1 steel [Текст] / K. Genel, I. Ozbek, C. Bindal // Material Science and Engineering A. – 2003. – T. 347(1–2). – P. 311–314. 8. Stergioudis, G. Formation of boride layers on steel substrates [Текст] / G. Stergioudis // Cryst. Res. And Technol. – 2006. – T. 41(10). – P. 1002–1004. 9. Sen Saduman. An approach to kinetic study of borided steels / Sen Saduman, Sen Ugur, Bindal Cuma // Surface and Coating Technologies. – 2005. – T. 191( 2–3). – P. 274–285. 10. Патент України №33654, МПК8 с 23 с 8/00. Склад для борування сталевих виробів [Текст] / О. О. Павлюченко, В. О. Костик, К. О. Костик. – Заявка №u200800226. Заявл. 04.01.08, надрук. 10.07.08, Бюл. № 13.

**Bibliography (transliterated):** 1. Shmykov, A. A., Khoroshaylov, V. G., Gyulihandarov, E. L. (1991). Thermodynamics and kinetics of the interaction of controlled atmospheres with the surface of steel. Metallurgy, 160 p. 2. Smirnov, M. A., Schastlivtsev, V.M, Zhuravlev, L.G. (2002). Fundamentals of heat treatment of steel : a tutorial. Science and Technology, 519 p. 3. Kostik, V. O., Saputskaya, O. V., Kostik, E. A. (2005) Formirovanie mikrostrukturyi borirovannogo sloya na poverhnosti uglevodistyoy konstruktsionnoy i instrumentalnoy stalyah iz obmazok pri pechnom nagreve. Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovyih tehnologiy, 5/1 (17), 63–68. 4. Raytses, V. B., Litvin, V. M. (1980) Himiko-termicheskaya obrabotka detaley. Kiev: TehnIka, 152. 5. Lahtin, Yu. M., Arzamasov, B. N. (1985) Himiko-termicheskaya obrabotka metallov. Moscow: Metallurgiya, 256. 6. Kulka, M., Pertek, A., L. Klimek, M. (2006) The influence of carbon content in the borided Fe-alloys on the microstructure of iron borides. Mater. Charact, 56(3), 232–240. 7. Genel, K., Ozbek, I., Bindal, C. (2003) Kinetics of boriding of AISI W1 steel. Material Science and Engineering A, 347(1–2), 311–314. 8. Stergioudis G. (2006) Formation of boride layers on steel substrates. Cryst. Res. And Technol, 41(10), 1002–1004. 9. Sen Saduman, Sen Ugur, Bindal Cuma (2005) An approach to kinetic study of borided steels. Surface and Coating Technologies, 191( 2–3), 274–285. 10. Patent UkraYini №33654, МПК8 s 23 s 8/00. Sklad dlya boruvannya stalevih virobiv / O. O. Pavlyuchenko, V. O. Kostik, K. O. Kostik. – Zayavka №u200800226. Zayavl. 04.01.08, nadruk. 10.07.08, Byul. № 13.

Надійшла (received) 25.09.2014