

УДК 621.74

DOI: 10.15587/2313-8416.2016.69969

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПО КРИТЕРИЮ ТВЕРДОСТИ РЕЖИМОВ ТЕРМООБРАБОТКИ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ СТАЛИ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОГО МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

© А. А. Радченко, Ю. Н. Алексеенко, В. И. Чумаченко, В. В. Богдан

*Выполнено математическое моделирование влияния марки литой высокопрочной стали, легированной марганцем, никелем, хромом и молибденом, и режимов термической обработки на твердость стали. Модель построена на основании ортогонального планирования эксперимента, в котором входные переменные рассмотрены как нечеткие числа. Найдены оптимальные режимы термической обработки для сталей марок 25ГНХМЛ, 35ГНХМЛ, 40ГНХМЛ*

**Ключевые слова:** высокопрочная сталь, термическая обработка, нечеткая кластеризация, искусственная ортогонализация

*The mathematical simulation of high-strength cast steel grade alloyed with manganese, nickel, chromium and molybdenum, and heat treatment conditions on the steel hardness are done. The model is developed on the basis of orthogonal experimental design, in which the input variables are considered as fuzzy numbers. The optimal heat treatment conditions for steels 25ГНХМЛ, 35ГНХМЛ, 40ГНХМЛ are determined*

**Keywords:** high-strength steel, heat treatment, fuzzy clustering, artificial orthogonalization

### 1. Введение

Управление качеством черных сплавов является очень сложной задачей, зависящей от многих параметров. Как было показано в работе [1] на примере сложнолегированного чугуна, на формирование физико-механических свойств влияют практически все элементы химического состава сплава, режимы плавки, модифицирования и легирования. Применительно к готовым отливкам количество факторов увеличивается еще значительно, существенное влияние начинают оказывать промежуточные параметры качества, формируемые на предшествующих технологических операциях. Например, формирование остаточных напряжений, вызывающих коробление или формирование трещин в горячих или холодных отливках [2, 3], усадочную и газовую пористость [4], несплошности и т. д. [5, 6]. Все это вызывает необходимость всесторонних исследований, направленных на выявление наиболее существенных факторов, влияющих на характеристики сплава.

### 2. Анализ литературных данных

Несмотря на огромное количество влияющих факторов, вносящих общий вклад в формирование

качества сплава или отливок из него изготовленных, особый интерес исследователей вызывают финишные операции, к числу которых относится термическая и химико-термическая обработка. Исследователи пытаются построить математические модели данных процессов [7, 8], объяснить вероятные механизмы протекающих процессов для целенаправленного управления формированием желательных структур [9, 10], применить современные методы обработки термической обработки поверхностей [11, 12]. Такое многообразие подходов к решению проблем управления качеством сплавов должно обязательно учитывать специфические условия конкретного промышленного производства, поэтому любое исследование в этом направлении может расширить базу знаний в области эффективного управления желаемыми характеристиками сплавов.

### 3. Цель и задачи исследования

Целью работы являлся оптимизация технологических режимов термической обработки высокопрочных сталей трех марок: 25ГНХМЛ, 35ГНХМЛ, 40ГНХМЛ.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- построить ортогональный план эксперимента для входных переменных, являющихся нечеткими числами;
- построить математическую модель для последующей оптимизации.

**4. Экспериментальные данные и методика их обработки**

В качестве экспериментальных данных выбраны результаты промышленных исследований, изложенные в работе [13] (табл. 1).

Таблица 1

Исходные данные для моделирования

Марка стали	Режим термической обработки	Твердость НВ
25ГНХМЛ	900 °С 2 часа, воздух, 370 °С вода	364
	900 °С 2 часа, воздух, 540 °С вода	364
	900 °С 2 часа, воздух, 675 °С вода	255
35ГНХМЛ	900 °С 2 часа, воздух, 370 °С вода	477
	900 °С 2 часа, воздух, 540 °С вода	387
	900 °С 2 часа, воздух, 675 °С вода	269
40ГНХМЛ	900 °С 2 часа, воздух, 370 °С вода	430
	900 °С 2 часа, воздух, 540 °С вода	402
	900 °С 2 часа, воздух, 675 °С вода	269

Если выбрать в качестве входных переменных содержание углерода в стали ( $x_1$ ) и температуру на последнем этапе термообработки ( $x_2$ ), то для построения ортогонального центрального композиционного плана (ОЦКП) второго порядка необходимо иметь 9 экспериментальных точек с координатами в натуральном виде: (0,25; 675), (0,40; 370), (0,25; 370), (0,40; 675), (0,40; **522,5**), (0,25;**522,5**), (**0,325**; 675), (**0,325**; 370), (**0,325**; **522,5**). Жирным шрифтом выделены координаты ортогонального плана, в которых экспериментальные данные отсутствуют. Это видно из табл. 1. Поэтому для построения модели применен метод искусственной ортогонализации [14], на основании которого по близким к соответствующим вершинам плана точкам получены приблизительные оценки значений выходной переменной – твердости стали. При этом сами входные переменные рассмотрены как нечеткие числа, т. к. марка стали регламентирует неточное содержание углерода, а лишь его возможный диапазон. Т. е. принято, что истинные значения входных переменных  $F_{jp}$  описываются функциями принадлежности (L–R) типа [14]:

$$\mu(F_{jp}) = \begin{cases} L\left(\frac{\bar{F}_{jp} - F_{jp}}{\alpha_{jp}}\right), & F_{jp} \leq \bar{F}_{jp}, \\ R\left(\frac{F_{jp} - \bar{F}_{jp}}{\beta_{jp}}\right), & F_{jp} > \bar{F}_{jp}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\bar{F}_{jp}$  – измеренное значение  $p$ -й координаты (входной переменной) в  $j$ -м эксперименте, являющееся модальным для нечеткого числа  $F_{jp}$ ,  $j = 1, 2, \dots, n$ ,  $p = 1, 2, \dots, m$ ,  $\alpha_{jp}$ ,  $\beta_{jp}$  – левые и правые коэффициенты нечеткости в описании (1).

**5. Результаты моделирования и их обсуждение**

После нормирования выполнялся расчет коэффициентов математической модели по известной методике [15] в среде электронных таблиц Excel и строилась поверхность отклика, описывающая зависимость твердости стали от выбранного режима термообработки для каждой из марок исследуемой стали. Оптимальные режимы находились путем исследования полученного многомерного уравнения регрессии на экстремум.

На рис. 1 показана поверхность отклика, описывающая полученную математическую модель.

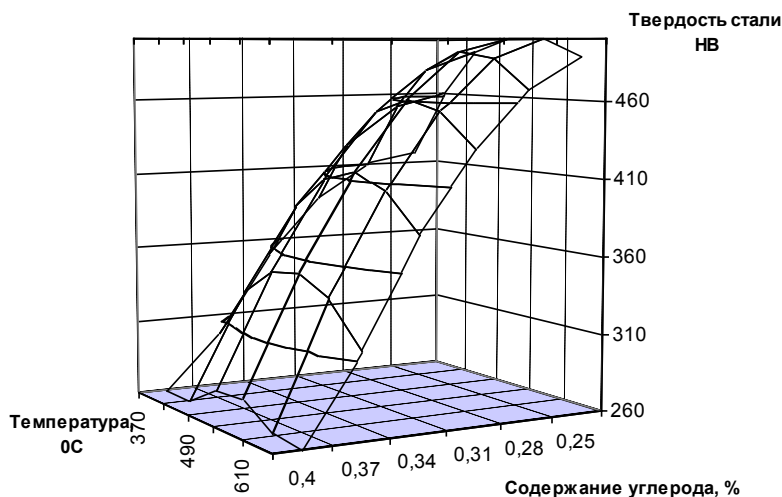


Рис. 1. Поверхность отклика для твердости стали

Визуальный анализ полученной поверхности отклика позволяет говорить о существенном влиянии содержания углерода, причем с понижением марки стали твердость увеличивается. Однако для каждой марки стали существует свой оптимальный температурный режим, определяемый как экстремум функции в сечении поверхности плоскостью, параллельной плоскости  $x_2OZ$  на уровне, соответствующем заданной марке стали. Причем, обращает на себя внимание, что

полученные кривые проходят через оптимум, что позволяет сделать вывод о целесообразности излишнего нагрева сверх оптимальной температуры.

### 6. Выводы

Таким образом, получено, что оптимальная температура соответствует примерно 550 °С и обеспечивает для марки 25ГНХМЛ твердость HB470, для марки 35ГНХМЛ твердость HB410, а для марки 40ГНХМЛ твердость HB290. Необходимо отметить, что полученные результаты по максимальной твердости имеют не точные значения, т. к. входные переменные рассматривались как нечеткие числа. Поэтому указанные значения твердости являются модальными.

### Литература

1. Дьомін, Д. О. Деякі аспекти управління якістю чавуну з пластинчастим графітом [Текст]: дис.... канд. техн. наук / Д. О. Дьомін. – Харків, 1995. – 181 с.
2. Акимов, О. В. Анализ собственных колебаний отливки блок-картера дизеля “СМД” [Текст] / О. В. Акимов, Ю. П. Анацкий, В. А. Солошенко // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – 1999. – № 66. – С. 40–47.
3. Акимов, О. В. Анализ погрешностей формообразования отливок колес турбин турбокомпрессоров для двигателя ДВС на этапе изготовления их восковых моделей [Текст] / О. В. Акимов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2003. – № 3 (3). – С. 16–24.
4. Пономаренко, О. И. Компьютерное моделирование процессов кристаллизации как резерв повышения качества поршней ДВС [Текст] / О. И. Пономаренко, Н. С. Тренёв // Технологический аудит и резервы производства. 2013. – № 6/2(14). – С. 36–40. – Режим доступа: <http://journals.uran.ua/tarp/article/view/19529/17205>
5. Хорошилов, О. Н. Повышение Качества Непрерывнолитых Заготовок Из Медных Сплавов [Текст] / О. Н. Хорошилов, О. И. Пономаренко, А. В. Кипенский, В. В. Наний // Metallurgia машиностроения. – 2012. – № 12. – С. 29–31.
6. Бреславский, Д. В. Управление качеством непрерывно литых заготовок [Текст] / Д. В. Бреславский, О. Н. Хорошилов, О. И. Пономаренко // Вісник ДДМА. – 2010. – № 3 (20). – С. 41–46.
7. Костик, К. О. Розробка швидкісної технології борування легованої сталі [Текст] / К. О. Костик // Східно-європейський журнал передових технологій. – 2015. – Т. 6, № 11 (78). – С. 8–15. doi: 10.15587/1729-4061.2015.55015
8. Костик, К. О. Порівняльний аналіз впливу газового та іонно-плазмового азотування на зміну структури і властивостей легованої сталі 30X3BA [Текст] / К. О. Костик, В. О. Костик // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення у сучасних технологіях. – 2014. – № 48. – С. 21–41.
9. Sun, Y. Effect of hydrogen on ductility of high strength quenched and tempered (QT) Cr–Ni–Mo steels [Text] / Y. Sun, J. Chen, J. Liu // Materials Science and Engineering: A. – 2015. – Vol. 625. – P. 89–97. doi: 10.1016/j.msea.2014.12.013
10. Kisko, E A. Effects of reversion and recrystallization on microstructure and mechanical properties of Nb-alloyed low-Ni high-Mn austenitic stainless steels [Text] / A. Kisko, A. S. Hamada, J. Talonen, D. Porter, L. P. Karjalainen // Materials Science and Engineering: A. – 2016. – Vol. 657. – P. 359–370. doi: 10.1016/j.msea.2016.01.093
11. Mohanad, M. K. Modeling of the case depth and surface hardness of steel during ion nitriding [Text] / M. K. Mohanad, V. Kostyk, D. Domin, K. Kostyk // Eastern-

- European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – Vol. 2, Issue 5 (80). – P. 45–49. doi: 10.15587/1729-4061.2016.65454
12. Костик, К. О. Зміцнення прес-форм лиття під тиском по нанотехнології [Текст] / К. О. Костик // Машинобудування. – 2013. – № 12. – С. 113–118.
  13. Бидуля, П. Н. Технология стальных отливок [Текст] / П. Н. Бидуля. – Metallurgizdat, 1961. – 352 с.
  14. Дёмин, Д. А. Применение искусственной ортогонализации в поиске оптимального управления технологическими процессами в условиях неопределённости [Текст] / Д. А. Дёмин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – Т. 5, № 9 (65). – С. 45–53. – Режим доступа: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/18452>
  15. Дёмин, Д. А. Нечеткая кластеризация в задаче построения моделей «состав – свойство» по данным пассивного эксперимента в условиях неопределённости [Текст] / Д. А. Дёмин // Проблемы машиностроения. – 2013. – Т. 16, № 6. – С. 15–23. – Режим доступа: <http://journals.uran.ua/jme/article/view/21309/36478>
  16. Дёмин, Д. А. Методология формирования функционала для задачи оптимального управления электроплавкой [Текст] / Д. А. Дёмин // Технологический аудит и резервы производства. – 2011. – Т. 1, № 1 (1). – С. 15–24. – Режим доступа: <http://journals.uran.ua/tarp/article/view/4082/3748>

### References

1. Domin, D. O. (1995). Dejaki aspekty upravlinnja jakistju chavunu z plastynchastym grafitom. Kharkiv, 181.
2. Akimov, O. V., Anackij, Ju. P., Soloshenko, V. A. (1999). Analiz sobstvennyh kolebanij otlivki blok-kartera dizelja “SMD”. Vestnik Har'kovskogo gosudarstvennogo politehnicheskogo universiteta, 66, 40–47.
3. Akimov, O. V. (2003). Analysis of errors in formshaping of casts of turbo compressor turbine wheels for combustion engine supercharge at the stage of their wax models production. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3 (3), 16–24.
4. Ponomarenko, O. I., Trenjov, N. S. (2013). Computer modeling of crystallization processes as a reserve of improving the quality of pistons of ICE. Technology audit and production reserves, 6 (2 (14)), 36–40. Available at: <http://journals.uran.ua/tarp/article/view/19529/17205>
5. Horoshilov, O. N., Ponomarenko, O. I., Kipenskij, A. V., Naniy, V. V. (2012). Povyshenie kachestva nepreryvno litihykh zagotovykh iz mednykh splavov. Metallurgija mashinostroenija, 12, 29–31.
6. Breslavskij, D. V., Horoshilov, O. N., Ponomarenko, O. I. (2010). Upravlenie kachestvom nepreryvno litihykh zagotovykh. Visnik DDMA, 3 (20), 41–46.
7. Kostik, K. O. (2015). Development of the high-speed boriding technology of alloy steel. Eastern-european journal of enterprise technologies, 6 (11 (78)), 8–15. doi: 10.15587/1729-4061.2015.55015
8. Kostyk, K. O., Kostyk, V. O. (2014). Porivnjaj'nyj analiz vplyvu gazovogo ta ionno-plazmovogo azotuvannja na zminu struktury i vlastyvostej legovanoi' stali 30H3VA. Visnyk Nacional'nogo tehničnogo universytetu «HPI». Serija: Novi rishennja u suchasnyh tehnologijah, 48, 21–41.
9. Sun, Y., Chen, J., Liu, J. (2015). Effect of hydrogen on ductility of high strength quenched and tempered (QT) Cr–Ni–Mo steels. Materials Science and Engineering: A, 625, 89–97. doi: 10.1016/j.msea.2014.12.013
10. Kisko, A., Hamada, A. S., Talonen, J., Porter, D., Karjalainen, L. P. (2016). Effects of reversion and recrystallization on microstructure and mechanical properties of Nb-alloyed low-Ni high-Mn austenitic stainless steels. Materials Science and Engineering: A, 657, 359–370. doi: 10.1016/j.msea.2016.01.093
11. Mohanad, M. K., Kostyk, V., Domin, D., Kostyk, K. (2016). Modeling of the case depth and surface hardness of

steel during ion nitriding. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2 (5 (80)), 45–49. doi: 10.15587/1729-4061.2016.65454

12. Kostyk, K. O. (2013). Zmicnennja pres-form lyt-tja pid tyskom po nanotehnologii'. Mashynobuduvannja, 12, 113–118.

13. Bidulja, P. N. (1961). Tehnologija stal'nyh otlivok. Metallurgizdat, 352.

14. Domin, D. A. (2013). Artificial orthogonalization in searching of optimal control of technological processes under uncertainty conditions. Eastern-European Journal of Enterprise Tech-

nologies, 5 (9 (65)), 45–53. Available at: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/18452>

15. Domin, D. A. (2013). Mathematical modeling in the problem of selecting optimal control of obtaining alloys for machine parts in uncertainty conditions. Problems of mechanical engineering, 16 (6), 15–23. Available at: <http://journals.uran.ua/jme/article/view/21309/36478>

16. Domin, D. A. (2011). Methodology of forming functional in the optimal control electric smelting. Technology audit and production reserves, 1 (1 (1)), 15–24. Available at: <http://journals.uran.ua/tarp/article/view/4082/3748>

*Рекомендовано до публікації д-р техн. наук, професор Хорошилов О. М.  
Дата надходження рукопису 12.05.2016*

**Радченко Александр Алексеевич**, кандидат технических наук, ПАО «Харьковский Тракторный Завод им. С. Орджоникидзе», пр. Московский, 275, г. Харьков, Украина, 61007

**Алексеев Юлия Николаевна**, кафедра литейного производства, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ул. Багалея, 21, г. Харьков, Украина, 61002  
E-mail: litvol1@kpi.kharkov.ua

**Чумаченко Виталий Иванович**, кафедра литейного производства, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ул. Багалея, 21, г. Харьков, Украина, 61002

**Богдан Виктория Владимировна**, кафедра литейного производства, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ул. Багалея, 21, г. Харьков, Украина, 61002

УДК 621.74

DOI: 10.15587/2313-8416.2016.69970

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ТЕПЛОЙ СУШКИ ЖИДКОСТЕКЛЬНОЙ СМЕСИ ПО КРИТЕРИЮ ПРОЧНОСТИ НА РАЗРЫВ

© П. С. Зинченко, В. В. Голиньков, С. А. Старых, М. А. Ступар

*Выполнено математическое моделирование процесса тепловой сушки омагниченной жидкостекляной смеси. Показано, что в исследованной области входных переменных – напряженности магнитного поля и времени сушки, оптимальные параметры процесса составляют 143493 А/м и 5 мин соответственно. При таких значениях параметров имеется принципиальная возможность повышения прочности образца на разрыв до 3,2 кг/см<sup>2</sup>*

**Ключевые слова:** напряженность магнитного поля, смесеприготовительное отделение, жидкостекляная смесь

*Mathematical simulation of thermal drying of magnetized liquid glass mixture is done. It is shown that in the investigated range of input variables - magnetic field strength and drying time, the optimum process parameters are 143493 A/m and 5 min respectively. Principal possibility of increasing the tensile strength of the sample up to 3.2 kg/cm<sup>2</sup> is observed under such values of the parameters*

**Keywords:** magnetic field strength, mixture preparation section, liquid glass mixture

### 1. Введение

Современные тенденции в области развития литейного производства таковы, что на первое место выходят разработки, связанные с созданием компьютерно-интегрированных технологий, в основе которых лежит оптимизация конструкторско-технологической подготовки производства. В отличие от предшествующих подходов к освоению технологий новых отливок, характерных для производства XX века, современные подходы предполагают параллельное решение вопросов проектирования и технологиче-

ского воплощения проектных решений в жизнь. Это стало возможным благодаря использованию CAD/CAM/CAE-систем, однако базируется это на понимании того, что без согласованности конструкторской разработки и технологических возможностей нельзя получить высококачественную отливку [1, 2]. Т. е. несоответствие технологических возможностей конструкторскому решению (проекту) приводит к получению отливок, не удовлетворяющих тем или иным требованиям. И тут на первое место выходит человеческий фактор – отсутствие современных средств