

УДК 681.2.002.2

Н. Д. КОШЕВОЙ, З. Э. ЧИСТИКОВА

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина***ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ТЕРМООБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ**

Проведен полный факторный эксперимент по изучению технологического процесса термообработки деталей из высокоуглеродистых сталей, на основании которого выданы рекомендации относительно оптимальных режимов работы при данном виде обработки. Построена математическая модель, характеризующая зависимость количества дефектов при термообработке от температуры закалки, температуры охлаждения маслом и температуры охлаждения водой. Выполнена оптимизация методом крутого восхождения (мысленные опыты). Подтверждена эффективность реализации мысленных опытов с помощью определения твердости у лучших образцов по методу Роквелла. Некоторые из реализованных опытов дали лучший результат по сравнению с наилучшим опытом полного факторного эксперимента, что дало возможность еще больше повысить качество деталей.

Ключевые слова: планирование эксперимента, термообработка, полный факторный эксперимент, параметр оптимизации, количество дефектов, режим работы, крутое восхождение.

Введение

Постановка проблемы. Детали (резцы, фрезы, протяжки, прутки и др.) из высокоуглеродистых сталей, таких как У7, У8А, У9, У10, У11, У12 имеют большое количество недопустимых дефектов (трещины, деформация, перегрев, недогрев и др.). Решить сложившуюся проблему можно путём оптимизации технологического процесса термообработки с помощью методов планирования эксперимента. В данной статье был рассмотрен образец из материала У8А.

Анализ последних исследований и публикаций. В последнее время вопрос оптимизации режимов термообработки активно изучают ряд исследователей [1, 2], а также известны локальные методы термической обработки и метод с использованием микроволнового излучения [3 - 5]. В известных источниках в явном виде не приведены математические модели процесса термической обработки. Для оптимизации технологического процесса данного вида обработки целесообразно использовать метод планирования эксперимента [6], с помощью математических моделей выполнить крутое восхождение и проверить эффективность реализации серии мысленных опытов.

Цель работы: уменьшить количество дефектов в деталях из высокоуглеродистых сталей после термообработки. Минимизировать время и затраты на устранение дефектов уже после изготовления вышеуказанных деталей.

Основные результаты исследований

В качестве количественного параметра оптимизации выберем число дефектов. Определим доминирующие факторы, с помощью которых можно воздействовать на оптимизируемый объект. В технологическом процессе указаны основные параметры термообработки данной детали: температура и время для закалки, охлаждения водой, охлаждения маслом, отпуска. Такие параметры как время для закалки, охлаждения водой, охлаждения маслом, отпуска и температура отпуска оставались неизменными в ходе всего эксперимента.

В технологической документации приведены рекомендации по выбору температуры закалки, охлаждения водой, охлаждения маслом. Диапазоны этих величин являются верхними и нижними уровнями факторов:

$$X_1 \in (780^\circ \text{C}; 800^\circ \text{C}),$$

$$X_2 \in (10^\circ \text{C}; 30^\circ \text{C}),$$

$$X_3 \in (20^\circ \text{C}; 70^\circ \text{C}),$$

где X_1 – температура закалки;

X_2 – температура охлаждения водой;

X_3 – температура охлаждения маслом.

План и результаты эксперимента приведены в таблице 1.

Здесь Y – количество дефектов; Y^* – оценка качества образца по 10-тибальной шкале (10 баллов означает отсутствие дефектов); +1 – верхний предел диапазонов величин температур закалки, охлаждения водой, охлаждения маслом; -1 – нижний предел

диапазонов величин температур закали, охлаждения водой, охлаждения маслом.

Таблица 1

План полного факторного эксперимента, результаты исследования и расчет коэффициента X_{ji}

№ опыта (i)	№ фактора (j)			Y	Y*
	1	2	3		
1	-1	-1	+1	2	8
2	+1	-1	-1	2	8
3	-1	+1	-1	0	10
4	+1	+1	+1	0	10
5	-1	-1	-1	3	7
6	+1	-1	+1	1	9
7	-1	+1	+1	0	10
8	+1	+1	-1	1	9

С целью минимизации количества дефектов на данном этапе проведения эксперимента можно дать следующие рекомендации: температура закали должна составлять 780°C, температура охлаждения водой – 30°C, температура охлаждения маслом – 20°C. Также отсутствие дефектов было достигнуто при режимах, где температура охлаждения водой имеет значение 30°C, температура охлаждения маслом – 70°C, температура закали – 780°C или 800°C. Нельзя использовать температуру закали значением 780°C с температурой охлаждения водой величиной 10°C и температурой охлаждения маслом – 20°C.

Модель исследуемого процесса, которую мы будем получать – алгебраический полином первой степени:

$$Y^* = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3,$$

где b_0, b_1, b_2, b_3 – неизвестные коэффициенты модели.

По результатам эксперимента найдем значение данных коэффициентов. Их оценки вычислим по формуле:

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N X_{ji} Y_i^*}{N}, \quad j=0,1,2,3,$$

где N – число опытов;

j – номер фактора;

i – номер опыта.

После вычисления получим математическую модель:

$$Y^* = 8,875 + 0,125X_1 + 0,875X_2 + 0,375X_3.$$

Коэффициенты при независимых переменных указывают на силу влияния факторов на параметр

оптимизации.

Для оптимизации качества термообработанных деталей проведём крутое восхождение (мысленные опыты), т. е. движение в направлении градиента функции отклика [7]. В таблицах 2, 3 приведены параметры планирования серии мысленных опытов до тех пор, пока оценка качества образца достигнет $Y^{**} \geq 20$ баллов.

Таблица 2

Исходные данные для проведения крутого восхождения

Параметры плана	X_1	X_2	X_3
Основной уровень	790	20	45
Интервал варьирования I_j	10	10	25
Верхний уровень	800	30	70
Нижний уровень	780	10	20
b_j	0,125	0,875	0,375
$b_j \times I_j$	1,25	8,75	9,375
Шаг	0,43	3	3,21

Таблица 3

План оптимизации технологического процесса термической обработки методом крутого восхождения (мысленные опыты)

№ опыта	X_1	X_2	X_3	Y^{**}
1	801,72	42	82,84	11,52
2	802,15	45	86,05	11,83
3	802,58	48	89,26	12,14
4	803,01	51	92,47	12,45
5	803,44	54	95,68	12,76
6	803,87	57	98,89	13,07
7	804,30	60	102,10	13,38
8	804,73	63	105,31	13,69
9	805,16	66	108,52	14,0
10	805,59	69	111,73	14,31
11	806,02	72	114,94	14,62
12	806,45	75	118,15	14,93
13	806,88	78	121,36	15,24
14	807,31	81	124,57	15,55
15	807,74	84	127,78	15,86
16	808,17	87	130,99	16,17
17	808,60	90	134,20	16,48
18	809,03	93	137,41	16,79
19	809,46	96	140,62	17,10
20	809,89	99	143,83	17,41
21	810,32	102	147,04	17,72
22	810,75	105	150,25	18,03
23	811,18	108	153,46	18,34
24	811,61	111	156,67	18,64
25	812,04	114	159,88	18,96
26	812,47	117	163,09	19,27
27	812,90	120	166,30	19,58
28	813,33	123	169,51	19,89
29	813,76	126	172,72	20,2

Некоторые из мысленных опытов были реализованы на практике. Результаты исследований приведены в таблице 4.

Таблица 4
Результаты практической реализации некоторых мысленных опытов

№ п/п	X ₁	X ₂	X ₃	Y ^{**}	Y [*]
1	801,72	42	82,84	11,52	10
2	802,15	45	86,05	11,83	10
3	803,01	51	92,47	12,45	9
4	804,30	60	102,10	13,38	6
5	805,16	66	108,52	14,0	7
6	809,46	96	140,62	17,10	5
7	812,90	120	166,30	19,58	4
8	813,76	126	172,72	20,2	5

Здесь Y^{**} – теоретическая оценка качества образца.

Чтобы сравнить качество образцов прошедших термообработку первой и второй серии опытов необходимо определить твердость у лучших образцов по методу Роквелла (рис. 1). Результаты испытаний указаны в таблицах 5, 6.

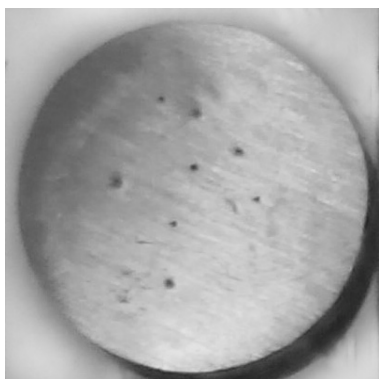


Рис. 1. Образец после измерения твердости по методу Роквелла

Таблица 5
Результаты определения твердости у лучших образцов, полученных при реализации мысленных опытов

№ п/п	X ₁	X ₂	X ₃	Y ^{**}	Y [*]	HRC, кгс
1	801,72	42	82,84	11,52	10	65
2	802,15	45	86,05	11,83	10	64

Здесь HR - обозначение твердости, определённой по методу Роквелла. К символу HR добавляется буква, указывающая на шкалу, по которой проводились испытания (HRC).

Таблица 6
Результаты определения твердости у лучших образцов, полученных при реализации полного факторного эксперимента

№ п/п	X ₁	X ₂	X ₃	Y [*]	HRC, кгс
1	780,0	30	20	10	63
2	800,0	30	70	10	64
3	780,0	30	70	10	63

Выводы

С учетом результатов исследования возможно использование следующих параметров режимов работы при термической обработке деталей из материала У8А:

1) температура охлаждения водой имеет значение 45°C, температура охлаждения маслом – 86°C, температура закалки – 802°C;

2) температура охлаждения маслом составляет 70°C, температура закалки – 800°C, температура охлаждения водой – 30°C.

Наивысший показатель твердости материала детали был достигнут при следующем режиме: температура закалки должна составлять 802°C, температура охлаждения водой – 42°C, температура охлаждения маслом – 83°C.

Литература

1. Зенкин, Р. Ю. Изучение микроструктуры высокопрочного чугуна при различных методах термообработки [Текст] / Р. Ю. Зенкин, М. М. Уткин, А. И. Вальтер // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2013. – № 4. – С. 174–178.

2. Макаров, С. В. Термическая обработка сварочных электродов [Текст] / С. В. Макаров // Технические науки — от теории к практике: материалы XII международной заочной научно-практической конференции, Новосибирск, 30 июля 2012 г. – Новосибирск, 2012. – С. 44.

3. Тарасова, Т. В. Исследование процессов лазерного легирования поверхности алюминиевых сплавов [Электронный ресурс] / Т. В. Тарасова, Г. О. Гвоздева. – Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/330611.html>. – 03.03.2013.

4. Термообработка листового теплоизоляционного материала с использованием микроволнового излучения [Текст] / А. В. Мамонтов [и др.] // Ежемесячное приложение к научно-техническому журналу «Измерительная техника». Метрология. – 2010. – № 11. – С. 38–42.

5. Исследование возможности плавления базальта с помощью СВЧ-энергии [Текст] /

А. В. Мамонтов [и др.] // Измерительная техника. – 2012. – № 9. – С. 49–50.

6. Данилишина, З. Э. Исследование и оптимизация технологического процесса термообработки изделий авиационной техники из высокоуглеродных сталей [Текст] / З. Э. Данилишина // Интегрированные компьютерные технологии в машиностроении ИКТМ-2013 : тез. докл. всеукраинской научно-

технической конференции, Харьков, 26 – 28 ноября 2013 г. – X., 2013. – С. 32.

7. Кошевой, Н. Д. Оптимальное по стоимостным и временным затратам планирование эксперимента [Текст]: моногр. / Н. Д. Кошевой, Е. М. Костенко. – X. : Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2013. – 317 с.

Поступила в редакцию 2.06.2014, рассмотрена на редколлегии 10.06.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. каф. информатики М. Л. Угрюмов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ТЕРМООБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ З ВИСОКОВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ

М. Д. Кошовий, З. Е. Чистикова

Проведено повний факторний експеримент з вивчення технологічного процесу термообробки деталей з високовуглецевих сталей, на підставі якого видано рекомендації щодо оптимальних режимів роботи при даному виді обробки. Побудовано математичну модель, яка характеризується залежністю кількості дефектів при термообробці від температури загартування, температури охолодження маслом і температури охолодження водою. Виконано оптимізацію методом крутого сходження (уявні досліди). Підтверджено ефективність реалізації уявних дослідів за допомогою визначення твердості у кращих зразків за методом Роквелла. Деякі з реалізованих дослідів дали кращий результат порівняно з найкращим дослідом повного факторного експерименту, що дало можливість ще більше підвищити якість деталей.

Ключові слова: планування експерименту, термообробка, повний факторний експеримент, параметр оптимізації, кількість дефектів, режим роботи, круте сходження.

STUDY AND OPTIMIZATION OF THE HEAT TREATMENT PROCESS OF THE DETAILS MADE OF HIGH CARBON STEEL

N. D. Koshevoj, Z. E. Chystikova

A complete factorial experiment to study the heat treatment process of the aircraft engineering details made of high carbon steel has been conducted; on the basis of it, the recommendations for optimal operation modes in this kind of treatment were given. A mathematical model, which defines the dependence of the number of defects in the heat treatment on the hardening temperature, the temperature of oil and water cooling, was drawn up. The optimization by a steepest ascent method (mental experiment) was carried out. The effectiveness of the mental experiments' implementation by the determination of the Rockwell hardness of the best specimens was confirmed. Some of implemented experiments gave better results as compared with the best experience of the complete factorial experiment that made it possible to improve further quality of the details.

Keywords: an experimental design, a heat treatment, a complete factorial experiment, an optimization parameter, a number of defects, an operation mode, steepest ascent.

Кошевой Николай Дмитриевич – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой авиационных приборов и измерений, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: kafedraapi@rambler.ru.

Чистикова Златослава Эдуардовна – аспирант кафедры авиационных приборов и измерений, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.