

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ЗАКАЛКИ И ОТЖИГА СТАЛИ

Шевелёва Анна Константиновна

магистрант Липецкого государственного технического университета, РФ, г. Липецк

Маслов Борис Владимирович

магистрант Липецкого государственного технического университета, РФ, г. Липецк

Немцева Елена Владимировна

магистрант Липецкого государственного технического университета, РФ, г. Липецк

Цыганов Игорь Анатольевич

научный руководитель, канд. техн. наук, доцент Липецкого государственного технического университета, РФ, г. Липецк

Коваленко Ирина Анатольевна

научный руководитель, канд. техн. наук, доцент Липецкого государственного технического университета, РФ, г. Липецк

Development of mathematical model of the process of quenching and annealing of steel

Anna Sheveleva

master's student of Lipetsk state technical University, Russia, Lipetsk

Boris Maslov

master's student of Lipetsk state technical University, Russia, Lipetsk

Elena Nemtseva

master's student of Lipetsk state technical University, Russia, Lipetsk

Igor Tsyganov

scientific supervisor candidate of technical Sciences, associate Professor of Lipetsk state technical University, Russia, Lipetsk

Irina Kovalenko

scientific supervisor candidate of technical Sciences, associate Professor of Lipetsk state technical University, Russia, Lipetsk

Аннотация. Разработка режимов закалки стали для улучшения механических, физических и

технологических свойств среднеуглеродистых сталей осуществлялась математическим моделированием процессов.

Abstract. The development of steel hardening modes to improve the mechanical, physical and technological properties of medium-carbon steels was carried out by mathematical modeling of processes.

Ключевые слова: сталь, термическая обработка математическая модель, расчет, режим, химический состав, структура, предел прочности, твердость.

Keywords: steel, heat treatment mathematical model, calculation, mode, chemical composition, structure, tensile strength, hardness.

Для решения задачи по разработке математической модели процесса закалки и отжига стали необходимо, прежде всего, её математическое описание с обозначением всех переменных записью уравнений, описывающих протекающие реальные физические процессы, вводятся математические ограничения, задаются начальные и конечные данные. Температуры начала и конца фазовых превращений A_1 и A_3 , и S предопределяются содержанием легирующих элементов в среднелегированной стали [1. с. 5–30].

1. Среднее содержание легирующих элементов (% массы) в среднеуглеродистой среднелегированной стали рассчитывается по формуле

$$X_j = (Y_j + Z_j)/2, \quad (1)$$

где X_j – среднее, Y_j – наименьшее, Z_j – наибольшее.

2. Положение критической точки S в эвтектоиде

(2)

(3)

(4)

где S_1 – среднее, S_2 – минимальное, S_3 – максимальное значение.

V_iX_j , V_iY_j , V_iZ_j – функции изменения значения точки S при увеличении легирующих элементов.

3. Температуры начала и конца фазовых превращений A_1 и A_3 ,

(5)

(6)

(7)

где A_1 – средняя, W_1 – минимальная, D_1 – максимальная температура эвтектоидного превращения, °C; F_i , Y_i , P_i – функции изменения положения критических точек A_1 , W_1 , D_3 при прибавлении легирующего элемента.

(8)

(9)

(10)

где A_3 – средняя, W_3 – минимальная, D_3 – максимальная температура начала превращения, °C;

F_j , H_j , P_j – функции, показывающие на сколько изменится положение точек A_3 , W_3 , D_3 при добавлении легирующего элемента.

4. Температура нагрева под закалку доэвтектоидной стали рассчитывается по формулам

(11)

(12)

(13)

где T_1 – средняя, T_2 – минимальная, T_3 – максимальная, °C.

5. Температура нагрева под закалку заэвтектоидной стали рассчитывается по формулам

(14)

(15)

(16)

6. Время нагрева под закалку в мин.

а) форма образца – цилиндр

(17)

где d – диаметр образца, мм;

K_1 – коэффициент среды (для газа – 2, соли – 1, металла – 0.5);

l – коэффициент распределения деталей в печи;

б) форма образца – параллелепипед

(18)

где C – толщина образца.

7. Время выдержки при температуре закалки, в мин.

(19)

8. Общее время пребывания деталей в печи, в мин.

(20)

9. Определение охлаждающей среды:

а) определение среднего балла зерна

(21)

где $B_{\min}$ – минимальный,

$B_{\max}$ – максимальный балл зерна

б) определение идеального критического диаметра сплава Fe–C:

(45)

в) определение идеального критического диаметра, мм

(22)

г) определение критического диаметра закалки, мм

Если $D_{\text{к}} < 200$, то

(23)

1. воздух

(24)

2. вязкое масло

(25)

3. масло

(26)

5. 5%-ный раствор NaOH (27)

Если $D_{\text{ж}} > 200$, то

(28)

1. воздух (29)

2. вязкое масло (30)

4. вода (31)

(32)

5. 5%-ный раствор NaOH

д) сравнивая диаметр образца с критическим диаметром заковки D находим охлаждающую среду.

При $D = d$ охлаждаем в данной среде.

10. Определение углеродного эквивалента

(33)

11. Определение необходимости обработки холодом.

а) определение критических точек M_H , M_K , M_C .

Точка M_K определяет необходимую температуру охлаждения;

точка M_H определяет эффект обработки холодом;

точка M_C определяет допустим ли разрыв во времени между закалкой и обработкой холодом.

Определяем точку M_K .

При $Y_{\text{экв}} < 0,514$ обработка холодом не производится, т.к. точка M_K расположена выше комнатной температуры.

При $Y_{\text{экв}} < 0,86$

$$M_K = 1026 Y_{\text{экв}}^2 + 733 Y_{\text{экв}} + 95,7 \quad (34)$$

При $Y_{\text{экв}} > 0,8$

$$M_K = -30,526 Y_{\text{экв}}^2 - 60,227 \quad (35)$$

Определяем точку M_H .

При $0,514 < Y_{\text{экв}} < 0,6$

$$M_H = 840 Y_{\text{ЭКВ}}^2 - 1120 Y_{\text{ЭКВ}} + 650 \quad (36)$$

При $Y_{\text{ЭКВ}} > 0,6$

$$M_H = -45 Y_{\text{ЭКВ}} + 245 \quad (37)$$

Определяем точку M_c .

При $0,514 < Y_{\text{ЭКВ}} < 0,6$

$$M_c = 6071,4 Y_{\text{ЭКВ}}^2 + 2610,7 Y_{\text{ЭКВ}} + 650 \quad (38)$$

При $Y_{\text{ЭКВ}} > 0,6$

$$M_c = -225 Y_{\text{ЭКВ}} - 65 \quad (39)$$

б) определение содержания остаточного аустенита.

(40)

(41)

в) содержание $A^{\text{ост}}$ не должно превышать 15–20 %, а если более то обработка холодом целесообразна

г) определение температуры обработки холодом

(42)

д) выдержку изделий при обработке холодом считают до момента сквозного их охлаждения из расчета 1,0–1,5 мин, на каждый мм диаметра или толщины изделия

мин

(43)

е) время охлаждения:

мин

(44)

12. Определение эквидистантной твердости

(45)

где HRC_9 – твердость после отпуска.

13. Определение температуры нагрева для отпуска при заданном времени выдержки и твердости:

(46)

где A, C – коэффициенты, зависящие от времени выдержки

Температуру отпуска определяем для двух времен выдержки $t_{в0}=1$ час, $t_{в0}=2$ часа по монограмме Гуляева И.П.

$$\text{для } t_{в0} = 1 \text{ час, } t_o = -11,85H_{ЭК} + 149,5 \quad (47)$$

$$\text{для } t_{в0} = 2 \text{ часа, } t_o = -17H_{ЭК} + 1016 \quad (48)$$

16. Определение времени нагрева при отпуске:

(\49)

После математического описания с обозначением всех переменных и записью уравнений, описывающих протекающие реальные физические процессы была составлена блок-схема в виде графического изображения, составленного из отдельных элементов – операционных блоков.

Для разработки режима термической обработки среднеуглеродистых и среднелегированных сталей была разработана программа “TERMOOBRABOTKA”. При вычислении режима термической обработки компьютер запрашивает следующую информацию:

- химический состав стали;
- форму, размер детали (шар, цилиндр, параллелепипед) и расположение ее в печи;
- время выдержки при отпуске, необходимую твердость после отпуска.

После ряда вычислений машина выдает информацию о:

- времени нагрева, времени выдержки, температуре при закалке;
- времени нагрева, температуре при отпуске;
- целесообразности и параметрах обработки холодом.

Для исследования были взяты несколько марок конструкционных сталей [2–4]. Режим термической обработки, критические точки, твердость, температура закалки и температура отпуска были получены при расчете на ЭВМ и опытным путем сопоставлены между собой. Расчетные и экспериментальные данные различаются не более 7 %.

Список литературы:

1. Иванников, Е.В. Компьютерное моделирование термической и химико-термической обработки: учеб. пособие. [Текст] / Е.В. Иванников, И.П. Горбунов, Д.И. Горбунов. – Липецк: ЛГТУ, 2002. 80 с.
2. Горбунов, И.П. Автоматизированное проектирование технологических процессов термообработки: в книге: Физическое металловедение. Сборник научных трудов. [Текст] / И.П. Горбунов, А.С. Бабкин. Липецк: Издательство ЛЭГИ, 2000. С. 61–69.
3. Горбунов, И.П. Математическое моделирование режима термической обработки низколегированных сталей: в сборнике: Современная металлургия начала нового тысячелетия сборник научных трудов. Часть 1. VI международной научно-практической конференции. [Текст] / И.П. Горбунов, Д.И. Горбунов, В.В. Бuzин, С.Ю. Рогов, А.А. Кофанов. – Липецк: ЛГТУ, 2009. С. 199–203.
4. Горбунов, И.П. Моделирование технологии процессов термообработки стали в металлургии: в сборнике: Современная металлургия нового тысячелетия сборник научных трудов II международной научно-практической конференции. [Текст] / И.П. Горбунов, И.А. Цыганов, Д.И. Горбунов. – Липецк: ЛГТУ, 2016. С. 124–127.