

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 519.711.53:621.785.05

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ ПОСЛЕ ЗАКАЛКИ

д-р техн. наук, проф. С.П. КУНДАС

(Международный государственный экологический университет им. А.Д. Сахарова, г. Минск),

И.А. ГИШКЕЛЮК, Б.А. ТОНКОНОГОВ

(Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники)

Представлена разработанная авторами математическая модель процесса закалки, базирующаяся на методе конечных элементов. Приведены результаты моделирования закалки в воде и масле для цилиндрических деталей из стали 40ХН и 35 и для детали типа «сателлит» из стали 45 в масле.

Введение. Процесс закалки в настоящее время широко применяется в различных отраслях техники, в том числе в радиоэлектронике и приборостроении, для повышения эксплуатационных свойств металлических деталей.

При закалке стальных деталей в них происходят фазовые превращения с образованием мартенсита. Мартенсит в стали представляет собой объемно-центрированную тетрагональную фазу железа, перенасыщенную углеродом. Чрезвычайно высокая прочность и твердость мартенсита обусловили значительную его роль в формировании требуемых эксплуатационных свойств деталей. На количество выделившегося мартенсита в закаливаемой детали в первую очередь влияют свойства материала и скорость охлаждения, определяемая применяемой средой охлаждения. Так, при закалке деталей из стали 45 в воде получаемая фазовая структура содержит большое количество мартенсита и характеризуется высокими механическими свойствами ($\sigma_s = 800$ МПа; $\sigma_{0,2} = 650$ МПа). При закалке же в масле вследствие меньшей скорости охлаждения получаемая структура содержит меньшее количество мартенсита и характеризуется более низкими механическими свойствами ($\sigma_s = 700$ МПа; $\sigma_{0,2} = 450$ МПа).

В настоящее время на отечественных предприятиях формируемые в процессе закалки фазовая структура и твердость в детали определяются экспериментальными методами, требующими значительных временных и материальных затрат. Эта проблема эффективно решается применением компьютерного моделирования [1].

Применение компьютерного моделирования для прогнозирования механических свойств металлических деталей после закалки позволит при минимальных затратах времени и материальных средств изучать и исследовать формирование фазовой структуры, твердости, напряжений и деформаций, проводить оптимизацию условий нагрева и охлаждения для получения требуемых эксплуатационных свойств изделия.

Математическая модель процесса закалки. Математическое описание процесса закалки основано на решении дифференциальных уравнений, описывающих физические процессы, имеющие место при закалке (тепловые процессы, фазовые превращения, формирование твердости структуры и возникновение деформаций и напряжений) при трехмерном представлении конструкции детали. Решение дифференциальных уравнений осуществляется методом конечных элементов - наиболее эффективным численным методом на сегодняшний день.

Определение распределения температур в детали в процессе закалки основано на решении уравнения теплопроводности:

$$C_v \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_v,$$

где T – температура в момент времени t в точке с координатами x, y, z ; C_v – коэффициент удельной теплоемкости материала; ρ – плотность материала; λ – коэффициент теплопроводности материала; q_v – удельная мощность внутренних источников теплоты.

Значения теплоемкости, плотности и теплопроводности зависят от температуры и фазового состава. Удельная мощность внутренних источников теплоты обусловлена выделением и поглощением теплоты при фазовых превращениях.

Решая уравнение теплопроводности с граничными (учитывающими конвективный и лучистый теплообмен) и начальными условиями, методом конечных элементов находится распределение температур в детали.

При этом уравнение теплопроводности сводится к системе уравнений, имеющей следующий вид в матричной форме [2]:

$$\frac{C(T^{n+\omega})}{\Delta t} \cdot (-T^n + T^{n+1}) + K(T^{n+\omega}) \cdot [(1-\omega) \cdot T^n + \omega \cdot T^{n+1}] = F^{n+\omega}, \quad (1)$$

где C и K – матрицы теплопроводности и конвекции соответственно; F – вектор тепловых сил; T – значение температуры в узле; n – номер инкремента.

Порядок расчета матриц C и K , и вектора F приведен в литературе [3].

В выражении (1) $T^{n+\omega}$ и $F^{n+\omega}$ означает, что значение температуры и тепловой нагрузки вычисляются в момент времени $t = t + \omega \cdot \Delta t$ ($0 \leq \omega \leq 1$) при помощи аппроксимаций:

$$T^{n+\omega} = (1-\omega) \cdot T^n + \omega \cdot T^{n+1};$$

$$F^{n+\omega} = (1-\omega) \cdot F^n + \omega \cdot F^{n+1}.$$

Для определения температуры T^{n+1} система уравнений (1) решается итерационно на каждом временном шаге.

Также на каждом временном шаге рассчитывается новый фазовый состав, учитывается изменение свойств материала в зависимости от его и производится вычисление теплоты, выделившейся в результате фазового превращения.

Структурные превращения при закалке с точки зрения их математического описания можно разделить на следующие виды:

- распад аустенита при охлаждении на феррит, перлит и бейнит;
- распад аустенита при охлаждении на мартенсит;
- образование аустенита при нагреве.

Для расчета структурных превращений при произвольном охлаждении (превращение аустенита в феррит, перлит и бейнит) наилучшее соответствие с экспериментом достигается при использовании данных об изотермическом распаде аустенита и уравнения Аврами [4]:

$$P(t) = 1 - \exp[-k(T) \cdot \tau^{n(T)}],$$

где P – доля вновь образующейся фазы при распаде аустенита за время t . Коэффициенты $n(T)$ и $k(T)$ для каждой температуры определяются по изотермической диаграмме распада переохлажденного аустенита.

При расчете доли образовавшейся фазы мартенсита используется уравнение:

$$P_M = 1 - \exp[C_1 \cdot T + C_2],$$

где коэффициенты C_1 и C_2 находятся исходя из значения температуры начала мартенситного превращения T_n и температуры, при которой аустенит и мартенсит присутствуют в равных долях $T_{0.5}$.

Для расчета структурных превращений при нагреве (образование аустенита) предпочтительно воспользоваться диффузионным уравнением:

$$P_A = 1 - \exp\left[A \cdot \left(\frac{T - T_i}{T_k - T_i}\right)^D\right],$$

где T_n и T_k – температуры начала и конца фазового превращения и T – текущая температура.

В основе расчета твердости материала при закалке лежит шаговый метод и правило аддитивности. Твердость стали после аустенитного превращения рассчитывается на каждом временном шаге решения уравнения теплопроводности. Зная температуру на временном шаге T , твердость i -той структуры H при этой температуре и объемную долю ΔP образовавшейся структуры вычисляется твердость материала с новым фазовым составом, используя формулу:

$$H = \sum_{i=1}^N H_i \cdot \Delta P_i.$$

При анализе деформаций и напряжений в детали в процессе закалки необходимо решать упруго-пластическую задачу, то есть применять метод конечных элементов в сочетании с теорией упругости и теорией пластичности. Эта задача усложняется тем, что распределение температур в теле изменяется с течением времени. Поэтому при анализе напряженно-деформированного состояния определяется приращение деформаций и напряжений за прошедший инкремент времени, а затем рассчитывается накопленная деформация и напряжения. Кроме того, механические свойства детали (модуль Юнга, коэффициент

Пуассона, предел текучести, модуль упрочнения и температурный коэффициент линейного расширения) зависят от фазового состава и средней температуры конечного элемента на текущем временном шаге.

Условие перехода конечного элемента из упругого состояния в пластическое определяется функцией текучести Мизеса (f), которая равна разности интенсивности напряжений и напряжения текучести [5].

Связь между приращениями деформации и напряжения в упругой области ($f < 0$) определяется зависимостью [5]:

$$d\sigma = [D_e] \cdot d\varepsilon,$$

где $[D_e]$ – матрица упругости, а в упругопластической области ($f = 0$) [5]; $d\sigma = [D_{ep}] \cdot d\varepsilon$, здесь $[D_{ep}]$ – упругопластическая матрица.

Условие равновесия в упругопластической области при воздействии нагрузок, вызванных температурными и структурными изменениями в детали, записывается в виде [6]:

$$[K_{ep}] \cdot \{\Delta U\} = \{Q_{th}\}, \quad (2)$$

где $\{\Delta U\}$ – вектор приращения перемещений, $[K_{ep}]$ – матрица жесткости, $\{Q_{th}\}$ – вектор нагрузок.

Матрица жесткости $[K_{ep}]$ определяется из выражения

$$[K_{ep}] = [B]^T \cdot [D] \cdot [B] \cdot V_e, \quad (3)$$

где $[B]$ – матрица геометрических характеристик.

Вектор нагрузок $\{Q_{th}\}$ рассчитывается по формуле

$$\{Q_{th}\} = [B]^T \cdot [D] \cdot \{\varepsilon_0\} \cdot V_e, \quad (4)$$

где $\{\varepsilon_0\}$ – вектор начальных деформаций, обусловленный температурными и структурными изменениями в детали:

$$\{\varepsilon_0\} = (\beta \cdot \Delta T + \delta) \cdot [111000]^T,$$

где β – температурный коэффициент линейного расширения; δ – изменение размера детали, вызванное фазовыми превращениями и ΔT – изменение температуры за рассчитываемый временной шаг.

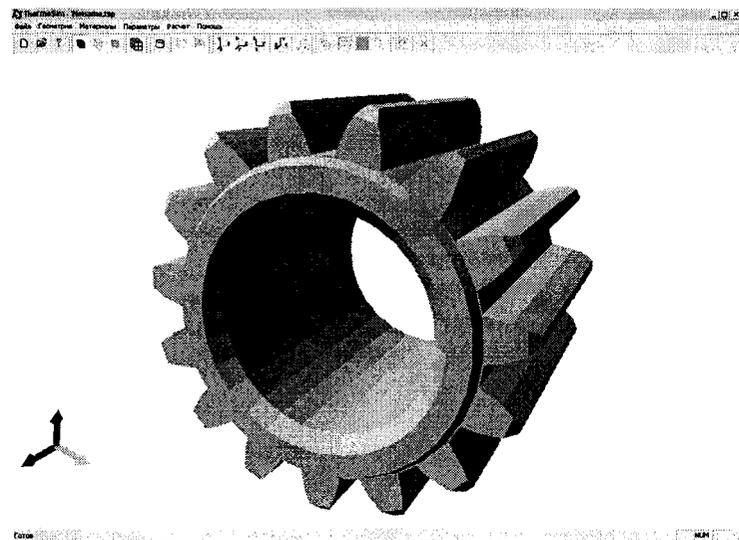
В выражениях (3) и (4) матрица $[D]$ равна матрице $[D_e]$ для конечных элементов, находящихся в упругой области, и $[D_{ep}]$ – в упругопластической области.

Далее на основании уравнения равновесия определяется вектор перемещений:

$$\{\Delta U\} = [K_{ep}]^{-1} \cdot \{Q_{th}\}.$$

Зная величину вектора перемещений, определяются остальные параметры напряженно-деформированного состояния [6].

Так как выражение (2) справедливо для бесконечно малых приращений напряжений, то на каждом временном шаге значения напряжений уточняются методом последовательных приближений (начальных напряжений).



Представленная математическая модель процесса закалки программно реализована в составе программного комплекса ThermoSim (рис. 1) [7], позволяющего проводить компьютерное моделирование процессов термообработки и на основании результатов моделирования прогнозировать механические свойства деталей.

Рис. 1. Интерфейс программного комплекса ThermoSim

Компьютерное моделирование процесса закалки. Алгоритм компьютерного моделирования закалки, реализованный в программном комплексе ThermoSim, включает следующие этапы:

- загрузка трехмерной геометрии детали в виде STL-файла.
- создание конечно-элементной геометрии детали или ее импорт из САЕ-программ (DEFORM-3D и MSC. MARC);
- выбор свойств материалов из базы данных;
- задание начальных (начальной температуры) и граничных условий (фазового состава и коэффициента теплообмена с окружающей средой);
- задание параметров численного решения (шага по времени и констант для итерационных процессов);
- выполнение расчета;
- анализ результатов моделирования.

С помощью программного комплекса моделировалась закалка цилиндрических деталей из стали 40ХН и стали 35 в воде и масле. Результатами моделирования являются распределения фазового состава (рис. 2, а, б) и твердости в объеме детали (рис. 3).

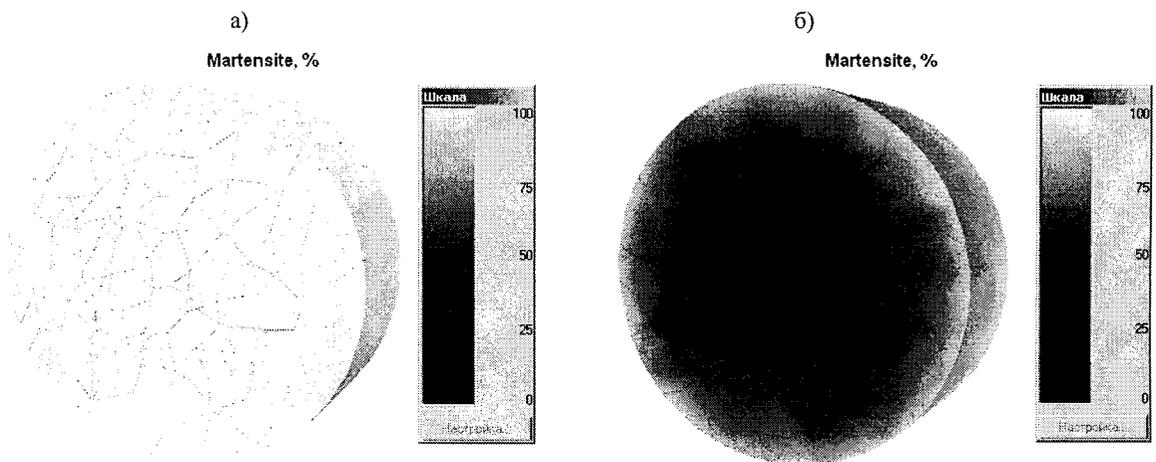


Рис. 2. Распределение мартенситной фазы в сечении цилиндрической детали после закалки в воде: а – деталь из стали 40ХН; б – деталь из стали 35

Как видно из рис. 2, для детали из стали 40ХН образовавшаяся после закалки в воде фазовая структура содержит 96 % мартенсита на поверхности и 81 % в сердцевине детали. При охлаждении в масле содержание мартенсита для детали из этой стали составляет 91 % и 59 % соответственно, что обусловлено скоростью охлаждения. В зависимости от содержания мартенсита изменяется и твердость по сечению детали (см. рис. 3).

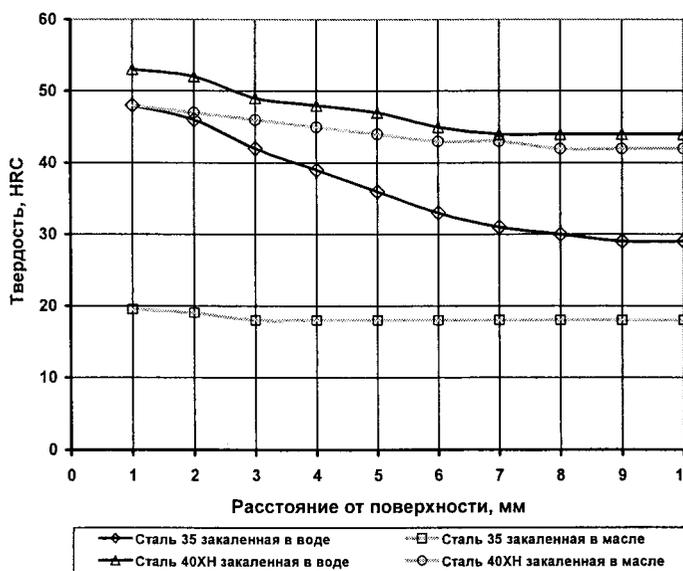


Рис. 3. Зависимость твердости в сечении цилиндрических деталей от расстояния до поверхности

Для получения приведенной выше информации с помощью экспериментальных методов необходимо было бы изготовить десятки металлографических шлифов, провести сотни измерений фазового состава и твердости, разрушив при этом большое количество дорогостоящих деталей.

Исследовалось также влияние материала детали на ее механические свойства и фазовый состав после закалки. Из результатов моделирования образца из стали 35 (см. рис. 2) видно, что содержание мартенситной фазы в последнем значительно ниже, чем при закалке с такими же режимами образцов из стали 40ХН, что, в основном связано с содержанием углерода в стали. Следовательно, применение для изготовления деталей сталей с более высоким содержанием углерода обеспечивает их более высокие механические свойства после закалки.

Особенно эффективно применение методов компьютерного моделирования для прогнозирования свойств деталей сложной конфигурации при закалке, для которых экспериментальными методами весьма трудно измерение твердости и невозможно исследование кинетики напряженно-деформированного состояния.

Так с помощью программного комплекса ThermoSim проводилось моделирование закалки детали типа «сателлит» погружением в масло. Моделируемые режимы закалки приведены в таблице.

В результате моделирования получено распределение температур, фазового состава, напряжений и твердости в объеме детали [8]. Результаты моделирования позволяют выбрать режим охлаждения при закалке, обеспечивающий наряду с требуемой структурой и твердостью допустимый уровень напряжений.

Режимы закалки детали типа «сателлит»

Тип детали	Вид материала	Охлаждающая среда	Режим закалки
Сателлит	Сталь 45	Масло (20 °С)	Закалка (840 °С) с полным погружением

На рис. 4 приведено изменения главных напряжений во времени (в нелинейном масштабе) для характерных точек закаливаемой детали. По полученным данным можно судить о величине максимальных временных и значениях остаточных напряжений, имеющих место в детали.

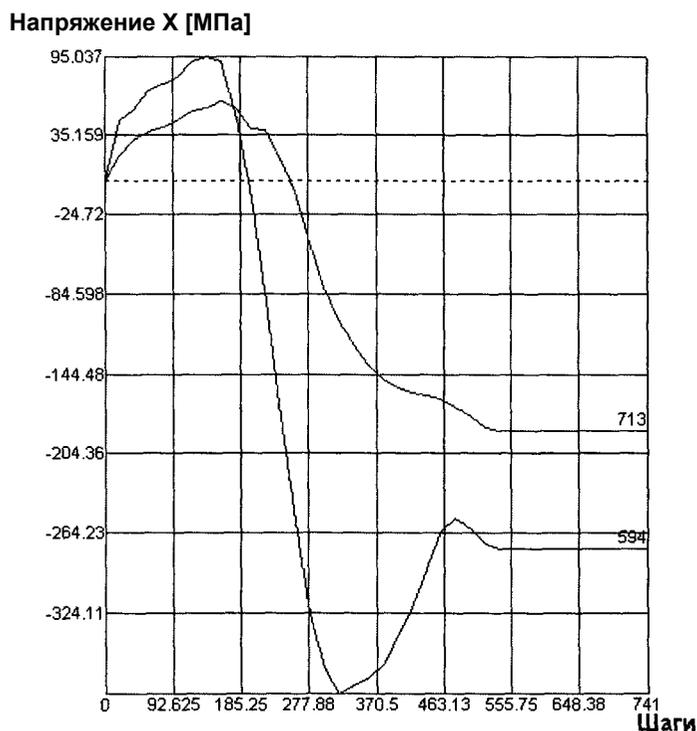


Рис. 4. Изменение главных напряжений в детали в процессе охлаждения

По рассчитанным значениям твердости (рис. 5) можно прогнозировать эксплуатационные свойства детали после закалки.

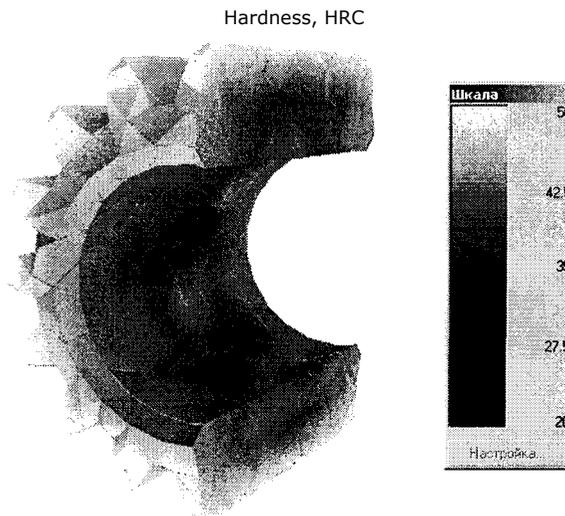


Рис. 5. Результаты моделирования распределение твердости в сечении детали

Заключение. Таким образом, с помощью разработанных моделей и программных средств возможно осуществлять анализ и прогнозирование свойств термообрабатываемых деталей как на стадии их проектирования, так и при разработке технологических процессов и организации реального производства. В настоящее время осуществляется разработка программных модулей управления закалочным оборудованием, что позволит обеспечить замкнутую автоматизацию всего жизненного цикла изделий - «проектирование - производство - эксплуатация».

ЛИТЕРАТУРА

1. Гурченко П.С. Упрочнение при индукционном нагреве и управляемом охлаждении. - Гомель: ИММС НАНБ, 1999. - 236 с.
2. Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация. - М.: Мир, 1986. - 318 с.
3. Шабров Н.Н. Метод конечных элементов в расчетах деталей тепловых двигателей. - Л.: Машиностроение, 1983. - 212 с.
4. Власов Н.В., Адамова Н.А., Сорокин В.Г. Напряженно-деформированное состояние стальных деталей при регулируемом охлаждении // МиТОМ. - 1986. - № 12. - С. 21 - 25.
5. Морозов Е.М., Никишков Г.П. Метод конечных элементов в механике разрушения. - М.: Наука, 1980. - 228 с.
6. Жарков В.А. Visual C++ на практике. - М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002. - 424 с.
7. Программный комплекс для моделирования процесса закалки деталей / С.П. Кундас, Б.А. Тонконогов, А.В. Лемзиков и др. // Грузовик - М: Машиностроение, 2003. - № 4. - С. 29 - 31.
8. Компьютерное моделирование и исследование теплофизических процессов в металлических деталях при закалке / С.П. Кундас, Б.А. Тонконогов, И.А. Гишкелюк и др. // Известия Белорусской инженерной академии. - 2003. - № 1(15)/2. - С. 168 - 175.