

4. Кундас С.П., Марковник Д.В., Кашко Т.А. Применение математических методов и программных средств для моделирования напряженно-деформированного состояния плазменных покрытий /Известия Белорусской инженерной академии, 2004 г., №1(17)/1 - с. 85-87.
5. Кундас С.П., Тонконогов Б.А., Гишкелюк И.А., Гурченко П.С. Компьютерное моделирование и исследование процесса заковки / Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, 2003 г. Том.1, № 3. с. 65-71.
6. Плазменные процессы в производстве изделий электронной техники. В 3 т. Т. 1./ А.П. Достанко, С.П. Кундас, С.В.Бордусов и др.; Под общ. ред. акад. НАН Беларуси А.П. Достанко. – Мн.: ФУАинформ, 2000.- 424 с.
7. Wolfram S. Theory and application of cellular automata. World Science Publication, 1986. – 546.
8. Raabe D. Introduction of hybrid model for the discrete 3D simulation of dislocation dynamics. Computational Materials Science, 1998. No.11. P.1-15.
9. Kundas S.P., Levashevich Y.S., Ilyushenko A.F. Hybrid Expert Systems Implementation for the Research and Optimization of Coating Plasma Spraying Processes/ IV International Conference "Plasma physics and plasma technology", Minsk, Belarus, September 15-19, 2003, p.591 - 594.
10. Computation Materials Science. Elsevier Science B.V., 1993-2004.

УДК 621.78.011:681.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И ТВЕРДОСТИ СТАЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ЗАКАЛКЕ

Кундас С. П.¹⁾, Тонконогов Б. А.²⁾, Гишкелюк И. А.²⁾

¹⁾ *Международный государственный экологический университет им. А.Д.Сахарова, Минск, Республика Беларусь, kundas@iseu.by*

²⁾ *Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь, adminset@bsuir.unibel.by*

Введение. Процесс заковки в настоящее время широко применяется в различных отраслях промышленности для повышения эксплуатационных свойств металлических деталей. При закалке стальных деталей в них возникают напряжения вследствие неоднородности температурного поля и неравномерного протекания фазовых превращений [1]. В связи с этим, актуальна задача выбора режима охлаждения при закалке, обеспечивающего, наряду с требуемой структурой и твердостью, допустимый уровень напряжений. Трудоемкость экспериментального исследования остаточных напряжений после заковки, а также невозможность в настоящее время экспериментально исследовать кинетику напряженно-деформируемого состояния (НДС) при закалке, вызывает необходимость построения математической модели для расчетного определения напряженно-деформируемого состояния при закалке стальных деталей [2].

В статье представлена математическая модель процесса печной заковки стальных деталей, обеспечивающая прогнозирование их напряженно-деформируемого состояния при произвольном охлаждении с учетом теплоты превращения и изменения удельного объема стали при фазовых превращениях, и проведено моделирование формирования напряжений в деталях при заданных условиях охлаждения.

Математическая модель напряженно-деформируемого состояния стальных деталей при закалке. Основная особенность определения напряженно-деформируемого состояния при закалке – необходимость учета влияния структурных превращений на напряжения вызванные неравномерным распределением температуры (термические напряжения) как вследствие теплового, так и объемного эффекта. В связи с этим, была разработана комплексная математическая модель напряженно-деформируемого состояния, базирующаяся на методе конечных элементов и учитывающая распределения тепловых полей и фазовых превращений в детали. Кроме того, так как основным показателем прокаливаемости детали при закалке служит твердость, разработанную математическую модель дополнили алгоритмом определения распределения твердости в объеме детали.

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

$$C_V \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_V, \quad (1)$$

где T – температуры 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 условиями, учитывающими конвективный и лучистый теплообмен и начальными условиями, методом конечных элементов находим распределение температур в детали.

При этом уравнение теплопроводности сводится к системе уравнений, имеющей следующий вид в матричной форме [3]:

$$\frac{C(T^{n+\omega})}{\Delta t} \cdot (-T^n + T^{n+1}) + K(T^{n+\omega}) \cdot [(1-\omega) \cdot T^n + \omega \cdot T^{n+1}] = F^{n+\omega}, \quad (2)$$

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 [4].

В выражении (2) $T^{n+\omega}$ 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:

$$T^{n+\omega} = (1-\omega) \cdot T^n + \omega \cdot T^{n+1}, \quad (3)$$

$$F^{n+\omega} = (1-\omega) \cdot F^n + \omega \cdot F^{n+1}, \quad (4)$$

Для определения температуры T^{n+1} система уравнений (4) решается итерационно на каждом временном шаге.

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

Расчет фазового состава производится путем аппроксимации термокинетических диаграмм (ТКД). Для этого на каждом временном шаге (итерации) по кривым начала и конца фазового превращения определяется, будет ли происходить фазовое превращение. При наличии превращения вычисляется процент распавшейся и образовавшейся

фазы в зависимости от температуры начала фазового превращения, изменения температуры и длительности инкремента.

Определение твердости основано на аппроксимации зависимости твердости от скорости охлаждения. Вычисляется средняя скорость охлаждения узлов конечно-элементной сетки и путем аппроксимации экспериментальных данных (зависимости твердости от скорости охлаждения для исходного материала) рассчитывается твердость в конкретных узлах детали после закалки.

При анализе деформаций и напряжений в детали в процессе закалки необходимо решать упругопластическую 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 приращением деформацией и приращением напряжением в упругой области ($f < 0$) определяется зависимостью [5]:

$$d\sigma = [D_e] \cdot d\varepsilon, \quad (5)$$

где $[D_e]$ – матрица упругости, а в упруго-пластической области ($f = 0$) связь между приращением деформацией и приращением напряжений определяется выражением [5]:

$$d\sigma = [D_{ep}] \cdot d\varepsilon, \quad (6)$$

где $[D_{ep}]$ – упругопластическая матрица.

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

$$[K_{ep}] \cdot \{\Delta U\} = \{Q_{th}\}, \quad (7)$$

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

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

$$[K_{ep}] = [B]^T \cdot [D] \cdot [B] \cdot V_e, \quad (8)$$

где $[B]$ – матрица геометрических характеристик.

Вектора нагрузок $\{Q_{th}\}$ рассчитываются по формуле:

$$\{Q_{th}\} = [B]^T \cdot [D] \cdot \{\varepsilon_0\} \cdot V_e, \quad (9)$$

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

$$\{\varepsilon_0\} = (\beta \cdot \Delta T + \delta) \cdot [111000]^T, \quad (10)$$

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

В выражениях (8) и (9) матрица $[D]$ равна матрице $[D_e]$ для конечных элементов находящихся в упругой области, и равна матрице $[D_{ep}]$ для конечных элементов находящихся в упругопластической области.

Далее на основании уравнения равновесия определяется вектор перемещений:

$$\{\Delta U\} = [K_{ep}]^{-1} \{Q_{th}\}, \quad (11)$$

Зная величину вектора перемещений, определяются остальные параметры НДС [6].

Так как выражение (7) справедливо для бесконечно малых приращений напряжений, то на каждом временном шаге значения напряжений уточняются методом последовательных приближений (метод начальных напряжений).

Представленная комплексная математическая модель программно реализована в составе программного комплекса ThermoSim [7], позволяющего проводить моделирование процессов термообработки.

Моделирование кинетики напряженно-деформированного состояния при закалке

С помощью программного комплекса ThermoSim проводилось моделирование закалки детали типа «сателлит» погружением в масло с коэффициентом теплообмена представленном на рис. 1. Моделируемые режимы закалки приведены в табл. 1.

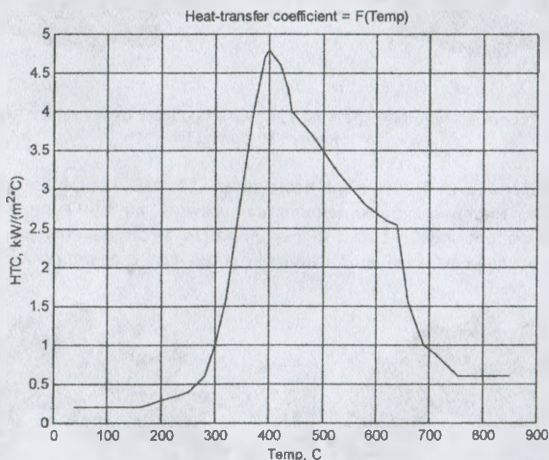


Рис. 1. Зависимость коэффициента теплообмена масла от температуры поверхности детали.

В результате моделирования получено распределение температур, напряжений, фазового состава и твердости в объеме детали [8].

Таблица 1. Режимы заковки детали типа «сателлит»

№	Тип детали	Вид материала	Охлаждающая среда	Режим заковки
1	Сателлит	Сталь 45	Масло (20 °С)	Заковка с 840 °С полным погружением

Из распределения температур (рис. 2) видно, что поверхность детали охлаждается значительно быстрее в сравнении с ее сердцевиной. Разность температур на поверхности и в центральной части детали вызывает возникновение термических напряжений.

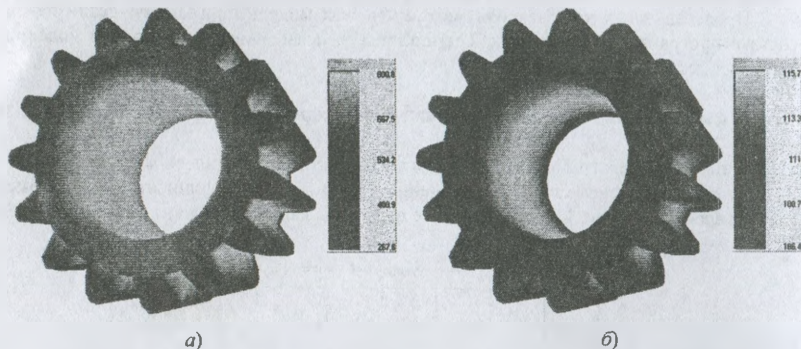


Рис. 2. Распределение температуры в детали в процессе охлаждения: через 3 секунды (а) и через 80 секунд (б)

Установлено (рис. 3), что в той части поверхности детали, в которой на 3-й секунде охлаждения имели место сжимающие напряжения, на 80-й – преобладали растягивающие и, наоборот, там, где на 3-й секунде имели место растягивающие напряжения, на 80-й преобладали сжимающие. Это можно объяснить следующими процессами.

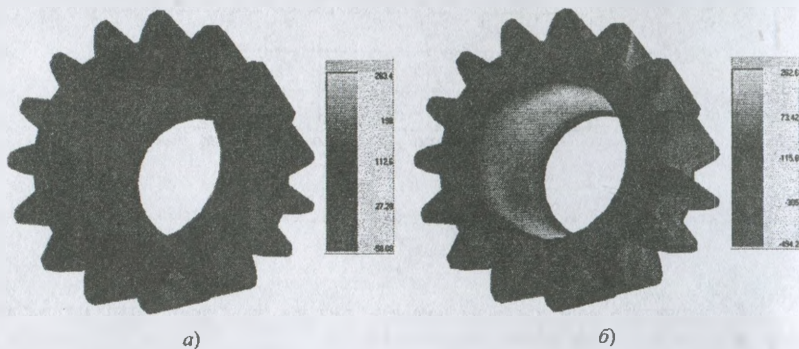


Рис. 3. Распределение главных напряжений (МПа) в детали при заковке погружением в масло через 3 с (а) и через 80 с (б)

Превращение аустенита, в первую очередь, начинается на поверхности детали, где температура начала распада достигается раньше, чем внутри. Так как распад аустенита сопровождается увеличением объема, поверхностные слои расширяются. Однако расширению поверхностных слоев препятствуют внутренние слои, где распад аустенита еще не начался. Это приводит к образованию на поверхности временных сжимающих напряжений, а во внутренних слоях – растягивающих. По мере развития превращения знак значений напряжений на поверхности и во внутренних слоях изменяется. Следует отметить, что в данном случае структурные напряжения превышают значения температурных напряжений, которые относительно структурных изменяются в обратном порядке.

На рис. 4 приведено изменения главных и эффективных напряжений во времени (в нелинейном масштабе) для характерных точек закаливаемой детали. По полученным данным можно судить о величине максимальных временных напряжениях и значению остаточным напряжений имеющих место в детали. Следует отметить, что получение информации об изменении напряжений при закалке экспериментальными методами весьма трудоемка, а зачастую вообще невозможна.

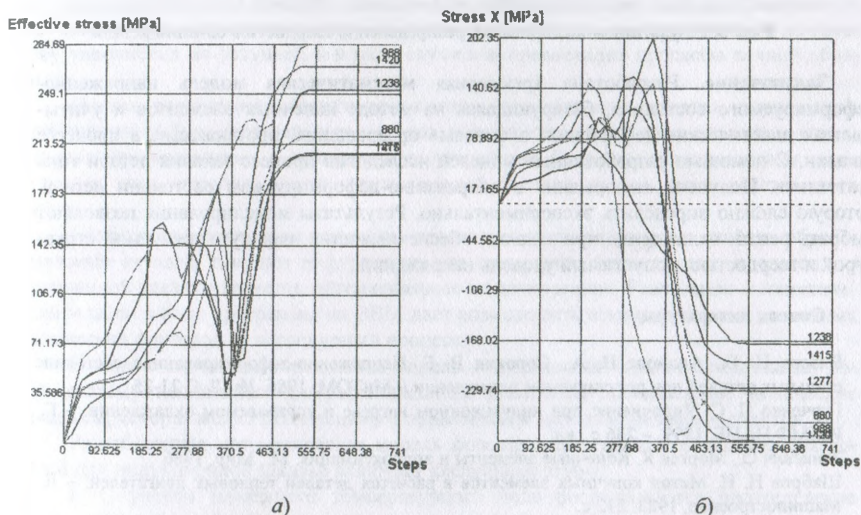


Рис. 4. Изменение эффективных (а) и главных напряжений (б) в детали в процессе охлаждения.

В результате моделирования, также было получено распределение твердости в сечении детали после закалки (рис. 5). По полученному значению твердости можно судить об эксплуатационных свойствах детали (пределу прочности, пределу текучести) после закалки. Экспериментальная верификация полученных результатов показала, что погрешность моделирования не превышает 10% [8].

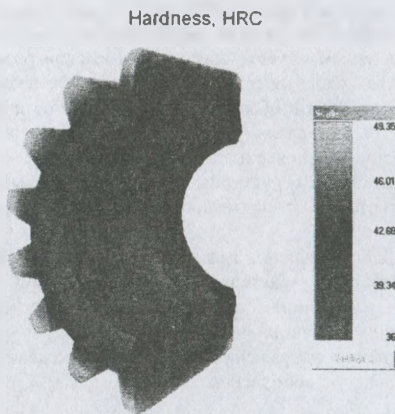


Рис. 5. Результаты моделирования распределение твердости в сечении детали

Заключение. Разработана трехмерная математическая модель напряженно-деформируемого состояния, базирующаяся на методе конечных элементов и учитывающая пластические деформации и фазовые превращения, протекающие в процессе заковки. С помощью разработанных моделей исследован процесс заковки детали типа «сателлит». Получена информация о напряженно-деформируемом состоянии детали, которую сложно определить экспериментально. Результаты моделирования позволяют выбрать режим охлаждения при заковке, обеспечивающий, наряду с требуемой структурой и твердостью, допустимый уровень напряжений.

Список литературы

1. Власов Н. В., Адамова Н. А., Сорокин В. Г. Напряженно-деформированное состояние стальных деталей при регулируемом охлаждении // *МитОМ*. 1986. № 12. С 21-25.
2. Гурченко П. С. Упрочнение при индукционном нагреве и управляемом охлаждении. – Г.: ИММФ НАНБ, 1999. – 236 с., ил.
3. Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация. М.: Мир, 1986.
4. Шабров Н. Н. Метод конечных элементов в расчетах деталей тепловых двигателей. – Л.: Машиностроение, 1983. 212 с.
5. Морозов Е. М., Никишков Г. П. Метод конечных элементов в механике разрушения. – М.: Наука, 1980.
6. Жарков В. А. Visual C++ на практике. М.: Издательство "Лаборатория Базовых Знаний", 2002. 424 с.: ил.
7. Кундас С. П., Тонконогов Б. А., Левашкевич Я. С., Лемзиков А. В., Гишкелюк И. А., Гурченко П. С. Программный комплекс для моделирования процесса заковки стальных деталей // *Технология, оборудование, автоматизация, неразрушающий контроль процессов нагрева и упрочнения деталей на машиностроительных предприятиях* / Сб. научн. трудов под ред. П. С. Гурченко. – Мн.: УП "Технопринт", 2002. 163 с. Ил. С. 105 - 109.
8. Кундас С. П., Тонконогов Б. А., Гишкелюк И. А., Лемзиков А. В., Иванов Д. Г., Коваленко В. И. Компьютерное моделирование и исследование теплофизических процессов в металлических деталях при заковке // *Известия Белорусской инженерной академии*, 2003 №1(15)2. С. 168 - 175.