

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНДУКЦИОННОЙ ЗАКАЛКИ С УЧЕТОМ ФОРМИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ДЕТАЛЕЙ

Иванов Д.Г., Кундас С.П.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск

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

Введение

Целью индукционной закалки является увеличение твердости поверхностных слоев детали посредством быстрого нагрева и последующего охлаждения. Желаемый эффект упрочнения достигается с помощью изменения микроструктуры стали. Однако, несмотря на то, что этот процесс успешно применяется в промышленности на протяжении многих лет, актуальной по-прежнему остается задача оптимального его управления и обеспечения необходимого качества термообрабатываемых деталей. Это обстоятельство связано с повышением требований к надежности и материалоемкости продукции, что в свою очередь вызывает увеличение сложности геометрии, уменьшение толщины конструктивных элементов деталей.

Перспективным направлением решения названных задач является применение методов компьютерного моделирования для оптимизации технологических режимов закалки, а также их объединение с системами управления технологическим оборудованием [1].

С точки зрения физики индукционной термообработки, этот технологический процесс весьма сложен и включает в себя целый ряд явлений, которые находятся в тесной взаимосвязи друг с другом (рисунок 1).

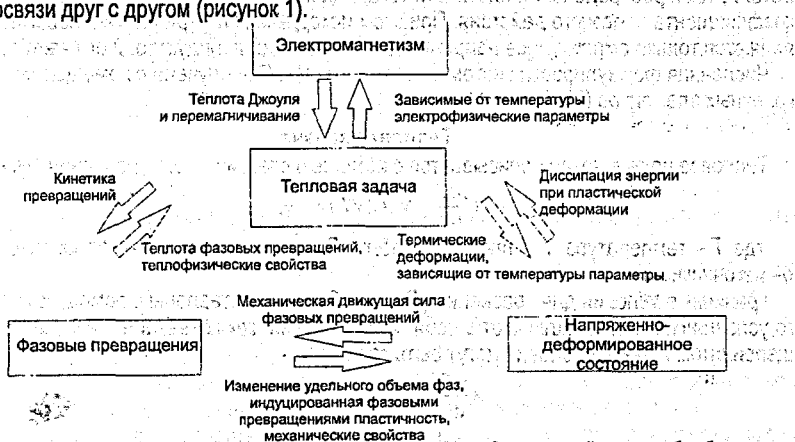


Рисунок 1. Наиболее существенные физические явления индукционной термообработки

Для того, что бы достичь приемлемой точности результатов моделирования, в математическое описание процесса необходимо включить все значимые физические явления, которые оказывают как прямое, так и косвенное влияние на результат закалки.

Очевидно, что математическое описание индукционной закалки должно включать описание электромагнитных и тепловых явлений, а также модель фазовых превращений.

Стоит также понимать, что на результирующие свойства детали большое влияние оказывает напряженно-деформированное состояние (остаточные напряжения) вследствие суммирования этих напряжений с внешней нагрузкой. Более того, внутренние напряжения в детали являются дополнительной движущей силой для фазовых превращений (рисунок 1).

Электромагнитные явления

Модель электромагнитных явлений в системе «индуктор-среда-деталь» разработана на основе уравнений Максвелла, которые можно записать в виде следующей системы уравнений (без учета токов смещения, что справедливо для частот, на которых осуществляется индукционный нагрев) [2]:

$$j\omega\sigma\mathbf{A} + \nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) + \sigma \nabla \cdot \mathbf{V} = 0, \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (j\omega\sigma\mathbf{A} + \sigma \nabla \cdot \mathbf{V}) = 0. \quad (2)$$

где \mathbf{A} – векторный магнитный потенциал, V – скалярный потенциал электрического поля, μ – магнитная проницаемость материала, σ – удельная электрическая проводимость материала, j – мнимая единица, ω – круговая частота тока в индукторе.

Для решения системы уравнений (1) и (2) ее необходимо дополнить граничными условиями. Предлагаемая модель позволяет производить расчет индукционного нагрева при задании значения электрического потенциала V в месте подачи напряжения на индуктор. Также на границе воздушной области определяется граничное условие, подразумевающее равенство нулю тангенциальной составляющей векторного магнитного потенциала [2]:

$$n \times \mathbf{A} = 0. \quad (3)$$

В такой постановке задачи имеется возможность расчета как источников теплоты в детали, так и распределения плотности тока, падения напряжений в индукторе, а также коэффициента полезного действия. При этом исходными электрическими параметрами являются только амплитудное напряжение, подаваемое на индуктор, и его частота.

Численная формулировка системы уравнений (1) и (2) получена с помощью метода конечных элементов (МКЭ).

Тепловая задача

Тепловое поле в детали описывается с помощью классического уравнения Фурье:

$$-\rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (\lambda \nabla T) = -q, \quad (4)$$

где T – температура, ρ – плотность стали, C – теплоемкость, λ – теплопроводность, q – источники теплоты.

Граничные условия для уравнения (4) могут быть представлены с помощью граничного условия Неймана и включают в себя такие явления, как конвекция и излучение. В общепринятом виде эти условия могут быть записаны:

$$-\lambda \frac{dT}{dn} = \epsilon_s \sigma_{SB} (T^4 - T_\infty^4), \quad (5)$$

$$-\lambda \frac{dT}{dn} = h(T - T_\infty), \quad (6)$$

где n – нормаль к граничной плоскости, ϵ_s – степень черноты тела, σ_{SB} – постоянная Стефана-Больцмана, h – коэффициент конвекции, T_∞ – температура окружающей среды.

В предположении, что выделяемая тепловая мощность в нагреваемой детали обуславливается только индуцируемыми токами, источники теплоты в детали можно считать с помощью выражения:

$$q = 0.5\sigma\omega^2(A \cdot A^*) \quad (7)$$

В общем случае все коэффициенты уравнения (4) зависят от температуры. Это обстоятельство приводит к нелинейности и, вследствие этого, к необходимости использования итерационного алгоритма решения тепловой задачи.

Напряженно-деформированное состояние

В качестве причин, вызывающих остаточные напряжения I-го рода при термообработке сталей можно назвать (см. рисунок 1) [3]:

1. Термические напряжения в процессе нагрева и охлаждения.
2. Различия в структурных составляющих по сечению детали, в их удельных объемах и ТКЛР.
3. Индуцированная фазовыми превращениями пластичность (ИФПП). На макроуровне ИФПП в общем рассматривается как аномальная пластическая деформация, наблюдаемая в том случае, если фазовые превращения происходят под действием внешнего напряжения даже много меньшего, чем предел пластичности наиболее «слабой» фазы.

В предположении малых деформаций выражение приращения напряжения на данном этапе тепловой нагрузки может быть представлено в следующем дифференциальном виде:

$$\{d\sigma\} = [D]\{d\varepsilon^e\} + [dD]\{\varepsilon^e\}, \quad (8)$$

где $[D]$ – матрица упругости материала, $[dD]$ – изменение матрицы упругости материала на рассматриваемом интервале приращения тензора деформаций, $\{\varepsilon^e\}$ – упругая деформация, $\{d\sigma\}$ и $\{d\varepsilon^e\}$ – приращения тензоров напряжения и упругой деформации (здесь и далее тензоры напряжения и деформации представлены в векторном виде).

Суммарная деформация:

$$\{d\varepsilon\} = \{d\varepsilon^e\} + \{d\varepsilon^p\} + \{d\varepsilon^T\} + \{d\varepsilon^{ph}\} + \{d\varepsilon^{tr}\}, \quad (9)$$

где $\{d\varepsilon^e\}$, $\{d\varepsilon^p\}$, $\{d\varepsilon^T\}$, $\{d\varepsilon^{ph}\}$, $\{d\varepsilon^{tr}\}$ – приращение упругих, пластических, термических, обусловленных фазовыми превращениями, ИФПП деформаций на текущем временном шаге соответственно.

Приращение деформации обусловленной фазовыми превращениями можно представить в виде [4]:

$$\{d\varepsilon^{ph}\} = \frac{1}{3} \frac{\Delta V}{V^{ph}} \{I^V\}, \quad (10)$$

где $\Delta V/V^{ph}$ – объемная деформация при фазовом превращении, $\{I^V\}$ – вектор, соответствующий единичному гидростатическому тензору деформации.

Аналогичным образом вычисляется термическая деформация, которая также имеет объемный характер:

$$\{d\varepsilon^T\} = \alpha dT + (T - T_{ref}) \{I^V\} d\alpha, \quad (11)$$

где T – температура на текущем временном шаге, dT – изменение температуры по отношению к предыдущему временному шагу, α – ТКЛР, $d\alpha$ – изменение ТКЛР на интервале dT , T_{ref} – температура, по отношению к которой измеряется термическая деформация.

Для учета ИФПП в разработанной конечно-элементной модели применено выражение, предложенное авторами работ [5,6]:

$$\{d\varepsilon^{tr}\} = k dz (1-z) \{s\}, \quad (12)$$

где k – параметр ИФПП, z – объемная доля образующейся фазы, $\{s\}$ – девиаторная часть тензора напряжений.

Таким образом, приращение напряжения может быть представлено в виде:

$$\{d\sigma\} = [D](\{d\varepsilon\} - \alpha \{I^V\} dT - (T - T_0) \{I^V\} d\alpha - \{d\varepsilon^p\} - \{d\varepsilon^{ph}\} - \{d\varepsilon^{tr}\}) + [dD]\{\varepsilon^e\} \quad (13)$$

В случае пластического течения материала удобно воспользоваться понятием упругопластической матрицы материала, с использованием которого выражение, связывающее напряжения и деформации, будет выглядеть следующим образом:

$$\{d\sigma\} = [D_{ep}]\{d\varepsilon\} + [dD]\{\varepsilon^e\}, \quad (14)$$

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

Для математического описания пластического поведения стали применена модель J_2 -пластичности, которая базируется на ассоциативном законе пластического течения и критерии фон Мизеса, включающая в себя изотропный механизм упрочнения [7]. Как показано в [8], такая модель полностью подходит для описания пластического поведения сталей в условиях термообработки.

В соответствии с ассоциативным законом пластического течения, приращение пластической деформации на текущем этапе нагрузки:

$$\{d\varepsilon^p\} = d\lambda\{n\}, \quad (15)$$

где $\{n\}$ – тензор направления пластического течения:

$$\{n\} = \frac{\partial f}{\partial \{\sigma\}} f_m^{-1}, \quad (16)$$

где f – функция Мизеса, f_m может быть определено в соответствии с выражением:

$$f_m = \frac{\partial f}{\partial \{\sigma\}}^T \frac{\partial f}{\partial \{\sigma\}} \quad (17)$$

Параметр $d\lambda$ в выражении (15) непосредственно связан с приращением эффективной пластической деформации на рассматриваемом этапе тепловой нагрузки:

$$d\varepsilon^p = \sqrt{2/3} d\lambda, \quad (18)$$

где $d\varepsilon^p$ – приращение эффективной пластической деформации.

Расчет параметра может быть осуществлен с учетом зависимости функции упрочнения от температуры [6]:

$$d\lambda = \frac{\{n\}^T [D] (\{\varepsilon\} - \{\varepsilon^h\} - \{\varepsilon^p\} - \{\varepsilon^{ph}\} - \{d\varepsilon^p\}) + \{n\}^T [dD] \{\varepsilon^e\} - 2/3 Y_m^{-1} (\partial Y / \partial T) dT}{S}, \quad (19)$$

где:

$$S = \{n\}^T [D] \{n\} + 2/3 Y_m^{-1} H_{iso} \sqrt{2/3}. \quad (20)$$

Упругопластическая матрица в выражении (14), следуя математическим выкладкам [6]:

$$[D^{ep}] = \frac{[D] - [D] \{n\} \{n\}^T [D]}{S}. \quad (21)$$

Приращение тензора напряжений на текущем шаге с учетом температурной зависимости функции упрочнения [6]:

$$\{d\sigma\} = [D^{ep}] (\{\varepsilon\} - \{\varepsilon^h\} - \{\varepsilon^p\} - \{\varepsilon^{ph}\} - \{d\varepsilon^p\}) + \left(\frac{[dD] - [D] \{n\} \{n\}^T [dD]}{S} \right) \{\varepsilon^e\} + \frac{2/3 [D] \{n\} Y_m^{-1} (\partial Y / \partial T) dT}{S}. \quad (22)$$

Поиск решения с помощью МКЭ проводится итерационно. При этом, матрица (21) используется как тангенциальная в сочетании с методом Ньютона-Рафсона. Вычисление полного напряжения и деформаций осуществлено при помощи интегрирования выражения (14) на каждом шаге тепловой нагрузки.

Фазовые превращения

В настоящее время экспериментальные диаграммы (изотермические и термокинетические) широко используются для анализа и разработки технологий индукционной закалки. Большинство вычислительных алгоритмов построены на основе интеграла Шейля (переход от изотермических к неизотермическим условиям) и параметрического вида уравнения Авраами [9]. В этом случае модель может быть построена с применением изотермических диаграмм.

Однако существует целый ряд приведенных ниже проблем, который ограничивает возможность применения такого подхода:

- Недостаток данных о растворимости фаз в зависимости от температуры. Вследствие этого, необходимо использование термодинамического аппарата для расчета превращений феррита и перлита. Более того, существует большая сложность в определении максимально возможной доли бейнита [10].
- Недостаток информации о влиянии особенности микроструктуры (например, размера зерна).
- Отсутствие информации о влиянии механической движущей силы на фазовые превращения.
- Диаграммы фазовых превращений не отражают одновременный рост долей фаз (например, феррита и перлита, бейнита и перлита).

Для решения этих проблем может быть использован аппарат вычислительного материаловедения и разработана модель, которая позволяет вычислять диаграммы охлаждения и нагрева для произвольной стали, основываясь на ее химическом составе, особенностях микроструктуры и напряженно-деформированном состоянии. Такая теория базируется на положениях термодинамики и кинетики и может быть использована для вычисления [11]:

- инкубационного времени зарождения зерен каждой из фаз;
- скорости зарождения и типа геометрии зерен;
- скорости и механизма роста;
- A_{c3} , A_{c1} , M_s точек фазовых превращений.

Указанные вычисления строятся на основе термодинамических данных для сплавов с различным химическим составом с использованием CALPHAD метода [12]. Существует целый ряд вычислительных программ, которые реализуют этот метод (MTDATA, ThermoCalc).

Заключение

В настоящей статье представлена математическая модель, которая учитывает все значимые физические явления, имеющие место при индукционной закалке. Компьютерная реализация описанной модели позволяет анализировать фазовые превращения, напряженно-деформированное состояние детали и ее температурную историю в процессе термообработки. Более того, анализу может быть подвергнута и электромагнитные параметры системы «индуктор-деталь». В настоящее время, модель фазовых превращений реализована на основе экспериментальных диаграмм, однако интенсивно проводятся исследования, направленные на совершенствование этой модели с использованием более гибкого термодинамического подхода. Включение в комплексную модель описания напряженно-деформированного состояния позволяет, с одной стороны, анализировать на этапе проектирования технологического процесса напряжения и деформации детали, а с другой стороны, повысить точность и адекватность результатов моделирования.

Литература

1. Кундас С.П. Компьютерное моделирование процессов термической обработки сталей. - Мн.: Бестпринт, 2005. - 313 с.
2. Кундас С.П., Иванов Д.Г., Гишкелюк И.А. Совместное решение электромагнитной и тепловой задач при моделировании индукционного нагрева // Известия Белорусской инженерной академии. - 2005. - № 1(19)/2. - с. 51-53.
3. Демидович В.Б., Чмиленко Ф.В., Кундас С.П., Иванов Д.Г., Лемзиков А.В. Комплексная математическая модель индукционной закалки осесимметричных деталей с учетом напряженно-деформированного состояния и фазовых превращений // Сборник трудов конференции «Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий». - 2006. - с. 149-153.
4. Кундас С.П., Гишкелюк И.А., Тонконогов Б.А., Лемзиков А.В., Иванов Д.Г. Моделирование напряженно-деформированного состояния стальных деталей при закалке // Деформация и разрушение материалов - 2005. - Т. 5. - с. 37-47.
5. Seong-Hoon Kang, Young-Taek Im Three-dimensional thermo-elastic-plastic finite element modeling of quenching process of plain-carbon steel in couple with phase transformation // International journal of mechanical sciences - 2007. - 49. - p. 423-439.
6. Y.V.L.N Murthy, G. Venkata Rao, P.Krishna Iyer Numerical simulation of welding and quenching processes using transient thermal and thermo-elasto-plastic formulations // Computers & Structures - 1996. - v. 60, 1 - p. 131-154.
7. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. The Finite Element Method. Volume II. Solid mechanics. 5th Edition. - Butterworth-Heinemann - 2000. - 476 p.
8. Edited by E. Steck, R. Ritter, U. Peil, A. Ziegenbein. Plasticity of Metals: Experiments, Models, Computation. - Wiley-VCH Verlag GmbH, 2001 - 398 p.
9. Kurek K., Dolega D. Modeling of Induction Hardening. // International Scientific Colloquium "Modeling for Electromagnetic Processing" - Hannover - 2003. - p. 125-130
10. Reti T., Fried Z., Felde I. Computer simulation of steel quenching process using a multi-phase transformation model // Computational Materials Science - 2001. - p. 261-278.
11. Bhadeshia H. Bainite in steels (2nd Edition). London: IOM Communications Ltd. - 2001. - 454 p.
12. Saunders N., Miodownik A. CALPHAD - Calculation of Phase Diagrams (Vol. 1). (R. Cahn, Ed.) Oxford: Elsevier Science. - 1991. - 132 p.

УДК 536.46:534.29:539.26

ЗАКОНОМЕРНОСТИ СИНТЕЗА И ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ СИСТЕМЫ ТИТАН - БОР ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Клубович В.В., Кулак М.М., Платонов Л.Л.

Институт технической акустики НАН Беларуси, г. Витебск

Возрастающим комплексным интенсивным нагрузкам на поверхности узлов и механизмов современного машиностроения наиболее полно могут противостоять новые материалы с уникальными физико-механическими, электрофизическими, физико-химическими или многофункциональными свойствами. Боридные соединения находят все большее применение в качестве материала для износостойких покрытий.

Перспективным направлением, позволяющим достаточно просто синтезировать новые материалы, является самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС). С помощью СВС решаются задачи по созданию новых композиционных материалов (новые марки твердых сплавов, литая керамика и т.д.). Успешное и перспективное