

УДК 536.46

## АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ПРОГРАММНЫХ ПРОДУКТОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕРМООБРАБОТКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

*А.В. Польшаев, А.И. Михлюк, И.И. Вегера*  
Физико-технический институт НАН Беларуси  
г. Минск, Беларусь

*В работе представлен обзор основных программных продуктов, которые могут применяться для моделирования процессов термообработки, в том числе и с применением индукционного нагрева. Проведен анализ их основных характеристик, показаны достоинства и недостатки.*

*The paper presents an overview of major software products that can be applied in simulation of heat treatment processes including the ones using induction heating. It gives an analysis of their principal characteristics, advantages and disadvantages.*

В настоящее время перед промышленностью остро стоит проблема выпуска качественной и конкурентоспособной продукции. Требования качества в полной мере относятся и к процессам термообработки изделий, которые играют очень важную роль в обеспечении технологических и эксплуатационных свойств деталей.

Особенностью технологической подготовки производства деталей, подвергаемых термообработке, является необходимость анализа обоснованности назначения режимов их обработки уже на стадии проектирования. Традиционно этот анализ осуществляется экспериментальными методами, с применением разрушающих методов контроля и металлографии, что связано с большими затратами времени и материальных средств. Одним из эффективных направлений решения указанных проблем является применение методов компьютерного моделирования, которые при минимальном количестве дорогостоящих экспериментальных исследований позволяют получить максимальное количество информации о характеристиках разрабатываемого процесса и свойствах полученных изделий. Мировая тенденция развития данного направления заключается в применении CALS-технологии, то есть сквозной автоматизации всего жизненного цикла изделия.

Методы математического моделирования позволяют рассматривать различные стадии производства и эксплуатации изделий в режиме «реального» времени. Поскольку фактически любой процесс, происходящий в окружающем мире, можно описать при помощи математических моделей с той или иной точностью, то используя современные высокопроизводительные ЭВМ можно осуществлять прогнозирование поведения изделия, как в процессе его изготовления, так и при эксплуатации. Адекватность моделей зависит лишь от точности, с которой проводится исследование. Для обеспечения более высокой точности используется большее количество уравнений и итераций, соответственно требуется большее время для моделирования.

В данной работе представлен обзор современных информационных технологий, которые могут применяться при реализации комплексного подхода к разработке процессов термообработки металлов, в том числе и с применением индукционного нагрева.

Математическое моделирование процессов термообработки невозможно без детального изучения и анализа: кинетики фазовых и структурных превращений в металлах и сплавах; теплофизических процессов, происходящих при нагреве;

процессов формирования физико-механических и технологических свойств деталей.

Процесс термической обработки сталей можно разделить на следующие этапы: нагрев до определенной температуры, выдержка при этой температуре и охлаждение. На данных этапах происходят следующие теплофизические процессы:

- теплопередача от окружающей среды к детали;
- распределение тепловой энергии в объеме детали;
- фазовые и структурные превращения, происходящие с выделением или поглощением тепла;
- упругие и пластические деформации, происходящие вследствие изменения температуры детали и фазовых превращений.

Прогнозирование протекания этих процессов при нагреве, их влияние на получаемые свойства деталей и является задачей моделирования.

В наши дни в области CAE (Computer Aided Engineering) моделирования теплофизических процессов и устройств находят применение универсальные и специализированные программные средства.

Универсальные программные средства предоставляют возможность моделирования различных физических процессов в одной программной оболочке с возможностью их адаптации для анализа конкретного технологического процесса или конструкции. В них, как правило, предусмотрено несколько уровней ветвления хода решения задачи, что придает таким пакетам некоторую сложность и трудоемкость в использовании и повышенные требования к квалификации пользователей. К таким программным средствам можно отнести MSC. NASTRAN, MSC. MARC, ANSYS, ABACUS и др.

В свою очередь специализированные программные средства предназначены для моделирования одного или нескольких, близких по физическим основам технологических процессов (например, закалка, литье, штамповка). Конечно же, универсальные и специализированные программные средства имеют свои особенности в построении. Однако чаще всего общим для современных CAE-систем является типовая структура, основанная на реализации трех основных подсистем (блоков): препроцессора, процессора, постпроцессора.

При моделировании сложных технических объектов возникают проблемы, связанные с трудоемкостью подготовки большого количества исходной информации, ее проверки и корректирования. При ручной подготовке большого объема входных данных неизбежно появление ошибок.

Поэтому CAE-приложений имеют препроцессоры — подсистемы автоматизированной подготовки информации. Блок процессора непосредственно осуществляет математические операции обработки входных данных. В блоке постпроцессора осуществляются интерпретация и представление в необходимой форме результатов моделирования. Например, наглядное графическое распределение по поверхности и в объеме (сечении) модели полей температур, построение графических и табличных зависимостей величин от времени и т.д. Базы данных в CAE-приложениях могут быть реализованы в виде отдельного программного модуля с использованием СУБД и специального графического интерфейса либо интегрированы в программный комплекс с возможностью чтения данных из файла определенного формата [1].

#### **Универсальные программные средства**

Рассмотрим подробнее особенности универсальных программ, большинство из которых построено на основе применения метода конечных элементов (МКЭ).

Программный комплекс MSC.NASTRAN обеспечивает расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) и решение задач теплопередачи при различных процессах [1]. Предусмотрена возможность моделирования практически всех типов материалов, включая композитные и гиперупругие. MSC.NASTRAN работает на персональных компьютерах, рабочих станциях и суперкомпьютерах. Применение MSC.NASTRAN для моделирования задач термообработки возможно лишь при наличии в его составе подпрограмм пользователя, содержащих информацию о кинетике фазовых превращений в различных металлах и сплавах. Это является существенным недостатком программы и требует специальной подготовки пользователей. Кроме того, в базах данной программы отсутствует информация о физико-механических и технологических свойствах фазовых составляющих сталей. Поэтому для адаптации данной программы требуется постоянное расширение баз данных экспериментальными данными для различных материалов.

Универсальным программным комплексом, позволяющим моделировать различные физические процессы и явления, является ANSYS. ANSYS позволяет решать задачи прочности, теплофизики, гидрогазодинамики, электромагнетизма, совместно с расчетом усталостных характеристик и процедур оптимизации. Широкие возможности представляются также препроцессором. На разработанной модели пользователь

может удалять несущественные мелкие детали, дорабатывать детали, проводить сгущение/разрежение сетки и другие важнейшие операции, без которых в некоторых случаях дальнейшее решение будет некорректным или вообще не сможет быть достигнуто. Построение поверхностной, твердотельной и каркасной геометрии и внесение изменений осуществляется средствами собственного геометрического модуля [1]. Однако аналогично MSC.NASTRAN для решения задач термообработки в ANSYS требуется создание дополнительных моделей и написание подпрограмм пользователя, расширение базы данных.

MSC.MARC предоставляет возможности для комплексного нелинейного анализа конструкций, решения сложных задач термической прочности и моделирования технологических процессов. Программный комплекс широко используется для компьютерного моделирования технологических процессов прокатки, прессования, листового и объемного формования, суперпластического формования. Доступны также неструктурные типы анализа: электростатический, магнитостатический, электромагнитный, акустический, гидродинамический, анализ подшипников, теплопередача и др. [3]. Для решения задач термообработки в данной программе также требуется создание подпрограмм пользователя, учитывающих кинетику фазовых и структурных превращений. Кроме того, опыт практического использования MSC.MARC [4] показывает, что большую сложность представляют описание температурной зависимости свойств фазовых составляющих стале- и формализация присутствия нескольких фаз в материале в один и тот же момент времени.

Исходя из приведенного анализа, можно сделать вывод, что в настоящее время не существует как в нашей стране, так и за рубежом универсальных конечно-элементных приложений, которые возможно было бы применить для моделирования процессов термообработки без проведения исследовательских работ по их адаптации, разработке дополнительных моделей, подпрограмм пользователя и расширения баз данных свойств материалов. Кроме того, лицензионные универсальные программные средства характеризуются высокой стоимостью (более 50 тыс. долл. США), что ограничивает возможности их приобретения большинством потенциальных потребителей нашей страны.

#### **Специализированные программные средства**

К специализированным программным средствам, которые можно применять для модели-

рования процессов термообработки, можно отнести DEFORM-3D [5], Ind [6], ThermoSim [7,8], IndHeat [9, 10]. Как отмечалось ранее, особенностью этих программных средств является их узкоспециализированное назначение.

Например, система DEFORM-3D предназначена для трехмерного анализа процессов обработки металлов давлением, а также процессов термообработки при установке дополнительного модуля DEFORM-HT. Типичные направления применения программного комплекса следующие: ковка, выдавливание, вырубка, обработка резанием, высадка и др. Для моделирования процессов термообработки в состав DEFORM-3D включен дополнительный модуль DEFORM-HT. Основная задача DEFORM-HT — анализ процессов термообработки на ранних стадиях проектирования. Программный комплекс предоставляет возможности анализа таких процессов термообработки, как нормализация, отжиг, закалка, отпуск, старение и цементация. В процессе моделирования учитываются фазовые превращения, науглероживание, изменения объема и тепловыделение в результате фазовых превращений с получением численных значений объемной доли мартенсита, аустенита, величины остаточных напряжений, коробления, твердости и других параметров.

Таким образом, программный комплекс DEFORM-3D с модулем DEFORM-HT может успешно применяться для анализа процессов термообработки. В качестве недостатков следует отметить высокую стоимость, а также ограниченность базы данных свойств фаз материалов, что не позволяет моделировать процессы термообработки легированных сталей, без проведения предварительных экспериментальных исследований данных материалов.

Программа Ind [6], разработанная в Институте тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, позволяет проводить математическое моделирование индукционного нагрева и охлаждения, выполнять теоретическое построение термических кривых нагрева и охлаждения для любой точки поверхности и сечения обрабатываемой детали. Вводя параметры применяемого преобразователя частоты, форму, размеры и скорость движения индуктора, первоначальную температуру, материал и размеры нагреваемых деталей и охлаждающей среды, можно расчетным путем прогнозировать распределение температурного поля и слоя закалки на обрабатываемых деталях. В режиме просмотра результатов расчета возможен выбор контрольных точек в любых узлах модели де-

тали и построение для этих точек температурных кривых нагрева и охлаждения. Прогнозирование твердости детали после закалки осуществляется с помощью термокинетических диаграмм.

Следует отметить, что программа Ind работает только с двухмерными моделями деталей, в процессе моделирования не учитываются напряженно-деформированное состояние детали и фазовые превращения, что снижает возможности ее практического применения и точность получаемых результатов.

Программный комплекс ThermoSim для моделирования процессов термообработки разработан совместно БГУИР и МГЭУ им. А.Д.Сахарова [7, 8]. Он реализует 3D-модель процесса термообработки, особенностью которого является математическое описание распределения температур, напряженно-деформированного состояния, твердости детали с учетом фазовых превращений, образования трещин, а также релаксации напряжений за счет пластических деформаций.

ThermoSim реализует следующие функции: загрузку файлов геометрии модели детали в формате STL или форматах программ DEFORM-3D и MSC.MARC; отображение детали на экране, масштабирование и вращение; загрузку текстового файла проекта, содержащего информацию о модели для выполнения расчета; разбиение геометрии модели детали на конечные элементы определенной плотности; ввод термических, механических и других свойств материала детали непосредственно в диалоговом режиме или выбор из базы данных; ввод начальных и граничных условий, технологических режимов; расчет температур в узлах модели в процессе нагрева и охлаждения детали; расчет текущего фазового состава материала детали (на основе аппроксимации термокинетических или изотермических диаграмм); расчет твердости в объеме и на поверхности детали; расчет напряженно-деформированного состояния с учетом фазовых превращений и релаксации напряжений; отображение в виде цветных градиентов температурных полей, деформаций, напряжений, фазового состава, твердости и мест возможного образования трещин в детали; построение графических зависимостей, рассчитанных выходных характеристик процесса закалки от времени; сохранение результатов в файл.

Программный пакет IndHeat [9, 10], разработанный в ВНИИТВЧ (Санкт-Петербург) совместно с ЭСТЭЛ (Эстония), состоит из пяти модулей, предназначенных для моделирования процессов индукционного нагрева:

- PE – редактор базы данных свойств материалов заготовок и футеровок;
- CP1D - 1D-модель нагрева цилиндров и пластин;
- SS2D - 2D-модель нагрева слябов и ленты;
- UNIVERSAL2D - модель нагрева цилиндров;
- UNIVERSAL3D - модель нагрева тел с прямоугольным и более сложным сечением.

Реализованные в IndHeat модели основаны на использовании различных численных методов решения электромагнитной и тепловой задачи (МКЭ, МКР и метод интегральных уравнений) и их комбинации. Результаты расчетов представляются в наглядном текстовом и графическом виде.

Возможности пакета:

- получение полной информации об ТВЧ-установке (КПД, коэффициент мощности, активная и реактивная мощность, распределение электромагнитного и температурного поля в заготовке, внутренних напряжений, критических деформаций и т.п.);
- моделирование непрерывных линий термообработки (непрерывная разливка-прокатка, горячая гальванизация и т.п.), включающее газовые печи, зоны термостатирования, транспортировки и охлаждения;
- получаемая при расчете информация и возможность моделирования переходных процессов позволяют использовать программы при проектировании систем управления.
- вывод результатов расчетов в графическом виде, текстовом отчете, в формате XLS.

IndHeat является одним из лучших программных пакетов для моделирования индукционного нагрева. Он содержит обширную базу как нагреваемых материалов (цветные, черные металлы и сплавы, графит, керамика), так и конструкционных и теплоизолирующих. Недостатком данной программы является отсутствие возможности импорта и экспорта геометрии моделей деталей, что снижает возможности его применения, однако при этом упрощает практическое использование менее подготовленными пользователями.

### Выводы

Исходя из приведенного анализа, можно сделать вывод, что применение специализированных программных средств значительно ускоряет процесс моделирования термообработки деталей, особенно при накоплении базы данных экспериментальных исследований по свойствам, фазовому составу и структуре различных металлов и сплавов. Их использование особенно актуально в научных и учебных организациях, а также на крупных промышленных предприятиях, имею-

ших в своем составе опытные конструкторские отделы и центральные заводские лаборатории. Применение узкоспециализированных продуктов позволяет избежать грубых ошибок и просчетов при проектировании оснастки и нагревательного оборудования, разработке технологических процессов термообработки и отладки режимов работы оборудования. Данные, полученные при моделировании, могут применяться для внесения их в автоматизированные системы управления и контроля промышленного оборудования с целью своевременного выявления сбоев в параметрах технологического процесса и для предотвращения наступления аварийной ситуации.

В заключении следует отметить, что настоящее время в Беларуси уделяется недостаточно внимания вопросам моделирования процессов

термообработки, особенно при использовании индукционного нагрева. На это имеется целый ряд причин, основными из которых, на наш взгляд, являются: отсутствие на промышленных предприятиях необходимых программных комплексов, отсутствие квалифицированных кадров для использования современных САПР. Поэтому только комплексное решение следующих проблем: обучение молодых специалистов, исследования свойств и структуры материалов, разработка современных технологий и оборудования, автоматизация и компьютеризация технологического оборудования, контроль качества всех этапов производства позволит процессам с применением термического нагрева деталей стать экономически эффективными, высокопроизводительными, рентабельными и безопасными.

#### *Список использованных источников*

1. Кундас С.П., Тонконогов Б.А., Кашко Т.А., Гринчик Н.Н. Компьютерное моделирование технологических систем. Учеб. пособ. В 2-х ч. Ч. 2. Мн.: БГУИР, 2003. 182 с.
2. ANSYS Release 9.0 Documentation [Computer file] // ANSYS, Inc. Computer data. Canonsburg, 2004. 1 CD-ROM.
3. MSC. MARC Volume A: Theory and User Information, Version 2005 [Computer file] / MSC. Software Corporation. Computer data. Santa Ana, 2004. 1 CD-ROM.
4. Кундас С.П., Кузьменков А.Н., Гуревич В.А. Адаптация программного комплекса MARC для моделирования теплообмена и остаточных напряжений при плазменном напылении покрытий // Материалы 2-й Рос. конф. по применению современных программных разработок фирмы MSC на предприятиях России, Беларуси и Украины. М., 1999. 15 с. (CD).
5. Site of DEFORM System // Scientific Forming Technologies Corporation [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.deform.com/products/deform-ht/>
6. Гринчук П.С., Файн И.В. Математическое моделирование работы установки индукционного нагрева стальных заготовок и оптимизация ее электрической намотки // Тепло и массоперенос-2007. Минск: ИТМО им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, 2007. С. 362-368.
7. Кундас С.П., Кашко Т.А. Компьютерное моделирование технологических систем: Учеб. пособие. В 2 ч. Ч. 1. – Мн.: БГУИР, 2002. – 168 с.: ил.
8. Кундас С.П., Гишкелюк И.А., Иванов Д.Г., Лемзиков А.В., Чмиленко Ф.В. Математическое моделирование индукционной закалки с применением метода конечных элементов // Материалы международной конференции «Актуальные проблемы теории и практики индукционного нагрева», СПб, 2005, стр. 292-299
9. Демидович В.Б., Чмиленко Ф.В. Численные методы в теории индукционного нагрева. СПб.: Технолит, 2008.
10. Демидович В.Б., Чмиленко Ф.В., Малышев А.А., Скворцов В.Е. Двумерные и трехмерные электротепловые модели индукционных нагревателей: Учеб. пособ. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2004. 40 с.