

ментов, что подтверждается образованием сегрегаций на дефектах решетки. Это позволяет предполагать образование некрсталлических материалов путем твердофазной реакции при совместной пластической деформации исходных компонентов. К такой аморфизации склонны системы, в которых соединения плавятся конгруэнтно и имеют узкую область гомогенности. В упомянутых соединениях (системах) большая степень ионности и ковалентности межатомных связей, что способствует сохранению аморфного состояния.

Заключение. Таким образом, при моделировании импульсно-плазменной обработки газотермических покрытий предусмотрено физико - математическое описание теплового и ударно-волнового воздействий как процессов, оказывающих решающее влияние на механизм упрочнения обрабатываемых покрытий. Кроме того, в систему уравнений моделей предусмотрено ввести зависимости, учитывающие влияние на уровень воздействий дистанции обработки, являющейся одним из технологических параметров, который не отражен в известном моделировании. С использованием физико-математического описания предусмотрено также теоретическое прогнозирование технологических параметров обработки, обеспечивающих механизм упрочнения газотермических покрытий, установленный на предыдущих этапах исследований импульсно-плазменных воздействий и о котором упоминалось выше. Экспериментальная проверка прогнозируемых технологических параметров позволит оценить адекватность моделирования и перспективы его применения на практике.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Мейерманов А.М. Задача Стефана. – Новосибирск, 1986.
2. Митропольский Ю.А., Березовский А.А. Задачи Стефана в металлургии, криохирургии и физике моря. Препринт 1989. II. Киев.
3. Углов А.А., Смулов И.Ю., Гуськов А.Г. О расчете плавления металлов концентрированным потоком энергии // Физика и химия обработки материалов. 1985. №3. С. 3-8.
4. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. – М., 1972.

5. Коздоба Л.А. Методы решения нелинейных задач теплопроводности. – М., 1975.
6. Коздоба Л.А. Решения нелинейных задач теплопроводности. – К., 1976.
7. Углов А.А., Смулов И.Ю., Лашин А.М. Моделирование нестационарного движения фазовых границ при воздействии потоков энергии на материалы // Теплофизика высоких температур. 1989. Т. 27, №1. С. 87-93.
8. Табаков В.П., Власов С.Н., Рандин А.В. Разработка технологии комбинированной упрочняющей обработки для повышения эффективности применения режущего инструмента // 6-я Международная конференция "Пленки и покрытия ' 2001". С.-П., 2001. С. 187-189.
9. Ильющенко А.Ф., Оковитый В.А., Кундас С.П., Форманек Б. Формирование газотермических покрытий. Теория и практика. – Мн., 2002.
10. Шиллер З., Гайзинг У., Панцер З. Электронно-лучевая технология. – М., 1980.
11. Ильющенко А.Ф., Оковитый В.А., Шевцов А.И., Асташинский В.М., Ильющенко Т.А. Исследование свойств и механизма упрочнения напыленных самосмазывающихся покрытий, обработанных импульсными плазменными потоками // Сб. "Порошковая металлургия". 2003. Вып. 26. С. 117-123.
12. Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Зуев И.В., Кокора А.Н. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов. Справочник. – М., 1985.
13. Будовских Е.А., Сарычев В.Д., Коврова О.А. Науглероживание с оплавлением поверхности титанового сплава и железа импульсным воздействием гетерогенных плазменных пучков // Изв.вуз. Чер. металлургия. 1992. №6. с. 89-93.
14. Будовских Е.А., Сарычев В.Д., Симаков В.И., Носарев П.С. Импульсное науглероживание никеля и меди воздействием плазменных пучков // Электрон. обраб. материалов. 1993. №3. С. 20-23.
15. Камруков А.С. Козлов Н.П., Протасов Ю.С. Физические принципы плазодинамических сильноточных излучающих систем // Плазменные ускорители и ионные инжекторы. – М., 1984. – С. 5-9.
16. Лукьянов Г.А. Сверхзвуковые струи плазмы. – Л., 1985.

Статья поступила в редакцию 29.10.2007

УДК 621.785; 004.8.032.26; 004.89:004.4

Кундас С.П., Лемзиков А.В., Иванов Д.Г.

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ИНДУКЦИОННОЙ ЗАКАЛКИ

Введение. Методы компьютерного моделирования в настоящее время находят широкое применение во всех отраслях техники, в том числе в металлургии и машиностроении. Перспективными направлениями в этом отношении являются процессы термообработки и, в частности – разработка и оптимизация индукционной закалки как один из наиболее перспективных методов упрочнения деталей [1].

Следует отметить, что в настоящее время большинство предприятий Республики Беларусь не используют широкие возможности оптимизации технологических процессов, предоставляемые современными инженерными программными средствами, среди которых можно выделить такие программные продукты, как MSC.MARC [2], DEFORM HT [3], ThermoSim [4], которые предназначены непосредственно для

моделирования процессов, связанных с термообработкой стальных деталей. Это определяется многими факторами, в частности, зарубежное программное обеспечение имеет достаточно высокую стоимость, часто не адаптировано к реальным условиям отечественного производства и не всегда рентабельно для предприятий.

Применительно к задаче оптимизации процесса индукционной закалки можно выделить следующие актуальные направления:

- выбор параметров процесса индукционного нагрева, позволяющих обеспечить необходимое распределение температуры на поверхности и в объеме детали и динамике ее изменения;
- выбор марки (или химического состава) стали, исходя из

Кундас Семен Петрович, д.т.н., профессор, ректор Международного государственного экологического университета им. А.Д. Сахарова.

Лемзиков Андрей Валерьевич, м.н.с., Центр 10.1, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники.

Иванов Дмитрий Георгиевич, м.н.с., Центр 10.1, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники.

требуемых эксплуатационных характеристик деталей;

- выбор охлаждающей среды, позволяющей обеспечить требуемую скорость охлаждения при закалке.

Кроме этого, современные требования к автоматизации производства ставят задачу интеграции программных комплексов для инженерного компьютерного анализа технологических процессов термообработки с системами управления технологическим оборудованием [5, 6]. Это особенно актуально для быстропротекающих процессов, к которым относится закалка.

Для решения указанных выше задач, прежде всего, необходима разработка математических моделей процесса закалки, которые бы с удовлетворительной для практического использования точностью описывали этот процесс. Вторым и не менее важным этапом является создание программных средств, реализующих модели, с учетом возможности их использования специалистами-практиками в условиях производства. Упомянутые выше зарубежные разработки (MSC.MARC, DEFORM HT и др.) являются универсальными, предназначены для решения многих задач в рассматриваемой предметной области, требуют проведения большого количества работ на уровне системного программиста или высококвалифицированного пользователя по их настройке и адаптации к конкретному процессу, не говоря уже об их высокой стоимости.

Особенности математического описания физических процессов, протекающих в процессе индукционной закалки.

Для обеспечения необходимой точности результатов моделирования рассматриваемого процесса его математическое описание должно охватывать все значимые физические явления, которые оказывают как прямое, так и косвенное влияние на обеспечиваемые закалкой механические и эксплуатационные свойства деталей.

Исходя из вышеизложенного математическое описание индукционной закалки должно включать описание электромагнитных и тепловых явлений, а также модель фазовых превращений. Стоит также понимать, что на эксплуатационные свойства детали большое влияние оказывает напряженно-деформированное состояние (остаточные напряжения) вследствие суммирования этих напряжений с внешней нагрузкой. Кроме этого, внутренние напряжения являются дополнительной движущей силой для фазовых превращений.

Таким образом, комплексная модель процесса индукционной закалки, должна содержать математическое описание электромагнитной задачи (индуктор), задачи теплообмена (нагрев и охлаждение детали), формирования напряженно-деформированного состояния детали с учетом фазовых превращений и пластических деформаций.

Такая задача решена в рамках совместного проекта БГУ-ИР и МГЭУ им. А.Д.Сахарова, выполняемого по заданиям ГПКНИ «Инфотех» и Министерства образования.

Модель электромагнитных явлений в системе «индуктор-среда-деталь» разработана на основе уравнений Максвелла [7] и позволяет, исходя из конструкции индуктора и подаваемого на него амплитудного напряжения определенной частоты, рассчитать как источники теплоты в детали, так и распределения плотности тока, падения напряжений в индукторе, а также коэффициента полезного действия. Модель разработана совместно со специалистами ЛЭТИ (г. Санкт-Петербург).

Тепловая задача решена в 3-х мерной постановке на основе уравнения Фурье с соответствующими граничными условиями [8]. В качестве источника теплоты использовались результаты электромагнитного анализа. Отличительными особенностями математической модели является учет температурных зависимостей свойств материала и теплоты фазовых превращений.

Напряженно-деформированное состояние деталей в процессе закалки описано в 3-D упруго-пластической постановке с учетом фазовых превращений [9]. 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.

При моделировании процессов термообработки, как следует из вышеприведенной информации, важное значение имеет учет и адекватное математическое описание фазовых превращений [10], протекание которых оказывает наиболее существенное влияние на формируемые свойства деталей.

В настоящее время моделирование фазовых превращений преимущественно базируется на двух подходах: 1) на основе использования аппроксимации экспериментально определенных изотермических и термокинетических диаграмм сталей; 2) на основе теории термодинамики и кинетики фазовых превращений.

В разработках авторов в настоящее время практически реализован первый подход и проводятся исследования модели, базирующейся на строгих термодинамических расчетах. Создается также модель, которая позволяет вычислять диаграммы охлаждения и нагрева для любой стали, основываясь на ее химическом составе, особенностях микроструктуры и напряженно-деформированном состоянии. Вычисления строятся на основе термодинамических данных для сплавов с различным химическим составом с использованием CALPHAD метода [11]. Существует ряд вычислительных программ, которые реализуют этот метод (MTDATA, ThermoCalc).

Представленные математические модели позволяют решить прямую задачу моделирования, т.е. по заданным режимам закалки рассчитать свойства обрабатываемых деталей. Однако в реальном производстве перед специалистами-технологами часто стоит обратная задача – по требуемым свойствам детали определить оптимальные режимы ее термообработки. Эта задача может быть решена наиболее эффективно с применением гибридных экспертных систем, в которых для целей оптимизации используются нейронные сети [12], что позволяет решить как прямую, так и обратную задачу моделирования.

Особенностью предложенного решения является применение для целей оптимизации генетических алгоритмов, которые взаимодействуют с нейронной сетью с помощью специального интерфейса целевой функции.

В отличие от существующих разработок, предложенная реализация позволяет формировать структуру модуля оптимизации на этапе выполнения, т.е. конечный пользователь, а не разработчик программного обеспечения может задавать вид целевой функции и, таким образом, оптимизировать производственные технологические процессы. Кроме того, модуль генетического алгоритма не является жестко связанным с нейронными сетями, что дает возможность легко адаптировать его к решению задач оптимизации, основанных на других видах целевых функций (например – аналитические выражения, эмпирические зависимости, уравнения, полученные методом регрессионного анализа и т.п.).

Программные средства для моделирования и оптимизации процесса индукционной закалки.

Современный программный комплекс для моделирования технологических процессов должен содержать ряд модулей, которые взаимодействуя друг с другом, позволяют пользователю решать задачи моделирования и оптимизации. Можно выделить следующие основные модули: база данных свойств материалов, библиотека работы с двух- и трехмерной графикой, математическая библиотека для решения больших систем уравнений, постпроцессор для анализа результатов моделирования. Кроме того, специализированные программные комплексы могут

содержать дополнительные модули, предназначенные для оптимизации исследуемого процесса.

В настоящее время создано несколько специализированных программных комплексов, для моделирования процессов закалки, к которым можно отнести Deform HT [3], Universal (Санкт-Петербургский электротехнический университет «ЛЭТИ») и др. Программный комплекс DEFORM-HT обеспечивает анализ процессов нормализации, отжига, закалки, отпуска, старения и цементации. DEFORM-HT учитывает при моделировании фазовые превращения, науглероживание, изменение объема и тепловыделение, вызванное фазовыми превращениями. В результате расчета могут быть получены численные значения объемной доли мартенсита, аустенита, величины остаточных напряжений, коробления, твердости и другие параметры. Программный комплекс Universal позволяет моделировать процессы индукционного нагрева для длинномерных осесимметричных заготовок, а также для слябов, т.е. рассматриваются только электромагнитная и тепловая задачи.

Как видно из вышеизложенного, существующие программные средства не позволяют проводить комплексный анализ процесса индукционной закалки и решение задачи оптимизации.

В лаборатории «Компьютерное моделирование технологических процессов» Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники разработан программный комплекс KMTP Framework, в состав которого входят подсистемы для моделирования и оптимизации процессов, связанных с индукционной закалкой. В качестве отличительных особенностей программного комплекса можно выделить его модульную структуру, позволяющую организовать взаимодействие различных алгоритмов между собой (например, нейронных сетей, генетического алгоритма и метода конечных элементов), а также простоту в эксплуатации и ориентацию на отечественного пользователя.

В настоящее время в состав программного комплекса входят следующие модули:

1. *ThermoSim – Закалка.* Модуль предназначен для моделирования процессов закалки стальных деталей произвольной трехмерной геометрии в различных охлаждающих средах. Отличительными чертами реализованных математических моделей являются: учет температурных зависимостей свойств материала, учет фазовых превращений, учет напряжено-деформированного состояния (термических и фазовых напряжений). Модуль позволяет вычислять поля температуры, напряжений, фазовых составляющих и твердости в процессе закалки. Экспериментальная верификация модуля показала высокую точность принятых в нем решений (погрешность математической модели не превышает 10-15%).
2. *Нейронные сети.* Модуль предназначен для создания, обучения и использования искусственных нейронных сетей (ИНС) различной структуры. Применение нейронных сетей, обученных на наборах экспериментальных данных, позволяет создать модель процесса, основанную на анализе зависимостей между входными и выходными параметрами, что обеспечивает минимальные затраты машинного времени при моделировании процесса закалки.
3. *Генетический алгоритм.* Исследования в области классических методов оптимизации привели к созданию так называемых генетических алгоритмов (ГА) оптимизации. Основная идея ГА позаимствована из механизмов, наблюдаемых в живой природе. В сочетании с нейронными сетями генетические алгоритмы позволяют эффективно производить оптимизацию целевой функции по многим параметрам.
4. *База данных свойств сталей.* Содержит информацию о температурных зависимостях свойств фазовых составляющих сталей, применяемых в процессах закалки.

Оптимизация свойств материалов. Применяя модули нейронных сетей и генетического алгоритма, в программном комплексе KMTP Framework можно решать задачу оптимизации режимов закалки исходя из требований к ее эксплуатационным характеристикам. Для этого разрабатывается нейронная сеть, позволяющая определить значение требуемой характеристики (предел текучести, вязкость, предел ползучести, модуль упругости и др.) в зависимости от химического состава стали и режимов ее обработки. В дальнейшем используется генетический алгоритм, осуществляющий поиск такой комбинации входных параметров, при которой значение искомой характеристики наиболее близко к желаемой.

Выбор охлаждающей среды. Одним из возможных применений методов оптимизации при проектировании технологического процесса индукционной закалки является подбор коэффициента теплоотдачи охлаждающей среды, т.е. фактически выбор охлаждающей среды и скорости охлаждения.

На отечественных предприятиях традиционно используется ограниченное множество охлаждающих сред, к которым можно отнести минеральное масло, воду, водо-воздушные смеси, соляные растворы и др. Методы охлаждения «погружением» не позволяют варьировать скорость охлаждения и поэтому представляют малый интерес для проведения оптимизации. С другой стороны, существуют прогрессивные методы охлаждения, к которым можно отнести применение смесей воды с воздухом, передаваемых через форсунки [13]. Изменяя соотношение между количеством воды и воздуха, а также давление смеси, можно изменять скорость охлаждения от соответствующих воздушной среде до значений, значительно превышающих скорость охлаждения в воде.

В сочетании с применением индукционного нагрева, широкое распространение получили водные растворы на основе полигликоля (Aquaquench и др.). Варьируя процентным содержанием полиэфира в воде, возможно контролируемое изменение охлаждающей способности этой среды, при этом дополнительным преимуществом является отсутствие резких пиков температурной зависимости коэффициента теплоотдачи от температуры.

Поиск требуемого коэффициента теплоотдачи (выбор охлаждающей среды и режимов охлаждения) является обратной задачей моделирования. Решение может быть найдено с помощью определения целевых функций, функций ограничения и многократного решения прямой задачи путем варьирования искомого параметра в соответствии с одним из алгоритмов оптимизации (например, алгоритм золотого сечения).

Следует отметить, что найденное в процессе оптимизации числовое значение коэффициента теплоотдачи в большинстве случаев не может быть напрямую связано с процентным содержанием полигликоля в воде или воздуха – в доводоздушной смеси. В том случае, если производителем охлаждающей среды не предоставляется полная информация об этих зависимостях, идентификация этих параметров возможна в заводских условиях. Поиск температурных зависимостей охлаждающей среды может быть построен на основе решения обратной задачи теплопроводности с использованием измеренных с помощью термометров, пирометров или другого оборудования температурных историй в характерных точках деталей с простой геометрией (пластины, трубы и т.п.) [14].

Оптимизация параметров индуктора. Одной из основных задач при разработке технологических процессов индукционной термообработки является правильный выбор типа индуктора, его пространственной геометрии, количества витков и т.п. От этого, как правило, в большой степени зависит КПД процесса, шаблон нагрева, надежность самого индуктора и др.

Для индукторов простой формы применяются общепринятые методики расчета конструктивных параметров [15]. Исключения составляют индукторы специальной формы и назначения, для которых может варьироваться один или несколько параметров геометрии в сочетании с режимами работы генератора (мощность и частота) [16]. В этом случае поиск оптимального решения может быть также автоматизирован, по изложенной выше методике выбора охлаждающей среды. Как и в предыдущем случае возможно использование ряда расчетов электромагнитной задачи под управлением алгоритма оптимизации. Целевой функцией обычно служит термический КПД индуктора.

Одним из распространенных методов индукционного нагрева длинномерных заготовок является сканирующий метод. Искомыми параметрами в этом случае являются скорость движения индуктора, частота и мощность генератора. Наиболее распространенные направления оптимизации в этом случае: обеспечение равномерного нагрева при минимальном температурном градиенте во время проведения процесса и по всему сечению детали; обеспечение заданной глубины упроченного слоя (для случая, когда охлаждение происходит за счет теплопередачи вглубь от поверхности детали).

Заключение. Эффективным направлением ускорения технологической подготовки процессов индукционной закалки и сокращение сроков их внедрения в производстве является применение современных методов инженерного анализа и оптимизации. Существующие коммерческие программные средства на сегодняшний день не позволяют провести комплексный анализ и оптимизацию этого высокоэффективного энергосберегающего процесса. Разработанный авторами статьи программный комплекс KMTP Framework предоставляет широкие возможности решения прямых и обратных задач моделирования процессов термообработки. С помощью реализованных в разработке методов и моделей возможно обеспечение оптимизации формирования требуемой структуры и свойств материала детали, начиная с выбора химического состава стали, конструктивных параметров индуктора и заканчивая определением режимов термообработки.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кундас С.П., Лемзиков А.В., Коваленко В.И., Иванов Д.Г. Эффективность применения индукционного оборудования в процессах термообработки / *Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин*. Том II. - Новополоцк: ПГУ, 2007. - С. 59-62
2. Интернет-ресурс <http://www.mssoftware.com>
3. Интернет-ресурс <http://www.deform.com>
4. Кундас С.П. Компьютерное моделирование процессов термической обработки сталей. - Мн.: Бестпринт, 2005. - 313 с.

5. Кундас С.П., Лемзиков А.В., Гурченко П.С. Система компьютерного управления процессом закалки / *Технология, оборудование, автоматизация, неразрушающий контроль термических процессов на машиностроительных предприятиях*: Сб. научных трудов под ред. П.С. Гурченко. - Мн.: РДУП "Издательство ОСПИ", 2005. - С. 63-65.
6. Лемзиков А.В., Кундас С.П. Применение экспертных систем для автоматизированного управления процессом закалки / *Сборник материалов IV Международной научно-технической конференции «Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств»*. В 2-х томах. Том 2. - Новополоцк: ПГУ, 2006. - С. 92-96.
7. 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.
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 закалке // *Известия Белорусской инженерной академии*, 2003. - № 1(15)/2. - С. 168-175.
9. 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.
10. Кундас С.П., Гишкелюк И.А., Иванов Д.Г. и др. Математическое моделирование индукционной закалки с применением метода конечных элементов // *Материалы Междунар. конф. «Актуальные проблемы теории и практики индукционного нагрева»*. - СПб.: ГЭТУ «ЛЭТИ» 2005. - С. 292-299.
11. Saunders N., Miodownik A. CALPHAD - Calculation of Phase Diagrams (Vol. 1). (R. Cahn, Ed.) Oxford: Elsevier Science, 1991. 128 p.
12. Лемзиков А.В., Иванов Д.Г., Кундас С.П., Куцыло В.В. Применение нейросетей для определения характерных точек фазовых превращений в сталях с различным химическим составом / *Информатика*. №1(13), 2007. - С.89-97.
13. Желудкевич М. С., Герман М. Л., Ознобишин А. Н. Управляемое водовоздушное охлаждение. - Мн: АНК ИТМО НАНБ, 2001. - 166 с.
14. Hui-pung, Li., Inverse heat conduction analysis of quenching process using finite-element and optimization method. Finite elements in analysis and design. 2006, №42, P. 1087-1096.
15. Semiatin S.L. and Stutz D.E. Induction Heat Treatment of Steel. Ohio : American Society for Metals, 1986. 308 P.
16. Design of complex induction hardening problems by the use of numerical simulation. Nacke, В. и E.Wrona. *Материалы Междунар. конф «Актуальные проблемы теории и практики индукционного нагрева»*. - СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2005. - С. 99-105.

Статья поступила в редакцию 29.10.2007

УДК 004.8.032.26; 691; 691:620.1

Лемзиков А.В., Кундас С.П., Куцыло В.В.

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕРМООБРАБОТКИ

Введение. В настоящее время наметилась тенденция применения искусственных нейронных сетей (ИНС) при моделировании процессов термообработки в качестве элементов, производящих различного рода вычисления [1]. Наиболее востребованной областью, где использование ИНС позволяет

достичь существенного прогресса по сравнению с классическим подходом, является решение термодинамических задач, связанных с определением свойств сталей при различных условиях их обработки.

Куцыло Виталий Васильевич, инженер-программист, Центр 10.1, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники.

Машиностроение