

# Моделирование индукционного нагрева в среде *DEFORM*

©2021 ТЕСИС

Индукционный нагрев – один из распространенных технологических процессов нагрева металла. Его популярность объясняется высокой скоростью прогрева металла, энергоэффективностью и контролируемостью процесса. Индукционный нагрев может применяться как при необходимости нагрева всего объема заготовки для её последующего деформирования, так и для нагрева части заготовки при локальном деформировании длинных прутков, а также для поверхностной закалки заготовки.

Электромагнитная индукция генерирует тепло в заготовке, помещенной внутри или рядом с медной катушкой (индуктором). В частности, прохождение переменного тока по катушке индуцирует вторичный ток в заготовке. Этот ток вызывает электрический нагрев поверхности заготовки, что в свою очередь (в случае, если материал заготовки является магнитным), порождает реверсивное магнитное поле и эффект гистерезиса, что приводит к генерации значительного количества тепловой энергии.

Многие расчетные программы пытаются моделировать процесс индукционного нагрева металла. В данной статье рассматривается функционал программного комплекса *DEFORM*, разработчики которого в последних релизах уделяют данной теме повышенное внимание.

## Контролируемый нагрев и его моделирование

Индукционный нагрев может применяться для локального нагрева небольшой области заготовки. Факторами, позволяющими осуществлять контроль над областью нагрева и глубиной нагрева, являются частота переменного тока в катушке, форма катушки и использование “концентраторов потока”.

Технологический процесс поверхностной закалки выглядит так: быстрый нагрев поверхности с высокой энергией нагрева и последующее быстрое охлаждение – так, чтобы сердцевина заготовки не успела прогреться за счет теплопроводности.

Температуру поверхности заготовки в обоих случаях – и когда необходимо прогреть всё сечение заготовки, и когда надо прогреть лишь её поверхностную область – несложно измерить с помощью пирометра. Однако очень важным для проверки и оптимизации технологического процесса

моментом является изучение температурных полей внутри заготовки, поскольку процесс нагрева металла на поверхности и в сердцевине заготовки идет по принципиально разным физическим моделям. Осуществить экспериментальное измерение температуры внутри заготовки методами неразрушающего контроля крайне трудно. Для оценки распределения температурных полей при индукционной поверхностной закалке можно использовать закалку порезанных вдоль оси опытных образцов. Для оценки же распределения температурных полей в том случае, когда необходимо прогреть всё сечение заготовки, подобных методов не существует.



*Рис. 1. Пример визуализации результатов численного моделирования индукционного нагрева в среде DEFORM*

Таким образом, инженерам часто приходится полагаться на опыт предыдущих поколений и какие-то методические указания – при этом распределение

температурных полей внутри заготовки они себе представляют слабо.

Модели индукционного нагрева, заложенные в системе *DEFORM*, учитывают многие тонкие моменты физических процессов электромагнетизма – в частности, влияние температуры на магнитные свойства материала, влияние формы магнитного поля на процессы, происходящие внутри заготовки, влияние эффекта уменьшения амплитуды электромагнитных волн по мере их проникновения вглубь заготовки и т.д. В сочетании с экспериментальными данными по температуре поверхности при индукционном нагреве, система *DEFORM* может стать мощным инструментом для проверки и оптимизации технологических процессов индукционного нагрева и индукционной закалки.

## Нагрев крупных заготовок

При нагреве крупных заготовок методом индукционного нагрева затруднительным делом является получение равномерного по сечению распределения температуры. Поверхностные области заготовки нагреваются за счет электромагнитного поля, в то время как внутренние области – за счет теплопроводности. Общепринятой практикой для крупных заготовок является ступенчатый нагрев: периодическое включение и выключение тока в обмотке с целью дать возможность прогреться сердцевине заготовки во время пауз. Здесь снова необходимо отметить, что экспериментально температура может быть измерена лишь на поверхности заготовки.

## Сканирующая индукционная закалка

Технология индукционной закалки широко применяется для упрочнения поверхности детали при сохранении её сердцевины пластичной. В этом случае поверхностную область заготовки быстро нагревают выше температуры образования аустенитной структуры – с последующим быстрым охлаждением (как правило, с помощью спреера).

Эффективность технологического процесса индукционного нагрева определяется, в первую очередь, тем, что лишь малая часть энергии, по сравнению с другими процессами нагрева, уходит на прогрев окружающей среды, а большая часть идет собственно на разогрев материала заготовки. При этом для технолога бывает затруднительным спрогнозировать температуру внутри заготовки при выбранных параметрах технологического процесса. Программный комплекс *DEFORM* предлагает мощный инструмент для оценки распределения температурных полей внутри заготовки при индукционном нагреве. Следует отметить, что моделирование в осесимметричной постановке дает возможность быстрой оценки (от нескольких минут до часа) эффективности выбранных параметров технологического процесса, что трудно осуществить экспериментально.

В нашем примере моделирование данного процесса в среде *DEFORM* осуществлялось для заготовки диаметром 23 мм из стали марки *AISI 1045*. Использовалась обмотка в два витка, электрическая мощность составляла 20 kW, частота тока – 20 kHz (рис. 2). Заготовка двигалась вдоль оси обмотки со скоростью 10 мм/с. После нагрева поверхности заготовки в обмотке, сразу же производилось её охлаждение струями воды. В среде *DEFORM* это моделировалось окном граничных условий с определением в этом окне коэффициента конвективной теплоотдачи, соответствующего паре сталь-вода.

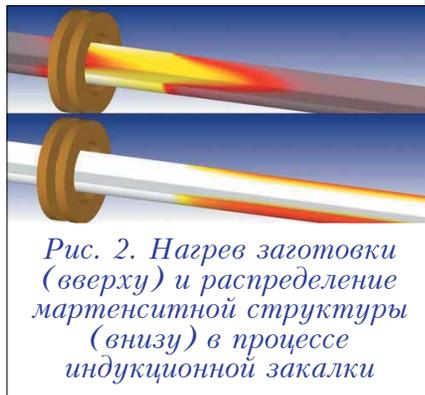


Рис. 2. Нагрев заготовки (вверху) и распределение мартенситной структуры (внизу) в процессе индукционной закалки

## Усовершенствования модуля для расчета индукционного нагрева

Как уже было сказано, индукционный нагрев эффективно применяется в широком диапазоне производственных задач – к примеру, при нагреве заготовок для полугорячей и горячей штамповки или уже готовых поковок перед термической обработкой. Местный (локальный) индукционный нагрев часто используется при поверхностной закалке и отжиге. В этом случае контроль размера нагреваемой области, её глубины и скорости прогрева позволяет получать заданное распределение характеристик конечного изделия.

Широкое распространение индукционный нагрев получил потому, что он представляет собой быстрый и экономичный способ нагрева металла. У инженера, проектирующего технологический процесс индукционного нагрева, есть возможность контролировать и изменять следующие параметры:

- конструкцию катушки;
- частоту переменного тока;
- входную мощность.

Программное обеспечение *DEFORM* дает возможность исследовать влияние вышеуказанных параметров процесса с помощью компьютерного моделирования. Это позволяет рассмотреть все варианты до “реализации в железе” и выбрать наилучший из рассмотренных. *DEFORM* имеет широкие функциональные возможности для моделирования индукционных процессов и позволяет оптимизировать скорость, область и глубину нагрева.

В среде *DEFORM* реализованы два решателя для моделирования индукционного нагрева: на основе метода конечных элементов (*FEM*) и на основе метода граничных элементов (*BEM*).

- ✓ Достоинства и недостатки метода *FEM*:
  - воздух должен быть представлен телом, разбитым на сетку;
  - сложно реализовать моделирование процесса с движением заготовки/нагревателя;
  - обеспечивается более точное решение.

- ✓ Достоинства и недостатки метода *BEM*:

- простая настройка – не требуется представлять воздух телом, разбитым на сетку;
- можно моделировать процессы с движением заготовки/нагревателя;
- более длительное время решения.

Ранее в программном обеспечении *DEFORM* для 3D-моделирования индукционного нагрева методом граничных элементов были разработаны специальные окна нагрева (рис. 3, слева). Эти окна позволяют уменьшать вычислительный размер модели за счет ограничения области расчета процессов индукции. При этом сохраняется точность решения внутри области, которая попадает в назначенное пользователем окно. Предполагается, что за пределами этого окна, взаимодействие индуктора с заготовкой незначительно и им можно пренебречь, чтобы сэкономить вычислительные ресурсы. Окна нагрева могут перемещаться вместе с индуктором или заготовкой, что значительно упрощает процесс настройки модели, подразумевающей движение заготовки/нагревателя (рис. 3, справа).

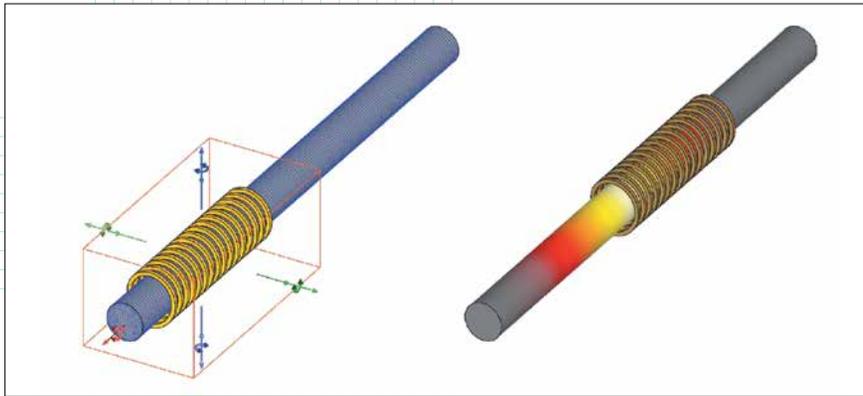


Рис. 3. Моделирование нагрева в случае перемещения нагревателя

Компания *Scientific Forming Technologies Corporation (SFTC)*, разработчик *DEFORM*, постоянно совершенствует свои решатели, предназначенные для моделирования индукционного нагрева, уменьшает продолжительность расчетов и повышает их качество. В версии *DEFORM V12.1* был представлен обновленный *BEM*-решатель, который обеспечивает более быстрое моделирование с меньшими требованиями к объему оперативной памяти компьютера. Например, для модели индукционного нагрева в *3D BEM*-постановке, представленной на рис. 3, вычисления на компьютере с четырьмя физическими ядрами при использовании версии *DEFORM V12* продолжались 6 часов, тогда как решателю *V12.1* для этого потребовалась 41 минута. Таким

образом, при прочих равных расчет прошел приблизительно в 9 раз быстрее.

Решатель *DEFORM* для *FEM*-моделирования индукционного нагрева в *2D*-постановке был разработан уже давно. Некоторым фактором, ограничивающим его применение, является необходимость моделирования воздуха как отдельного объекта, разбитого на сетку. Это затрудняло моделирование процессов, предполагающих движение заготовки или движение индуктора, так как воздух в этом случае должен быть разделен на отдельные, соприкасающиеся и движущиеся друг относительно друга объекты (рис. 4а).

Версия *DEFORM V12.1* поддерживает более гибкие и продвинутое подходы к моделированию подобных задач, в том числе на основе метода конечных элементов. Первый подход подразумевает, что воздух представлен одним объектом с сеткой, который перекрывает другие объекты (рис. 4б). Второй подход: сетка для воздуха автоматически создается на каждом шаге (рис. 4с). Пользователю не нужно заботиться о дополнительных объектах, моделирующих воздух, так как их создание и расчет производятся автоматически.

Оба эти подхода позволяют моделировать перемещение заготовки/индуктора, устраняют необходимость создания дополнительных объектов для воздуха и настройки граничных условий взаимодействия между ними.

Следует отметить, что *2D*-модели *FEM* имеют небольшое преимущество перед *2D*-моделями *BEM* (рис. 4д) с точки зрения точности. В показанном выше примере наилучшее сочетание точности и простоты использования обеспечивается перекрывающимися (рис. 4б) и автоматически генерируемыми (рис. 4с) моделями объектов воздуха. При этом *FEM*-модели с автоматически сгенерированным объектом воздуха (рис. 4с) и *BEM*-модели (рис. 4д) потребовали меньших затрат времени и усилий для их создания.

Средства моделирования индукционного нагрева включены в комплектацию *DEFORM Premier* и *DEFORM-HT*. Эти возможности также могут быть добавлены к *DEFORM-2D* или *DEFORM-3D* с помощью модуля *Microstructure*.

О новых возможностях *DEFORM V12.1* можно прочитать на сайте <https://tesis.com.ru>

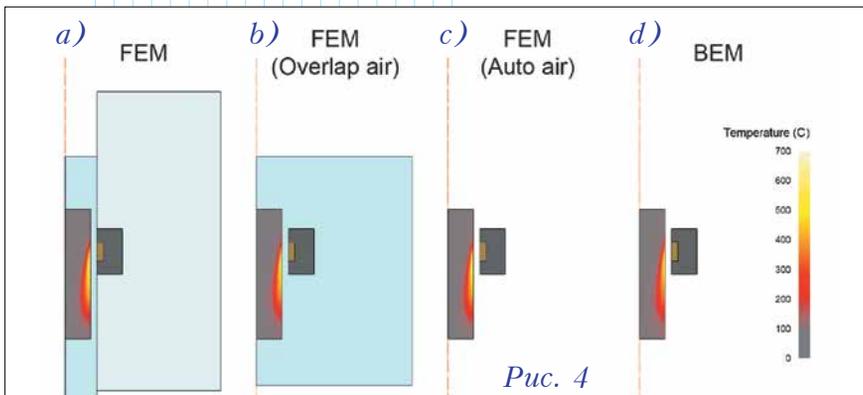


Рис. 4

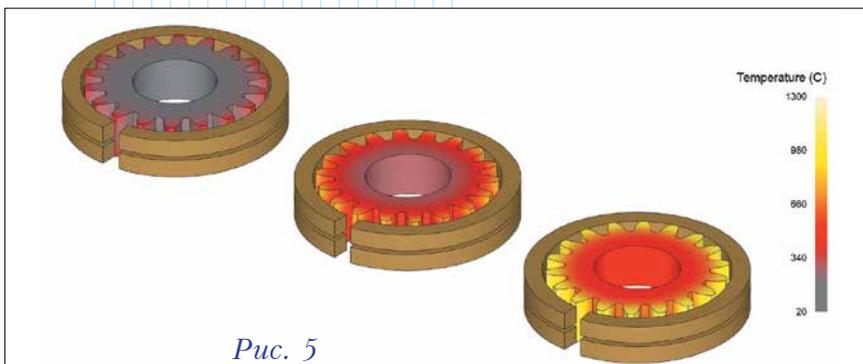


Рис. 5