



## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ТРУБ В ЗОНЕ СВАРНОГО ШВА

**И. В. ЧЕРНЫХ**, д-р техн. наук (Урал. гос. техн. ун-т, г. Екатеринбург, РФ),  
**С. А. РАЧКОВ**, инж. (ООО НПП «ЭЛТЕРМ-С», г. Екатеринбург, РФ)

Рассмотрена методика моделирования процесса индукционного нагрева труб большого диаметра перед их сваркой. Обоснован выбор программного пакета для моделирования и приведен пример моделирования. Описана картина теплового поля в зоне сварного шва и графики распределения температуры в стенке трубы. Показан пример реализации установки индукционного нагрева.

*Ключевые слова:* сварные трубы, большой диаметр, сварной шов, индукционный нагрев, тепловое поле, моделирование

В настоящее время при проведении сварочных работ на трубах большого диаметра широко используется индукционный нагрев зоны сварного шва. Установка для индукционного нагрева состоит из индуктора и источника питания током средней частоты (2400 Гц). При ее разработке было проведено математическое моделирование зоны нагрева для нахождения геометрических параметров индуктора, параметров источника питания установки для индукционного нагрева и определения распределения температуры в стенке трубы. Методы расчета подробно изложены в работах [1–3]. Результатами расчета являются картины теплового поля, графики распределения мощности тепловыделения в трубе и температуры, а также интегральные показатели такие, как потребляемая мощность, КПД,  $\cos \varphi$  и др.

Расчет проводили в два этапа. На первом приняли допущение о том, что труба является сплошной (не имеет разрыва в месте будущего шва). Для расчета использовали программу Universal 2D. Программа основана на использовании численных методов (конечных разностей, конечных элементов, интегральных уравнений и их комбинаций) для совместного расчета электромагнитных и температурных полей в двухмерных областях. Этот этап позволил определить основные энергетические показатели установки и графики распределения температуры вдоль и поперек стенки трубы с учетом принятого допущения. Расчеты проводили для стальной трубы диаметром  $D = 1420$  мм и толщиной стенки  $h = 33,4$  мм. Установка имеет индуктор, состоящий из двух секций, каждая из которых имеет два витка. Расстояние между секциями составляет 160 мм, что вполне достаточно для установки наружного трубного центра. Расчет показал, что потреб-

ляемая мощность установки  $P = 50$  кВт, время нагрева до заданной температуры  $t = 10$  мин, электрический КПД установки  $\eta = 81,7$  %. Кривые

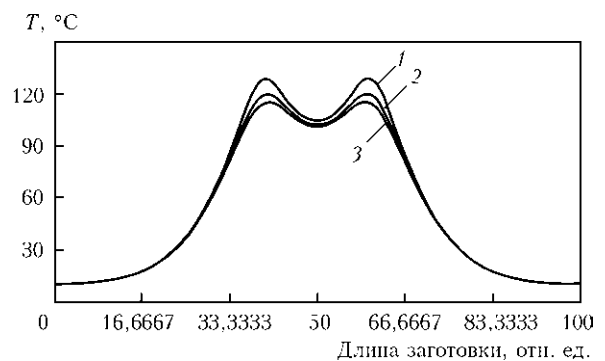


Рис. 1. Результаты расчета распределения температур вдоль стенки трубы на первом этапе: 1, 3 — соответственно температура наружной и внутренней поверхностей трубы; 2 — средняя температура

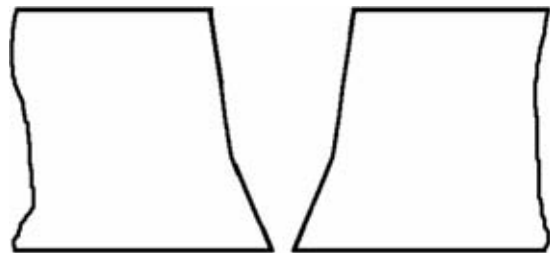


Рис. 2. Форма разделки торцов труб

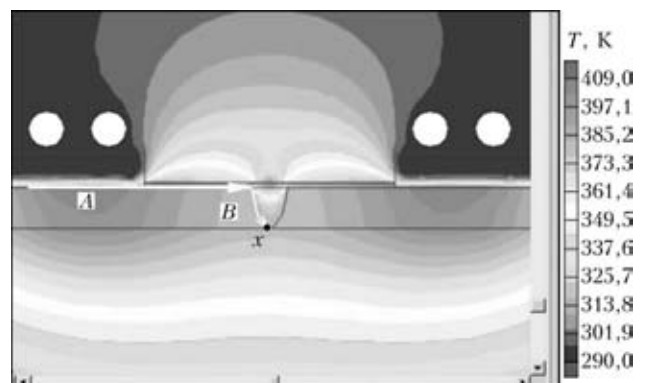


Рис. 3. Картина распределения теплового поля в зоне нагрева

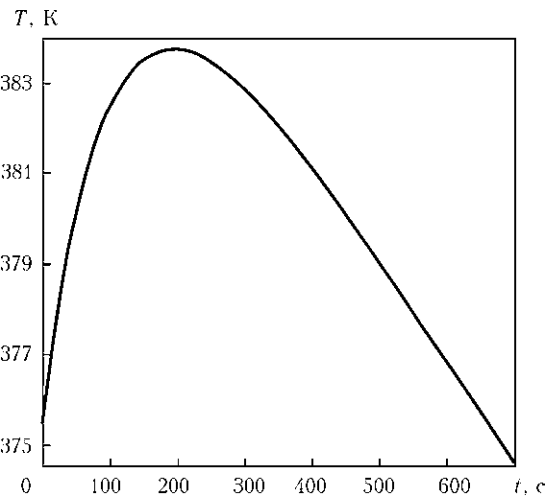
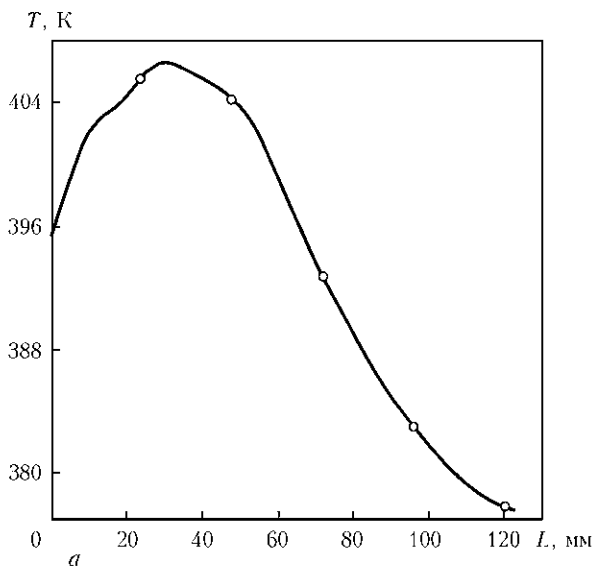


Рис. 5. Изменение температуры в контрольной точке X при охлаждении

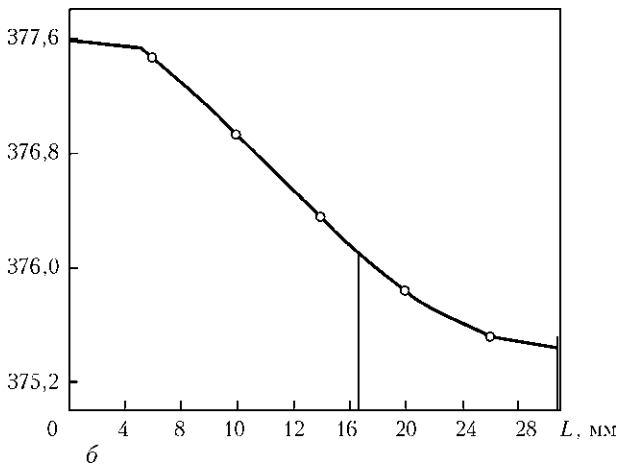


Рис. 4. Распределение температуры в конце интервала нагрева по контуру A (а) и B (б)



Рис. 6. Общий вид установки индукционного нагрева «ЭЛ-ТЕРМ-С УИИТ-50-2,4»

распределения температуры вдоль стенки трубы представлены на рис. 1. Ширина зоны нагрева трубы до температуры 100 °С и более равна 260 мм.

На втором этапе проводили уточнение расчетов с учетом формы разделки торцов труб (рис. 2), а также решали электромагнитные и тепловые задачи. В результате получены картина теплового поля, графики распределения температуры вдоль интересующих контуров трубы, а также графики изменения температуры во времени при нагреве и охлаждении трубы. Для расчета использовали программу ELCUT, реализующую метод конечных элементов [4]. На рис. 3 показана картина теплового поля в зоне нагрева, а также расположение контрольной точки X и контуров A и B. Из рисунка видно, что труба имеет максимальную температуру 130 °С в зонах расположения витков индуктора, а в зоне сварного шва температура составляет порядка 100 °С. На рис. 4 приведены графики распределения температуры вдоль контуров A и B в конце интервала нагрева. Видно, что температура на свариваемых поверхностях

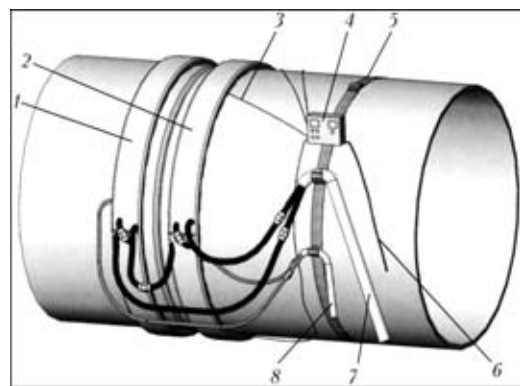


Рис. 7. Схема размещения мягкого гибкого индуктора на трубе: 1, 2 — соответственно 1-й и 2-й индуктор; 3 — подвод термопар (4 шт.); 4 — ПДУ; 5 — монтажный ремень из комплекта; 6 — кабель управления; 7 — электрический кабель; 8 — водяной шланг

равна 100 °С, а на поверхности трубы под индуктором не превышает допустимых значений.

Дополнительно на втором этапе рассчитывали режим естественного охлаждения трубы при от-



ключении индуктора от источника питания. Из рис. 5 следует, что поверхность в зоне сварного шва остается нагретой до температуры 100 °С еще около 10 мин.

По результатам расчетов были оптимизированы конструктивные решения и режимы работы установки для индукционного нагрева «ЭЛТЕРМ-С УИИТ-50-2,4». Общий вид установки представлен на рис. 6, размещение индуктора на нагреваемой трубе — на рис. 7. На основе моделирования спроектировано несколько видов индукторов.

Разработанные и серийно выпускаемые установки для индукционного нагрева на предприятии «ЭЛТЕРМ-С», оптимизированные по результатам расчетов, являются высокоэффективными технологическими установками индукционного нагрева при подогреве перед сваркой и сопутствующем подогреве.

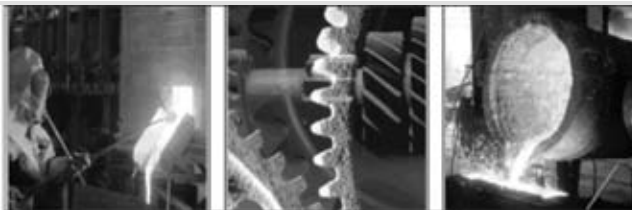
Авторы предлагают использовать накопленный опыт расчетов электромагнитных и тепловых расчетов при разработке индукционных установок для нагрева различных объектов (труб, фитингов, валов и пр.)

1. *Плавильные индукционные комплексы на основе индукционных тигельных печей и их математическое моделирование* / В. И. Лузгин, С. Ф. Сарапулов, Ф. Н. Сарапулов и др. — Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2005. — 464 с.
2. *Система индукционного нагрева длинномерных трубных заготовок* / В. И. Лузгин, А. Ю. Петров, Ф. Н. Сарапулов, И. В. Черных // Сб. матер. междунар. науч.-практ. конф. «Актуальные проблемы теории и практики индукционного нагрева». — С.-Пб., 2005.
3. *Система управления индукционным нагревом длинномерных трубных заготовок* / В. И. Лузгин, А. Ю. Петров, Ф. Н. Сарапулов и др. // Сб. докл. VI Симп. «Электротехника 2010 г.». — М., 2001. — Т. 3.
4. *Черных И. В. Пакет ELCUT: моделирование устройств индукционного нагрева* // Exponenta Pro. Математика в приложениях. — 2003. — № 2.

The paper deals with the procedure of simulation of the process of induction heating of large-diameter pipes before their welding. Selection of program package for simulation is substantiated, and an example of simulation is given. The thermal field pattern in the weld zone and graphs of temperature distribution in the pipe wall are described. An example of induction heating unit implementation is given.

Поступила в редакцию 19.05.2009

Металлообработка. Урал  
UralMetalExpo 2010  
27-29 апреля 2010  
Екатеринбург, ВЦ КОСК «Россия»



## 7-я МЕЖДУНАРОДНАЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА

### Тематика выставки:

- металлорежущее оборудование
- кузнечно-прессовое оборудование
- литейное оборудование
- сварочное оборудование. Специальные методы в сварке
- оборудование, инструменты, материалы, технологии для обработки поверхностей и нанесения покрытий
- инструменты станочные: металлорежущие, абразивные, резьбонарезные и др.
- контрольно-измерительные машины, приборы и инструменты
- комплектующие узлы и изделия, в том числе системы ЧПУ, гидравлические и пневматические системы, электродвигатели. Подшипники. Технологическая оснастка. Материалы для металлообработки
- автоматизированные системы управления технологическими процессами и производством, промышленная автоматизация. Роботы, системы и компоненты, информационные технологии
- ретрофитинг и модернизация оборудования. Лизинг
- субконтракция
- инвестиционные и инновационные проекты, технологические и конструкторские разработки, профильное образование

[www.uralexpotool.ru](http://www.uralexpotool.ru)