

## Краткие сообщения

УДК 621.365.5

### ЭФФЕКТИВНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНДУКТОРОВ\*

*Л.С. Зимин, А.С. Леоненко*

Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

**Аннотация.** Рассматривается задача достижения максимальной энергоэффективности технологических комплексов «индукционная нагревательная установка (ИНУ) – обработка металла давлением (ОМД)». Акцент при оптимизации ИНУ делается на учет параметров деформирующего оборудования (пресс, прокатный стан и др.). Анализируются особенности индукционного нагрева тел прямоугольной формы, например слябов под прокатку. Здесь в отличие от нагрева цилиндрических заготовок возникают тепловые и электродинамические проблемы. Это прежде всего проявление наряду с продольным также поперечного краевого эффекта, т. е. появление градиентов температуры по периметру поперечного сечения. К электродинамическим проблемам относятся электродинамические вибрации и сопровождающий их шум, превышающий санитарные нормы для производственных помещений.

**Ключевые слова:** деформация, нагрев, индуктор, краевой эффект, вибрации.

В статье описывается эксплуатация и оптимизация индукторов для нагрева металла под прессование и прокатку. Индуктор и деформирующее оборудование рассматриваются совместно, а также учитывается система электроснабжения с целью получения единого взаимосвязанного технологического комплекса с максимально возможными экономическими показателями как по производительности, так и качеству получаемых полуфабрикатов.

Индукционный нагрев кроме нагрева металла под деформацию в настоящее время также широко используется в технологиях нагрева неэлектропроводных материалов, например, при производстве пластмасс, а также в сварочном производстве [1,2]. Но наиболее перспективно применение индукционного нагрева в технологиях нагрева металла для горячего пластического деформирования [3,4]. При этом всегда ставится задача достижения максимальной энергоэффективности технологических комплексов индуктор - обработка металла давлением. Формулировка поставленной задачи описывается в виде:

$$X = X [Y(t), X(0), Z, K] \quad (1)$$

\*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 15-08-0305).

*Лев Сергеевич Зимин (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».*

*Александра Сергеевна Леоненко (к.т.н.), доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».*

$$Z=Z(K), Y=Y(t,K), X=X(t,K) \quad (2)$$

$$H [X(t), Y(t), X(0), Z, K] \leq 0 \quad (3)$$

где составляющие векторы:  $Y(t)$ - временные воздействия;  $X(0)$ - начальное условие;  $Z$  - параметры, не зависящие от времени;  $K$  - вектор параметров структурной или конструктивной схемы. Допустимые области, внутри которых находятся искомые проектные решения

$$X \in \Omega_x, Y \in \Omega_y, X(0) \in \Omega_0, Z \in \Omega_z, K \in \Omega_k, \quad (4)$$

где  $\Omega$  - замкнутое множество векторов.

Представленная задача (1)-(4) относится к обратным задачам исследования операций, которые в общем виде некорректны. Для регуляризации задачи используется идея целенаправленности, реализуемая с помощью критерия оптимальности, определяемого через проектные данные функционалом

$$I [X(t), Y(t), X(0), Z, K] \quad (5)$$

На реализацию и функционирование объекта проектирования накладываются разнообразные ограничения, совокупность которых можно представить с помощью вектор-функционала

Введение критерия оптимальности преобразует рассмотренную выше задачу в задачу оптимального проектирования: «Максимизировать (минимизировать) функционал  $I$  по всем независимым аргументам при соблюдении (4)».

Традиционный путь решения такой задачи состоит в решении локальных задач оптимизации отдельно для нагревательной установки и деформирующего оборудования в жестких рамках заданных технологических инструкций, формируемых за пределами этих задач. Качественно более широкие возможности появляются при совместной оптимизации этих процессов, преследующей достижение предельных значений совокупного экономического показателя работы комплекса в целом. Здесь целесообразен системный подход, когда индукционная нагревательная установка (ИНУ) рассматривается в едином комплексе с оборудованием для обработки металла давлением (ОМД) [5,6], например, пресс или прокатный стан.

Если с точки зрения конструкции ИНУ и особенностей процесса индукционного нагрева ограничиться двумя основными формами нагреваемых заготовок - прямоугольной и цилиндрической, то из наиболее распространенных видов горячей ОМД в металлургическом производстве целесообразно рассмотреть прокатку (слябинг) и прессование. Если индукционный нагрев цилиндрических тел, которые в основном являются заготовками при прессовании, довольно хорошо изучен, то при использовании индукционного нагрева в листопрокатном производстве возникает целый ряд особенностей, которые возникают из-за двумерного характера магнитных и тепловых полей [7-9]. Это приводит к ряду дополнительных особенностей как, например, поперечный краевой эффект [8].

Степень проявления поперечного краевого эффекта зависит от электрических и теплофизических свойств нагреваемого металла, размеров поперечного сечения, частоты тока индуктора и величины тепловых потерь. Так, на промышленной частоте тока это приводит к тому, что у алюминиевых слябов угловые зоны перегреваются по сравнению с центральными, а у титановых – наоборот.

Другое характерное явление, характеризующее индукционный нагрев прямоугольных тел заключается в том, что электромагнитные процессы в системе

«индуктор-металл» характеризуются не только выделением тепловой энергии в заготовке и индукторе, но также объемной плотностью электромагнитного поля и связанными с ней электродинамическими усилиями. Если в плавильных печах электродинамические силы играют положительную, т.к. могут улучшить перемешивание жидкого металла, то при индукционном нагреве под деформацию механическое проявление электромагнитной энергии играет резко отрицательную роль, т. к. возникает проблема устойчивости конструкций индукторов против вибраций, возникающих под действием электродинамических сил. Особенно остро эта проблема проявляется при индукционном нагреве прямоугольных заготовок [10,11]. В индукторах для нагрева цилиндрических заготовок отсутствуют условия для возникновения значительных вибраций (круглое поперечное сечение обладает большой естественной жесткостью), а в индукторах прямоугольной формы необходимо принимать во внимание малую устойчивость прямолинейных участков обмотки индуктора. Причем, суть проблемы представляет не механическая прочность медной трубки индуктора, поскольку возникающие напряжения изгиба гораздо меньше допустимых для меди, а сильная вибрация и сопровождающий ее шум, которые, если не принимать специальных мер, значительно превышают санитарные нормы для производственных помещений.

При оптимальном проектировании комплекса «ИНУ-ОМД» одновременно решается проблема энергосбережения [12].

Действительно энергоэффективный технологический комплекс «ИНУ - ОМД» можно спроектировать только с учётом его системы электроснабжения (СЭС). Под энергоэффективным проектированием СЭС понимается построение наиболее экономичного её варианта при соблюдении технических условий, накладываемых как элементами СЭС, так и потребителями – ИНУ. В качестве экономического критерия энергоэффективности целесообразно принимать суммарные приведенные затраты на СЭС, которые определяются технологическими, электротехническими и топологическими параметрами [13,14].

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Базаров А.А., Данилушкин А.И., Зимин Л.С.* Индукционная система для подогрева труб перед сваркой // Электротехника. – 2018. – № 3. – С. 40–45.
2. *Зимин Л.С., Сорокин А.Г., Горбачевский Н.И.* Электротехнический комплекс индукционного нагрева // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2017. – Вып. 2(54). – С. 191–195.
3. *Зимин Л.С., Егиазарян А.С.* Особенности индукционного нагрева алюминиевых сплавов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2016. – Вып. 2(50). – С. 203–208.
4. *Егиазарян А.С., Зимин Л.С.* Особенности индукционного нагрева под деформацию // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2015. – Вып. 3 (47). – С. 128–135.
5. *Егиазарян А.С., Зимин Л.С.* Комплексный подход к оптимальному проектированию индукционных нагревательных установок // Известия вузов. Электромеханика. – 2014. – Вып. 5. – С. 63–67.
6. *Егиазарян А.С.* Возможные подходы к проектированию индукторов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2015. – Вып. 1(45). – С. 194–198.
7. *Зимин Л.С., Егиазарян А.С.* Проектирование прямоугольных индукторов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2016. – Вып. 3(51). – С. 151–154.
8. *Егиазарян А.С., Зимин Л.С.* Поперечный краевой эффект при индукционном нагреве // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2010. – Вып. 7 (28). – С. 231–233.

9. *Зимин Л.С., Егиазарян А.С.* Ключевые проблемы при эксплуатации индукционных нагревателей // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2017. – Вып. 1(53). – С. 179–182.
10. *Зимин Л.С., Егиазарян А.С.* Электродинамические процессы при индукционном нагреве // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2016. – Вып. 1(49). – С. 156–160.
11. *Зимин Л.С., Егиазарян А.С.* Виброзащита мощных индукторов // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. – 2016. – Вып. 3(24). – С. 135–139.
12. *Зимин Л.С., Егиазарян А.С.* Направления энергосбережения // Градостроительство и архитектура. – Самара, 2017. – Т. 7. – № 2. – С. 125–132.
13. *Егиазарян А.С., Зимин Л.С.* Анализ режимов электроснабжения индукционных установок // Известия вузов. Электромеханика. – 2011. – № 3. – С. 74–76.
14. *Егиазарян А.С., Зимин Л.С., Федотов М.Е.* Электромагнитная совместимость систем электроснабжения с индукционными установками // Известия вузов. Электромеханика. – 2007. – Спец. выпуск. – С. 75.

*Статья поступила в редакцию 1 февраля 2018 г.*

## **THE EFFICIENT DESIGN OF INDUCTORS**

***L.S. Zimin, A.S. Leonenko***

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

***Abstract.*** *The problem of achievement of the maximum energy efficiency of technological complexes "induction heating installation (IHI) – metal processing by pressure" is considered. The emphasis during optimization of induction heating installation is directed on parameters of the deforming equipment (a press, a rolling mill, etc.). The characteristics of the induction heating of rectangular bodies, for example, the slab for rolling is analyzed. Here, in contrast to the heating of cylindrical billets, thermal and electrodynamic problems arise. This is, above all, the appearance of the longitudinal as well as the transverse edge effect, i.e. the appearance of temperature gradients along the cross-section perimeter. Electrodynamic vibration and accompanying noise, in excess of health standards for shopfloor belong to electrodynamic problems*

***Keywords:*** *deformation, heating, inductor, boundary effect, vibration.*