

## Краткие сообщения

УДК 621.365.5

### ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ И ТЕПЛОВЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ ИНДУКЦИОННОМ НАГРЕВЕ\*

*Л.С. Зимин, А.С. Леоненко*

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

**Аннотация.** Рассматриваются специфические особенности индукционного нагрева, которые необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации индукционных нагревательных установок (ИНУ). Подчеркивается определяющая роль конфигурации температурного поля для достижения необходимого качества нагрева. В данном случае для индукционного нагрева является характерным наличие краевых эффектов – как продольных, так и поперечных. Причем первые присутствуют при нагреве как цилиндрических, так и прямоугольных заготовок. Степень проявления поперечного краевого эффекта зависит от электрических и теплофизических свойств нагреваемого металла, размеров поперечного сечения, частоты тока индуктора и величины тепловых потерь. Электромагнитные процессы в системе «индуктор – металл» прямоугольной формы характеризуются электродинамическими усилиями и связанными с ними вибрациями и шумом.

**Ключевые слова:** индуктор, деформация, нагрев, электродинамические силы, вибрация, шум.

Индукционный нагрев широко представлен в промышленных технологиях, причем как в специфическом качестве, например в сварочных производствах [1], так и в основном предназначении – нагрев металла под деформацию.

В настоящее время наблюдается тенденция роста объема индукционных нагревательных установок (ИНУ) в кузнечном, прокатном и прессовом производствах. На долю индукционного нагрева [2] приходится около 70 % всей мощности, идущей на нагрев перед операциями пластической деформации. В условиях дефицита электроэнергии и ее высокой стоимости актуальное значение приобретает проблема достижения экстремальных значений технико-экономических показателей технологических комплексов «индукционный нагрев – обработка металла давлением». Здесь решающее значение приобретает конфигурация температурного поля, от которого зависят пластичность деформируемого металла и, соответственно, производительность процесса деформации и качество готового полуфабриката.

---

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

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

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

При индукционном нагреве качество температурного поля по длине индуктора [3] в основном определяется продольным краевым эффектом, отстроиться от которого можно при помощи выбора оптимальной величины заглубления выходного торца нагреваемой заготовки.

В настоящее время нет решения задачи о выделении мощности на торцах за счет деформации магнитного поля индуктора на концах. Не существует даже постановки такой задачи.

Приведем следующие физические рассуждения. Используя вполне приемлемую аналогию с полем потока невязкой жидкости, можно представить, что электромагнитное поле омывает заготовку подобно водяному потоку, омывающему пористый камень. При малых размерах пор (глубины проникновения) можно смело пренебречь тем количеством воды, которое в них просачивается, и при расчете обтекания не принимать эти поры во внимание. При течении жидкости по каналам с резким изменением (под прямым углом) сечения течение на большом расстоянии от места изгиба можно считать однородным, причем скорость течения (напряженность магнитного поля) обратно пропорциональна ширине канала (поперечные размеры заготовки и индуктора). Стенки канала являются линиями потока. Ясно, что в зоне угла скорость будет сначала возрастать до вершины угла (теоретически до бесконечности), а затем снова убывать до нового установившегося значения, определяемого шириной канала.

При аналогии с магнитоэлектростатической задачей можно предположить, что объем заготовки заполнен неким гипотетическим материалом, сквозь который не проникают линии магнитного поля. При этом индуктор и заготовку можно представить в виде тонких широких токонесущих лент. Тогда для плоскопараллельного поля между лентами может быть применен в полной мере аппарат конформных отображений [4]. Поле двух лент, несущих разнонаправленные токи, подобно полю плоского конденсатора. Если на силовых участках, обращенных к заготовке и краю индуктора, плотность линии представить эквипотенциалами, то можно считать, что максимальная величина настилов тока в индукторе и заготовке будет на краях пластин, т. е. на краях заготовки.

При этом, хотя по всем виткам индуктора протекает один и тот же ток, в крайних витках плотность тока возрастает, а с обратной стороны она падает и может даже принять отрицательное значение. Физически объяснить повышение настила тока на краях заготовки можно следующим путем.

Нити тока на боковой поверхности заготовки стараются взаимно оттолкнуться и одновременно притянуться к нитям тока в индукторе. При этом вихревые токи на краю будут испытывать с одной стороны отталкивание от соседних вихревых нитей, а с другой – притяжение не только по нормальному к заготовке направлению, но также в сторону выступающего края индуктора. Эти силы действуют согласно и способствуют вытеснению тока на край заготовки. Даже когда край индуктора не выступает за заготовку, вытеснение тока все равно будет за счет отталкивания от токов средней части и отсутствия уравнивания со стороны края. С другой стороны, исходя из закона – ток стремится выбрать путь с минимальным полным сопротивлением – можно заключить, что настил на краях будет выше, ведь магнитный поток будет в какой-то степени «срезать» угол, вытесняя туда ток, т. к. там он будет охвачен минимальным из возможных по всей длине индуктора магнитным потоком.

Одновременно с продольными краевыми эффектами в ИНУ, предназначенных для нагрева тел прямоугольной формы, например слябов под прокатку, воз-

никают поперечные [5, 6, 7] краевые эффекты. Они характеризуются неравномерностью температурного поля по периметру поперечного сечения нагреваемой заготовки, когда угловые зоны имеют положительный или отрицательный градиент температуры по сравнению с гранями. Знак градиента и его величина определяются материалом нагреваемой заготовки, соотношением размеров ее поперечного сечения и частотой тока индуктора.

В случае индукционного нагрева тел с резко изменяющейся кривизной поверхности, к которым в первую очередь относятся слябы, возникает проблема, которая определяется тем, что электромагнитные процессы в системе «индуктор – металл» характеризуются не только выделением тепловой энергии в заготовке и индукторе, – в этом случае необходимо учитывать также объемную плотность электромагнитного поля и связанные с ней электродинамические усилия [8,9]. Особенно остро эта проблема проявляется при индукционном нагреве прямоугольных заготовок, особенно из немагнитных металлов [10]. Авторами разработаны методы расчета электродинамических и виброакустических характеристик индукторов для нагрева прямоугольных заготовок, которые можно использовать уже на стадии проектирования.

Основным фактором, препятствующим широкому внедрению мощных индукционных установок для нагрева тел прямоугольной формы, например слябов, является сильная вибрация обмотки индуктора, которая сопровождается шумом, превышающим санитарные нормы, и может привести к разрушению установки.

#### 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., Егиазарян А.С.* Ключевые проблемы при эксплуатации индукционных нагревателей // *Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки*. – 2017. – № 1 (53). – С. 179–182.
3. *Егиазарян А.С., Зимин Л.С.* Особенности индукционного нагрева под деформацию // *Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки*. – 2015. – № 3 (47). – С. 128–135.
4. *Егиазарян А.С., Зимин Л.С.* Аналитические исследования при индукционном нагреве // *Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки*. – 2009. – № 1 (23). – С. 152–159.
5. *Егиазарян А.С., Зимин Л.С.* Поперечный краевой эффект при индукционном нагреве // *Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки*. – 2010. – № 7 (28). – С. 231–233.
6. *Зимин Л.С., Егиазарян А.С.* Проектирование прямоугольных индукторов // *Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки*. – 2016. – № 3 (51). – С. 151–154.
7. *Егиазарян А.С.* Возможные подходы к проектированию индукторов // *Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки*. – 2015. – № 1 (45). – С. 194–198.
8. *Зимин Л.С., Егиазарян А.С.* Электродинамические процессы при индукционном нагреве // *Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки*. – 2016. – № 1 (49). – С. 156–160.
9. *Зимин Л.С., Егиазарян А.С.* Виброзащита мощных индукторов // *Вестник Самарского государственного архитектурно-строительного университета. Градостроительство и архитектура*. – 2016. – № 3 (24). – С. 135–139.
10. *Зимин Л.С., Егиазарян А.С.* Особенности индукционного нагрева алюминиевых сплавов // *Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки*. – 2016. – № 2 (50). – С. 203–208.

*Статья поступила в редакцию 27 февраля 2018 г.*

## ELECTROMAGNETIC AND THERMAL EFFECTS INDUCTION HEATING

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

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

**Abstract.** *Specific features of induction heating are considered, which must be taken into account when designing and operating INU. The decisive role of the configuration of the temperature field is emphasized to achieve the required heating quality. In this case, the presence of edge effects, both longitudinal and transverse, is characteristic for inductive heating. Moreover, the former are present when both cylindrical and rectangular preforms are heated. The degree of manifestation of the transverse edge effect depends on the electrical and thermal properties of the heated metal, the dimensions of the cross section, the frequency of the inductor current and the magnitude of the heat losses. Electromagnetic processes in the "inductor-metal" system of a rectangular shape are characterized by electrodynamic forces and associated vibrations and noise.*

**Keywords:** *inductor, deformation, heating, electrodynamic forces, vibration, noise.*

---

*Lev S. Zimin (Dr. Sci.(Techn.)), Professor.  
Aleksandra S. Leonenko (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.*