

## Краткие сообщения

УДК 621.365.5

### КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИХ СПОСОБОВ НАГРЕВА<sup>1</sup>

*Л.С. Зимин, А.С. Егиазарян*

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

*Приводится сравнение альтернативных методов нагрева: сопротивлением и индукционным. Указывается на эффективность совместного проектирования процессов деформации и нагрева, а также конструкции нагревательных устройств. Упоминаются проблемы, возникающие при проектировании и эксплуатации индукционных нагревательных установок (ИНУ) для заготовок прямоугольной формы больших габаритов. При этом приводятся результаты теоретических и экспериментальных исследований, полученных при нагреве слэбов промышленных размеров. Раскрывается причина появления поперечного краевого эффекта. Рассматривается электродинамическая проблема, возникающая при индукционном нагреве прямоугольных заготовок, особенно из алюминиевых сплавов. При индукционном нагреве на промышленной частоте тока уделяется внимание электромагнитной совместимости однофазных ИНУ с системой электроснабжения.*

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

В технологиях горячей деформации металлов существенное значение имеет выбор теплоносителя: пламенный нагрев (сжигание газа, мазута) или электрический. При электронагреве, когда приходится выбирать между нагревом сопротивлением или индукционным, надо иметь в виду, что последний согласно теории индукционного нагрева является малоэффективным для алюминиевых сплавов (низкие значения удельного сопротивления и магнитной проницаемости), особенно на промышленной частоте тока, на которой работают печи сопротивления. При электронагреве методом сопротивления подводимая путем теплопередачи конвекцией максимальная мощность составляет  $P_{уд} = 18,8 \text{ кВт/м}^2$ . При индукционном нагреве токами промышленной частоты, который успешно применяется для большинства размеров алюминиевых слитков, удельная мощность достигает  $P_{уд} = 1360 \text{ кВт/м}^2$ , т. е. примерно в 15 раз выше, чем в печах сопротивления.

Кроме того, индукционный нагрев все шире внедряется во многие отрасли промышленности. Так, помимо традиционных отраслей он в настоящее время находит применение при производстве пластмасс и др. [1–2]. Но наиболее перспективно применение индукционного нагрева в технологиях нагрева металла для горячего пластического деформирования. При этом всегда ставится задача достижения максимальной энергоэффективности технологических комплексов

<sup>1</sup>Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 15-08-03053).

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

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

«индукционная нагревательная установка (ИНУ) – обработка металла давлением (ОМД)». 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 ИНУ рассматривается в едином комплексе с ОМД. При этом оптимизация на математических моделях проводится как аналитически, так и численно [3–9].

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. Индукционный нагрев цилиндрических тел, которые в основном являются заготовками при прессовании, довольно хорошо изучен, но при использовании индукционного нагрева в листопрокатном производстве возникает целый ряд особенностей.

Индукционный нагрев тел с резко изменяющейся кривизной поверхности, к которым в первую очередь относятся слябы, характеризуется рядом проблем, которые в случае цилиндрических заготовок или вообще не возникают, или довольно легко разрешаются. Это прежде всего двумерный характер электромагнитного и температурного полей в поперечном сечении, когда температурный перепад между поверхностью и центром уже нельзя рассматривать в зависимости только от одной координаты, например радиуса заготовки. Исследования проводились при нагреве на промышленной частоте тока для слябов толщиной 0,3–0,5 м, характерной, например, для Самарского металлургического завода.

Как показали исследования, распределение удельной плотности внутренних источников тепла для этих двух сплавов имеет резко отличный характер. Так, в случае алюминиевых слябов угловые зоны и ребра всегда будут иметь положительный температурный градиент по сравнению с серединами граней. В случае титановых слябов наблюдается обратная картина. Причина заключается в разных значениях для этих сплавов величины удельного электросопротивления и, соответственно, глубины проникновения тока. Это явление, характеризующее тепловыделение в прямоугольной области, вызывает наряду с продольным краевым эффектом – ослаблением магнитного поля на концах любых заготовок (прямоугольных и цилиндрических) – поперечный краевой эффект [10]: появление градиентов температуры по периметру поперечного сечения заготовки. 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 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 роль, 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 [11–16]. 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.

Исследования показали, что при одинаковой удельной мощности наибольшее давление будет испытывать обмотка индуктора, предназначенного для нагрева немагнитных металлов с малым удельным электросопротивлением. Типовым в этом отношении является нагрев алюминиевых слябов на промышленной частоте как самой низкой из применяемых для индукционного нагрева. В самом общем случае для определения распределенных усилий по всему индуктору был использован закон Био – Савара – Лапласа, который позволяет найти вектор магнитной индукции в электрических системах любой сложности и тем самым определить настил тока в слябе. Затем, разбив заготовку на конечное число прямоугольных контуров и определив значения токов в этих контурах, а также найдя значение тока в обмотке индуктора с учетом взаимоиндуктивности, рассчитанной по известной формуле двух коаксиальных прямоугольников по методу ряда Тейлора, определены электродинамические усилия как на обмотку индуктора, так и на поверхность заготовки. При исследовании вибродинамической модели индуктора была синтезирована форма оптимальной оболочки индуктора по критерию минимального шумоизлучения (максимальной жесткости).

Исследована индукционная установка промышленной частоты мощностью 1500 кВт для нагрева алюминиевого сляба размерами 0,3×1,24×2,4 м. Обмотка индуктора, выполненная медной трубкой 26×32 мм со смещенным отверстием диаметром 18 мм, армирована стеклопластиком и заключена в бетонные блоки оптимальной формы. Шум такой установки не превышал 65 дБ, а без бетонных блоков достигал 125 дБ.

И, наконец, для индукционного нагрева крупногабаритных алюминиевых слябов по энергетическим и технологическим соображениям вполне приемлемой является промышленная частота тока. В этом случае возникает проблема электромагнитной совместимости напряжений питания индукторов и 3-фазной системы электроснабжения [17, 18].

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *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.
2. *Зимин Л.С., Сорокин А.Г.* Анализ применения индукционного нагрева при производстве пластмассы // Вопросы электротехнологии. – 2014. – Вып. 1 (2). – Саратов: Саратовский гос. техн. университет им. Гагарина Ю.А. – С. 36–39.
3. *Егиазарян А.С.* Возможные подходы к проектированию индукторов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2015. – Вып. 1 (45). – С. 194–198.
4. *Зимин Л.С., Егиазарян А.С.* Проектирование прямоугольных индукторов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2016. – Вып. 3 (51). – С. 151–154.
5. *Егиазарян А.С., Зимин Л.С.* Аналитические исследования при индукционном нагреве // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2009. – Вып. 1 (23). – С. 152–159.
6. *Егиазарян А.С., Зимин Л.С.* Комплексный подход к оптимальному проектированию индукционных нагревательных установок // Известия вузов. Электромеханика. – 2014. – № 5. – С. 63–67.
7. *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.
8. *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.
9. *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.
10. *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.
11. *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.
12. *Зимин Л.С., Егиазарян А.С.* Виброзащита мощных индукторов // Вестник Самарского государственного архитектурно-строительного университета. Градостроительство и архитектура. – 2016. – Вып. 3 (24). – С. 135–139.
13. *Зимин Л.С.* Electrodynamic processes at induction heating. International symposium on electromagnetic fields in electrical engineering. ISEF, 1989. Poland, Lodz, p. 301–304.
14. *Зимин Л.С.* Electrodynamic forces at induction heating. 40 Internationales wissenschaftliches colloquium. Vortagsreihhen. Ilmenau, Germany, 1995. Band 4, S. 66–71.
15. *Зимин Л.С.* Acoustic and vibration problems at induction heating. HIS-98. Proceedings of International Induction Heating Seminar. Padua, Italy, 1998, S. 499–505.
16. *Егиазарян А.С., Зимин Л.С.* Анализ режимов электроснабжения индукционных установок // Известия вузов. Электромеханика. – 2011. – Вып. 3. – С. 74–76.
17. *Егиазарян А.С., Зимин Л.С., Федотов М.Е.* Электромагнитная совместимость систем электроснабжения с индукционными установками // Известия вузов. Электромеханика. – 2007. – Спец. выпуск. – С. 75.
18. *Егиазарян А.С., Зимин Л.С.* Оптимизация электроснабжения индукционных установок // Известия вузов. Электромеханика. – 2009. – Спец. выпуск. – С. 34.

Статья поступила в редакцию 21 сентября 2017 г.

## COMPETITIVENESS OF ELECTROTHERMAL HEATING METHODS

***L.S. Zimin, A.S. Yeghiazaryan***

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

*Comparison of next alternative methods of heating is given: resistance and induction. Indicates the effectiveness of co-design processes of deformation, heating and design construction of heaters. The problems arising at design and operation of high power inductions for preheating of big dimensions slabs are mentioned. At the same time results of the theoretical and pilot studies received when heating slabs of the industrial sizes are given. The reason of emergence of cross section effect is uncovered. The electrodynamic problem at induction heating of rectangular slabs is considered, especially from aluminum alloys. At induction heating at an industrial frequency of current attention is paid to electromagnetic compatibility of single-phase inductors with the system of power supply.*

***Keywords:*** deformation, heating, inductor, regional effect, vibrations.

---

*Lev S. Zimin (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.*

*Alexandra S. Yeghiazaryan (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.*