

УДК 621.365.5

ОСОБЕННОСТИ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ¹

А.С. Егиазарян, Л.С. Зимин

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

Рассматриваются особенности индукционного нагрева алюминиевых сплавов, которые являются проблемными для нагрева путем электромагнитной индукции. Приводится сравнение с электрическими печами сопротивления. Даются рекомендации по выбору методики расчета индукторов, рассматриваются возможности учета продольного и поперечного краевых эффектов. Раскрываются энергетические особенности трехфазных индукторов. Указывается, что по величине мощности, потребляемой отдельными катушками трехфазного индуктора, нельзя однозначно судить о средней температуре заготовки, расположенной в этой катушке. В зависимости от значений коэффициентов взаимной индуктивности и от углов сдвига между токами в каждом индукторе потребление мощности каждым из индукторов может быть различным, а также положительным или отрицательным. Указывается, что максимальный к.п.д. будет иметь однофазная катушка индуктора.

Ключевые слова: деформация, скорость нагрева, трехфазный индуктор, равномерность нагрева, краевой эффект.

Широко распространенные в различных отраслях промышленности процессы обработки металлов, в частности алюминиевых сплавов, методом горячего пластического деформирования неразрывно связаны с технологией нагрева металла, где перспективно применение индукционного нагрева. Поэтому при повышении эффективности металлургического производства встает проблема достижения экстремальных значений технико-экономических показателей технологических комплексов «индукционная нагревательная установка (ИНУ) – обработка металлов давлением (ОМД)» [1, 2].

Если с точки зрения конструкции ИНУ и особенностей индукционного нагрева ограничиться основными формами нагреваемых заготовок – прямоугольной и цилиндрической, то из наиболее распространенных видов горячей ОМД в металлургическом производстве целесообразно рассмотреть прокатку (слябинг) и прессование. При современном состоянии производства производительность прессового оборудования достигает 4–5 т/час на прессах средней мощности к 10–15 т/час на крупных прессах, а производительность современных крупных прокатных станов достигает 50 и более т/час. Из приведенных цифр видно, что даже современные электрические печи сопротивления с принудительной циркуляцией не в состоянии достичь указанной производительности и что для обеспечения нормальной работы крупного оборудования приходится уста-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 15-08-03053).

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

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

навливать до 4–5 многокамерных крупногабаритных нагревательных печей сопротивления.

Исследования в области скоростного нагрева алюминиевых слитков показали, что пределом увеличения скорости нагрева является внутренний температурный перепад по сечению слитка (Δt). Для твердых алюминиевых сплавов рекомендуется температурный перепад не более 20 °С, для мягких сплавов $\Delta t = 40$ °С и для чистого алюминия $\Delta t = 60$ –80 °С и более. Повышение скорости нагрева в несколько десятков раз стало возможным только при индукционном нагреве, когда вся энергия, идущая на нагрев, передается индукционно непосредственно в слитки без участия внешней среды.

В последние годы значительно повысился интерес к разработке методов проектирования индукторов [3, 4]. Это объясняется двумя причинами: во-первых, вследствие существенного расширения области промышленного применения индукционного нагрева возросли потребности в расчетах такого рода, во-вторых, коренным образом изменились возможности их реализации благодаря быстрому развитию компьютерных технологий.

Расчет индукторов для нагрева металлических заготовок и деталей в переменном электромагнитном поле преследует двоякую цель: 1) найти распределение выделяемой в металле энергии; 2) согласовать параметры источника питания и нагрузки. Для расчета индуктора наиболее наглядным является использование системы трансформатора, уравнения которого основаны на известной связи двух или нескольких линейных контуров тока. Основная трудность в данном случае связана с четким обоснованием разделения магнитного полезного потока. Теория поля обходит эти трудности, используя связи электрического и магнитного полей через уравнения Максвелла для дифференциальных уравнений второго порядка в частных производных [5]. При исследовании известных способов расчета необходимо объединить теорию поля и трансформатора. Теория поля в случае однородного поля может служить для выяснения принципиальных связей, тогда как искривление неомогенности поля необходимо учитывать как отрицательный фактор в формулах для бесконечно длинных пустотелых линейных контуров тока. Равномерность нагрева заготовки в аксиальном направлении зависит в основном (если пренебречь влиянием тепловых потерь) от распределения напряженности магнитного поля, а именно аксиальной ее составляющей. Поэтому задача равномерного нагрева заготовки по длине может быть сведена к задаче получения равномерной картины поля по длине индуктора. В прямоугольных индукторах надо учитывать явление поперечного краевого эффекта [6].

В данном исследовании распределение аксиальной составляющей напряженности магнитного поля определялось как с помощью расчета, так и экспериментально. В случае индукционного нагрева, особенно на промышленной частоте, электромагнитное поле, поле векторов электрической и магнитной напряженности, можно рассматривать как квазистационарное (потенциальное), т. к. длина волны в зазоре ($\lambda = \text{скорость света} / \text{частота тока}$) много больше размеров воздушных зазоров в системе «индуктор – металл». Фаза тока при этом одинакова по всей длине индуктора, т. е. система рассматривается как участок цепи с сосредоточенной самоиндукцией. В свою очередь, тепловое действие электромагнитного поля определяется вектором Пойтинга.

В случае плоскопараллельного поля поверхность заготовки будет поверхностью уровня потенциала, т. е. выделяемая мощность определяется только гео-

метрическими и физическими параметрами заготовки, но совершенно не зависит от положения и формы индуктора.

Повышение энергетических, технологических и эксплуатационных показателей ИНУ возможно применение трехфазного тока промышленной частоты [7, 8, 9]. С увеличением веса заготовок и производительности индукционных нагревателей промышленной частоты мощность однофазных индукторов, даже при условии компенсации их реактивности, часто оказывается довольно значительной. При этом их подключение к трехфазными сетям становится нежелательным или вообще недопустимым. Поэтому индукционные установки большой мощности целесообразно выполнять в трехфазном исполнении. В трехфазных электрических машинах все фазы расположены симметрично, т. е. имеют равные значения взаимных индуктивностей. При симметричной системе напряжений получается полностью симметричная система тока, поэтому бывает достаточно исследовать процессы только в одной фазе, чтобы получить представление о соотношениях в трехфазной системе.

При индукционном нагреве пространственная асимметрия является причиной неравенства коэффициентов взаимной индуктивности даже в том случае, если все три катушки индуктора имеют одинаковые параметры.

Падения напряжений на каждой катушке трехфазного индуктора обусловлены активными и индуктивными составляющими. Причем та часть падения напряжения, которая вызвана ЭДС взаимной индукции, может быть также разложена на активную и реактивные составляющие, совпадающие по направлению или перпендикулярные току рассматриваемого индуктора. Наличие активных составляющих падения напряжения, обусловленных взаимной индуктивностью, оказывает влияние на потребление активной мощности каждым индуктором. Поскольку коэффициенты взаимной индукции между индукторами не равны между собой, то, как следствие, не будет равенства и в потреблении активной мощности каждой фазой. В зависимости от значений коэффициентов взаимной индуктивности и от углов сдвига между токами в каждом индукторе потребление мощности каждым из индукторов может быть различным, а также положительным или отрицательным, так как одиночные индукторы могут обмениваться мощностью как с сетью, так и друг с другом. Как правило, при углах сдвига между токами, близких к 120° , мощности крайних катушек в сумме дают удвоенное значение мощности средней катушки. При углах, отличающихся от 120° , значения мощностей в каждой фазе могут быть различными.

Неравномерное потребление мощности разными катушками не означает такого же неравномерного распределения напряженности магнитного поля и, как следствие, неравномерного нагрева. Таким образом, потребление мощности отдельными катушками не находится в однозначной связи с индуктированной в заготовке мощностью и с мощностью, превращенной в тепло в катушке. Чем больше отношение диаметра катушек к длине, тем сильнее сказывается их взаимное индуктивное влияние на электрический режим индуктора.

Поэтому в индукторе, состоящем из нескольких катушек, расположенных рядом по одной оси так, что они влияют друг на друга, сумма мощностей, передаваемых в заготовку, будет тем больше по сравнению с суммой потребляемых мощностей, чем меньше взаимный сдвиг фаз напряжений, питающих отдельные катушки. Это объясняется следующим:

– чем больше сдвиг фаз между питающими напряжениями, тем больше их размагничивающее влияние;

– наличие значительной радиальной составляющей поля индуктора на границах катушек вызывает неблагоприятное распределение тока в меди катушек в этих районах, что также вызывает дополнительные потери в индукторе.

Приведенные выше рассуждения предполагали, что по всем виткам первичной катушки течет ток I , а по всем виткам вторичной – ток I_1 , так что плотность тока неизменна по всей длине. Для индуктора в общем случае это справедливо. Но в заготовке, которая представляет собой целый ряд лежащих рядом закороченных и включенных параллельно витков, плотность тока по длине ни в коем случае не будет равномерной. У трехфазного индуктора к краевому эффекту катушек добавляется влияние стыков соседних фаз, которое тем больше, чем более сдвиг фаз полей соприкасающихся катушек. При таком рассмотрении однофазная катушка представляет собой идеальный граничный случай отдельных катушек, поля которых имеют одинаковую фазу. Такая катушка будет иметь наивысший к.п.д. Для трехфазного индуктора эта одинаковость фаз недостижима. Однако и в этом случае надо стремиться к возможному выравниванию фаз по времени, т. е. по соображениям к.п.д. предпочтение следует отдать несимметричной схеме включения катушек.

Следует также обратить внимание на то, что эффективное сопротивление обмотки индуктора зависит от формы поля. Вытеснение тока в обмотке происходит в сторону магнитных силовых линий. На концах катушек могут возникать дополнительные потери от вытеснения тока за счет радиальной составляющей магнитного поля. Деформация поля на стыках зависит от сдвига фаз, так что и по этой причине следует стремиться к несимметричной схеме включения катушек.

Для мощных цилиндрических и прямоугольных ИНУ часто применяют профиль трубки со смещенным отверстием, толщина прямоугольной части которой равна 1,0 см (глубина проникновения в медь на частоте 50 Гц). Характер зависимостей электрического к.п.д. индуктора от коэффициента заполнения, профиля сечения трубки и схемы соединения можно объяснить образованием витковых локальных полей, определяющих проявления эффекта близости, поверхностного, катушечного и других эффектов, которые в конечном итоге определяют действительное активное сопротивление переменному току.

Выводы

1. Индукционный нагрев не только позволяет исключить из процесса теплопередачи внешнюю среду, но и уменьшить внутреннее термическое сопротивление слитка до 50 % за счет объемного распределения источника тепла.

2. Тепловые потери от нагреваемого слитка в окружающую среду дополнительно снижают внутренний перепад температуры.

3. При слабо выраженном поверхностном эффекте возможен перегрев внутреннего слоя, смещенного к центру слитка, на величину перепада температуры между поверхностью и центром заготовки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Егiazарян А.С., Зимин Л.С.* Повышение эффективности индукционного нагрева металла под деформацию // Индукционный нагрев. – № 22. – СПб.: КОМЛИЗ-ПОЛИГРАФИЯ, 2012. – С. 41–43.
2. *Егiazарян А.С., Зимин Л.С.* Комплексный подход к оптимальному проектированию индукционных нагревательных установок // Известия вузов. Электромеханика. – 2014. – № 5. – С. 63–67.

3. *Егiazарян 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. *Егiazарян А.С.* Возможные подходы к проектированию индукторов // Вестник Самарского государственного технического университета. Технические науки. – 2015. – № 1 (45). – С. 194–198.
5. *Егiazарян А.С., Зимин Л.С.* Аналитические исследования при индукционном нагреве // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2009. – № 1 (23). – С. 152–159.
6. *Егiazарян 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.
7. *Егiazарян А.С., Зимин Л.С.* Анализ режимов электроснабжения индукционных установок // Известия вузов. Электромеханика. – 2011. – № 3. – С. 74–76.
8. *Егiazарян А.С., Зимин Л.С., Федотов М.Е.* Электромагнитная совместимость систем электроснабжения с индукционными установками // Известия вузов. Электромеханика. – 2007. – Спец. выпуск. – С. 75.
9. *Егiazарян А.С., Зимин Л.С.* Оптимизация электроснабжения индукционных установок // Известия вузов. Электромеханика. – 2009. – Спец. выпуск. – С. 34.

Статья поступила в редакцию 2 марта 2016 г.

FEATURES OF INDUCTION HEATING OF ALUMINIUM ALLOYS

A.S. Yeghiazaryan, L.S. Zimin

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

The features of induction heating of aluminum alloys which are problematic for heating by electromagnetic induction are discussed. Comparison with electric resistance furnaces is provided. Recommendations for selection of calculation methods of the inductors are given. The possibility of accounting for the longitudinal and transverse edge effects is considered. Energy features of three-phase inductors are revealed. The magnitude of the power consumed by the individual coils of a three-phase inductor does not correspond to the average temperature of the billet located in the coil. Depending on the values of the coefficients of mutual inductance and the phase current in each inductor the power consumption of each of the inductors may be different, as well as positive or negative. A single-phase coil of the inductor will have a maximum efficiency.

Keywords: *deformation, heating rate, the three-phase inductor, the uniformity of heating, edge effect.*

*Alexandra S. Yeghiazaryan (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Lev S. Zimin (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.*