

НАГРЕВ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ПОЛЕ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

Гудков И.С., Михайлов К.А., Горемыкин В.А., Головенко Е.А.

Проблема низкой эффективности индукционного нагрева

Профильные металлические конструкции, которые повсеместно используются в повседневной жизни, изготавливаются из металлических полуфабрикатов, цилиндрических слябов. Для получения необходимой формы сечения, металлический цилиндр нагревается до температуры, при которой производится термическая обработка давлением в прессе. Нагрев заготовок производится с целью уменьшения сопротивления деформированию. При горячей деформации сопротивление деформированию примерно в 10 раз меньше, чем при холодной. Это позволяет изготавливать изделия. Для каждого металла и сплава температура горячей обработки имеет свои верхний и нижний пределы, образующие область нагрева, называемую температурным интервалом обработки. Существуют различные методы нагрева металлов, например, пламенные печи, подогреваемые газом (нефтью), прямой нагрев сопротивлением, а также получивший более широкое распространение в металлургии индукционный нагрев. В индукционных установках тепло в электропроводном нагреваемом теле выделяется токами, индуктированными в нем переменным электромагнитным полем. Установленная мощность индукционных сквозных нагревателей цветных металлов достигает десятков и даже сотен мегаватт, при этом основным недостатком таких устройств является низкий КПД, при нагреве цветных металлов он не превышает 50 %, и жидкостное охлаждение которое определяет их низкую надежность. Это обусловлено высокой удельной электропроводностью нагреваемого металла (алюминий, медь, латунь), сопоставимой с электропроводностью обмоток индуктора. Зависимости КПД индуктора от рода нагреваемого материала приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Характерные значения КПД индуктора

Материал	Температура нагрева, °С	КПД УИН
Сталь углеродистая	1250	0,65
Сталь углеродистая	700	0,80
Сталь нержавеющая	1250	0,60
Латунь	800	0,50
Медь	900	0,40
Алюминий	500	0,40

Индукционный нагрев во вращающемся поле постоянных магнитов

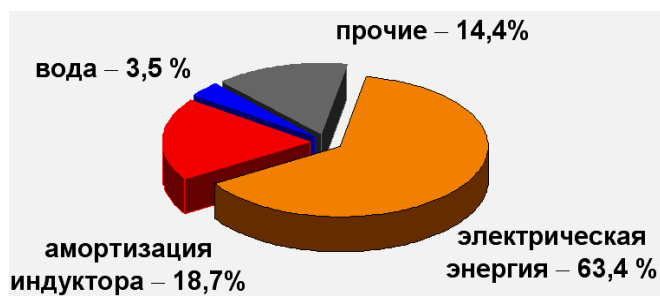
Для увеличения энергетической эффективности предложен и рассмотрен способ нагрева во вращающемся поле постоянных магнитов, КПД которого ограничен только КПД электропривода и может достигать 90%, а коэффициент мощности определяется

параметрами электродвигателя и составляет не менее 0,9. Данный метод индукционного нагрева уже давно известен. Первые патенты нагрева постоянными магнитами относятся к 50м годам прошлого столетия, но эффективного применения технология не нашла до сих пор. Причина заключается в недостаточной проработанности технологий и в несовершенстве постоянных магнитов. В настоящее время у команды проекта существует технология предпромышленной стадии, которая показала свою эффективность на лабораторной установке. Опытным путем доказана возможность использования постоянных магнитов, в качестве источников электромагнитного поля, для нагрева цилиндрической заготовки, из материала с высокой удельной электропроводностью перед процессом пластической деформации.

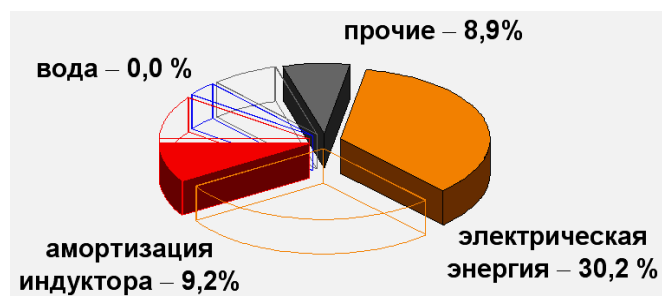
Экспоненциальный рост развития мощности и качества постоянного магнита стал происходить после 80х годов и в настоящее время постоянный магнит является успешным заменителем энергии магнитного поля в установках индукционного нагрева. Магнит – источник магнитной энергии, в сравнении с силовыми катушками тока, не требующий постоянно подводимой мощности. За счет данной замены и происходят меньшие потери передаваемой энергии от сети питания к нагреваемой заготовке. В лабораторной установке был достигнут КПД процесса 85%, при увеличении общей мощности системы КПД процесса возрастает. Более того улучшается качество прогрева цилиндрической заготовки, за счет действия не продольного, как в соленоидальных катушках, а поперечного магнитного поля. На рисунке 3 представлено распределение плотности тока и активной мощности по сечению заготовки.

Необходимость повышения эффективности индукционного нагрева для предприятий переработчиков.

Производство профильной продукции, это высокотехнологический процесс, большая доля затрат в нем идет на электроэнергию. Как мы знаем, коэффициент полезного действия установок индукционного нагрева для цветных металлов не превышает 50%. Это говорит о том, что каждый второй кВт электроэнергии тратится впустую, эта энергия превращается в тепло, которое приходится снимать с устройства. Рассмотрим на примере Европейского производства. Состав себестоимости 1кг алюминиевого изделия, рисунок 1.1, включает в себя помимо сырья и сопутствующих расходов, так же амортизацию индуктора и издержки на электрическую энергию. Предлагаемый в проекте способ позволяет отказаться от использования воды, уменьшает расход энергии в 2 раза, позволяет экономить на обслуживании при эксплуатации и уменьшить расходы на амортизацию за счет меньшей цены оборудования. При внедрении новой технологии, доля последних затрат заметно сокращается, что приводит к ощутимой выгоде, около 2\$ на 1кг, или около 2\$ млн. в год.



а)



б)

Рисунок 1.1 – структура себестоимости 1кг готового изделия

Проектирование новых установок и параметрическая оптимизация

Проектирование нового устройства, на базе данной технологии, осуществлено в качестве аналога существующего агрегата, в целях для модернизации производства. В качестве прототипа для сопоставления традиционной технологии в продольном магнитном поле и предлагаемой технологии в поле постоянных магнитов выбран индукционный нагреватель периодического действия марки ОКБ 894А для нагрева алюминия перед наложением алюминиевой оболочки на электрический кабель с двух сторон (используется сдвоенный индуктор). Электрический КПД $\eta_{эл}$ которой составляет 28%, а коэффициент мощности $\cos\varphi$ не превышает 0,31, рисунок 4.

Рисунок 4 – Индукционный нагреватель ОКБ 894А

В рамках проектирования использовался подход параметрической оптимизации. Все технические параметры были приведены в соответствие с максимальной полезной мощностью установки. Результаты проектирования и сопоставления представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Технические характеристики исходного и модернизированного нагревателей

Параметр	Исходный образец ОКБ 894А	Нагреватель на постоянных магнитах
Диаметр нагреваемых слитков, мм	175	
Длина нагреваемых слитков, мм	438	
Время нагрева, секунд	90	
Частота питающего напряжения, Гц	50	50
Напряжение питания, В	480	380
Число фаз установки	1	3
Установленная мощность, кВт	2 × 300	2 × 110
КПД, %	28	90
Охлаждение	водяное	естественное

Как видно из таблицы достоинствами нового индуктора является:

- использование стандартной величины напряжения,
- трехфазная система питания вместо однофазной, что обеспечивает повышение симметрии цеховой системы энергопитания и качества энергии по производству в целом;
- повышение КПД более чем в 3 раза и снижение установленной мощности системы с 600 кВт до 220 кВт;
- отказ от водяного охлаждения и как следствие сокращение издержек и увеличение надежности технической системы.

Для повышения эффективности преобразования электрической мощности в тепловую, был выполнен поиск оптимальных конструктивных параметров и свойств материала ротора с магнитами при помощи методов оптимального проектирования.

Применение комплексной параметрической оптимизации с использованием генетического алгоритма Холланда позволило выявить закономерности между характерными конструктивными параметрами индукционного нагревателя и его энергетическими характеристиками. В качестве целевой функции приняты мощность тепловыделения в загрузке, частота вращения ротора и число пар полюсов, в качестве параметров оптимизации приняты геометрические размеры магнитов, высота зубца ротора, магнитная проницаемость материала ротора, угол поляризации магнитов, число магнитов и число пар полюсов. Высоких результатов при оптимизации получилось достичь, используя многокомпонентную целевую функцию следующего вида:

$$F_{ц} = k_1 \left| \frac{P_2 - P_2'}{P_2} \right| + k_3 \left| \frac{n_1 - n_1'}{n_1'} \right| + k_3 \left| \frac{1}{p} \right| \rightarrow \min, \quad (4.2)$$

где P_2 – текущее значение мощности, потребляемой регулируемым приводом УИН;

P_2' – заданная полезная мощность в загрузке;

p – число пар полюсов;

n_1 – текущее значение частоты вращения ротора с магнитами;

n_1' – заданная частота вращения ротора с магнитами (номинальная частота вращения асинхронного двигателя);

k_1, k_2, k_3 – весовые коэффициенты для каждого из критериев оптимизации.

Уравнение 4.2 является универсальным: установив значение весовых коэффициентов $k_1=0$, $k_2=0$ или $k_3=0$ можно исключить из комплексной целевой функции какой-либо из критериев. Так же можно использовать целевую функцию для оптимизации по мощности, установив $k_2=0$ или $k_3=0$.

Решение задачи позволяет оптимизировать УИН как по массогабаритным, так и по энергетическим показателям.

Расчеты показали, что разделение ротора на секции позволяет повысить эффективность преобразования электрической энергии в тепловую за счет появления концевых эффектов на стыке секций роторов с магнитами. Это позволяет сделать вывод, что число встречно вращающихся секций должно быть как можно больше. Однако увеличение числа секций ограничено конструктивными возможностями механической передачи. Ввиду этого оптимизация может производиться и по данному параметру.

Сравнение предложенной конструкции УИН с конструкцией индукционного нагревателя ОКБ 894А, показывает, что предложенная конструкция УИН позволяет добиться увеличения КПД процесса нагрева алюминиевой заготовки практически на 60%, увеличения коэффициента мощности $\cos\phi$ с 0,31 до 0,9, а также отказаться от жидкостного охлаждения, компенсирующих и симметрирующих устройств.