

Д.А. Посмитюха

(Украина, Днепропетровск, Национальный горный университет)

КОНСТРУКТИВНОЕ ИСПОЛНЕНИЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ПРОВОЛОКИ

На метизных предприятиях Украины находится в эксплуатации устарелое и энергоемкое термическое оборудование для производства оцинкованной проволоки. В производстве проволоку протягивают с большего диаметра к меньшему, до требуемых значений, что приводит к образованию уплотненного поверхностного слоя, который препятствует протяжке для уменьшения диаметра. Поверхностные уплотнения проволоки устраняются термической обработкой в специальном оборудовании, которое является самым энергоемким в процессе производства. Проблема повышения эффективности использования энергии сегодня является актуальной и требует новых технологических подходов и решений.

В последнее время технологически совершенствуются способы прямого и косвенного нагрева для термической обработки проволоки. Широкое распространение получили усовершенствованные колпаковые печи отжига проволоки, в которых применяется защитная газовая среда (H_2 , N_2). Также совершенствуются проходные печи отжига с электро- или газонагревом, прямой контактный нагрев проволоки. Перечисленные способы термической обработки используются в производстве и продолжают совершенствоваться до сегодняшнего дня. Однако, с точки зрения энергосбережения, они имеют недостаточную энергоэффективность, что обусловлено как конструктивно так и физикой протекающих процессов [1-4, 6].

Применение индукционного нагрева проволоки является альтернативой имеющемуся оборудованию термической обработки, в большей степени как технология чистого производства, нежели энергосберегающего.

Первые индукционные установки отжига проволоки были подобны проходным печам, в которых проволока протягивалась через муфели, нагретые индукционно до температуры магнитных превращений [3,6]. Такая компоновка обеспечивала точное авторегулирование температуры, но для различных режимов отжига необходимы были муфели из разных сплавов, которые имели температуру магнитных превращений, соответствующую тому или иному режиму отжига. Высокое энергопотребление и малая маневренность в адаптации к тепловым режимам отжига не способствовали массовому распространению индукционных печей в промышленности.

Следующим этапом развития индукционного отжига стало применение цилиндрических индукторов, через которые протягивается пучок проволоки. В настоящее время эти установки изменились конструктивно в соответствии с требованиями производства [1,3,6]. Установки отжига пучка проволоки работают в комплексе с проходными электропечами, что обусловлено снижением энергоэффективности нагрева металла индукционным способом выше температур магнитных превращений. Данные установки обеспечивают тепловые режимы отжига до температур магнитных превращений в стали, однако имеют низ-

кие энергетические показатели, что обусловлено конструктивным исполнением. При нагреве пучка проволоки внутреннее пространство цилиндрического индуктора заполнено частично, что обуславливает магнитные потери на рассеивание и низкий $\cos \varphi$. Как следствие, в индукционных установках отжига пучка проволоки используется длинный секционированный индуктор (более 2-х м); это обеспечивает нагрев проволоки, но кардинально не улучшает энергетические показатели, что детально рассмотрено в работе [1]. Также существует ряд других препятствий, которые не позволяют повысить энергоэффективность отжига проволоки при использовании распространенных способов индукционного нагрева [2-4].

Конструкция индуктора, геометрические параметры его и нагреваемой заготовки, эффективность использования магнитного потока определяют электрический КПД индукционной установки. Основным препятствием на пути повышения энергоэффективности являются большие магнитные потери рассеяния, что характерно для распространенных конструкций индукторов.

Из вышеизложенного следует, что необходимо разработать принципиально новый тип индуктора для отжига проволоки, у которого отсутствуют недостатки предыдущих конструкций, минимизированы потери на рассеивание магнитного потока. Установка индукционного отжига не должна изменять существующие технологические процессы производства проволоки. С учетом непрерывности технологических процессов протяжки проволоки, а также ее оцинкования, конструкция индуктора должна эффективно нагревать движущуюся проволоку, иметь компактные размеры для обеспечения минимума тепловых потерь.

При рассмотрении устройств, использующих электромагнитный поток, было обращено внимание на трансформаторы напряжения с бронированным магнитопроводом. Данный тип трансформаторов характеризуется низкими потерями рассеяния магнитного потока и рассматривается как индуктор с магнитной системой без потерь и одной ее частью с ферромагнитными потерями. В роли магнитопровода с потерями рассматривается ферромагнитная заготовка, которая подвергается индукционному нагреву; для исключения потерь в магнитной системе принимается, что она выполнена из феррита. Поскольку в качестве магнитопровода предлагается проволока, то следует отметить несоответствие ее габаритов и магнитной системы индуктора. Так как одна проволока имеет поперечные размеры меньше, чем магнитопровод индуктора, то, возможно, что из-за большого магнитного сопротивления она будет «невидима» для магнитного потока индуктора и обусловит потери на рассеяние в воздушном зазоре. Если за магнитопровод с потерями принять не одну проволоку, а ее пучок, расположенный в одной плоскости, то это должно обеспечить замкнутость потока в магнитной системе. Если учесть, что проволока будет проходить над индуктором, то возможно наличие некоторого воздушного зазора, который при оптимизации конструкции следует сводить к минимуму для устранения потерь рассеяния магнитного потока. Необходима оптимизация параметров геометрии воздушного зазора, т.е. оптимальная площадь магнитопровода в воздушном зазоре с проволокой. Целесообразно будет рассматривать индуктор на одну про-

волоку, при нагреве же нескольких проволок необходимо будет рассматривать совокупность скрепленных вместе индукторов и разделенных диэлектрической прослойкой для исключения магнитных связей, что будет удобно при параметрической оптимизации. Таким образом сформирован прототип индуктора, с помощью которого возможен нагрев неподвижного или движущегося пучка проволок (рис.1).

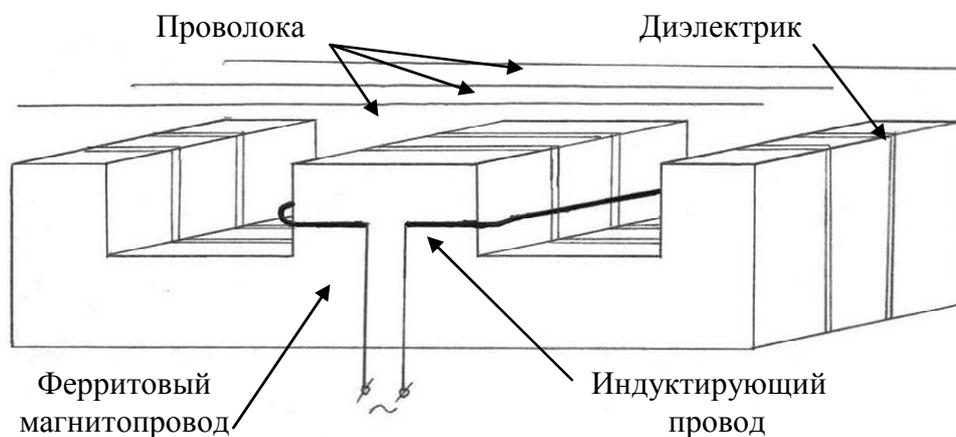


Рис.1. Индуктор для нагрева

Существует множество методов расчета и анализа электромагнитных полей устройств индукционного нагрева: аналитические, численные, аналоговые, схем замещения, а также физическое моделирование и планирование эксперимента. Выбор метода расчета и анализа электромагнитных параметров индукционных устройств зависит от вида электромагнитной системы, задачи исследования, имеющихся технических средств и программного обеспечения. Каждый из перечисленных методов имеет свои преимущества и недостатки [2-4]. Основная задача моделирования и расчета электромагнитных полей – обоснование рациональной частоты тока и мощности установки индукционного нагрева определить энергетические показатели индукционного нагрева.

Анализ достоинств и недостатков перечисленных методов расчета индукционных устройств, а также возможности их использования в исследовании электромагнитных процессов новой конструкции индуктора показали, что невозможно использовать какую-либо одну методику.

Применение аналитических, численных и аналоговых методов для исследования электромагнитных процессов в индукторе для нагрева проволоки затруднительно. В конструкции нет осевой симметрии, как у цилиндрических индукторов, неизвестна картина магнитного поля индуктора в целом. Эти методы используются для расчета геометрически простых систем или отдельных частей сложных систем в линейной постановке, причем с усложнением системы быстро возрастают трудности ее описания. Недостатками физического моделирования являются во многих случаях большая стоимость и трудоемкость, невысокая точность измерения ряда параметров при общей достоверности процесса. Методы схем замещения для двухмерных (и трехмерных) систем очень просты, однако позволяют определять только интегральные параметры (токи, сопротивления, мощности), имеют ограниченную область применения и недостаточную

точность, что затрудняет их использовать для параметрической оптимизации. Метод схем замещения позволяет частично описать электромагнитные процессы в данной конструкции индуктора, неизвестной областью является картина магнитного поля на переходном участке магнитопровод-проволока. Однако с помощью физического моделирования можно исследовать распределение магнитного поля на данном участке конструкции индуктора. Следует сказать, что возможности физического моделирования резко возрастают при использовании математического аппарата теории подобия и теории планирования эксперимента, позволяющих распространить полученные результаты на совокупность полностью или частично подобных объектов, сократить число экспериментов при сохранении достоверности данных, что особенно важно в многопараметрических процессах. Комбинированные методы широко распространены в практике индукционного расчета.

Применяя метод схем замещения по рабочему магнитному потоку, конструкция индуктора описывается следующим образом. Рабочий поток индуктора $\Phi_{И}$, создаваемый обмоткой, разделяется на потоки Φ_{M1} , Φ_P и Φ_{M2} . Магнитный поток Φ_{M1} охватывает обмотку индуктора, что определяет ее индуктивность. Поток Φ_P – поток рассеяния в пазу магнитопровода, в котором уложена обмотка индуктора. Магнитный поток Φ_{M2} замыкается по проволоке и выполняет полезную работу – нагрев проволоки (рис.2).

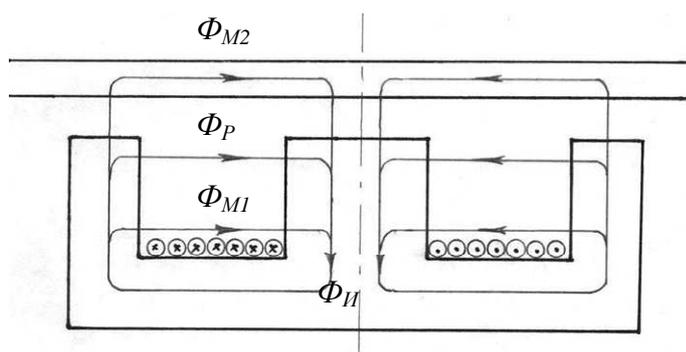


Рис.2. Картина магнитного поля в индукторе.

Составляется магнитная схема замещения (рис.3), обозначения на которой следующие: Z_{M1} – магнитное сопротивление обмотки индуктора, R_{MP} – магнитное сопротивление рассеяния в пазу магнитной системы, R_{MB} – магнитное сопротивление воздушного зазора между магнитопроводом и проволокой, Z_{M2} – полное магнитное сопротивление проволоки. Магнитной схеме

замещения соответствует электрическая схема замещения (рис.4), сопротивления которой приведены к числу витков катушки индуктора и связаны с магнитными сопротивлениями соотношением

$$Z_i = j\omega W_1^2 / Z_{mi} .$$

Метод основан на двух основных допущениях. Во-первых, считается, что все витки индуктора охвачены одним и тем же магнитным потоком. Во-вторых, поле в нагреваемой детали и в зазоре деталь-обмотка считается одномерным, что позволяет применять для расчета их сопротивлений известные аналитические выражения [2-4]. Следовательно, сопротивление воздушного зазора между

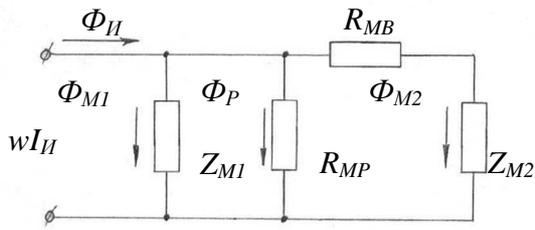


Рис.3. Магнитная схема замещения индуктора.

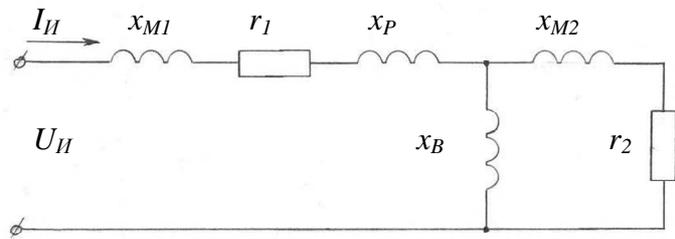


Рис.4. Электрическая схема замещения индуктора.

проволокой и магнитопроводом не поддается описанию данным методом, поэтому в связи с неоднородностью магнитного поля необходима комбинация нескольких методов.

Исследовать магнитное поле в зазоре возможно с помощью методов физического моделирования и учета ряда факторов при планировании эксперимента. А именно: необходимо учитывать ограничения при выборе области эксперимента, принципиальные ограничения для значений факторов, которые не могут быть нарушены ни при каких обстоятельствах, в первую очередь связанных с электрофизическими свойствами используемых материалов конструкции, учитываются ограничения, которые определяются конкретными условиями проведения процесса, существующей аппаратурой, технологией.

При планировании эксперимента лучше рассматривать конструкцию индуктора с поперечной симметрией, что сократит количество учитываемых факторов (рис. 5). С учетом применяемой аппаратуры можно ограничиться минимальной стандартной толщиной ферритовых элементов при компоновке магнитопровода индуктора, что сократит один габаритный фактор и положительно повлияет на скорость параметрической оптимизации. Кроме того сопротивление воздушного зазора будет определяться как функция от диаметра проволоки, факторов X_1 X_4 и частоты f , т.е.

$$x_B = F(X_1, X_4, D, f).$$

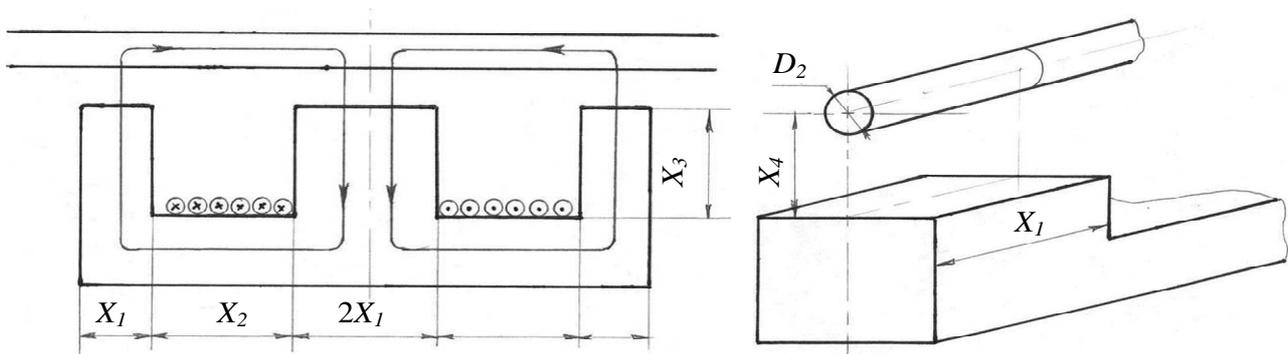


Рис.5. Геометрические факторы.

Конечная цель исследования электромагнитных процессов в конструкции индуктора для нагрева проволоки – определение полного КПД индукционного нагрева, который будет представлен параметрической зависимостью вида

$$\eta_{II} = F(X_1, X_2, X_3, X_4, \dots).$$

Использование комбинированного метода для исследования индукционной установки нагрева проволоки позволит изучить электромагнитные процессы, разработать методику расчета энергетических показателей, произвести оптимизацию конструкции в целом.

Вывод

Сформулированы требования к новой конструкции установки индукционного отжига проволоки с учетом технологии производства. Сформирован прототип индуктора, в котором исключены недостатки предыдущих конструкций. Произведен выбор методов расчета и анализа электромагнитных параметров установки индукционного отжига проволоки.

Список литературы

1. Посмитюха Д.А. Особенности индукционного нагрева проволоки/ Гірничя електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – 2005. – Вип. 74. – С. 47-53.
2. Немков В.С., Демидович В.Б. Теория и расчет устройств индукционного нагрева. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с.
3. Бабат Г.И. Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. – Л.: Энергия, 1965. – 552 с.
4. Установки индукционного нагрева: Учеб. пособие для вузов/А.Е. Слухоцкий, В.С. Немков, Н.А. Павлов, А.В. Бамунер; Под ред. А.Е. Слухоцкого. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 328 с.
5. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1971. – 283 с.
6. Бонзель М. Производство стальной проволоки. – М. – Л.: ГОНТИ, 1941. – 435 с.