



СИНТЕЗ ИНДУКЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ СВАРКИ И ПАЙКИ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБ ПО ЗАДАННОМУ РАСПРЕДЕЛЕНИЮ МОЩНОСТИ В ЗОНЕ ШВА

А. С. Письменный, д-р техн. наук (Ин-т электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины)

Описаны метод синтеза электромагнитного поля и конструкции индуктора, реализуемые при использовании импедансных граничных условий и задании распределения удельной мощности на поверхности нагреваемой детали.

Ключевые слова: сварка, пайка, синтез, электромагнитные поля, индукторы, катушки (обмотки), трубы, фланцы

При сварке и пайке большое значение для получения качественного шва, соединяющего детали, имеет достижение заданных (по технологическим требованиям) распределений температуры и удельной мощности в зоне шва.

При использовании индукционного нагрева для указанной цели важной задачей является определение конструкции и размеров индуктора, зазора между индуктором и нагреваемыми деталями, а также электрических параметров индуктора, обеспечивающих заданный режим нагрева.

Указанную задачу традиционно решают методами последовательных приближений, обычно при постановке краевой задачи электромагнитного поля, возбуждаемого током индуктора (ток, форма и размеры индуктора задаются исходя из опыта расчета — нулевое приближение), в нагреваемых деталях и в окружающем их пространстве. Размеры и другие параметры индуктора определяют в ходе расчетов удельной мощности в зоне шва, повторяя процесс расчета до достижения нужного результата.

Очевидно, что такой подход является трудоемким и неоптимальным (с позиций разработчиков технологических процессов и оборудования для их реализации).

Для этих целей целесообразно применение таких методов синтеза, при которых необходимые параметры электромагнитного поля и конструкции индуктора определяют непосредственно по заданному распределению векторов поля вдоль поверхности нагреваемых деталей.

Существует ограниченное количество аналитических или численных решений подобных задач [1–3]. Например, в случае плоских электромагнитных полей возникает необходимость решения задачи Коши для уравнения Лапласа на полуплоскости. Это больше соответствует случаям, при которых независимой переменной является время, в отличие от задач, когда независимым аргументом служит пространственная координата, как в рассматриваемой задаче.

Дополнительным ограничением при решении задач синтеза является, во-первых, возможность задания на границе либо предельного значения потенциала, либо его нормальной производной. Независимое задание того и другого несет математическое противоречие, вследствие чего задача становится неразрешимой при строгой постановке. Во-вторых, решения задачи Коши для уравнения Лапласа неустойчивы по отношению к малым изменениям краевых условий, что приводит к необходимости существенного ограничения области поля, в которой можно получить приближенное решение [1, 2].

Существует, однако, возможность регуляризации задач синтеза, обеспечения разрешимости и устойчивости их решения путем применения при постановке задач импедансных граничных условий (ИГУ). Эти условия однозначно связывают значения потенциала и его нормальной производной (напряженностей электрического E и магнитного H полей). Целесообразно также применение граничных условий нового типа — энергетических, связывающих значение потенциала на границе тел с удельной мощностью (поверхностной P_e или объемной P_{ev}) [4–7].

Приведем методику решения упомянутых задач в терминах векторного потенциала магнитного поля $\vec{A}(r, \theta, z)$ в цилиндрической системе координат.

Ставится задача определения конструкции, размеров и электромагнитных параметров расположенного вне поверхности нагреваемого тела индуктора, обеспечивающего заданные распределения электромагнитного поля и удельной мощности в зоне шва, а значит, и заданный режим ее нагрева.

Векторный потенциал в области, являющейся внешней по отношению к нагреваемому телу, должен удовлетворять уравнению Лапласа

$$\Delta \vec{A} = 0 \quad (1)$$

и условию излучения на бесконечности [8]

$$\lim_{r, z \rightarrow \infty} \vec{A} = 0 \quad (2)$$

На поверхности нагреваемого тела выполняется ИГУ, в общем случае справедливое для расчета двух- и трехмерных полей, в том числе для тел с криволинейными границами:

$$[\vec{n} \times \vec{E}_e] = Z_e [\vec{n} \times [\vec{n} \times \vec{H}_e]], \quad (3)$$

где \vec{n} — орт нормали к поверхности нагреваемого тела; Z_e — волновое сопротивление поверхности тела (нормальный поверхностный импеданс) в той же точке; $\vec{E}_e = -j\omega \vec{A}_e$ — для комплексных амплитуд векторов электромагнитного поля и рассматриваемого здесь случая задач с осевой симметрией нагреваемых тел и токоведущих контуров; $\vec{H}_e = (1/\mu_0) \text{rot}_e \vec{A}_e$.

В данной задаче \vec{A}_e является известной функцией координат и удельной мощности [4–7]:

$$\vec{A}_e = jZ_e (2P_e \text{Re}[Z_e])^{1/2} / \omega \quad (4)$$

при заданном распределении P_e и

$$\vec{A}_e = (\rho P_{ev})^{1/2} / \omega \quad (5)$$

при заданном распределении P_{ev} .

Наиболее простым и удобным для решения краевой задачи (1)–(4) или (1)–(3), (5) является метод аналитического продолжения на основе равномерного приближения искомой функции рядом Тейлора [1]. При этом не всегда может быть удовлетворено условие на бесконечности (2). Однако зачастую это не имеет практического значения, так как необходимо обеспечить заданную точность в определении электромагнитного поля в ближней окрестности нагреваемых деталей (в пределах воздушного зазора между деталями и индуктором).

После определения поля следует выполнить этап физической реализации краевых условий за пределами заданной окрестности деталей, но в пределах области, в которой определено поле путем размещения источников поля вдоль выбранной границы: линейной плотности тока (численно равной тангенциальной компоненте напряженности поля) и ферромагнетиков (магнитопроводов) — вдоль эквипотенциальных участков границы. На этом решение задачи синтеза завершается [1].

С учетом условий технической реализуемости полученной идеальной конструкции индуктора практически невозможно точно реализовать получающееся распределение плотности тока. Проблема заключается в том, что в действительности



источниками электромагнитного поля индуктора являются контуры тока и системы контуров (витков обмотки). Они имеют конечные размеры и зачастую мало зависящее от токов в нагреваемых деталях распределение плотности тока вдоль обращенной к деталям поверхности витков индуктора.

Поэтому при решении задачи целесообразно сразу учесть известную информацию об источниках поля и ввести ее в рассмотрение в явном виде, поскольку в силу цилиндрической симметрии известна их структура. При этом можно еще более упростить процедуру синтеза.

В новой постановке для того, чтобы учесть известную структуру источников поля, необходимо ввести условие допустимой погрешности реализации заданного на поверхности нагреваемых деталей векторного потенциала \vec{A}_e :

$$|\vec{A}_e - \vec{A}_{ei}| < \epsilon, \quad (6)$$

где \vec{A}_{ei} — векторный потенциал магнитного поля, генерированный на поверхности нагреваемых деталей током индуктора; $\epsilon \geq 0$ — произвольное малое число, определяющее допустимую погрешность в реализации поля на поверхности деталей.

При этом целесообразно изменить постановку задачи синтеза, сформулировать ее как задачу минимизации функционала

$$F = \iint_S [\vec{A}_e(r_{ek}, z_{ek}) - \vec{A}_{ei}(I_i, r_i, z_i)]^2 drdz, \quad (7)$$

где I_i — ток индуктора; индекс i относится к координатам источников электромагнитного поля (индуктору), а индекс k — к координатам зоны поверхности нагреваемых деталей, в которых задано распределение (4) или (5).

Благодаря тому, что функционал (7) необходимо решать для поверхности деталей, он существенно упрощается и принимает вид

$$F = \int_L [\vec{A}_e(r_{ek}, z_{ek}) - \vec{A}_{ei}(I_i, r_i, z_i)]^2 dx. \quad (8)$$

В том случае, если функции (4) или (5) заданы в ограниченном числе точек поверхности нагреваемых деталей (точках коллокации), то можно использовать запись функционала (8) в форме

$$F = \sum_{k=1}^N [\vec{A}_e(r_{ek}, z_{ek}) - \vec{A}_{ei}(I_i, r_i, z_i)]^2 = 0, \quad (9)$$

где k — номер точки коллокации; N — количество точек коллокации.

Полученное решение задачи синтеза по определению удовлетворяет уравнениям электромагнитного поля и граничным условиям. Поэтому оно является искомым решением в силу теоремы единственности решения для системы уравнений Максвелла [8].

Указанным путем был выполнен синтез конкретных индукционных систем для нагрева под пайку и сварку труб [4] и фланцевых соединений [6] труб.

Экспериментальная проверка показала, что погрешность расчетов по разработанному методу лежит в пределах единиц процентов. Это позволяет рекомендовать его для применения при разработке и проектировании оборудования для технологических процессов.

1. Колесников Э. В. Синтез двумерного магнитного поля у ферромагнитной плоскости // Изв. вузов. Электромеханика. — 1966. — № 5. — С. 487–505.
2. Колесников Э. В. Синтез магнитного поля с помощью магнетиков конечной проницаемости // Там же. — № 7. — С. 691–709.
3. Волынский Б. А., Бухман В. Е. Модели для решения краевых задач. — М.: Физматгиз, 1960. — 452 с.
4. Письменный А. С. Синтез индукционных систем для сварки и пайки // Автомат. сварка. — 1990. — № 5. — С. 11–15.
5. Письменный А. С. Расчет индукционных систем электротермической гибки сварных трубопроводов // Там же. — 1991. — № 10. — С. 39–42.
6. Письменный А. С., Прокофьев А. С., Шиплов М. Е. Синтез индукционных систем для пайки фланцевых соединений труб по заданному распределению мощности в зоне шва // Там же. — 1999. — № 8. — С. 17–21.
7. Письменный А. С. Импедансные граничные условия на поверхности электропроводных тел в задачах электротермии // Доп. НАН України. — 1995. — № 1. — С. 64–66.
8. Кошляков Н. С., Глинер Э. Б., Смирнов М. М. Уравнения в частных производных математической физики. — М.: Высш. шк., 1970. — 712 с.

Method of synthesis of electromagnetic field and design of inductor are described. The method is realized by using impedance boundary conditions and preset distribution of specific power at the workpiece surface being heated.

Поступила в редакцию 25.07.2000

УДК 621.778.28:331.875.4

ПРАВКА ЭЛЕКТРОДНОЙ ПРОВОЛОКИ НА АВТОМАТАХ

С. А. ВАСИЛИШИН, канд. техн. наук (КПО «Призма-Пресс», г. Хмельницкий, Украина)

Описаны виды и особенности технологических процессов правки металлических материалов из бунта. Рассмотрены конструкции правильных рамок и отличия их работы. Предложена усовершенствованная конструкция правильной рамки, позволяющая устанавливать различные схемы ее регулировки в зависимости от диаметра и вида материала, подвергаемого правке.

Ключевые слова: правка проволоки, роликовая правка, всесторонняя правка, правильная рамка, конструкции, схемы настройки

При всем многообразии технологических процессов и конструкций оборудование по изготовлению изделий из проволоки (в частности электродов) имеет общие операции. Среди них наиболее важной является правка проволоки из бунта.

В зависимости от требований, предъявляемых к качеству правки, а также от профиля поперечного сечения исходного материала существуют два основных принципиально различных технологических процесса правки материала в бунтах:

роликовая правка в двух взаимно перпендикулярных плоскостях посредством многократного поперечного пластического изгиба (роликовые правильные машины);

всесторонняя правка путем многократного пластического поперечного изгиба в сухарях (фильерах) вращающейся правильной рамки.

Правка металла с помощью роликов обычно применяется для сортового и фасонного проката. Для обеспечения этого процесса в двух плоскостях часть роликов устанавливают в горизонтальной плоскости, другую — в вертикальной. В этих машинах правка осуществляется между двумя рядами роликов, причем ролики одного ряда размещены по отношению к роликам другого ряда в шахматном порядке. Материал при прохождении между роликами подвергается многократным, чере-