Verification of the mathematical model of the induction soldering technological process

Vyacheslav S Marayev

Siberian Federal University, Informatics Department, Krasnoyarsk, Russian Federation

E-mail: slava9517538426@gmail.com

Abstract. The paper has devoted to the research of the construction and verification of the mathematical model of the process of heating the elements of the thin-walled aluminum waveguide path in the development of the induction soldering technological procedure. The paper has reviewed the method of mathematical modeling of the induction soldering technological process. Comparative research of the induction soldering models of waveguide paths have carried out for their compliance with the real process in permissible limits. Experimental verification of the correctness of the selected mathematical model of the process of the induction soldering is performed. As a result of inventory and model experiments, it has established that the developed mathematical model of induction heating of the assembly elements of thin-wing aluminum waveguide paths of cosmic aircraft with a sufficiently high accuracy simulates this technological process.

Ключевые слова: waveguide path, induction soldering, process modeling, mathematical model, model verification, automated control

УДК 621.372.83.001.24

Верификация математической модели технологического процесса индукционной пайки

Вячеслав Сергеевич Мараев

Сибирский Федеральный Университет, кафедра информатики Института космических и информационных технологий, Красноярск, Российская Федерация

E-mail: slava9517538426@gmail.com

Аннотация. Работа посвящена исследованию построения и верификации математической модели процесса нагрева элементов тонкостенного алюминиевого волноводного тракта при отработке технологической процедуры индукционной пайки. В статье проводится обзор метода математического моделирования технологического процесса индукционной пайки. Проведены сравнительные исследования моделей индукционной пайки волноводных трактов на предмет их соответствия реальному процессу в допустимых пределах. Выполнена экспериментальная проверка корректности выбранной математической модели технологического процесса индукционной пайки. В результате натурных и модельных экспериментов установлено, что реализованная математическая модель индукционного нагрева элементов сборки тонкостенных алюминиевых волноводных трактов космических летательных аппаратов с достаточно высокой степенью точности моделируют данный технологический процесс.

Ключевые слова: волноводный тракт, индукционная пайка, моделирование процесса, математическая модель, верификация модели, автоматизированное управление

1. Введение

Метод создания неразъемных соединений на основе индукционного нагрева широко используется при производстве тонкостенных алюминиевых волноводных трактов в аэрокосмической промышленности. Применение паяных тонкостенных волноводных трактов в составе конструкции космических аппаратов позволяет сократить межблочные расстояния между элементами полезной нагрузки, размещая ее при этом более компактно. Это, в свою очередь, позволяет снизить габариты и массу космических аппаратов на 15-20%, либо увеличить пропускную способность космических аппаратов при заданном ограничении по массе [1-3].

Однако применение таких высоко технологичных методов формирования неразъёмных соединений усложняется наличием ряда внешних факторов, наибольшую сложность из которых представляют:

 низкая степень повторяемости неавтоматизированного (ручного) процесса пайки/сварки;

- 2. сложность, а порой и невозможность визуального контроля нагрева деталей;
- 3. искажение электромагнитных полей оборудования, вследствие его взаимодействия с различными проводящими телами, находящимися вблизи зоны нагрева;
- наложение помех на средства измерения, использующиеся при автоматизации процессов сварки/пайки, за счет действия мощных источников излучений вблизи процесса;
- 5. большие экономические потери при досрочном прекращении технологического процесса вследствие сбоя аппаратного или программного обеспечения;
- 6. влияние человеческого фактора [4-6].

Выше обозначенные проблемы управления современными процессами формирования неразъемных соединений могут быть решены в результате внедрения интеллектуальных технологий обработки информации и принятия решений в условиях неопределенности, что позволит проводить оценку достоверности получаемой из зоны нагрева информации, оценивать погрешности средств измерения и формировать адекватное управление технологическим процессом с целью повышения его точности и повторяемости [7-9].

Однако для внедрения подобных интеллектуальных методов необходимы высокоточные математические модели технологического процесса индукционной пайки. Таким образом, актуальной задачей является обзор, подбор и автоматизация разработки математических моделей для каждого элементов волноводного тракта.

В данной статье мы проведём обзор метода математического моделирования технологического процесса индукционной пайки, реализуем модель процесса нагрева волноводного тракта в процессе индукционной пайки и проведём сравнительное исследование построенных моделей на предмет их соответствия реальному процессу в допустимых пределах, таким образом проведя верификацию выбранных математических моделей.

2. Математическая модель технологического процесса индукционной пайки

В качестве математической модели нагрева волноводного тракта с целью отработки технологического процесса индукционной пайки используется мгновенный источник нагрева в плоском стержне (1):

$$T(x,t) = \int_0^t \frac{Q}{F c p \sqrt{4\pi a t}} e^{(-\frac{x^2}{4at} - bt)} + d$$
(1)

$$b = \frac{\alpha p}{c p F} \tag{2}$$

где Q – количество тепла [Дж], F – поперечное сечение трубы [м2], x – расстояние от источника тепла [м], $c\rho$ – объемная теплоемкость [Дж/м3], t – время [сек], b – коэффициент тепловой конвекции во внешнюю среду с поверхности стержня (2), d – поправочный коэффициент (высчитывается эмпирически), α – коэффициент теплопроводности, p – периметр сечения [10].

В качестве примера элемента волноводного тракта возьмём тонкостенную алюминиевую трубу сборки волноводного тракта. Для моделирования процесса нагрева трубы сборки волноводного тракта следует исходить из соображений, что:

- 1. труба волноводного тракта представляет собой достаточно длинное тело из однородного материала,
- 2. труба волноводного тракта имеет относительно одинаковое поперечное сечение по всей длине,
- труба волноводного тракта имеет схожий механизм теплопередачи и теплопроводности [11-13].

Из чего можно сделать вывод, что математическая модель плоского источника тепла в стержне справедлива для плоского источника тепла в прямоугольной трубе сборки волноводного тракта [14-16]. Таким образом мы вводим лишь геометрическое ограничение с одной стороны стержня, обозначая и учитывая ограниченность трубы со стороны вылета фланца при формирования соответствующего соединения [17-19]. Делая допущение о том, что волноводная труба равномерно нагревается по всему сечению, так как толщина стенок составляет 2мм, а конструкция индуктора такова, что вызывает равномерный нагрев по ее периметру. На рисунке 1 показана типовая труба сборки волноводного тракта в реалистичном изображении.

Рисунок 1. Концептуальное изображение трубы сборки волноводного тракта.

Расчётная формула (4) для процесса нагрева волноводной трубы с привязкой к конкретному типоразмеру в таком случае представляет собой:

$$T(x,t) = \sum_{j=\{-1,1\}} \frac{Q}{Fcp\sqrt{4at}} exp^{\left(-\frac{(x+jl)^2}{4at} - bt\right)} + d$$
(4)

Для экспериментального построения и последующей верификации примера модели технологического процесса индукционной пайки трубы сборки волноводного тракта возьмём конкретную трубу типоразмерами 22 х 11 мм. Её проекции изображены на рисунке 2, где *F* – площадь сечения трубы, *p* – периметр сечения.



Рисунок 2. Проекции трубы сборки волноводного тракта с типоразмерами.

На рисунке 3 представлен график модели нагрева трубы сборки волноводного тракта для разных значений мощности источника индукционного нагрева, где: синий график – температура трубы при мощности нагрева 11 кВт, оранжевый график – температура трубы при мощности нагрева 3 кВт.



Рисунок 3. График модели нагрева трубы сборки волноводного тракта.

45

Теперь необходимо провести верификацию представленной математической модели нагрева волноводного тракта в процессе индукционной пайки на экспериментальных данных.

3. Верификация математической модели процесса индукционной пайки

Проверим корректность выбранной математической модели технологического процесса индукционной пайки. Для этого проведём сравнительное исследование моделей индукционной пайки волноводных трактов, которые построены с использованием программного средства реализации математических моделей на предмет их соответствия реальному процессу в допустимых пределах.

Эксперименты проводились на программно-аппаратном комплексе по управлению процессом индукционной пайки волноводных трактов. Структурно установка состоит из следующих компонентов:

- 1. генератор индукционного нагрева;
- 2. устройство согласования;
- 3. набор индукторов с рабочими окнами прямоугольного сечения;
- 4. манипулятор-позиционер;
- 5. индуктор;
- 6. консоль управления;
- 7. амперметр.

В качестве компьютера используется промышленный компьютер IPPC-9171G-07ВТО, имеющий компактное исполнение, защищенное от помех, позволяющее использовать для соединения с внешними устройствами ввода/вывода информации интерфейсную плату PCI-1710 и дополнительные разъемы RS-232. Наличие сенсорного экрана делает работу для оператора более удобной и наглядной. Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 4.



Рисунок 4. Установка индукционной пайки.

46

В качестве примера для опыта по сопоставлению результатов экспериментальных исследований и моделирования используем ту же тонкостенную алюминиевую трубу сборки волноводного тракта 22 х 11 мм (рисунок 2). На рисунке 5 представлены сводные данные для сравнения модельных графиков и графиков реального технологического процесса индукционного нагрева элемента сборки волноводного тракта при разных значениях мощности источника индукционного нагрева. Где синий график – график волноводной сборки (модель), мощность 11 кВт; оранжевый график – график волноводной сборки (реальный процесс), мощность 11 кВт; зеленый график – график волноводной сборки (модель), мощность 5 кВт; красный график – график волноводной сборки (модель), мощность 5 кВт; синий график – график волноводной сборки (модель), мощность 5 кВт; синий график – график волноводной сборки (реальный процесс), мощность 5 кВт; синий график – график волноводной сборки (модель), мощность 5 кВт; синий график – график волноводной сборки (модель), мощность 3 кВт. Реальные экспериментальные данные об изменении температуры доступны только начиная от 200 °C поскольку имеющиеся пирометры имеют диапазон измеряемых температур 200-1800 градусов. Однако имеющихся данных вполне хватит чтобы корректно оценить качество моделирования технологического процесса индукционной пайки.



Рисунок 5. Сравнительный график модели и реального технологического процесса индукционного нагрева элемента сборки волноводного тракта.

В таблице 1 приведены значения среднеквадратичных отклонений результатов моделирования и реальных технологических процессов индукционной пайки волноводных трактов.

47

Modern Innovations, Systems and Technologies, 2022, 2(1)

Таблица 1	. Таблиц	а среднеквадратичных
отклонений.		
Мощность ист	очника	Среднеквадратичное
нагрева, Р		отклонение
3 кВт		2,3 °C
5 кВт		2,1 °C
11 кВт		1,9 °C

Как видно из представленных выше графиков, а также данных об относительно низком значении среднеквадратической ошибки, представленных в таблице 1, реализованные модели индукционного нагрева элементов сборки тонкостенных алюминиевых волноводных трактов космических летательных аппаратов с достаточно высокой степенью точности моделируют данный технологический процесс.

Результаты натурных и модельных экспериментов показывают, что реализованные предложенные математические модели технологического процесса индукционной пайки, можно использовать для отработки разных режимов работы технологического процесса индукционной пайки тонкостенных волноводных трактов космических летательных аппаратов.

5. Заключение

В рамках данной работы была рассмотрена, построена и верифицирована математическая модель процесса нагрева элементов тонкостенного алюминиевого волноводного тракта при отработки технологической процедуры индукционной пайки.

Выполнена экспериментальная проверка корректности выбранной математической модели технологического процесса индукционной пайки. Проведены сравнительные исследования моделей индукционной пайки волноводных трактов, которые построены с использованием программного средства реализации математических моделей на предмет их соответствия реальному процессу в допустимых пределах. Выполнено экспериментальное сравнение корректности выбранной математической модели технологического процесса индукционной пайки и правильности её реализации.

В результате натурных и модельных экспериментов установлено, что реализованные модели индукционного нагрева элементов сборки тонкостенных алюминиевых волноводных трактов космических летательных аппаратов с достаточно высокой степенью точности моделируют данный технологический процесс.

Целью дальнейших исследований может являться автоматизация и повышение точности моделирования технологического процесса индукционной пайки волноводных трактов путём внедрения интеллектуальных методов анализа данных и построения моделей.

Список литературы

- [1] Tynchenko, V. S. The automated system for technological process of spacecraft's waveguide paths soldering / V. S. Tynchenko, A. V. Murygin, O. A. Emilova, A. N. Bocharov, V. D. Laptenok // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. T. 155. № 1. P. 012007.
- [2] Tynchenko, V. S. A control algorithm for waveguide path induction soldering with product positioning / V. S. Tynchenko, A. V. Murygin, V. E. Petrenko, Y. N. Seregin, O. A. Emilova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. T. 255. № 1. P. 012018.
- [3] Murygin, A. V.Complex of automated equipment and technologies for waveguides soldering using induction heating / A. V. Murygin, V. S. Tynchenko, V. D. Laptenok, O. A. Emilova, A. N. Bocharov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. T. 173. № 1. P. 012023.
- [4] Milov, A. V. Neural Network Modeling to Control Process of Induction Soldering / A. V. Milov, V. S. Tynchenko, A. V. Murygin // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – 2019. – P. 1-5.
- [5] Milov, A. V. Algorithmic and software to identify errors in measuring equipment during the formation of permanent joints / A. V. Milov, V. S. Tynchenko, V. E. Petrenko // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). – 2018. – P. 1-5.
- [6] Milov, A. V. Use of artificial neural networks to correct non-standard errors of measuring instruments when creating integral joints / A. V. Milov et al. // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – № 1118(1). – P. 012037.
- [7] Bukhtoyarov, V. V. Intelligently informed control over the process variables of oil and gas equipment maintenance / V. V. Bukhtoyarov et al. // International Review of Automatic Control. 2019. № 12(2). P. 59-66.
- [8] Bocharova, O. A. Induction heating simulation of the waveguide assembly elements /
 O. A. Bocharova et al. // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing. 2019.
 № 1353(1). P. 012040.
- [9] Murygin, A. V. Modeling of thermal processes in waveguide tracts induction soldering / A. V. Murygin et al. // IOP Conference Series: Materials science and engineering. – IOP Publishing. – 2017. – № 173(1). – P. 012026.

- [10] Milov, A. Intellectual Control of Induction Soldering Process using Neuro-fuzzy Controller /
 A. Milov, V. Tynchenko, V. Petrenko // International Russian Automation Conference (RusAutoCon). –2019. – P. 1-6.
- [11] Zhu, T. The study of the effect of magnetic flux concentrator to the induction heating system using coupled electromagnetic-thermal simulation model / T. Zhu et al. //2013 International Conference on Mechanical and Automation Engineering. – 2013. – P. 123-127.
- [12] Pánek, D. Reduced-order model based temperature control of induction brazing process / Pánek
 D. et al. // Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ) & 2019
 Symposium on Electrical Engineering and Mechatronics (SEEM). –2019. P. 1-4.
- [13] Eftychiou, M. A. A detailed thermal model of the infrared reflow soldering process /
 M. A. Eftychiou, T. L. Bergman, G. Y. Masada // J. Electron. Packag. 1993. № 115(1).
- [14] Вдовин, К. Н. Программное обеспечение для математического моделирования индукционного нагрева и закалки цилиндрических деталей / К. Н. Вдовин, Л. Г. Егорова, М. В. Гуков // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2012. – №. 2. – С. 40-45.
- [15] Долгих, И. Ю. Математическое моделирование электромагнитных и тепловых процессов при индукционном нагреве / И. Ю. Долгих, А. Н. Королев, В. М. Захаров // Электротехника. Энергетика. Машиностроение. – 2014. – С. 85-88.
- [16] Шарапова, О. Ю. Численное моделирование процесса периодического индукционного нагрева на базе конечно-элементного программного пакета FLUX / О. Ю. Шарапова // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2010. – №. 7.
- [17] Черных И. В. Пакет ELCUT: моделирование устройств индукционного нагрева /
 И. В. Черных // Научно-практический журнал Exponenta Pro. Математика в приложениях. 2003. №. 2.
- [18] Zeller, U. Multiphysics simulation of induction soldering process / Zeller U. et al. // IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC)(A Joint Conference of 45th IEEE PVSC, 28th PVSEC & 34th EU PVSEC). – 2018. – P. 654-659.
- [19] Papargyri, L. Modelling and experimental investigations of microcracks in crystalline silicon photovoltaics: A review / L. Papargyri et al. //Renewable Energy. – 2020. –Vol. 145. – P. 2387-2408.