

УДК 621.372.83.001.24
DOI: 10.15827/0236-235X.125.167-173

Дата подачи статьи: 17.09.18
2019. Т. 32. № 1. С. 167–173

Система автоматизации индукционной пайки на основе двух контуров управления с позиционированием заготовки

*В.С. Тынченко*¹, к.т.н., доцент, *vadimond@mail.ru*

*В.Д. Лаптенюк*¹, д.т.н., профессор, *ius_laptenok@sibsau.ru*

*В.Е. Петренко*¹, аспирант, *dpblra@inbox.ru*

*А.В. Мурыгин*¹, д.т.н., профессор, зав. кафедрой, *avm54@mail.ru*

*А.В. Милов*¹, аспирант, *antnraven@ieee.org*

¹ *Сибирский государственный университет науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнева, кафедра информационно-управляющих систем, г. Красноярск, 660037, Россия*

В статье предлагается решение проблемы автоматизированного управления процессом индукционной пайки алюминиевых волноводных трактов на основе двух контуров управления с позиционированием заготовки. В рамках работы анализируются особенности технологического процесса индукционной пайки алюминиевых волноводных трактов, а также становится очевидной необходимость его автоматизации с применением программной системы.

Разработанный программный продукт производит контроль процесса нагрева изделия по двум контурам: первый контур – это управление скоростью нагрева элементов волноводного тракта, второй – управление перемещением сборки волновода относительно плоскости индуктора. Использование разработанной автоматизированной системы позволяет обеспечить качественное управление технологическим процессом индукционной пайки, а следовательно, снизить количество бракованных изделий.

Программное решение представляет собой приложение для операционной системы Windows, совместимое с версиями Windows XP/7/8/8.1/10. Приложение разработано с использованием языка программирования C++ и среды разработки Embarcadero RAD Studio XE7. Разработка велась с использованием объектно-ориентированного подхода.

В статье приведены структура автоматизированной системы, алгоритм ее работы, а также диаграмма переходов экранных форм. В процессе проектирования с применением языка UML построены диаграммы вариантов использования системы и переходов состояний. Представленное программное решение содержит функционал настройки средств измерения и параметров технологического процесса индукционной пайки, кроме того, возможен просмотр графиков температур деталей изделия. Имеется возможность просмотра и редактирования БД технологических процессов.

Апробация решения проводилась в рамках серии экспериментов, показавших высокое качество управления технологическим процессом индукционной пайки.

Ключевые слова: *автоматизированная система, автоматизированное управление, волноводный тракт, индукционная пайка, программный продукт.*

Технология индукционного нагрева широко применяется на предприятиях отечественной промышленности как для формирования неразъемных соединений элементов изделий, так и для поддержки технологических операций улучшения физических свойств материалов изделий. Метод индукционного нагрева для формирования паяных соединений хорошо зарекомендовал себя при производстве трактов антенно-фидерных устройств. Внедрение такого способа позволяет улучшить их радиотехнические характеристики, снизить массогабаритные показатели до 40 %, сократить затраты на изготовление в 2–2,5 раза по сравнению с аналогами, произведенными с использованием технологий сварки.

Применение такого высокотехнологичного метода формирования неразъемных соединений усложняется наличием ряда внешних факторов, особенно следующими:

- низкая степень повторяемости неавтоматизированного технологического процесса;
- проблемы, связанные со зрительным контролем за степенью нагрева деталей изделия;
- искажение электромагнитных полей оборудования вследствие его взаимодействия с различными про-

водящими телами, находящимися вблизи зоны нагрева;

- наложение помех на средства измерения, используемые при автоматизации процессов пайки, за счет действия мощных источников излучения вблизи процесса;

- большие экономические потери при досрочном прекращении технологического процесса вследствие сбоя программного или аппаратного обеспечения;

- влияние человеческого фактора.

В [1, 2] описана разработка автоматизированного оборудования и технологии индукционной пайки алюминиевых волноводных трактов космических аппаратов. Однако ПО, используемое для управления данным технологическим процессом, представляет собой реализацию ПИД-регулятора. Этот метод управления не обеспечивает достаточного контроля за параметрами быстро протекающего процесса [3, 4]. Данная автоматизированная система обладает рядом недостатков. Программа управления режимом нагрева позволяет воспроизводить временную характеристику температуры нагрева лишь для одного элемента соеди-

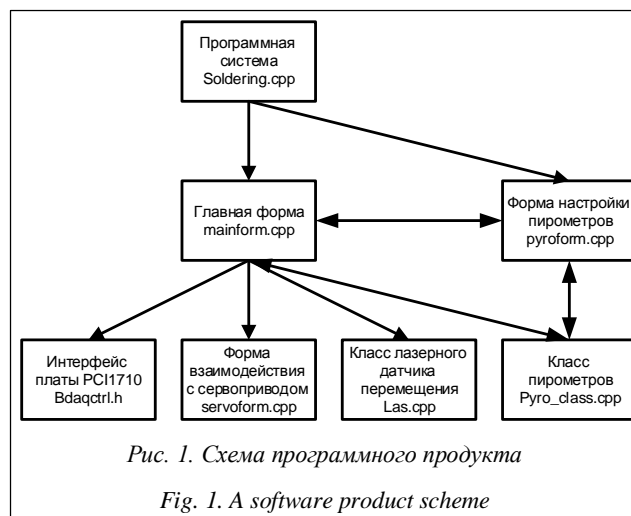
нения – волноводной трубы. При этом температура второго элемента – фланца может существенно отличаться от температуры трубы. Выбором исходного расстояния от фланца до индуктора удастся уменьшить разность температур в окрестности температуры плавления припоя. Однако полностью устранить разброс температур не удастся из-за разброса толщин волноводных труб, которые могут составлять до 20 % от номинальных толщин. Проблема может быть решена с помощью автоматической корректировки расстояния от фланца до индуктора во время технологического процесса пайки. Структура системы управления при этом становится двухконтурной и взаимосвязанной.

Структура и алгоритмы работы ПО

Программное решение представляет собой приложение для операционной системы Windows, совместимое с версиями Windows XP/7/8/8.1/10. Приложение разработано с использованием C++ и объектно-ориентированного подхода [5–7].

Для работы с COM-портами использовались средства WinApi [8, 9], а с платой сбора данных PCI-1710 – сторонняя библиотека bdaqctrl.h [10].

Структура приложения представлена на рисунке 1.



Исходный код программного приложения разнесен по нескольким файлам:

- основной файл программной системы включает в себя основную функцию системы, в рамках которой осуществляются запуск и функционирование;
- главная форма реализует функционал главного окна системы;
- форма настройки пирометров реализует алгоритмы работы с информацией о пирометрических датчиках измерения температуры;
- интерфейс платы PCI1710 предназначен для обработки данных термопар и управления уставкой мощности;

- в классе пирометров представлены описание класса пирометров, логика взаимодействия с пирометрами, а также функционал их настройки;

- класс лазерного датчика перемещения включает в себя алгоритмы взаимодействия с датчиками, а также функционал его настройки;

- форма взаимодействия с сервоприводом реализует логику работы с сервоприводом.

В системе реализованы два пользовательских класса: класс пирометра Pyro и класс лазерного датчика перемещения Las.

Класс пирометров включает в себя следующий функционал: работа с лазером пирометрического датчика, получение состояния лазера пирометрического датчика, серийного номера пирометрического датчика, нижней границы температуры, регистрируемых пирометрическим датчиком, верхней границы температур, регистрируемых пирометрическим датчиком, текущего значения температуры, регистрируемой пирометрическим датчиком, коэффициента эмиссии, задание коэффициента эмиссии, автоматический расчет коэффициента эмиссии.

Класс Las хранит всю информацию о подключении лазерного датчика перемещения и его параметры. Используя данный класс, можно производить получение последнего записанного в класс измерения, запросы состояния потока и идентификации, последнее измерение датчика, защелкивание результата, считывание с защелки, включение/выключение лазера, формирование/стирание границ измерения.

На рисунке 2 представлена диаграмма вариантов использования в нотации UML [11–14].

На диаграмме показаны основные варианты использования в рамках разрабатываемой системы управления индукционной пайкой на основе нечеткого регулятора. Выделены актеры: оператор и технолог.

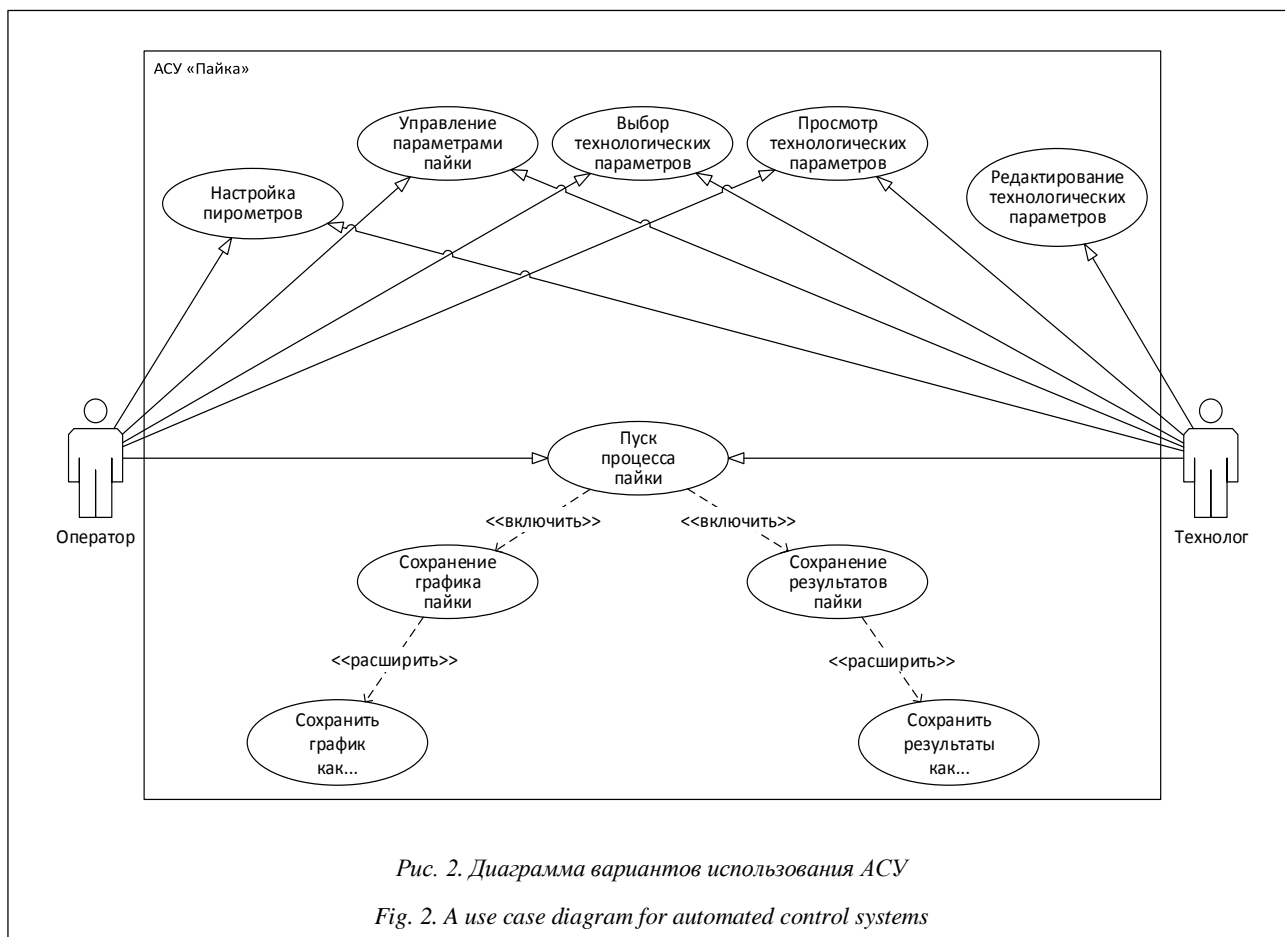
Функции, доступные оператору: настройка пирометрических датчиков, управление параметрами пайки, просмотр параметров технологического процесса пайки, выбор параметров технологического процесса пайки, пуск технологического процесса пайки.

Технологу доступны все действия, которые может выполнить оператор, а также возможность редактировать таблицу технологических параметров пайки.

Технолог и оператор также имеют возможность сохранять результаты пайки в виде графика или текстового файла после завершения процесса пайки.

Блок-схема работы программной системы приведена на рисунке (см. <http://www.swsys.ru/uploaded/image/2019-1/2019-1-dop/1.jpg>).

Вначале происходят инициализация всех структур данных, а также настройка портов и интерфейсов. Для наибольшей точности измерения перед открытием основного окна производится принудительное отключение лазеров пирометрических датчиков измерения температуры.



При завершении работы с программным продуктом производится закрытие всех портов, а также отключение платы сбора данных и индуктора.

При первоначальной настройке с помощью опроса пирометрических датчиков получается следующая информация: серийный номер, минимальная измеряемая пирометром температура, максимальная измеряемая пирометром температура, коэффициент излучательной способности деталей изделия, настроенной на пирометрическом датчике.

Запуск процесса автоматической индукционной пайки осуществляется кнопкой «Пуск». Управление процессом нагрева деталей изделия выполняется на основе пропорционального регулятора [15, 16]. Алгоритм, реализующий пропорциональный регулятор, используется для обеспечения необходимой скорости нагрева изделия [17]. Как только изделие нагревается до температуры стабилизации, алгоритм обеспечивает поддержание данной температуры в течение времени стабилизации.

На рисунке 3 представлена блок-схема управления процессом пайки.

Схема управления технологическим процессом позволяет эффективно управлять индукционной пайкой волноводных трактов с дискретностью 20 раз в секунду. Серия экспериментов показала, что такое зна-

чение дискретности обеспечивает достаточное качество управления процессом индукционной пайки волноводных трактов космических аппаратов.

Описание работы с автоматизированной системой

В рамках обеспечения безопасности в системе предусмотрены следующие уровни разграничения доступа:

- уровень доступа «оператор»; устанавливает разрешения на управление технологическим комплексом, а также на просмотр параметров технологического процесса индукционной пайки (см. <http://www.swsys.ru/uploaded/image/2019-1/2019-1-dop/14.jpg>);
- уровень доступа «технолог»; к уровню доступа «оператор» дает дополнительно возможности редактировать технологические параметры процесса индукционной пайки волноводных трактов.

В главном окне системы «оператор» пользователю доступен функционал просмотра графика нагрева изделия. Кроме того, пользователь может использовать управляющие элементы, сгруппированные по функциональности. Эти группы отмечены на рисунке цифрами 1–3. В первой группе собраны управляющие элементы, предназначенные для управления параметрами

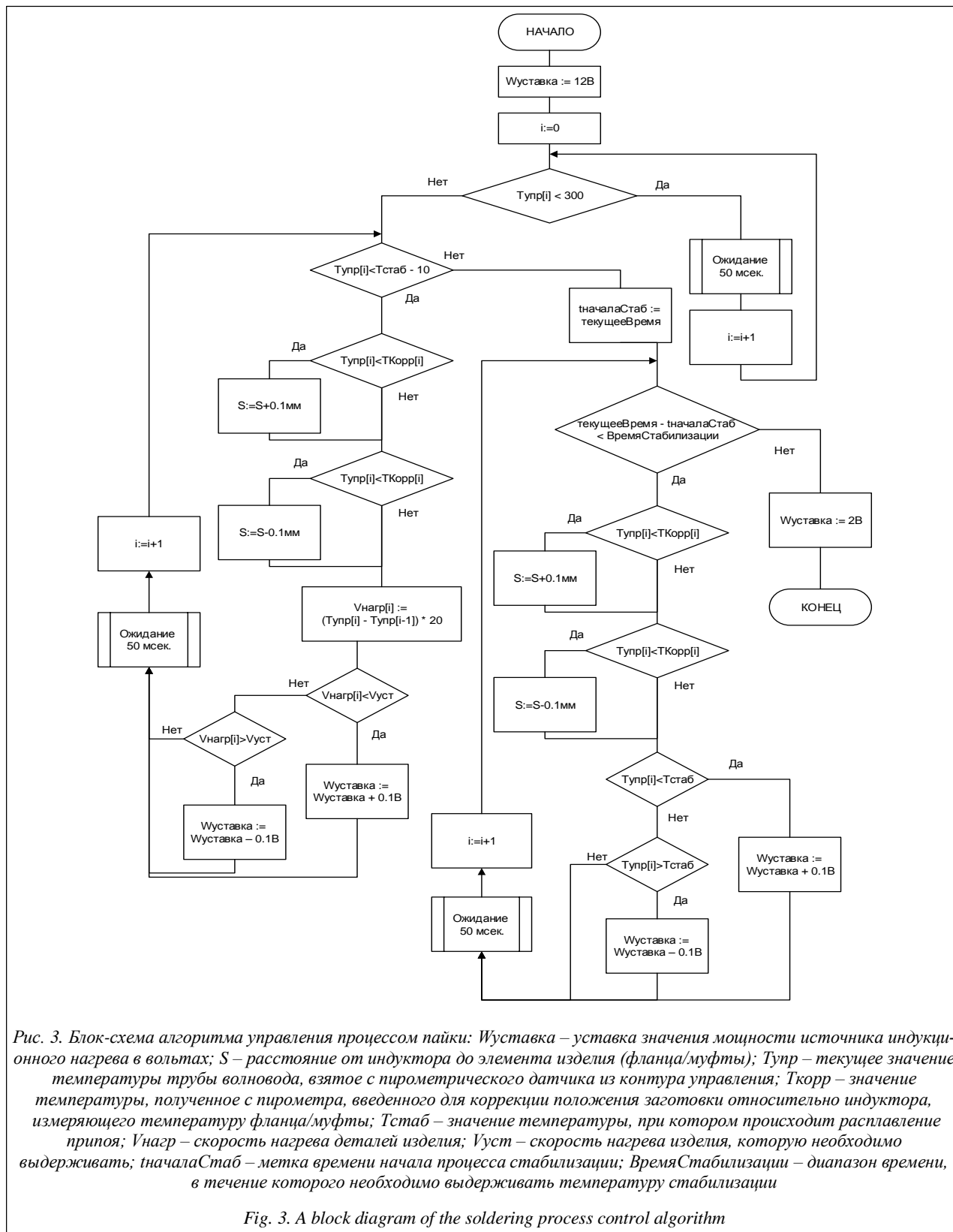


Рис. 3. Блок-схема алгоритма управления процессом пайки: Wуставка – уставка значения мощности источника индукционного нагрева в вольтах; S – расстояние от индуктора до элемента изделия (фланца/муфты); Tупр – текущее значение температуры трубы волновода, взятое с пирометрического датчика из контура управления; ТКорр – значение температуры, полученное с пирометра, введенного для коррекции положения заготовки относительно индуктора, измеряющего температуру фланца/муфты; Tстаб – значение температуры, при котором происходит расплавление припоя; Vнагр – скорость нагрева деталей изделия; Vуст – скорость нагрева изделия, которую необходимо выдерживать; tначалаСтаб – метка времени начала процесса стабилизации; ВремяСтабилизации – диапазон времени, в течение которого необходимо выдерживать температуру стабилизации

Fig. 3. A block diagram of the soldering process control algorithm

технологического процесса индукционной пайки. Элементы второй группы предназначены для работы с лазерами пирометрических датчиков, а в третьей груп-

пе собраны элементы управления сервоприводом, а именно кнопки управления приводом, границами перемещения, а также начальной мощностью генератора.

Кнопка «Стоп» предназначена для аварийной остановки технологического процесса при возникновении нештатных ситуаций.

В отличие от рассмотренного вида главного окна программной системы для «оператора» для «технолога» предоставлены дополнительная панель управления в главном окне (см. <http://www.swsys.ru/uploaded/image/2019-1/2019-1-dop/15.jpg>), возможность настройки регуляторов процесса пайки (см. <http://www.swsys.ru/uploaded/image/2019-1/2019-1-dop/16.jpg>), а также смена паролей доступа для оператора и технолога.

Результаты управления технологическим процессом индукционной пайки могут быть сохранены как в графическом, так и в текстовом видах. Эти данные можно использовать для анализа качества управления процессом индукционной пайки.

Корректировка значения излучательной способности материала возможна в ручном и автоматическом режимах.

Экспериментальное исследование эффективности работы автоматизированной системы

Для исследования эффективности работы системы по управлению процессом индукционной пайки волноводных трактов из алюминия был проведен ряд лабораторных экспериментов на опытном оборудовании с типоразмерами труб 58×25 мм, 35×15 мм, $19 \times 9,5$ мм.

На рисунке 4 показаны графики процесса пайки. В каждом случае были получены высококачественные паяные соединения.

На графике 4а) разница температуры элементов волноводного тракта минимальна, поэтому перед расплавлением припоя перерегулирования практически не наблюдается. Кроме того, при достижении температуры плавления происходит стабилизация температуры элементов волноводного тракта с формированием высококачественных паяных соединений.

На графике 4б) виден начальный перегрев трубы волноводного тракта, при котором система достигает стационарного состояния до плавления припоя, после чего температурные графики снова сходятся и стабилизируются, формируя прочное неразъемное соединение.

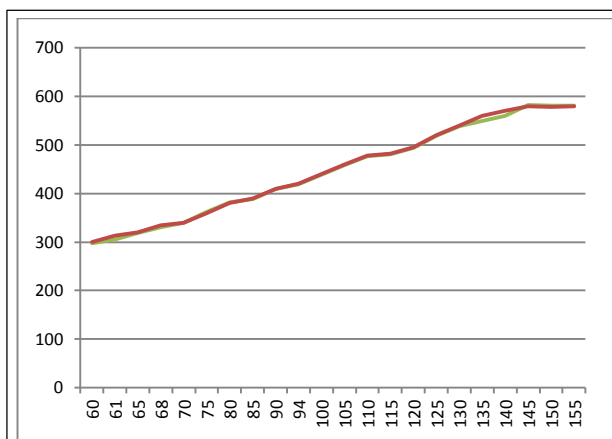
На графике 4в) показан быстро затухающий колебательный процесс, после чего система переходит в устойчивое состояние, доводя технологический процесс до плавления припоя и успешного завершения.

Во всех трех случаях были получены высококачественные паяные соединения волноводных трактов.

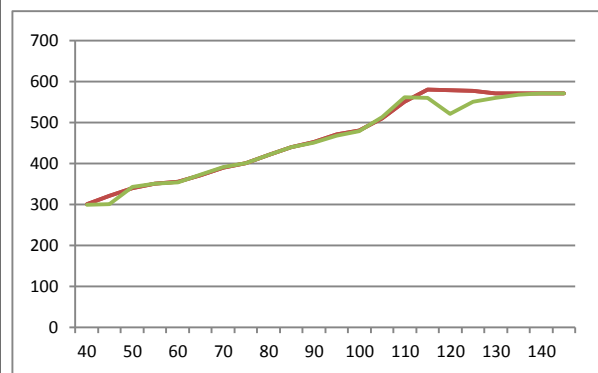
Заключение

В статье представлена разработанная система автоматизации индукционной пайки на основе двух контуров управления с позиционированием заготовки. Ис-

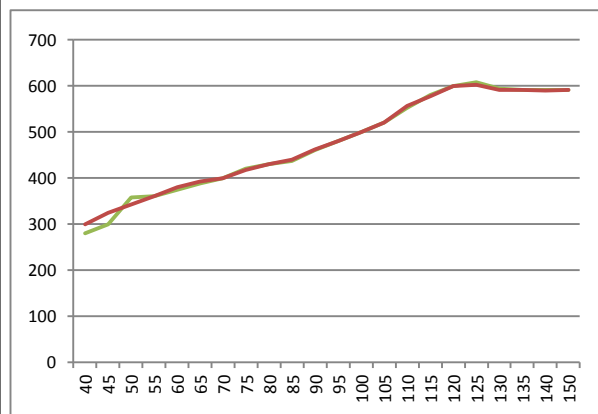
пользование данной программной системы позволяет контролировать процесс индукционной пайки волно-



а)



б)



в)

Рис. 4. Графики процесса пайки труба-фланец: а) 58×25 мм, б) 35×15 мм, в) $19 \times 9,5$ мм (красный график – температура трубы, зеленый – температура фланца, ось абсцисс – время, ось ординат – температура)

Fig. 4. The pipe flange soldering process diagrams: а) 58×25 mm, б) 35×15 mm, в) $19 \times 9,5$ mm (the red diagram is a pipe temperature, the green diagram is flange temperature, axis of abscissa is time, axis of ordinates is a temperature)

водных алюминиевых трактов без необходимости переконфигурировать их положение, что указывает на универсальность использования системы для производства волноводных трактов широкого диапазона размеров.

Применение импульсного управления в системе дало возможность снизить перекрестное влияние в системе до незначительного уровня, тем самым обеспечив качество управления процессом.

Использование разработанной системы управления позволяет получать высококачественное паяное соединение для волноводных трактов из алюминиевых сплавов.

Таким образом, система дает возможность обеспечить высокое качество паяных соединений и снизить воздействие человеческого фактора на технологический процесс.

Работа финансируется Советом по грантам Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых в рамках проведения исследований по теме МК-6356.2018.8.

Литература

1. Murygin A.V., Tynchenko V.S., Laptенок V.D., Emilova O.A., Bocharov A.N. Complex of automated equipment and technologies for waveguides soldering using induction heating. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2017, vol. 173, no. 1, art. 012023. DOI: 10.1088/1757-899X/173/1/012023.
2. Tynchenko V.S., Murygin A.V., Emilova O.A., Bocharov A.N., Laptенок V.D. The automated system for technological process of spacecraft's waveguide paths soldering. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2016, vol. 155, no. 1, art. 012007. DOI: 10.1088/1757-899X/155/1/012007.
3. Тынченко В.С., Бочаров А.Н., Лаптенко В.Д., Серегин Ю.Н.,

Злобин С.К. Программное обеспечение технологического процесса пайки волноводных трактов космических аппаратов // Программные продукты и системы. 2016. № 2. С. 128–134. DOI: 10.15827/0236-235X.114.128-134.

4. Murygin A.V., Tynchenko V.S., Laptенок V.D., Emilova O.A., Seregin Y.N. Modeling of thermal processes in waveguide tracts induction soldering. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2017, vol. 173, no. 1, art. 012026.

5. Лафоре Р. Объектно-ориентированное программирование в C++. СПб: Питер, 2011. 928 с.

6. Архангельский А.Я. Приемы программирования в C++ Builder 6 и 2006. Механизмы Windows, сети. М.: Бином-Пресс, 2010. 992 с.

7. Страуструп Б. Программирование. Принципы и практика с использованием C++. М.: Вильямс, 2015. 1328 с.

8. Работа с COM-портом с помощью потоков. URL: http://piclist.ru/S-COM-THREAD-RUS/COM_port_potoki_TThread_WINAPI.pdf (дата обращения: 22.08.2018).

9. Титов О. Работа с коммуникационными портами (COM и LPT) в программах для Win32. URL: <http://www.realcoding.net/article/view/2416> (дата обращения: 12.08.2018).

10. Тынченко В.С., Бочаров А.Н., Серегин Ю.Н., Лаптенко В.Д. Модуль взаимодействия с аппаратным обеспечением АСУ «Пайка». Свид. о гос. регистр. прогр. для ЭВМ № 2015611846. 2015.

11. Нотация и семантика языка UML. URL: <http://www.intuit.ru/studies/courses/32/32/info/> (дата обращения: 10.08.2018).

12. Bennett S., McRobb S., Farmer R. Object-oriented systems analysis and design using UML. NY, McGraw-Hill Publ., 1999, 516 p.

13. Fowler M. UML distilled: a brief guide to the standard object modeling language. Addison-Wesley Professional Publ., 2004, 179 p.

14. Mellor S.J., Balcer M. Executable UML: A foundation for model-driven architectures. Addison-Wesley Longman Publ., 2002, 416 p.

15. Типы регуляторов и законы регулирования. URL: <http://automation-system.ru/main/15-regulyator/type-of-control.html> (дата обращения: 22.08.2018).

16. Автоматические регуляторы и их типы. URL: <http://mashmex.ru/metallurgi/104-osnovi-avtomatizacii.html?start=6> (дата обращения: 20.08.2018).

17. Пуппо В. Автоматизация процессов. URL: <http://opobjektid.tptlive.ee/Automatiseerimine> (дата обращения: 25.08.2018).

Software & Systems
DOI: 10.15827/0236-235X.125.167-173

Received 17.09.18
2019, vol. 32, no. 1, pp. 167–173

An automation system of induction soldering based on two control loops with work position shift

V.S. Tynchenko¹, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, vadimond@mail.ru

V.D. Laptенок¹, Dr.Sc. (Engineering), Professor, ius_laptенок@sibsau.ru

V.E. Petrenko¹, Postgraduate Student, dpblra@inbox.ru

A.V. Murygin¹, Dr.Sc. (Engineering), Professor, Head of Chair, avm54@mail.ru

A.V. Milov¹, Postgraduate Student, antnraven@ieee.org

¹ Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Department of Information and Control Systems, Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation

Abstract. The paper proposes a solution for the problem of automated control of the aluminum waveguide paths induction soldering process based on two control loops with the work position shift. Within the work, the authors analyze the features of technological process of aluminum waveguide paths induction soldering. The analysis shows the necessity of the process automation using a software system.

The developed software product controls the product heating process in two circuits. The first circuit is the control of the waveguide path elements heating rate. The second circuit is the control of the waveguide assembly movement relating to the inductor plane. The

developed automated system provides high-quality control of the induction soldering technological process, and consequently, reduces the number of mendes.

The software solution is an application for the Windows operating system that is compatible with Windows XP/7/8/8.1/10. The application is developed using C++ and the Embarcadero RAD Studio XE7. The development included an object-oriented approach.

The paper shows the automated system structure, its operation algorithm, as well as the diagram of the screen forms transitions. The design process includes building use-case and state-chart diagrams using the UML language. The presented software solution contains the functionality of adjusting measuring instruments and the parameters of the induction soldering technological process. In addition, it is possible to view the product parts temperature graphs. It is possible to view and edit the database of technological processes.

The approbation of the solution was carried out within the framework of a series of experiments that have shown high-quality control of the induction soldering technological process.

Keywords: automated system, automated control, waveguide, induction soldering, software.

Acknowledgements. *The reported study was funded by the President of the Russian Federation grant for state support of young Russian scientists No MK-6356.2018.8 "Intellectualization of technological processes for the formation of permanent joints at the enterprises of the rocket and space industry".*

References

1. Murygin A.V., Tynchenko V.S., Laptенок V.D., Emilova O.A., Bocharov A.N. Complex of automated equipment and technologies for waveguides soldering using induction heating. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publ., 2017, vol. 173, no. 1, art. 012023. DOI: 10.1088/1757-899X/173/1/012023.
2. Tynchenko V.S., Murygin A.V., Emilova O.A., Bocharov A.N., Laptенок V.D. The automated system for technological process of spacecraft's waveguide paths soldering. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publ., 2016, vol. 155, no. 1, art. 012007. DOI: 10.1088/1757-899x/155/1/012007.
3. Tynchenko V.S., Bocharov A.N., Laptенок V.D., Seregin Yu.N., Zlobin S.K. Software for technological process of soldering spacecraft waveguide paths. *Software & Systems*. 2016, no. 2, pp. 128–134 (in Russ.). DOI:10.15827/0236-235X.114.128-134.
4. Murygin A.V., Tynchenko V.S., Laptенок V.D., Emilova O.A., Seregin Yu.N. Modeling of thermal processes in waveguide tracts induction soldering. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publ., 2017, vol. 173, no. 1, art. 012026.
5. Lafore R. *Object Oriented Programming in C++*. St. Petersburg, Piter Publ., 2011, 928 p.
6. Arkhangelsky A.Ya. *Programming Techniques in C++ Builder 6 and 2006. Windows Mechanisms, Networks*. Moscow, Binom-Press, 2010, 992 p.
7. Strastrup B. *Programming. Principles and Practice of Using C++*. Moscow, Vilyams Publ., 2015, 1328 p.
8. *Working with COM port Using Streams*. Available at: http://piclist.ru/S-COM-THREAD-RUS/COM_port_potoki_TThread_WINAPI.pdf (accessed August 22, 2018).
9. Titov O. *Working with port communication ports (COM and LPT) in Win32 Programs*. Available at: <http://www.realcoding.net/article/view/2416> (accessed August 12, 2018).
10. Tynchenko V.S., Bocharov A.N., Seregin Yu.N., Laptенок V.D. *The Module of Interaction with the Hardware of the Automated Control System Payka*. Software State Registration Cert. no. 2015611846, 2015.
11. *UML Notation and Semantics*. Available at: <http://www.intuit.ru/studies/courses/32/32/info/> (accessed August 10, 2018).
12. Bennett S., McRobb S., Farmer R. *Object-Oriented Systems Analysis and Design Using UML*. NY, McGraw-Hill Publ., 1999, vol. 2, 516 p.
13. Fowler M. *UML Distilled: a Brief Guide to the Standard Object Modeling Language*. Addison-Wesley Prof. Publ., 2004, 179 p.
14. Mellor S.J., Balcer M. *Executable UML: A Foundation for Model-Driven Architectures*. Addison-Wesley Longman Publ. Co., Inc., 2002, 416 p.
15. *Types of Regulators and Regulation Laws*. Available at: <http://automation-system.ru/main/15-regulyator/type-of-control.html> (accessed August 22, 2018).
16. *Automatic Regulators and Their Types*. Available at: <http://mashmex.ru/metallurgi/104-osnovi-avtomatizacii.html?start=6> (accessed August 20, 2018).
17. Purro V. *Process Automation*. Available at: <http://opiobjektid.tptlive.ee/Automatiseerimine> (accessed August 25, 2018).