Астафьева Н. А., Николаева Е. П.
N. A. Astafeva., E. P. Nikolaeva

ГЕРМЕТИЗАЦИЯ КОРПУСОВ ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ

SEALING OF ELECTRONIC MODULE PACKAGES

Астафьева Наталья Анатольевна – кандидат технических наук, доцент кафедры машиностроительных технологий и материалов Иркутского национального исследовательского технического университета (Россия, Иркутск). E-mail: anstella@mail.ru.

Ms. Natalia A. Astafeva – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering Technologies and Materials, Irkutsk National Research Technical University (Russia, Irkutsk). E-mail: anstella@mail.ru.

Николаева Елена Павловна – кандидат технических наук, доцент кафедры машиностроительных технологий и материалов Иркутского национального исследовательского технического университета (Россия, Иркутск). E-mail: nicelen@mail.ru.

Ms. Elena P. Nikolaeva – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering Technologies and Materials, Irkutsk National Research Technical University (Russia, Irkutsk). E-mail: nicelen@mail.ru.

Аннотация. В статье приведены результаты исследования сварных соединений из сплава Fe-29 %Ni-18 % Co – ковара. Сварка проводилась с целью получения герметичного соединения. Сложность осуществления сварки обусловлена миниатюрными размерами самой детали. Поэтому был выбран вариант создания герметичного сварного шва с помощью лазера. Высококонцентрированный поток энергии создавался твердотельным лазером. Проведённые эксперименты показали эффективность использования импульсной лазерной сварки. Расчётным методом были определены основные характеристики лазерного излучения, приводящие к существенному изменению температуры зоны нагрева. Выявлены параметры лазерной сварки, которые влияют на режим сварки и формирование качественных сварных швов. Так как конечной целью является герметичность детали, то качество сварных швов определяется глубиной провара, размерами зоны термического влияния, перекрытием сварных точек, отсутствием трещин и газовых пустот. Методом оптической металлографии исследована структура полученных сварных соединений. Экспериментально определено влияние режима и условий сварки на формирование структуры шва, зоны термического влияния и наличие дефектов в сварных соединениях.

Summary. The article deals with the results of a study of Kovar (Fe-29 % Ni-18 % Co) welded joints. The welding was carried out in order to obtain a sealed joint. The difficulty of welding is due to the miniature size of the work-piece itself; therefore, to create a seal weld we chose the laser seam sealing. High-concentrated flow of energy has been made with a solid-state laser. The experiments showed the effectiveness of pulsed laser welding use. The main characteristics of laser radiation, resulting in a significant change in the temperature of the heating zone were determined by a computational method. The parameters of laser welding, which affect the welding conditions and formation of quality weld seams were revealed. Seeing the ultimate goal is the depth of penetration, size of heat-affected zone, weld spots overlapping and crack-free and gas voidless, determines the sealing capability of the part, the quality of the weld seams. The structure of the obtained welded joints was investigated by optical metallography. It was experimentally determined the impact of the mode and welding conditions for weld seam structure and heat affected-zone formation and defects in welded joints.

Ключевые слова: лазерная сварка, микроструктура, сварное соединение, ковар.

Key words: laser welding, microstructure, welded joint, kovar.

УДК 621.791.01

Введение

Корпуса различных электронных модулей используются в устройствах систем связи и передачи данных [3]. Эксплуатация подобных изделий осуществляется в жёстких условиях: при воздействии ударов, постоянных ускорений, вибраций в широком диапазоне частот (от десятков мегагерц до сотен гигагерц), значительного изменения окружающей температуры, изменения влажности и атмосферного давления. Проблема герметизации корпусов высокочастотных (ВЧ) и сверхвысокочастотных (СВЧ) устройств является актуальной и требует решений, которые позволили бы получить высококачественный продукт, конкурирующий с изделиями мировых производителей, таких как Китай, Германия, Япония, США.

Для герметизации корпусов применяют различные способы соединения элементов: используется пайка припоями на основе серебра, пайка особо низкотемпературными индиевыми припоями, контактная шовная сварка. Существует ряд проблем, возникающих в процессе изготовления корпусов. В частности, при пайке происходит значительный нагрев основания корпуса, что обуславливает необходимость применения флюса, попадание частиц припоя в рабочую полость, нарушение работы и высокий уровень брака [1]. Контактная шовная сварка требует изменения конструктивной формы изделия, а, главное, данная технология и оборудование не являются отечественными.

Заменить низкотемпературную пайку и контактную сварку при сборке и герметизации различных изделий приборостроения и радиоэлектроники можно с применением высококонцентрированных источников, одним из которых является лазерное излучение. Наиболее успешно для таких изделий применяется импульсное излучение твердотельных лазеров благодаря хорошему сочетанию энергетических, временных и пространственных характеристик [6; 7].

Определение параметров лазерного излучения

Качество сварных соединений при лазерной сварке зависит от выбранных параметров режима и их соотношения, характеристик свариваемого материала, а также ряда других факторов. Соотношение параметров сварки и нарушение стабильности процесса лазерной сварки приводит к изменению глубины проплавления, сильному испарению и выплеску материала при сварке, и, как следствие, к образованию дефектов шва и низкому качеству сварного соединения.

Основную причину нестабильного режима лазерной сварки связывают с колебаниями температуры поверхности свариваемых материалов (T). Повышение этой температуры выше температуры кипения (T_k) вызывает сильный перегрев сварочной ванны, а снижение температуры менее T_k вызывает уменьшение глубины проплавления.

Определить возможные источники колебания температуры поверхности можно по уравнению следующего вида [4]:

$$T = 2E_{\text{л}}(1 - R) \sqrt{\frac{a}{\pi^3 \tau k r_0^2}}, \quad (1)$$

где $E_{\text{л}}$ – энергия излучения, Дж; R – коэффициент отражения металла в зоне воздействия лазерного излучения; a – температуропроводность металла; τ – длительность воздействия излучения; излучение лазеров; r_0 – радиус сплошного кругового пятна, сформированного в зоне обработки материала; πr_0^2 – площадь облучения материала, м^2 .

Температуропроводность связывается с другими теплофизическими характеристиками твёрдого тела соотношением $a = k/(pc)$, где k – теплопроводность; p – плотность; c – удельная теплоёмкость материала.

Уравнение (1) описывает связь максимальной температуры нагрева материала равномерно распределённым источником теплоты с параметрами лазерного излучения и оптико-физическими характеристиками материала.

Изменение максимальной температуры (ΔT) вследствие флуктуации параметров $E_{\text{л}}$, r_0 , a , k и R может быть описано уравнением (1), представленным в следующем виде:

$$\Delta T = \left| \frac{\partial T}{\partial E_{\text{л}}} \right| \Delta E + \left| \frac{\partial T}{\partial r_0} \right| \Delta r_0 + \left| \frac{\partial T}{\partial \tau} \right| \Delta \tau + \left| \frac{\partial T}{\partial A} \right| \Delta A + \left| \frac{\partial T}{\partial k} \right| \Delta k + \left| \frac{\partial T}{\partial a} \right| \Delta a, \quad (2)$$

где $A = 1 - R$ – коэффициент поглощения лазерного излучения в процессе сварки.

Тогда частные производные от температуры по соответствующему параметру будут иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial E_{\text{л}}} &= 2A \sqrt{\frac{a}{\pi^3 \tau k r_0^2}}, \\ \frac{\partial T}{\partial r_0} &= -4AE_{\text{л}} \sqrt{\frac{a}{\pi^3 \tau k r_0^3}}, \\ \frac{\partial T}{\partial \tau} &= -AE_{\text{л}} \sqrt{\frac{a}{\pi^3 \tau^8 k r_0^2}}, \\ \frac{\partial T}{\partial A} &= 2E_{\text{л}} \sqrt{\frac{a}{\pi^3 \tau^3 k r_0^2}}, \\ \frac{\partial T}{\partial k} &= -2AE_{\text{л}} \sqrt{\frac{a}{\pi^3 \tau^2 k r_0^2}}, \\ \frac{\partial T}{\partial a} &= \frac{AE_{\text{л}}}{\sqrt{\pi^3 \tau a r_0^2}}. \end{aligned} \quad (3)$$

С целью определения параметров лазерного излучения для сварки ковара 29НК был произведён числовой расчёт с использованием следующих теплофизических характеристик сплава: $a = 0,046 \text{ см}^2/\text{с}$; $k = 0,19 \text{ Вт} / \text{см} \cdot ^\circ\text{C}$; $A = 0,25$; $T = T_k = 2870 \text{ }^\circ\text{C}$. Учитывались параметры лазерного излучения: $E_{\text{л}} = 5 \text{ Дж}$; $\tau = 5 \text{ мс}$; $r_0 = 5 \cdot 10^{-2} \text{ см}$.

Получены следующие результаты: $\partial T / \partial E_{\text{л}} \approx 570 \text{ }^\circ\text{C} / \text{Дж}$; $\partial T / \partial r_0 \approx 115000 \text{ }^\circ\text{C} / \text{мс}$; $\partial T / \partial \tau \approx -280 \text{ }^\circ\text{C} / \text{мс}$; $\partial T / \partial A \approx -14000 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{см} / \text{Вт}$; $\partial T / \partial a \approx 5800 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{с} / \text{см}^2$.

Расчёты показывают, что наибольшее влияние на режим сварки оказывают колебания параметров радиуса сплошного кругового пятна, сформированного в зоне обработки материала, и коэффициента отражения металла в зоне воздействия лазерного излучения, приводящие к существенному изменению температуры. При изменении на 10 % параметров R , r_0 , $E_{\text{л}}$, k , τ и a изменения температуры соответственно составляют: $\Delta T_R \approx 900 \text{ }^\circ\text{C}$; $\Delta T_{r_0} \approx 560 \text{ }^\circ\text{C}$; $\Delta T_{E_{\text{л}}} \approx 280 \text{ }^\circ\text{C}$; $\Delta T_{\tau} \approx 135 \text{ }^\circ\text{C}$; $\Delta T_k \approx 280 \text{ }^\circ\text{C}$; $\Delta T_a \approx 30 \text{ }^\circ\text{C}$.

На качество сварных соединений влияние оказывает скорость сварки. При импульсном режиме непрерывной сварки шов образуется за счёт наложения сварных точек с их перекрытием. Скорость сварки определяется диаметром сварных точек, коэффициентом их перекрытия и частотой следования импульсов:

$$V_{\text{св}} = df(1 - k). \quad (4)$$

В связи с этим обстоятельством менять скорость сварки можно, изменяя диаметр пятна, что ограничивается возможностями установки и конструктивными особенностями соединения, либо за счёт вытягивания светового пятна.

Таким образом, основными управляемыми параметрами процесса сварки являются энергия импульса, длительность воздействия импульса, диаметр сфокусированного луча, положение фокального пятна относительно свариваемой поверхности и скорость сварки.

Материалы и методы исследований

Для исследований изготовлены образцы малых ВЧ-корпусов, которые используются для герметизации микросхем и плат. Конструкция и геометрические параметры корпуса представлены на рис. 1.

Рис. 1. Геометрические параметры корпуса

Основные элементы – корпус и крышка. Толщина стенки крышки составляет 0,2 мм. Корпус и крышка изготовлены из ферромагнитного сплава 29НК. Сплав содержит 51,14...54,5 % Fe, 28,5...29,5 % Ni, 17...18 % Co, до 0,4 % Mn, до 0,3 % Si, до 0,2 % Al и Cu, до 0,1 % Cr и Ti, до 0,03 % C, до 0,015 % S и P [2]. Основные свойства сплава при комнатной температуре представлены в табл. 1.

Таблица 1

Свойства сплава 29НК

Температурный коэффициент линейного расширения ТКЛР, $10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	Интервал температур ΔT , $^\circ\text{C}$	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ , %
4,5...6,5	-70...+420	490...610	23

Ковар 29НК используется для изготовления герметичных вакуумплотных спаев со стеклом. Несмотря на большую устойчивость сплава 29НК к коррозии, в некоторых случаях требуется дополнительное покрытие на основе никеля или золота.

Для герметизации ВЧ-корпусов используется оборудование, входящее в состав лазерной установки «Квант-15 МСЗ» (см. рис. 2).

Установка состоит из твердотельного лазера с блоками питания и охлаждения, импульсного источника питания лазера SF 138, измерителя энергии лазерного излучения MLE 200, оптической

системы с силовыми и ТВ-каналами, предметного стола, регулируемого по высоте, пульта управления, газо-пневмосистемы и педали. В установке предусмотрена подача инертного газа в зону сварки.

Рис. 2. Установка для лазерной сварки «Квант-15 МСЗ»

Для визуального контроля зоны сварки используется телевизионная система наблюдения, изображённая на рис. 3.

Рис. 3. Телевизионная система наблюдения зоны сварки

Исследуемый диапазон параметров режима сварки твердотельным лазером представлен в табл. 2.

Таблица 2

Технологические параметры режима сварки твердотельным лазером

Параметр	Значение
Максимальная средняя мощность излучения, Вт, не менее	50
Частота следования импульсов, Гц	1...10
Дискретность изменения частоты импульсов, Гц	0,1
Длительность импульса тока накачки, мс	0,1...6,0
Дискретность изменения длительности тока накачки, мс	0,01

Амплитуда тока накачки, А, не более	900
Напряжение заряда накопителя, В	350...500
Скорость сварки, м/ч	80...150

Результаты и обсуждение

Были получены герметичные сварные соединения малых ВЧ-корпусов с применением лазерного излучения (см. рис. 4).

Рис. 4. Малый ВЧ-корпус, герметизированный на установке «Квант-15 МСЗ»

Подготавливались микрошлифы, микроструктура сварных соединений изучалась на микроскопе МЕТ-3 в светлом поле при увеличении 50...200 раз [5]. Геометрия и структура шва, зоны термического влияния (ЗТВ), наличие дефектов сварки являются основными критериями качества сварного соединения, полученного лазерной сваркой. Особенности микроструктуры сварного шва и ЗТВ после осуществления лазерной сварки элементов корпуса из сплава 29НК иллюстрирует рис. 5.

Рис. 5. Микроструктура сварного соединения из сплава 29НК

Микроструктура основного металла сплава 29НК, не подвергавшегося термическому воздействию тепла сварочной ванны, представлена зёрнами твёрдого раствора – аустенита, конфигурация которых была сформирована в результате холодной пластической деформации. В микроструктуре сварного соединения отчётливо идентифицируются зоны кристаллизации, сплавления, зона основного металла, подвергавшегося термическому воздействию.

В зоне кристаллизации наблюдаются зёрна, ориентированные в направлении, обратном отводу тепла.

Структура ЗТВ неоднородна. Внутри рекристаллизованных зёрен выявляются двойники разной толщины. Однородная мелкозернистая структура благоприятна для обеспечения требуемого уровня механических свойств и предотвращения образования кристаллизационных трещин. Такие структурные особенности обеспечиваются высокими скоростями сварки и высоким уровнем

плотности мощности, что даёт возможность получать жёсткие термические циклы с высокими скоростями охлаждения. Ширина зоны термического влияния различна. Образцы, полученные с использованием защитного газа аргона, имеют ширину ЗТВ не более 30...40 мкм, а без защиты ширина ЗТВ достигает 100 мкм. Дефекты в этой зоне отсутствуют.

Изменение параметров режима – мощности, длины импульса и положения поверхности относительно фокуса излучения – оказывают существенное влияние на размеры литой зоны (см. рис. 6 и 7).

Рис. 6. Лазерная сварка 29НК: коэффициент формы шва $\phi_{\text{пр}} = 3,63$

Коэффициент формы шва $\phi_{\text{пр}}$ – отношение ширины шва (e) к глубине (h) провара – в полученных образцах изменяется от 1,4 до 4. С увеличением значений $\phi_{\text{пр}}$ форма расплавляемой зоны становится сферической.

Рис. 7. Лазерная сварка 29НК: коэффициент формы шва $\phi_{\text{пр}} = 2,75$

В ходе исследований встречались газовые полости (см. рис. 8) в зоне стыковки деталей, дефекты формы шва, связанные с необходимостью смещения луча на массивный по отношению к крышке корпус.

Основные причины образования пор и корневых дефектов в сварных швах – это затруднённые условия дегазации жидкого металла сварочной ванны, особенно в корне шва; загрязнённость неметаллическими включениями, газами основного металла в зоне стыка.

В нашем случае основной причиной дефектов стало неплотное прижатие элементов корпуса при сборке – наличие зазора.

Рис. 8. Дефекты сварного шва

Выводы

Проведённые исследования позволили получить необходимую глубину проплавления, обеспечив минимальную зону термического влияния сварного соединения из сплава 29НК.

Наиболее благоприятная картина с точки зрения оцениваемых критериев качества получена на режимах $U = 415$ В; $\tau = 5,5$ мс; $f = 9,1$ Гц; расстояние между линзами 8 мм. Провар в этом случае составляет не менее 30 %.

В ходе исследований отмечено, что способ защиты инертным газом влияет не только на качество шва, но и на проплавляющую способность луча. Отсутствие газовой защиты зоны сварки приводит к окислению шва.

Для локализации зоны нагрева и уменьшения ширины ЗТВ применили струйную подачу аргона. Защита инертным газом шва также положительно сказалась на качестве литой зоны. Отсутствие трещин, требуемый провар и перекрытие точек 70...80 % обеспечили герметичность корпусов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Астафьева, Н. А. Способы герметизации корпусов радиоэлектронной аппаратуры / Н. А. Астафьева, В. Ю. Афанасьев // Материалы V Всерос. науч.-техн. конф. с международным участием. – Иркутск: Изд-во ИРНТУ, 2015. – С. 260-264.
2. ГОСТ 10994-74. Сплавы прецизионные. Марки. – Введ. 1975-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1975. – 133 с.
3. Джуринский, К. Конструктивные и технологические особенности модулей СВЧ / К. Джуринский, А. Лисицын // Современная электроника. – 2008. – № 1. – С. 22-27.
4. Малащенко, А. А. Лазерная сварка металлов / А. А. Малащенко, А. В. Мезенов. – М.: Машиностроение, 1984. – 44 с.
5. Чаузова, Е. В. Применение кобальта 29НК для изготовления герметичных радиочастотных соединителей СВЧ-техники / Е. В. Чаузова, Е. П. Николаева // Материалы VII Всерос. науч.-техн. конф. с международным участием. – Иркутск: Изд-во ИРНТУ, 2017. – С. 225-229.
6. Gorscak, S. Designer's Guide for Laser Hermetic Sealing / S. Gorscak, H. Bransch, T. Kugler [Электронный ресурс]. – 2001. – Режим доступа: http://www.designsci.com/Design_Guideline_1.pdf, свободный. – Загл. с экрана.
7. Shannon, G. Laser Seam Sealing of Electronic and Opto-electronic Packages / G. Shannon. – Amada Miyachi America Corporation. – 2015. – P. 1-8.