

ИССЛЕДОВАНИЯ

КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ КОНЦЕПЦИЯ МЕХАНИЗМА ОБРАЗОВАНИЯ ЛАЗЕРНОГО СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ В УЗЛАХ ГЕРМЕТИЗАЦИИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ КОСМИЧЕСКОЙ И СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Разработана новая конструкторско-технологическая концепция герметизации радиоэлектронных модулей в корпусах из алюминиевых сплавов с использованием многофункционального покрытия на основе Ni и Si, получаемое импульсной лазерной наплавкой. Получена формула для определения длительности наплавки одного слоя, с учетом которой возможно определение общей продолжительности лазерного наплавления и образования МФП.

**Н.В. Замирец, *В.Г. Котух,
**А.М.Цымбал, *С.А. Нестерцова*

**Государственное предприятие
«Научно-исследовательский технологический
институт приборостроения»*

*ул. Примакова, 40 / 42, г. Харьков, УКРАИНА, 61010.
e-mail: nitip@kharkov.ukrtel.net.
e-mail: yankovsky@kture.kharkov.ua*

***Факультет Компьютерной инженерии и управления.
Харьковского национального университета
радиоэлектроники,*

*пр. Ленина, 14, г. Харьков, УКРАИНА, 61166
e-mail: mcdulcimer@kture.kharkov.ua*

1. Введение

Анализ действующих технологий и конструктивно-технологических решений узлов герметизации радиоэлектронных модулей (РЭМ) в корпусах из алюминиевых сплавов для аппаратуры, предназначенной для изделий космической и специальной техники в части обеспечения повышенных требований к герметичности (5×10^{-5} л-мкм рт. ст/с), радиационной стойкости (более, чем 5 единиц), автоматизации процесса герметизации РЭМ показал, что технологические и конструкторские возможности РЭМ в паяном и паяно-сварном исполнении практически исчерпаны. Радиационная стойкость паяных герметичных соединений не превышает 2 ед. Новые требования к РЭМ могут быть выполнены только путем перехода на цельносварное исполне-

ние РЭМ в корпусах из алюминиевых сплавов с использованием импульсных лазерных технологий [1].

На основе теоретических и экспериментальных исследований процессов взаимодействия импульсного лазерного излучения с алюминиевыми сплавами в ГП НИТИП (г. Харьков) разработана новая конструкторско-технологическая концепция герметизации РЭМ в корпусах из алюминиевых сплавов с использованием многофункционального покрытия (МФП) на основе Ni и Si, которое предложено получать импульсной лазерной наплавкой [2]. При этом многофункциональное покрытие выполняет следующие технологические и металлургические функции:

- защищает свариваемые кромки корпусных деталей РЭМ от окисления на протяжении всего технологического цикла изготовления РЭМ;

- улучшает энергетические условия плавления за счет большей теплоемкости и меньшей теплопроводности Ni и Si по сравнению с Al;
- обеспечивает получение герметичных сварных соединений деталей РЭМ из Al-сплавов между собой (Al+Al), с электросоединителями (Al+29НК), узлами откачки-заполнения (Al+12Х18Н10Т, Al+М1);
- обеспечивает радиационную стойкость сварных соединений на уровне радиационной стойкости сплавов Al и 29НК, стали 12Х18Н10Т, меди М1 и других материалов (более 5 единиц);
- улучшает ремонтпригодность РЭМ за счет исключения операций очистки кромок корпуса и крышки перед второй (третьей) герметизацией после ремонтного вскрытия корпуса.

2. Обоснование выбора материалов для создания МФП

В соответствии с разработанной в ГП НИТИП конструкторско-технологической концепцией и по результатам анализа современных технологий герметизации РЭМ, основными материалами для создания МФП выбраны Ni и Si. При этом основными физическими проблемами взаимодействия Ni и Si с Al-сплавом являются следующие:

- возможность образования прочных связей соединяемых материалов;
- свариваемость;
- возможность образования твердых растворов с учетом растворимости Ni и Si в Al-основе;
- влияние сверхскоростных процессов лазерного нагрева и охлаждения на образование МФП.

Возможность соединения разнородных металлов с образованием прочных связей определяется, прежде всего, физико-химическими свойствами соединяемых металлов и применяемой технологией сварки. Сравнение физических свойств Al, Ni и Si показал, что они имеют кристаллические решетки одинакового типа, кубические гранцентрированные (КГЦ). Температура плавления Al (660°C) почти в 2 раза ниже, чем у Ni (1455°C) и Si (1415°C), что затрудняет процесс их сплавления. Существенное влияние должно оказывать большое различие (в 3-4 раза) коэффициентов теплопроводности и линейного расширения, приводящее к образованию таких температурных полей и условий кристаллизации, которые способствуют возникновению термических напряжений и ослаблению связей, что может затруднить образование МФП.

Решающее влияние на свариваемость металлов оказывает металлургическая совместимость, которая определяется взаимной растворимостью соединяемых металлов как в жидком, так и в твердом состояниях, а также образованием хрупких химических соединений – интерметаллидов. Прочные сварные соединения образуют металлы и сплавы, в состав которых входят элементы, обладающие неограниченной растворимостью не только в жидком, но и в твердом состоянии, т.е. образующие непрерывный ряд твердых растворов замещения.

Правильный подбор способа, режима и технологии наплавки и сварки, в сочетании с металлургическими средствами воздействия, может позволить полностью устранить или свести к минимуму отрицательные последствия ограниченной растворимости, особенно Ni в Al. Следует сказать, что твердый раствор образуется в том случае, если в системе, состоящей из различных атомов, может существовать общая для них кристаллическая решетка. Неограниченная растворимость в твердом состоянии воз-

можна при наличии одинаковой кристаллической структуры у компонентов, как в нашем случае, у Al, Ni и Si. Однако это условие является необходимым, но не достаточным. Из известных типов растворов твердый раствор замещения является наиболее распространенным. При образовании МФП можно ожидать образование твердых растворов замещения (Al-Ni, Al-Si), т.к. атомные радиусы этих элементов различаются незначительно: $0,143 \text{ нм}$ (Al); $0,134 \text{ нм}$ (Si); $0,124 \text{ нм}$ (Ni).

По Паулингу [4], энергия нормальной ковалентной связи не зависит от элементов, находящихся в химической связи. Созданная им шкала электроотрицательности характеризует образование связи между элементами. При этом, с увеличением разности электроотрицательности увеличивается стабильность как первичных твердых растворов, так и интерметаллических соединений.

Основными факторами, определяющими размеры и параметры области первичных твердых растворов, являются такие размерные факторы как электроотрицательность и валентность. Даркен и Гури показали, что на комбинированной диаграмме (карте) электроотрицательности и радиуса атома каждый элемент может быть представлен точкой. Чем ближе расположены точки на этой карте, тем более вероятно высокая взаимная растворимость элементов [5].

Для определения растворимости в алюминии Ni и Si, выбранных для лазерной наплавки на детали из Al-сплавов, на основе теории Даркена-Гури, в ГП НИТИП разработаны диаграммы (карты) растворимости для Al (рис.1) и для Ni (рис. 2), которые необходимы для прогноза параметров твердых растворов Al-Ni, Al-Si, образующихся при лазерной наплавке МФП и сварке разнородных металлов в узлах герметизации РЭМ.

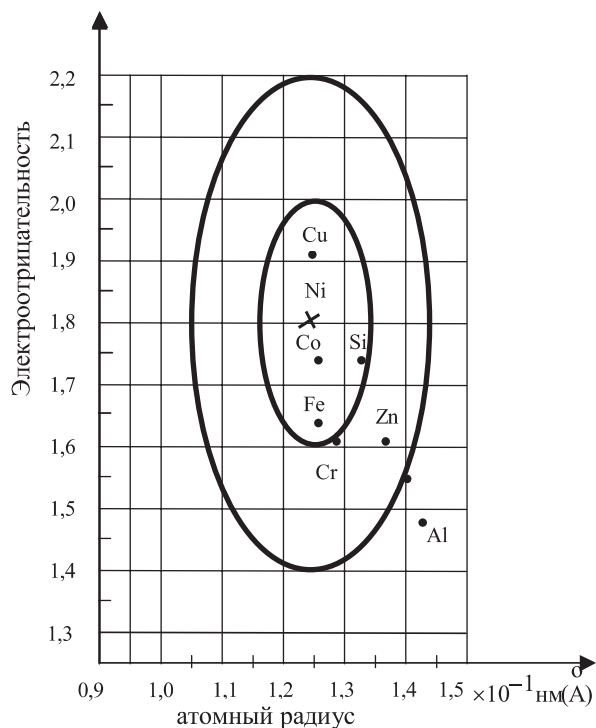


Рисунок 1. Карта растворимости для Al

Из анализа диаграммы (рис. 1) следует ожидать образование твердых растворов Ti и Zn с Al. Достаточно хорошо растворимы в алюминии Si, Mn, Cu, Fe, Co, вследствие чего можно ожидать образование прочных твердых растворов этих элементов в Al. Образование твердых растворов

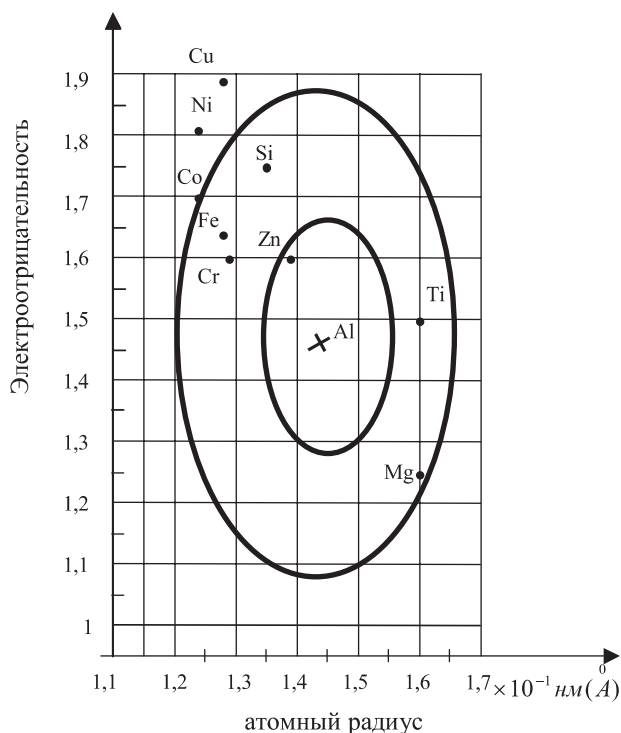


Рисунок 2. Карта растворимости для Ni

Ni в алюминии менее вероятно из-за его плохой растворимости в алюминии, так как Ni расположен вне большого эллипса. Построение диаграммы растворимости для Ni (рис.2) показало, что в Ni хорошо растворяется Cu, Co, Si, Fe. В связи с этим можно ожидать образования прочных твердых растворов этих элементов в Ni, являющихся основой МФП.

Из анализа построенных диаграмм (рис. 1, 2) следует, что образование прочного твердого раствора при лазерной наплавке МФП на основе Si, а при наплавке МФП на основе Ni из-за его ограниченной растворимости в Al прочность сцепления МФП с Al-основой может оказаться недостаточной и должна быть исследована и определена экспериментально.

Таким образом, для узла герметизации корпус-крышка (Al-Al) предпочтительно МФП на основе Si, а для узлов герметизации электросоединитель-корпус РЭМ, штенгель-корпус РЭМ, узла бесштенгельной откачки (рис. 3) более предпочтительно МФП на основе Ni.

Разработанные диаграммы (рис. 1, 2) определены для равновесных систем, например, для получения сплавов системы Al-Ni в условиях медленного нагрева и охлаждения. Поэтому при применении наплавки традиционными способами нагрева (плазмой, электрической дугой и др.) не гарантируется получение прочной связи в системе Al-Ni.

3. Выбор и обоснование технологических режимов лазерной наплавки

Наиболее приемлемым способом наплавки Ni на Al может быть импульсный лазерный нагрев. Существующие лазерные технологические

установки серии «Квант» и др. обеспечивают длительность импульса лазерного излучения в пределах 1-8 мс и плотность мощности в зоне наплавки до 10^6 Вт /см². При этом скорость нагрева и охлаждения зоны наплавки составляет $10^2...10^6$ град/с. Известно [6,7], что сверхбыстрый нагрев и охлаждение вносят существенные изменения в процесс образования твердых растворов, что выражается в увеличении взаимной растворимости элементов, в т. ч. Ni в Al, а диффузионные процессы на границе между твердым и жидким телом обладают той особенностью, что скорость их определяется интенсивностью диффузии в твердом теле, т.к. она обычно во много раз меньше скорости диффузии в жидкости.

Следует отметить, что процесс взаимодействия твердой и жидкой металлических фаз при наплавке сопровождается развитием гетерогенной диффузии в зоне контакта. Даже незначительное время их сосуществования способствует протеканию процессов гетерогенной диффузии в направлении установления фазового равновесия. Интенсивность протекания этих процессов определяется температурой, длительностью контактирования, градиентом концентраций и диффузионной подвижностью атомов [8]. На границе раздела фаз определяющей является стадия взаимодействия твердого металла с жидким. Развитие диффузионных процессов на стадии охлаждения закристаллизовавшегося металла, в основном, определяется временем нахождения металла при повышенных температурах.

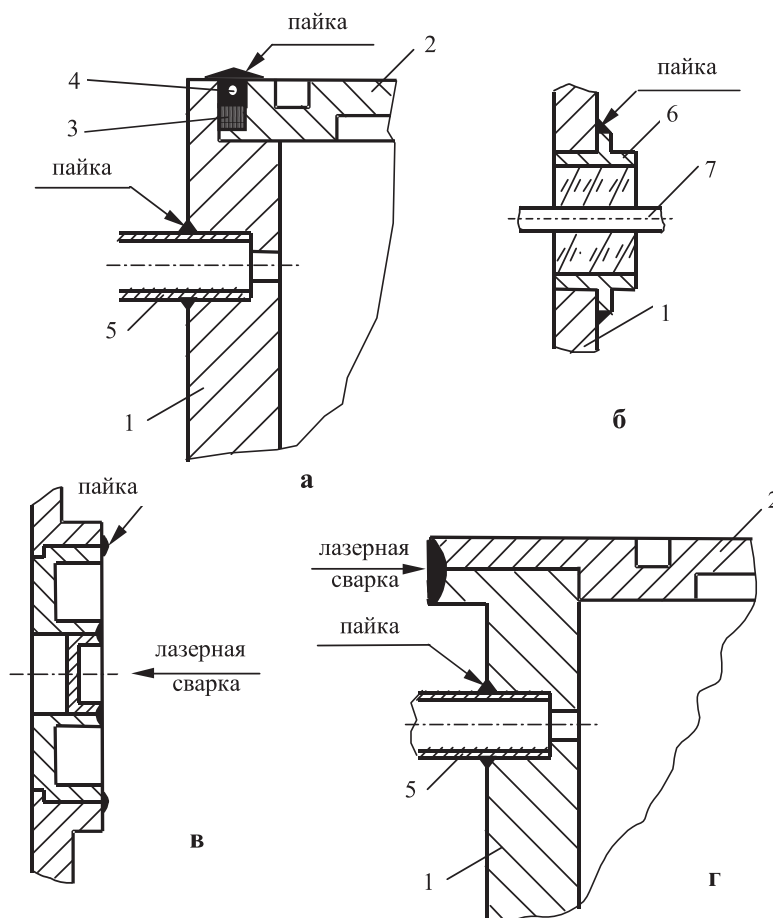


Рисунок 3. Стандартные узлы герметизации РЭМ в корпусах из сплавов по ОСТ 92-1637-79:

а, б – паяное исполнение; в, г – паяно-сварное исполнение.
1- корпус РЭМ; 2 – крышка РЭМ; 3– резиновая прокладка; 4– облуженная проволока; 5– штенгель; 6– корпус электросоединителя; 7– штырь; 8– корпус бесштенгельного узла откачки и заполнения; 9– заглушка

Количественное решение задачи по гетерогенной диффузии примеси в зоне контакта твердой и жидкой фаз при частных граничных условиях приведено в работе [8]. Характер распределения примеси зависит от коэффициента распределения k , характеризующего различную растворимость элементов в твердой и жидкой фазах, от коэффициента диффузии в твердой D_m и жидкой $D_{ж}$ фазах, длительности процесса t и градиента концентрации примеси на границе сплавления. Значение коэффициентов диффузии D_m зависит от температуры, концентрации, структуры, примесей и могут меняться в широких пределах ($10^{-7} \dots 10^{-16}$ см²/с и менее). Значения коэффициентов диффузии в жидкости находятся в пределах $10^{-4} \dots 10^{-6}$ см²/с. Длительность контактирования в случае наплавки традиционными способами находится в пределах от 0,01...0,5 с (смачивание) до 0,5...10 с и более (наплавка, сварка) и от 0,002 до 0,006 с (лазерная наплавка и сварка) и зависит от погонной энергии и скорости.

Равновесный коэффициент распределения ($k_0 = c_m/c_{ж}$) в зависимости от легирующего элемента может быть больше или меньше единицы. Если происходит снижение температуры, то $k_0 < 1$ (1 – 0,001 для систем, относящихся к чисто эвтектическим). Если примесь повышает температуру плавления сплава, то $k_0 > 1$. При наличии интенсивного перемешивания, что характерно для лазерной наплавки и сварки, эффективное значение коэффициента распределения k сильно отличается от равновесного и достигает 1.

В общем случае значения эффективного коэффициента распределения определяются из уравнения, полученного К. Бартоном и др. [8]:

$$k = \frac{k_0}{k_0 + (1 - k_0) \exp\left(1 - \frac{f \delta_0}{D_{ж}}\right)}, \quad (1)$$

где f – скорость увеличения толщины твердой фазы;

δ_0 – толщина ламинарного слоя;

$D_{ж} = 10^{-5} \dots 10^{-4}$ см²/с.

Для большинства практических случаев неизвестны точные значения эффективного коэффициента распределения k , коэффициентов диффузии D_m и $D_{ж}$ и длительности контактирования. Точное определение этих величин в реальных сверхнеравновесных условиях лазерной наплавки связано с большими трудностями и не входит в задачу данных исследований. В работе [9] приведено решение для определения концентрации c_m и $c_{ж}$:

$$c_T = \frac{\sqrt{D_{ж}}}{\sqrt{D_m} + \sqrt{D_{ж}}} \left[1 + \Phi\left(\frac{|x|}{2\sqrt{D_m t}}\right) \right] \text{ при } x < 0, \quad (2)$$

$$c_{ж} = \frac{\sqrt{D_m}}{\sqrt{D_m} + \sqrt{D_{ж}}} \left[1 + \Phi\left(\frac{|x|}{2\sqrt{D_{ж} t}}\right) \right] \text{ при } x > 0, \quad (3)$$

которые, однако, не учитывают наличие двухфазной области и изменение коэффициентов диффузии от концентрации.

Предварительные исследования [10] показали, что при лазерной наплавке Ni на Al-сплав, несмотря на малую длительность процесса (4 мс), происходит образование в зоне контакта Al-Ni тонкой диффузионной прослойки толщиной 80 мкм. Исходя из этого, по известной формуле [8]:

$$Y = k\sqrt{D \cdot t} \quad (4)$$

приблизительно определен коэффициент диффузии Ni в Al, равный $D_m = 10^{-1} \dots 10^{-2}$ см²/с, т.е. на несколько порядков превышает известные значения.

Для обоснования технологических режимов лазерной наплавки Si и Ni на свариваемые кромки деталей корпуса РЭМ из Al-сплавов были проведены аналитические расчеты по определению скорости наплавки (мм/мин и мм²/мин), количества проходов и слоев, необходимых для получения МФП на кромках с заданными размерами; длительности наплавки, мин.

В расчетах на основании предварительных экспериментов принято:

- диаметр светового пятна d на поверхности кромки в пределах 0,6...0,8 мм;
- фокальная плоскость совпадает с поверхностью свариваемой кромки;
- коэффициент перекрытия наплавленных точек и дорожек $k=0,5$;
- частота следования импульсов лазерного излучения $f=10$ Гц.

4. Конструктивное исполнение свариваемой кромки

Конструктивное исполнение определено исходя из следующих соображений:

1. Конструктивная прочность кромки корпуса и крышки РЭМ не должна быть меньше заданной конструктором с учетом допустимого снижения запаса прочности не более 25%.

2. Наплавление одного слоя Ni на кромку, обеспечивая его достаточное сцепление с основой, не гарантирует из-за его малой толщины получение прочного сварного соединения.

3. Для обеспечения плотного прилегания свариваемых кромок при сборке под сварку МФП должно иметь толщину с припуском на последующую мехобработку.

На основании этого разработана конструкция кромки с пазом глубиной 20...25% толщины кромки под МФП (рис.4)

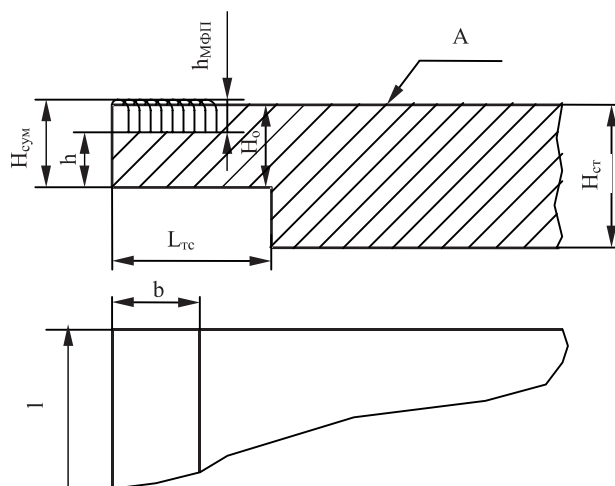


Рисунок 4. Конструктивное исполнение свариваемой кромки корпуса и крышки РЭМ:

$H_{сум}$ – толщина кромки с наплавленным МФП; $h_{МФП}$ – толщина МФП; H_0 – толщина кромки; $H_{ст}$ – толщина стенки корпуса РЭМ; $L_{тс}$ – длина рабочей части кромки; l – длина образца; h и b – толщина и ширина кромки под наплавку МФП

Скорость наплавки определяется по известной формуле [5].

$$V = 60 \cdot d \cdot f \cdot (1 - k), \text{ мм/мин} \quad (5)$$

Для определения количества проходов при наплавке одного слоя необходимо знать величину площади, направляемой за один проход. По аналогии с (5):

$$V = 60 \cdot f \cdot \frac{\pi d^2}{4} (1 - k), \text{ мм}^2 / \text{мин} \quad (6)$$

а количество проходов n определим по формуле:

$$S_n = (n + 1) \cdot (1 - k) \cdot S_1, \quad (7)$$

где $S_1 = 1 \cdot d$ – площадь первой дорожки,

$S_n = 1 \cdot b$ – площадь всех (n) дорожек

Так как ширина кромки (рис.4) задана, то

$$b = (n + 1) \cdot (1 - k) \cdot d, \text{ мм} \quad (8)$$

Отсюда определим количество проходов

$$n = \frac{b}{d \cdot (1 - k)} - 1 \quad (9)$$

Для определения количества наплавляемых слоев m необходимо знать $h_{\text{МФП}}$ (рис. 4) и толщину одного слоя $h_{\text{сл}}$, определяемую экспериментально.

$$m = \frac{h_{\text{МФП}}}{h_{\text{сл}}}, \quad (10)$$

$$\text{где } h_{\text{МФП}} = H_{\text{сум}} - h, \text{ мм} \quad (11)$$

По результатам предварительных экспериментов толщина наплавленного слоя ($h_{\text{МФП}}$) должна соответствовать $(1,2 \div 1,3) \cdot (H_0 - h)$, т.е. незначительно возвышается над поверхностью А стенки корпуса или крышки РЭМ (рис.4.) Тогда:

$$m = \frac{(1,2 \div 1,3) \cdot (H_0 - h)}{h_{\text{сл}}} \quad (12)$$

Авторами предложена формула для определения длительности наплавки одного слоя:

$$t = \frac{S_n}{V_n} = \frac{b \cdot l}{60 \cdot f \cdot \frac{\pi d^2}{4} (1 - k)}, \text{ мин} \quad (13)$$

Общую продолжительность процесса лазерного наплавления и образования МФП можно определить по формуле:

$$t_{\text{МФП}} = m \cdot t_c, \text{ мин} \quad (14)$$

Задача получения герметичного лазерного сварного соединения в узлах герметизации корпус РЭМ – электросоединитель, корпус РЭМ – штенгель, крышка РЭМ – бесштенгельный узел откатки и заполнения сводится к соединению плавлением металла корпуса электросоединителя (штенгеля и др.) с МФП, причем с внешней стороны МФП, состоящей из чистого Ni (рис. 5).

Из рассмотрения диаграммы растворимости в Ni (рис. 2) элементов, входящих в вышеуказанные сплавы (Co, Ni, Fe, Cu, Cr, Ti), и практического опыта лазерная сварка не должна вызывать больших затруднений, т. к. указанные элементы хорошо растворяются в Ni с образованием прочных твердых растворов. Таким образом, ожидается образо-

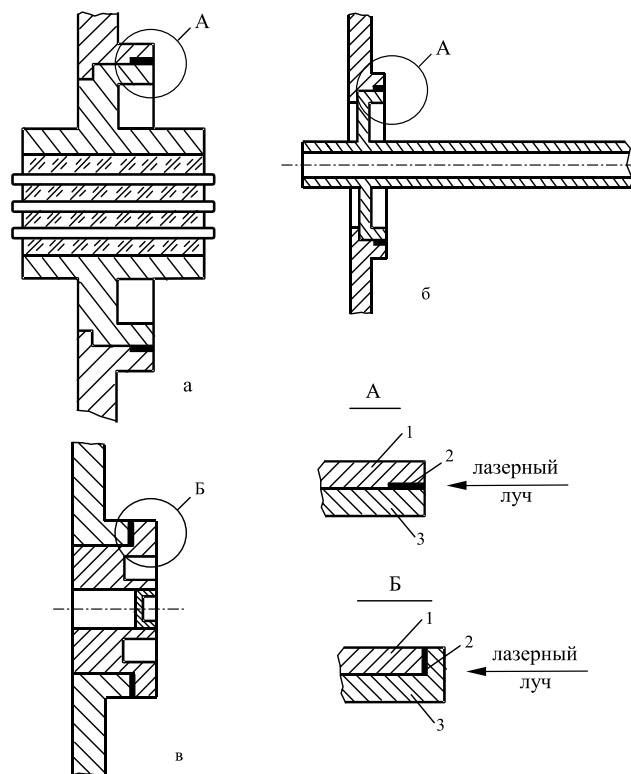


Рисунок 5. Возможные варианты образования лазерной сваркой герметичных соединений в системе Al–МФП–29НК(12Х18Н10Т, М1):

1 – корпус РЭМ (Al-сплав); 2 – МФП (Ni); 3 – электросоединитель (29НК), штенгель (М1), корпус узла откатки-заполнения (12Х18Н10Т)

вание комбинированного сварного соединения, состоящего из нескольких зон (рис. 6). При этом ожидается некоторое увеличение ширины диффузионной зоны Al-Ni под ранее наплавленным МФП, что обеспечивает прочность и плотность сварного соединения.

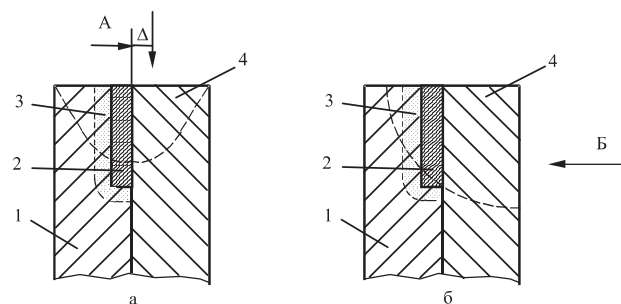


Рисунок 6. Схематическое изображение механизма образования соединений в системе Al–МФП–(29НК, 12Х18Н10Т):

1 – кромка корпуса РЭМ (Al-сплав); 2 – МФП(Ni); 3 – диффузная зона Al-Ni; 4 – кромка электросоединителя (сплав 29НК) или корпуса узла откатки-заполнения (12Х18Н10Т); Δ – смещение оси лазерного луча относительно стыка.

Пунктиром обозначена ожидаемая граница сварного соединения при сварке в торец А и внахлест В

Технологическая проблема при этом будет заключаться в обеспечении теплопроводностного режима плавления путем смещения оптической оси лазерного луча в сторону более теплоемкого материала. При этом, в первую очередь, необходимо обеспечить расплавление сплава 29НК,

12Х18Н10Т и исключить расплавление Al-сплава (кромки корпуса, крышки РЭМ). В этом случае должно происходить сплавление Ni-основы МФП с 29НЖ, 12Х18Н10Т и т.п. и расширение диффузионной зоны Al-Ni за счет взаимной диффузии. Такой режим сварки позволит исключить перегрев корпуса РЭМ выше критических температур, указанных в ТУ, и избежать тем самым потери герметичности электросоединителя из-за растрескивания стеклоспая.

Следует учитывать невозможность полного исключения зазора между поверхностями свариваемых кромок, который создает большое тепловое сопротивление, затрудняющее теплопроводный режим сварки. Это обстоятельство необходимо учитывать при разработке КТР в части требований к шероховатости и размерной точности (особенно неплоскостности) свариваемых кромок.

В случае лазерной сварки узла штенгель (медь М1) – МФП(Ni)–корпус РЭМ следует учитывать, что Cu обладает большей теплопроводностью по сравнению с Al и исключительно хорошей свариваемостью с Ni с образованием непрерывного ряда твердых растворов. Технологическая проблема будет состоять в том, что из-за высоких коэффициентов отражения лазерного излучения медью (97-99%) и алюминием (95-97%) для их расплавления необходимо ввести в зону сварки значительное количество энергии, что в сочетании с их высокой теплопроводностью может привести к нагреву корпуса РЭМ выше температур, допустимых по ТУ. Решение этой проблемы может быть осуществлено путем смещения оптической оси лазерного луча относительно стыка в сторону МФП (рис.7.). За счет этого в первую очередь должно расплавляться более теплоемкое МФП, обладающее к тому же более низким коэффициентом отражения, а затем уже плавление всей системы Al-Ni-Cu. В сварном соединении ожидается образование сплава типа алюмоникелевой бронзы.

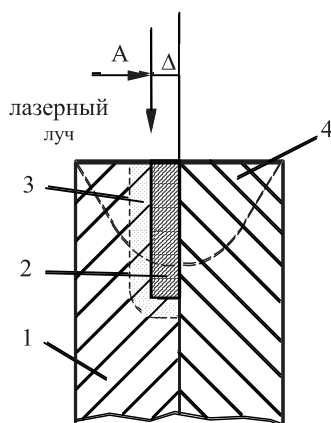


Рисунок 7. Схематическое изображение механизма образования соединения в системе Al–МФП–Cu:

1 – кромка корпуса РЭМ (Al-сплав); 2 – МФП(Ni); 3 – диффузная зона Al-Ni; 4 – кромка штенгеля (Cu-сплав); Δ – смещение оси лазерного луча относительно стыка.

Пунктиром обозначена ожидаемая граница сварного соединения

Следует сказать, что в процессе лазерной сварки ожидается расширение диффузионной зоны Ni-Al (рис. 8) за счет дальнейшей диффузии Ni в Al с уточнением слоя чистого Ni на внешних поверхностях МФП.

При использовании МФП на основе Si ожидается более плавное распределение Si в сварном соединении с образова-

нием Al-сплава типа силумина, возможно эвтектического состава. Это обстоятельство должно способствовать получению прочного и герметичного соединения.

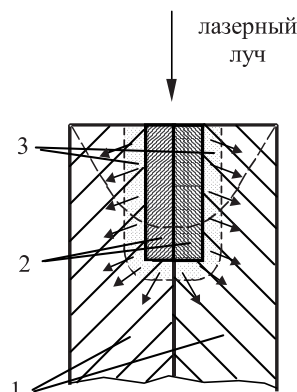


Рисунок 8. Схематическое изображение механизма образования соединения в системе Al–МФП–Al:

1 – кромка корпуса РЭМ (Al-сплав); 2 – МФП(Ni или Si); 3 – диффузная зона Al-Ni или Al-Si соответственно по поз. 2.;

Пунктиром обозначена ожидаемая граница сварного соединения; стрелками – ожидаемое направление диффузии в процессе лазерной сварки.

Основной технологической проблемой при лазерной сварке узла герметизации корпус РЭМ – крышка РЭМ будет являться выполнение ограничения нагрева стенки корпуса не выше критичной температуры, указанной в ТУ на РЭМ (70°-120°С на расстоянии 5...15 мм от зоны сварки).

Исходя из этих соображений был выполнен аналитический расчет нагрева корпуса РЭМ.

5. Результаты аналитического расчета нагрева корпуса РЭМ

Для расчета использовано уравнение квазистационарного состояния процесса распространения теплоты при нагреве пластины подвижным линейным источником q , перемещающимся с постоянной скоростью V [12]:

$$T(x, y, t) = \frac{q}{2\pi\lambda_T\delta} \cdot e^{-\frac{Vx}{2a}} \cdot K_0 \left(r \sqrt{\frac{v^2}{4a^2} + \frac{b}{a}} \right), \quad (15)$$

где r – плоский радиус-вектор в подвижной системе координат, связанной с источником теплоты;

K_0 – Бесселева функция от мнимого аргумента второго рода нулевого порядка, значение которой определяется по таблицам;

λ_T – коэффициент теплопроводности;

δ – толщина пластины;

a – коэффициент температуропроводности;

x – координата критической точки, в которой определяется температура;

t – время, за которое температура в данной точке достигает максимального значения;

b – коэффициент теплоотдачи.

Теплоотдача с поверхности корпуса при расчетах не учитывалась из-за небольшой продолжительности сварки,

а теплопроводность МФП принята равной теплопроводности Al-сплава. Расстояние от зоны сварки до критических точек корпуса было принято 5, 10, 15 мм исходя из наиболее распространенных размеров корпусов РЭМ. Расчетная скорость сварки принята 3, 15, 30 мм/мин, что намного меньше рекомендуемой по ОСТ 92-1170-86, т.е. для более жестких условий сварки. Энергия в импульсе была принята в пределах от 8 до 30 Дж, т.е. в диапазоне энергий для установок серии «Квант» и «Гарт». Частота следования импульсов была принята 1, 5, 10 Гц, а их длительность – от 4 до 6 мс.

Тепловые расчеты показали, что даже при лазерной герметизации с использованием импульсной сварки на самых жестких режимах ($\Theta=30$ Дж, $V=3$ мм/мин, $f=10$ Гц) в наиболее критичной точке на расстоянии 5 мм от зоны сварки по окончании процесса герметизации температура нагрева корпуса не превышает 48°C , что значительно меньше допустимой по ТУ. Следовательно, возможна герметизация РЭМ в корпусах из Al-сплавов с использованием тепловых ограничений.

В связи с тем, что узел герметизации корпус РЭМ – крышка РЭМ в зависимости от параметров внутрикорпусной газовой среды (давление, температура) испытывает в процессе приемочных испытаний, хранения и эксплуатации знакопеременные нагрузки, которые могут вызвать потерю герметичности сварного соединения, необходимо исследовать остаточные напряжения в этом узле герметизации экспериментальным путем, так как в литературе отсутствуют необходимые исходные данные для расчета ожидаемых величин и знака остаточных напряжений для импульсной лазерной сварки.

Поэтому для получения герметичного и прочного сварного соединения в системе Al-МФП-Al следует вводить в зону сварки ограниченное количество лазерной энергии для предотвращения перегрева стенки корпуса выше критичной температуры.

Выводы

Исходя из разработанной конструкторско-технологической концепции механизма образования лазерного сварного соединения в узлах герметизации РЭМ можно сделать следующие основные выводы:

1. При нанесении МФП на основе Si на детали узла герметизации корпус РЭМ – крышка РЭМ (Al-Al) не предвидится больших препятствий для получения прочных связей Si-покрытия на Al вследствие хорошей растворимости Si в Al. Необходимо экспериментально отработать технологические режимы подготовки поверхности деталей и лазерной наплавки на них Si.

2. Для образования МФП на основе Ni на деталях узлов герметизации необходимо применить высокоскоростной нагрев импульсным лазерным излучением с целью увеличения растворимости Ni в Al, а также разработать технологические режимы подготовки поверхности и лазерной импульсной наплавки Ni на корпусные детали из Al-сплава.

3. Для получения герметичного и прочного сварного соединения в системах Al-МФП-(29НК, 12Х18Н10Т и др.) необходимо обеспечивать теплопроводностный режим плавления. В соединении Al-МФП-Cu необходимо учитывать отрицательное действие высокого коэффициента отражения лазерного излучения медью и алюминием и хорошую свариваемость Cu с Ni на внешней стороне МФП.

4. Для получения герметичного и прочного сварного соединения в системе Al-МФП-Al (узел герметизации корпус-крышка) необходимо использовать импульсную лазерную сварку, при которой предотвращается возможность перегрева корпуса РЭМ выше критичной температуры, ограниченной ТУ на РЭМ, а также исследовать величину и знак остаточных напряжений в лазерном сварном соединении.

Литература

1. Т.Л. Алтухова, В.Г. Котух. Применение лазерной сварки для герметизации радиоэлектронных модулей из сплава алюминия / Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 1999г. – №6. – с. 26–29.
2. Н.В. Замирец, В.Г. Котух, Т.Л. Алтухова, В.А. Шур. Технологическая концепция лазерной герметизации радиоэлектронных модулей в корпусах из алюминиевых сплавов /Технология приборостроения. – 1995 – №2. – с. 17–20.
3. Физическое металловедение . ФВ 3-х кн./ Под ред. Р.Кана. 3-изд., перераб. и доп.-М.: Металлургия, 1987. –Т1.
4. Pauling L., 1980. The Nature of the Chemise Bond, 3d Ed (Cornel Univ.Press. New York), p.88.
5. Палатник Л.С., Фукс М.Я., Косевич В.И. Механизм образования и структура конденсированных пленок. –М.: Наука, 1972. – 420с.
6. А.Г. Григорьянц, И.Н. Шитанов. Лазерная техника и технология. В 7 кн. Кн.5. Лазерная сварка металлов/ Под ред. А.Г. Григорьянца.-М.: Высшая школа –1988.-208 с.
7. Лазерная техника и технология . В 7 кн. Кн.3. Методы поверхностной лазерной обработки: Учеб. пособие для вузов/А.Г. Григорьянц, А.Н. Сафонов. Под ред. А.П. Григорьянца. –М.: Высшая школа, 1987. – 191с.
8. Сварка разнородных металлов и сплавов /В.Р. Рябов, Д.М. Рабкин, Р.С. Курочко, Л.Г. Стрижевская.-М.: Машиностроение, 1984. –239 с.