

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ КОНЦЕПЦИЯ ОБРАЗОВАНИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПОКРЫТИЯ НА КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЯХ ДАТЧИКОВОЙ АППАРАТУРЫ ИЗ АL-СПЛАВОВ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКОЙ

Введение

Вопросам дальнейшего повышения надежности и качества датчиков для изделий радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) уделяется в настоящее время большое внимание. С этой целью производят общую герметизацию корпусов датчиков с заполнением их внутренней полости инертными газами. Герметичные датчики обладают следующими достоинствами: повышенный уровень интеграции за счет одновременного использования тонко и толстопленочных интегральных схем (ИС), микросборок (МСБ) пленочной и печатной коммутации, хорошие тепловые характеристики вследствие увеличенной поверхности теплоотдачи корпуса датчика и возможность применения искусственного осаждения. Для них характерна также высокая надежность вследствие общей герметизации и прямого внутриблочного монтажа, повышенная механическая прочность, повышенная в 8–10 раз плотность компоновки.

Необходимость общей герметизации корпусов датчиков накладывает, в свою очередь, ряд ограничений и требований к конструкции и технологии соединения элементов их корпусов, например, требование ремонтпригодности, ограничения нагрева корпуса датчика при герметизации (70–100 °С), состава и давления газовой среды внутри датчика и др.

Наиболее распространенным материалом корпусных элементов (деталей) датчиков является алюминий и его сплавы. Однако при их герметизации возникает ряд проблем, связанных прежде всего с возможностью создания надежного сварного соединения Al-сплавов с другими металлами и сплавами (например, корпуса электросрединителей, штенгеля, безштенгельного узла откачки и др.). Поэтому [1] для создания прочных связей соединяемых материалов необходимо образование многофункционального покрытия (МФП), основными материалами для которого являются Ni и Si. При этом возможность соединения разнородных металлов с образованием прочных связей с использованием МФП определяются прежде всего физико-химическими свойствами соединяемых металлов и применяемой технологией сварки.

Особенности технологических процессов сварки

Основные физические свойства элементов, входящих в Al-сплавы и в МФП приведены в таблице.

Сравнение физических свойств Al, Ni, и Si показало, что Al, Ni, Si имеют одинаковый тип кристаллической решетки кубическая гранецентрированная (КГЦ). Температура плавления Al (660 °С) почти в 2 раза ниже, чем у Ni (1455 °С) и Si (1415 °С), 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. Это может затруднять 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. Прочностные 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, режимов 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.

Физические свойства элементов

| Элемент | Плотность при 20° кг/см ³ | Температура плавления их, °С | Тип кристаллической решетки | Атомный радиус, *10 ⁻¹ н М(А) | Электроотрицательность | Коэффициент линейного расширения *10 ⁻⁶ , град ⁻¹ | Коэффициент теплопроводности, Вт/м-*град | Коэффициент теплоемкости Дж/кг *град |
|---|--------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|--|------------------------|---|--|--------------------------------------|
| 1. Элементы, содержащиеся в Al-сплавах | | | | | | | | |
| Al | 2700 | 660 | кгу | 1,43 | 1,47 | 24,0 | 204 | 880 |
| Mg | 1740 | 650 | кгу | 1,60 | 1,23 | - | 167 | - |
| Si | 2328 | 1415 | кгу | 1,34 | 1,74 | - | 84 | - |
| Zn | 7100 | 419 | кгу | 1,39 | 1,60 | 30 | 112 | 370 |
| 2. Элементы, содержащиеся в сплавах 29НК, 12К18Н10Т | | | | | | | | |
| Fe | 7800 | 1539 | кгу | 1,26 | 1,64 | 11,19 | 78 | 460 |
| Co | 8900 | 1494 | кгу | 1,25 | 1,7 | 12,,5 | 70,9 | 452 |
| Ni | 8900 | 1455 | кгу | 1,24 | 1,8 | 13,5 | 58 | 444 |
| Cr | 7190 | 1903 | кгу | 1,27 | 1,6 | - | - | - |
| Ti | 4500 | 1668 | кгу | 1,60 | 1,5 | 4,5 | 13 | 578 |
| 3. Элементы, содержащиеся в Cu сплавах | | | | | | | | |
| Cu | 8900 | 1083 | кгу | 1,28 | 1,9 | 16,5 | 390 | 380 |
| Be | 1850 | 1285 | кгу | 2,2 | 1,4 | - | 1,78 | - |

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 возможна при наличии одинаковой кристаллической структуры у компонентов, как в нашем случае у Al, Ni, Si. Однако это условие является необходимым, но не достаточным [47].

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 нм (Al); 0,134 нм (Si); 0,124 нм (Ni).

Анализ современных технологий сварки показывает, что энергия нормальной ковалентной связи не зависит от элементов, находящихся в химической связи, причем шкала электроотрицательности характеризует только образование связи между элементами, а с увеличением разности электроотрицательности увеличивается стабильность как первичных твердых растворов, так и интерметаллических соединений [2].

Основными факторами, определяющими размеры и параметры области первичных твердых растворов являются размерный фактор, электроотрицательность и валентность.

Для определения растворимости в алюминии Ni, Si, выбранных для лазерной наплавки на детали из Al-сплавов, автором на основе теории Даркена-Гурри построены диаграммы растворимости для Al (рис. 1) и для Ni (рис. 2) [3], которые необходимы для прогноза параметров твердых растворов Al – Ni, Al – Si, образующихся при лазерной наплавке МФП и сварке разнородных металлов в узлах герметизации корпусов датчиков.

Из анализа диаграмм следует ожидать образование твердых растворов Ti и Zn с Al. Достаточно хорошо растворимы в Al, Si, Mn, Cu, Fe, Co, вследствие чего можно ожидать образование прочных твердых растворов этих элементов в Al. Образование твердых растворов Ni в Al менее вероятно из-за его плохой растворимости в Al, 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, являющимся основой МФП.

Из анализа построенных диаграмм следует также ожидать образование прочного твердого раствора при лазерной наплавке МФП на основе Si, а при наплавке на основе Ni из-за его

неограниченной 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) датчиков предпочтительно МФП на основе Si.

Для узлов герметизации электросоединитель – корпус датчика, штенгель – корпус датчика, узла бесштенгельной откачки более предпочтительно МФП на основе Ni.

Использованные справочные данные (табл. 1) и построенные диаграммы [3] 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, эл. дугой и др.) не гарантируется получение прочной связи в системе Al – Ni.

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/см^2 . При этом скорость нагрева и охлаждения зоны наплавки составляет $10^2 \dots 10^6 \text{ град/с}$. Известно [1], 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. Однако процесс лазерной импульсной наплавки Ni на Al в этом аспекте не исследован.

Рассмотрим взаимодействие твердой и жидкой фаз при лазерной наплавке. 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.

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 [2].

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. Для большинства элементов замещения их подвижность при переходе из жидкого состояния в твердое резко падает (коэффициенты диффузии уменьшаются на три – пять порядков), и длительность пребывания при повышенных температурах в реальных процессах наплавки оказывается недостаточной для существенного развития процессов диффузии.

Количественное решение задачи по гетерогенной диффузии примеси в зоне контакта твердой и жидкой фаз при частных граничных условиях приведено в работе [1]. Характер распределения примеси зависит от коэффициента распределения k , характеризующего различную растворимость элементов в твердой и жидкой фазах, от коэффициента диффузии в твердой D_T и жидкой $D_{Ж}$ фазах, длительности процесса t и градиента концентрации примеси на границе сплавления.

Значения коэффициентов диффузии D зависят от температуры, концентрации, структуры, примесей и могут меняться в широких пределах ($10^{-7} \dots 10^{-16} \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$ и менее). Значение коэффициентов диффузии в жидкости в пределах $10^{-4} \dots 10^{-6} \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$. Длительность контактирования в случае наплавки традиционными способами находятся 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 ($k_0 = c_T / c_{Ж}$) 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 повы-

шает 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 [2]:

$$k = k_0 / [k_0 + (1 - k_0) \exp(1 - f\delta_0 / D_{ж})], \quad (1)$$

где f – скорость увеличения толщины твердой фазы; δ_0 – толщина ламинарного слоя; $D_{ж} = 10^{-5} \dots 10^{-4} \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$.

Для большинства практических случаев неизвестны точные значения эффективного коэффициента распределения k , коэффициентов диффузии D_T 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 [2] приведено решение для определения концентрации c_T и $c_{ж}$:

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

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

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

Предварительные исследования [3] показали, что при лазерной наплавки Ni на Al-сплав, несмотря на малую длительность процесса (4 мс), происходит образование в зоне контакта Al – Ni тонкой диффузионной прослойки толщиной мкм. Исходя из этого по известной формуле [1]:

$$y = k\sqrt{Dt} \quad (4)$$

приблизительно определен коэффициент диффузии Ni в Al, равный $D = 10^{-1} \dots 10^{-2} \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$, т.е. на несколько порядков превышает известные значения. Поэтому для более точного определения фактического коэффициента диффузии необходимо проведение специальных исследований.

Для обоснования технологических режимов лазерной наплавки Si и Ni на свариваемые кромки деталей корпуса датчика из Al-сплавов автором выполнен аналитический расчет:

- скорости наплавки, мм/мин и мм²/мин;
- количества проходов и слоев, необходимых для получения МПФ 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 $f = 10 \text{ Гц}$.
- конструктивное исполнение свариваемой кромки определено исходя из следующих соображений.

– конструктивная прочность кромки корпуса и крышки датчика не должна быть меньше заданной конструктором с учетом допустимого снижения запаса прочности не более 25 %.

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

– 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 [1]

Скорость наплавки определяется по известной формуле [1]:

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

для определения количества проходов при наплавке одного слоя необходимо знать величину площади, наплавляемой за один проход.

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

а количество проходов n определим по формуле

$$S_n = (n + 1)(1 - k) S_1 \text{ ,} \quad (7)$$

где $S_1 = 1d$ – площадь первой дорожки, $S_n = 1b$ – площадь всех (n) дорожек.

Так как ширина кромки (рис. 2.5) задана, то

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

Отсюда определим количество проходов:

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

Для определения количества наплавляемых слоев m необходимо знать $h_{МФП}$ (НВС 2.3) и толщину одного слоя $h_{сл}$, определяемую экспериментально:

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

где

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

По результатам предварительных экспериментов толщина наплавленного слоя $h_{МФП}$ должна соответствовать (1,2–1,3) ($H_0 - h$), т.е. незначительно возвышаться над поверхностью стенки корпуса или крышки датчика. Тогда

$$m = \frac{(1.2 - 1.3) (H_0 - h)}{h_{сл}} \text{ .} \quad (12)$$

Авторами предложена формула для определения длительности наплавки одного слоя:

$$t = \frac{S_n}{V_n} = \frac{b * l}{60 * f * \frac{hd^2}{4} (1 - k)} \text{ .мин.} \quad (13)$$

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

$$t_{МФП} = m * t_{сл} \text{ , мин} \quad (14)$$

Выводы

В соответствии с разработанной технологической концепцией:

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

- для получения МФП на основе Ni на деталях узлов герметизации Al – 29 НК и др. необходимо применить высокоскоростной нагрев импульсным лазерным излучением с целью увеличения растворимости Ni в Al. Необходимо проведение специальных экспериментов по определению фактической концентрации Ni в зоне соединения Al – Ni с последующей раз-

работкой технологических режимов подготовки поверхности и лазерной импульсной наплавки Ni на корпусные детали из Al-сплава.

Список литературы: 1. *Технологическая концепция лазерной герметизации радиоэлектронных лазеров в корпусах из алюминиевых сплавов* / Н. В. Замирец, В. Г. Котух, В. А. Шур, Т. Л. Алтухова // *Технология приборостроения*. 1996. N1. С. 84-87. 2. *Экспериментальные исследования технологических режимов герметизации корпусов микроблоков радиоэлектронной аппаратуры* / В. Г. Котух // *Технология приборостроения*. 1998. N1. С. 27-30. 3. *Исследования механизма образования многофункционального покрытия на корпусных деталях радиоэлектронных модулей* / Т. Л. Алтухова, В. Г. Котух // *Технология приборостроения*. 1998. N1. С. 38-42

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники
Харьковский институт социального прогресса*

Поступила в редколлегию 02.04.2009