

Изобретение относится к технологии диффузионной сварки и может быть использовано при изготовлении высокоэффективных теплообменников с высокой степенью ребрения, например, матричных, для различных областей теплоэнергетики.

Известен способ сварки пакета разнородных материалов, включающий нагрев пакета, изотермическую выдержку, охлаждение и изменение удельного давления в процессе сжатия пакета [1].

Недостатком этого способа при изготовлении теплообменника является то, что герметичность каналов теплообменника нарушается раньше, чем происходит падение его прочности при термоциклировании.

Наше исследование показало, что это связано со следующими факторами. Зона соединения разнородных материалов, например, алюминия со стеклом является неоднородной по составу. Большая часть зоны соединения состоит из продуктов взаимодействия стекла с чистым алюминием и является высокопрочным диффузионным соединением. Однако в зоне соединения образуются и локальные участки раствора оксида алюминия с оксидами стекла, представляющие собой несогласованный спай. Эти участки являются слабым местом соединения. Значительная разница в температурных коэффициентах линейного расширения (ТКЛР) стекла ($86 \times 10^{-7} \text{град}^{-1}$) и алюминия ($200 \times 10^{-7} \text{град}^{-1}$) приводит к тому, что в указанном спае возникают напряжения опасной величины, которые приводят к локальным трещинам и потере герметичности при термоциклировании теплообменника.

Задача, на решение которой направлено наше изобретение, заключается в создании такого способа изготовления матричного теплообменника диффузионной сваркой при использовании легкоплавкой составляющей (многокомпонентного стекловидного материала), который позволяет обеспечить герметичность каналов теплообменника при длительном термоциклировании за счет исключения возможности появления микротрещин в зоне соединений разнородных материалов.

Поставленная задача решается тем, что в способе изготовления матричного теплообменника диффузионная сварка ведется с изменением удельного давления: сначала (I - й этап) прикладывают давление $0,3 - 0,4 \text{ кг/мм}^2$ при достижении температуры начала деформации ($T_{нд}$) более легкоплавкой составляющей, затем его снижают до $0,1 - 0,2 \text{ кг/мм}^2$ при температуре пленкообразования этой составляющей, а изотермическую выдержку (II - й этап сварки) проводят при температуре $560 - 570^\circ\text{C}$ ($T_{ив}$) в течение 30 - 40 мин. При этом же давлении проводят дифференциальный отжиг (III - й этап сварки) до температуры 300°C - со скоростью охлаждения $4 - 5 \text{ град/мин}$, а до температуры 70°C - со скоростью $10 - 12 \text{ град/мин}$. Процесс сварки ведется в воздушной атмосфере окружающей среды. Температура начала деформации стекла связана с лавинообразным снижением его вязкости, поэтому повышение давления в это время повышает степень диспергирования оксидной пленки алюминия, что увеличивает прочность соединения. При достижении температуры пленкообразования стекла давление снижается до $0,1 - 0,2 \text{ кг/мм}^2$, минимальной необходимой для формирования участков "несогласованного спая" в зоне соединения. Большее давление вызовет деформацию алюминиевых деталей изделия.

Таким образом, на первом этапе происходит формирование зоны соединения и имеет место очаговое взаимодействие расплава стекла с алюминием. На втором этапе во время изотермической выдержки проходят процессы диффузионного взаимодействия тем интенсивней, чем выше температура. Максимальная ее величина ограничивается температурой, при которой начинается деформация свободных (не подлежащих соединению) участков пластин. Для алюминиевых пластин это $560 - 570^\circ\text{C}$.

На третьем этапе в процессе охлаждения начинается дифференциальный отжиг, предназначенный для устранения остаточных напряжений опасной величины в участках "несогласованного спая" зоны соединения. Дифференциальный отжиг проводится в течение 10 мин при температуре, на 10 град превышающей $T_{нд}$. Учитывая, что максимальная температура процесса сварки значительно выше температуры отжига ($360 - 380^\circ\text{C}$ для указанного стекла), последний можно совместить с охлаждением от температуры сварки до $T_{нд}$ со скоростью, обеспечивающей как равномерное охлаждение всего изделия, так и необходимое время отжига. Таким образом, одновременно с повышением прочности соединения сокращается время изготовления теплообменника. Максимальная скорость охлаждения рассчитывается по соотношению, выведенному из формулы Давуальтера:

скорость охлаждения до температуры, на $80 - 100 \text{ град}$. ниже $T_{нд}$ (около 300°C), рассчитывается по

$$V_1 = \frac{4}{\alpha^2};$$

формуле

$$V_2 = \frac{10}{\alpha^2},$$

скорость охлаждения на участке $300 - 70 \text{ град}$. по формуле $V_2 = \frac{10}{\alpha^2}$, где α - ТКЛР стекла. Таким образом, скорость охлаждения до температуры 300°C составляет $4 - 5 \text{ град/мин}$, а на участке $300 - 70^\circ\text{C}$ $10 - 12 \text{ град/мин}$.

Возможность ведения процесса сварки на воздухе с тем, что при температуре выше 150°C в стекле начинается, а при $320 - 330$ полностью завершается переход в вязкопластичное состояние, что создает условия для образования защитной среды, которая предотвращает доступ воздуха в зону соединения, ограниченную с обеих сторон алюминием.

Замена сварки в вакууме сваркой в воздушной атмосфере окружающей среды снижает энергоемкость процесса и его стоимость благодаря исключению необходимости использования вакуумного оборудования. Приведенные ниже примеры экспериментально проведенных режимов сварки подтверждают возможность достижения нужных результатов по прочности и герметичности каналов теплообменников при условиях предлагаемого способа сварки.

Пример 1 (прототип). Перфорированные пластины и проставки для пакета теплообменника из сплава АД1 обезжиривают в ацетоне. На проставки во время сборки пакета с двух сторон наносят равномерный слой порошка стекла толщиной $10 - 15 \text{ мкм}$. Собранный пакет помещают в вакуумную камеру где методом диффузионной сварки его нагревают до 500°C с одновременным сдавливанием при $P = 0,35 \text{ МПа}$, выдерживают при температуре и давлении 7 мин, после чего давление снимают и проводят

изотермическую выдержку (отжиг) при температуре 545°C в течение 35мин. Охлаждают пакет до комнатной температуры вместе с камерой. Готовые пакеты извлекают из камеры и подвергают механическим испытаниям, испытаниям на герметичность и термоциклирование.

В процессе испытаний на герметичность давление плавно поднимается до 20ат с выдержками по 10мин через каждые 2ат. Термоциклирование проводится в диапазоне температур от -200 до 100град (жидкий азот-термостат). Периодичность смены уровня температур составляла 10мин при нагреве образцов и 3мин при охлаждении. Герметичность стенок каналов теплообменника контролировалась каждые 5 термоциклов.

Прочностными испытаниями на сдвиг установлено, что прочность соединения пластин в образцах, изготовленных по режиму примера 1, составляет 130МПа, пакет сохраняет прочность в течение не менее 40 термоциклов, но потери герметичности происходит уже после 30 термоциклов.

Пример 2. Перфорированные пластины и проставки пакета теплообменника, изготовленные из сплава АД1, обезжиривают в ацетоне. На проставки во время сборки пакета с двух сторон наносят равномерный слой порошка стекла толщиной 10 - 15мкм. Собранный пакет помещают в вакуумную камеру для проведения сварки. При нагреве до $T = 370^{\circ}\text{C}$ пакет подвергается сжатию при давлении 0,35кг/мм². При температуре 525°C давление уменьшают до 0,15кг/мм². При температуре 565°C проводят изотермическую выдержку в течение 35мин. Охлаждение пакета ведут со скоростью 4,5град/мин до температуры 300°C, затем со скоростью 11град/мин до температуры 70°C, поддерживая давление 0,15кг/мм². Готовые пакеты извлекают из камеры и подвергают испытаниям на герметичность и прочность при термоциклировании. Испытаниями установлено, что каналы теплообменника сохраняют герметичность после 60 термоциклов.

Примеры 3 - 38. В таблице приведены экспериментальные результаты испытаний теплообменников, изготовленных по различным режимам сварки. В отличие от примера 2 процесс сварки проведен на воздухе. Герметичность сохраняется после 60 термоциклов. Из вышеизложенного следует, что предлагаемый способ соединения алюминиевых пластин в пакет теплообменника и режимы, проверенные экспериментально, являются оптимальными для получения высоконадежного соединения с повышенными эксплуатационными характеристиками.

Количество "жестких" термоциклов достигает 60 и более циклов и устойчиво превышает заданные эксплуатационные диапазоны, как и перепад давления между каналами теплообменника. При этом обеспечено надежное воспроизведение положительных результатов со 100% выходом герметичных матричных теплообменников.

Таблица

Результаты испытаний изготовленных теплообменников

Режим сварки Параметры II и III этапов: T и $v = 565^{\circ}\text{C}$; $\tau = 35$ мин Темп охлаждения: до 300°C , $V = 4,5$ град/мин; до 70°C , $V = 11$ град/мин. Параметры I этапа (нагрев под давлением).						
№	Температура начала деформации		Температура сброса давления, °C	Количество термоциклов	Давления при испытании, кг/мм ²	Результат испытаний
	T_1 , °C	P_1 , кг/мм ²				
3	350	0,35	525	40	0,12	не герметичен при 12 атм
4	360	0,35	525	60	0,15	герм.
5	390	0,35	525	60	0,15	герм.
6	400	0,35	525	50	0,15	герм.
7	370	0,20	525	40	0,15	герм.
8	370	0,30	525	60	0,15	герм.
9	370	0,40	525	60	0,15	герм.
10	370	0,50	525	60	0,15	герм. деформация
11	370	0,35	470	50	0,10	н/герм. при 10 атм.
12	370	0,35	480	60	0,15	герм.
13	370	0,35	530	60	0,15	герм.
14	370	0,35	535	60	0,15	герм.
15	370	0,35	525	30	0,05	герм.
16	370	0,35	525	60	0,1	герм.
17	370	0,35	525	60	0,2	герм.
18	370	0,35	525	60	0,25	герм. деформация

Продолжение таблицы

Параметры I и III этапов: $T_1 = 370^\circ\text{C}$, $P_1 = 0.35 \text{ кг/мм}^2$ $T_2 = 525^\circ\text{C}$, $P_2 = 0.15 \text{ кг/мм}^2$ Темп охлаждения: до 300°C , $V = 4.5 \text{ град/мин}$; до 70°C , $V = 11 \text{ град/мин}$. Параметры II этапа (изотерм выдержка)					
№	$T_{из}, ^\circ\text{C}$	$P, \text{ кг/мм}^2$	$t, \text{ мин}$	К-во термоцикл.	Результат испытаний
19	550	0.15	35	55	герм.
20	560	0.15	35	60	герм.
21	570	0.15	35	60	герм.
22	575	0.15	35	60	герм. деформация
23	565	0.05	35	30	герм.
24	565	0.1	35	60	герм.
25	565	0.2	35	60	герм.
26	565	0.25	35	60	герм.
27	565	0.15	20	40	н/герм. при 12 атм.
28	565	0.15	30	60	герм.
29	565	0.15	40	60	герм.
30	565	0.15	45	80	герм.
Параметры II и III этапов: $T_1 = 370^\circ\text{C}$, $P_1 = 0.35 \text{ кг/мм}^2$, $T_2 = 525^\circ\text{C}$, $P_2 = 0.15 \text{ кг/мм}^2$ $T_{из} = 565^\circ\text{C}$, $P = 0.15 \text{ кг/мм}^2$, $t = 35 \text{ мин}$. Параметры II I этапа (охлаждения)					
№	Скорость до 300°C , град/мин	Скорость до 70°C , град/мин	Кол-во термоциклов	Результат испытаний	
31	3	11	60	герм.	
32	4	11	60	герм.	
33	5	11	60	герм.	
34	6	11	50	герм.	
35	4.5	9	60	герм.	
36	4.5	10	60	герм.	
37	4.5	12	60	герм.	
38	4.5	13	50	герм.	