

Особенности пайки сотовых уплотнений ГТД порошковыми припоями в виде лент

*Морозов Вячеслав Андреевич – инженер-технолог 2 кат ТБ пайка ОГС;
Монастырская Елена Владимировна – к.т.н., начальник ТБ пайки ОГС;
Пашков Игорь Николаевич – д.т.н., профессор кафедры ТiСАПР МП Московского
авиационного института*

Любые утечки газа из газового тракта двигателя, как правило, снижают КПД двигателя. Для уменьшения утечек и перетечек газа широкое применение получили лабиринтные уплотнения. Для облегчения приработки в компрессорах при высоких температурах (до 1000 С°) применяют сотовые покрытия из металлической фольги, припаиваемой к статорной части ТГД – сотовые уплотнения.

Существует три основных технологии сборки под пайку и пайки сотовых уплотнений:

Первая технология заключается в предварительной сборке сотоблока, с корпусом сотового уплотнения, фиксацией сотоблока точечной контактной сваркой (ТКС), нанесением порошкового припоя в сотоблок с помощью специального дозатора и последующем закреплении порошка связующим.

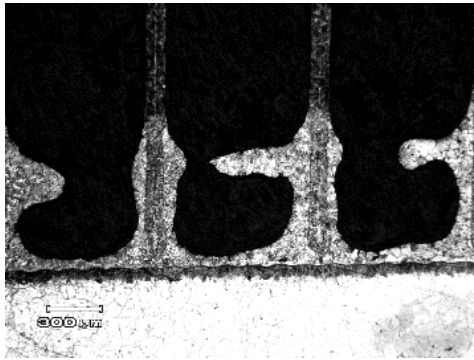
Вторая технология подразумевает использование специальной установки для изготовления сотоблоков, которая во время гофрирования фольги прихватывает припой в виде аморфной ленты толщиной порядка 35-45мкм между фольгами. Далее остается только зафиксировать сотоблок в корпусе сотового уплотнения.

Третья технология подразумевает использование порошковых припоев в виде лент на пластичных связующих. В данном случае припой вдавливаются в сотоблок непосредственно перед закреплении в корпус сотового уплотнения. Далее аналогично предыдущим технологиям осуществляют монтаж и фиксацию сотоблока ТКС.

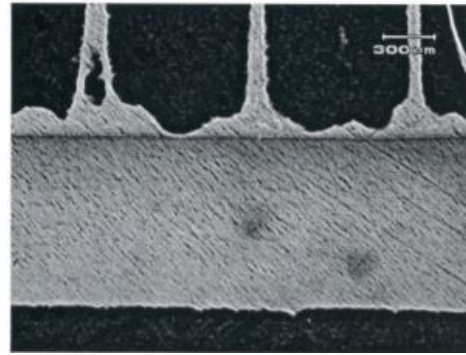
Технологии имеют ряд недостатков. Первая накладывает ограничения на конструкцию сотового уплотнения, так как корпус должен обеспечивать доступ для дозатора, который засыпает порошковый припой в ячейки. Также к недостаткам технологии можно отнести высокие требования, предъявляемые к порошкам припоя так как от морфологии частиц и фракционного состава припоя, зависит дозировка и в последующем качество паянного соединения. Вторая технология является дорогостоящей, так как подразумевает использование специального оборудования и дорогостоящего припоя в виде аморфной ленты. Третья технология является наиболее перспективной, так как не накладывает ограничение на конструкцию уплотнения и не подразумевает переоснащения производств, внедрением новых установок для изготовления сотоблоков.

В 2019 году на производственном комплексе «Салют» Объединённой Двигателестроительной Корпорации были проведены опытные работы по освоению технологии пайки сотовых уплотнений пластифицированными порошковыми лентами. После пайки серии образцов был обнаружен эффект,

который ранее не наблюдался при пайке сотовых уплотнений по традиционной технологии. На рисунке 1 показана микроструктура паяного соединения сотоблока с вписанной окружностью $d_{дч}=0,9$ мм. На нем видно образование наплывов припоя, которые находятся на высоте толщины ленты, используемой для пайки. Данные наплывы не являются браковочным признаком, однако они препятствуют визуальной контролю качества паяного соединения, а также вызывают некорректную работу ультразвукового дефектоскопа.



пайка порошковым припоем
в виде ленты



пайка по серийной технологии

Рисунок 1. Макроструктура паяного соединения сотового уплотнения.

Для изучения природы образования наплывов была проведена работа по исследованию процесса пайки сотового уплотнения. Образцы паяные пластифицированной лентой были отправлены в металлографическую лабораторию для анализа структуры паянных соединений. После проведения рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) было выявлено, что паянные швы имеют существенную ликвацию. В верхней части сотового уплотнения, в паянном шве между гофрированными фольгами припой был обогащён легкоплавкой фазой с содержанием бора выше чем в припое, который находился в нижней части сотового уплотнения, в наплывах (рисунок 2, таблица 1).

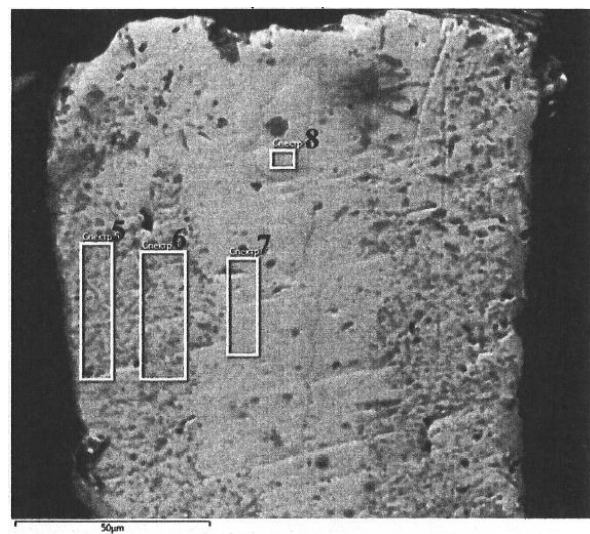
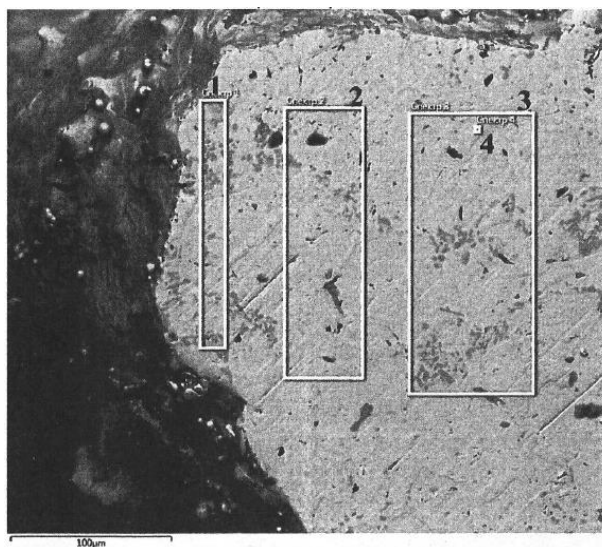


Рисунок 2. Микроструктура паяного соединения

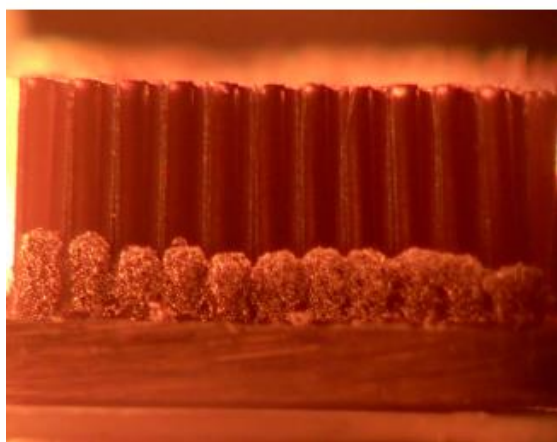
Слева - наплыв припоя вблизи подложки ; справа - раянный шов в верхней части сотоблока

Таблица 1 Содержание химических элементов по спектрам

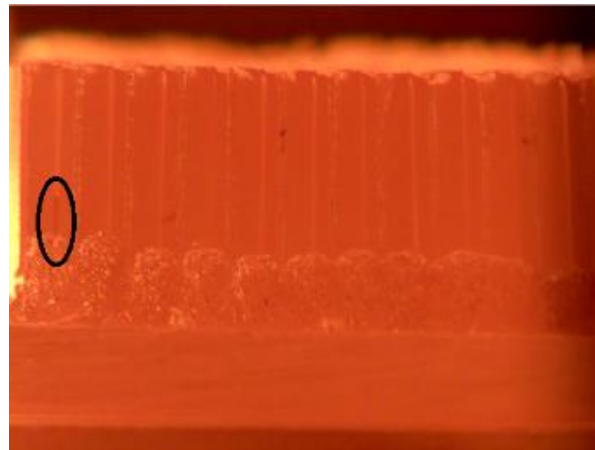
Спектр	B	Si	Ti	Cr	Fe	Ni
1	-	3,4	-	17,44	2,77	76,39
2	4,54	3,44	-	11,91	2,53	77,58
3	-	3,57	-	14,61	2,50	79,32
5	10,6	0,61	0,48	21,03	0,73	66,55
6	11,67	0,99	0,24	20,19	0,94	65,98
7	-	2,44	-	14,41	1,24	81,91

Для изучения динамики плавления припоя в сотовом уплотнении были изготовлены образы для пайки в специальной вакуумной лабораторной печи с возможностью фиксации процесса на видеокамеру. Во время съемки процесса нагрева было обнаружено, что при достижении температуры начала плавления припоя первичная жидкая фаза поднимается по зазору вверх сотового уплотнения по причине действия капиллярных сил, а также более высокой температуры тонкостенного сотоблока в сравнении с массивной подложкой (рисунок 3).

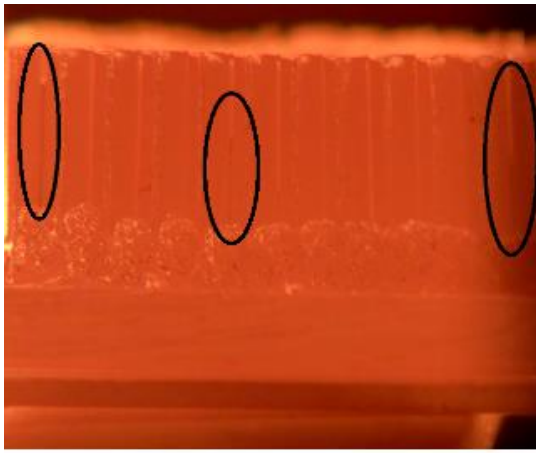
Таким образом был сделан вывод, что в процессе выхода на температуру пайки количество бора в основном объеме припоя снижается, тем самым повышая его температуру плавления. Из-за этого температуры пайки недостаточно для полноценного растекания припоя.



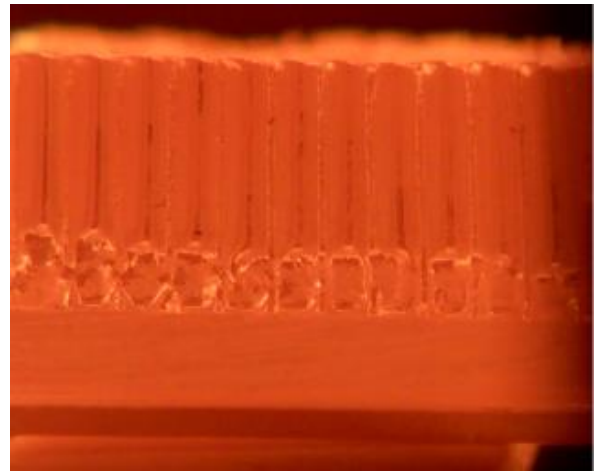
а) $T=1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ начало процесса пайки



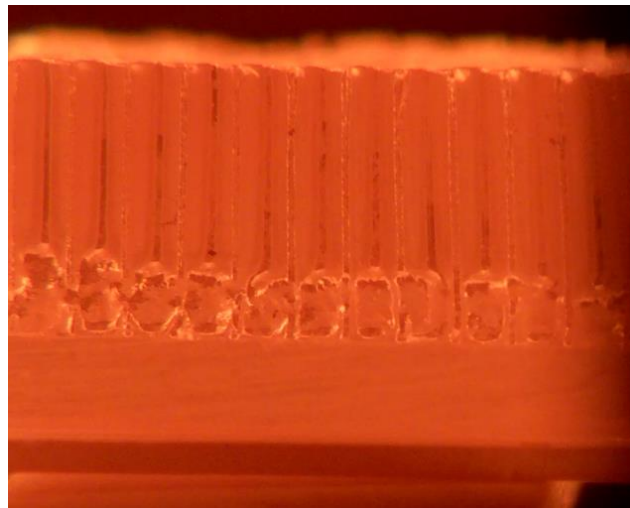
б) $T=1100\text{ }^{\circ}\text{C}$; время выдержки 1 минута. Заполнение первого зазора между гофрированными фольгами сотоблока



*в) $T=1100$ °C; время выдержки 3 минуты.
Активное заполнение зазоров между
гофрированными фольгами сотоблока*



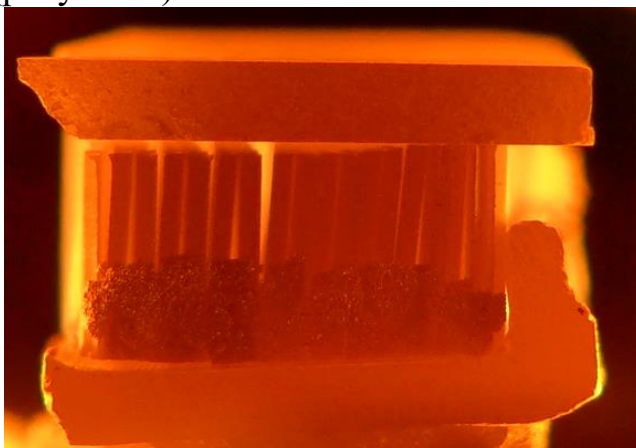
*г) $T=1100$ °C; время выдержки 5 минут.
Заполнение всех зазоров между
гофрированными фольгами*



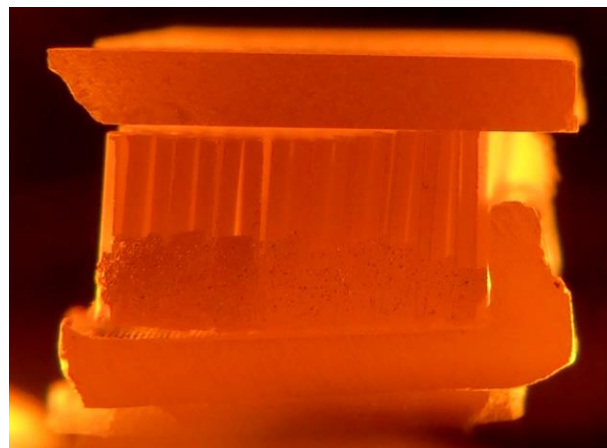
*д) $T=1100$ °C; время выдержки 8 минут.
Полное расплавление припоя на подложке*

Рисунок 3. Этапы пайки сотовго уплотнения.

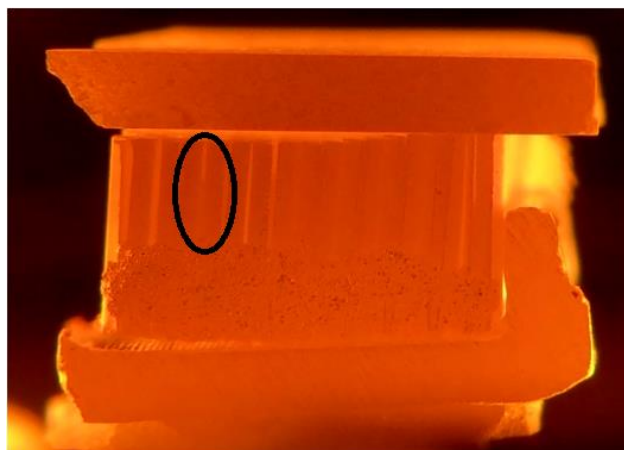
Для предотвращения вышеописанного эффекта было решено использовать технологическую оснастку для замедления нагрева тонкостенного сотоблока (рисунок 4).



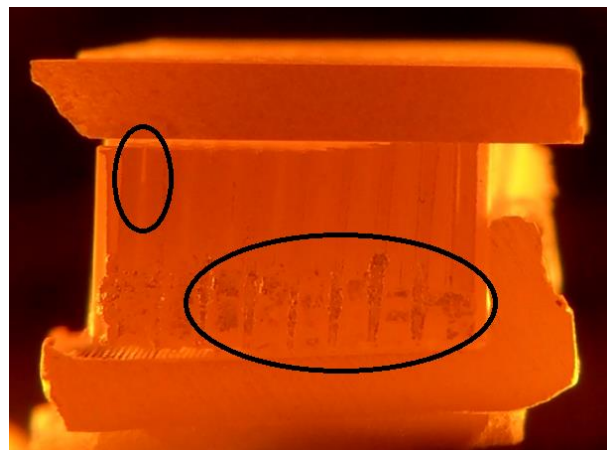
а) $T=1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ начало процесса пайки



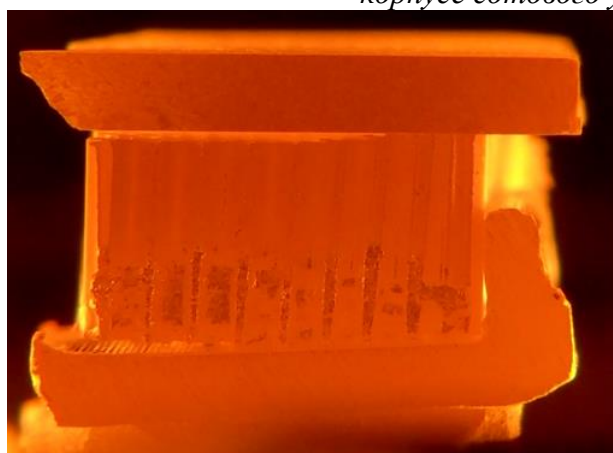
б) $T=1100\text{ }^{\circ}\text{C}$; время выдержки 1 минута. Заполнение между гофрированными фольгами сотоблока не наблюдается



в) $T=1100\text{ }^{\circ}\text{C}$; время выдержки 3 минуты. Начало заполнения зазора между гофрированными фольгами



г) $T=1100\text{ }^{\circ}\text{C}$; время выдержки 5 минут. Заполнение последнего зазора между гофрированными фольгами, припой на корпусе сотового уплотнения расплавлен



з) $T=1100\text{ }^{\circ}\text{C}$; время выдержки 8 минут. Полное расплавление припоя конец процесса пайки

Рисунок 3. Этапы пайки сотового уплотнения с использованием технологического экрана.

Затенив сотоблок экраном удалось снизить градиент температур между тонкостенным сотоблоком и подложкой (рисунок 4) и таким образом избавиться от наплывов припоя (рисунок 5).



Рисунок 5. Макроструктура паянного соединения после пайки с технологическим экраном