

На правах рукописи



Морозов Вячеслав Андреевич

**РАЗРАБОТКА ПРОЦЕССА ПАЙКИ СОТОВОГО УПЛОТНЕНИЯ  
ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
ПЛАСТИФИЦИРОВАННОГО ПОРОШКОВОГО ПРИПОЯ В ВИДЕ  
ЛЕНТЫ**

Специальность

2.5.8 – Сварка, родственные процессы и технологии

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва, 2021 г.

Работа выполнена на кафедре «Технологии и системы автоматизированного проектирования металлургических процессов» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: **-Пашков Игорь Николаевич,**  
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Официальные оппоненты: **- Люшинский Анатолий Владимирович,**  
доктор технических наук, профессор, АО «Раменское приборостроительное конструкторское бюро», заведующий научно-исследовательской лабораторией, г. Раменское  
**- Севрюков Олег Николаевич,**  
кандидат технических наук, доцент, институт ядерной физики и технологий «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», доцент офиса образовательных программ, г. Москва

Ведущая организация - АО «Объединённая двигателестроительная корпорация», г. Москва

Защита диссертации состоится «15» декабря 2021 года в 16 часов 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.327.05 в ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 121552, г. Москва, ул. Оршанская, д.3, аудитория 523А.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, А-80, ГСП-3, МАИ, ученому секретарю диссертационного совета и по электронной почте [paltievichar@mai.ru](mailto:paltievichar@mai.ru).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета и на сайте <https://mai.ru/events/defence/>.

Автореферат диссертации разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
24.2.327.05, к.т.н., доцент



---

Палтиевич А.Р.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

Для предотвращения утечек газового потока в горячей зоне газотурбинных установок широкое применение находят сотовые уплотнения. Одной из операций при производстве сотовых уплотнений является высокотемпературная пайка, выполняемая высокотемпературными припоями на никелевой основе.

В виду конструктивных особенностей сотовых уплотнений существует ряд проблем, связанных с получением стабильного качества паяных соединений. Можно выделить следующие особенности процесса пайки сотового уплотнения:

- большое количество паяных соединений на единицу площади, для пайки которых требуется точное и равномерное нанесение припоя;
- взаимодействие расплава припоя с материалом тонкостенного сотового блока и влияние взаимодействия на формирование паяного соединения;
- разнотолщинная конструкция сотового уплотнения, которая приводит к неравномерности нагрева тонкостенного сотового блока и массивного корпуса сотового уплотнения;

Данные особенности процесса пайки сотовых уплотнений вызывают необходимость разработки принципиально новых порошковых полуфабрикатов в виде пластифицированной ленты для точного и равномерного дозирования порошка. Исследовать и описать механизм формирования паяного соединения в вертикальном неравномерном зазоре характерном для сотового уплотнения. Смоделировать тепловые процессы, протекающие при нагреве сотового уплотнения для определения оптимальной технологии нагрева детали до температуры пайки и определить влияние разницы температур на растекание припоя в детали.

**Цель исследований** - разработка процесса создания неразъемного соединения конструкции типа «сотовое уплотнение» с помощью технологии высокотемпературной пайки и использованием пластифицированного порошкового припоя в виде ленты. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать порошковый припой в виде ленты на органическом пластифицированном связующем, обладающим высокой равномерностью и однородностью порошкового наполнителя, для обеспечения точного, воспроизводимого дозирования припоя и технологичного нанесения на сотовые блоки.

2. Исследовать влияние формы, размера частиц порошковых припоев и состав связующего вещества на технологические свойства ленты припоя, ее однородность и плотность.

3. Исследовать процесс формирования паяного соединения в вертикальном неравномерном зазоре, определить влияние количества припоя и температуры пайки на формирование соединения.

4. Разработать компьютерную модель тепловых процессов, протекающих при нагреве разнотолщинной конструкции сотового уплотнения, определить влияние градиента температур на растекание припоя и определить способ выравнивания температуры в детали при нагреве под пайку.

5. Сформулировать общие технологические рекомендации по пайке конструкции типа «сотовое уплотнение», которые будут включать в себя описание подготовительных операций, расчет требуемого количества порошкового припоя, нанесения порошкового припоя в виде ленты на органическом пластифицированном связующем, разработке технологической оснастки для пайки сотового уплотнения и контроля паяных соединений.

#### **Научная новизна**

- определено, что для достижения максимальной плотности и высокой однородности порошковой ленты на органическом пластифицированном связующем – высокомолекулярном каучуке необходимо использовать сферические порошки с размером частиц 40-70 мкм.

- впервые обнаружен эффект уплотнения порошкового наполнителя в следствии испарения растворителя из связующего вещества, определено, что для максимальной утяжки порошка следует использовать 6,8-7,5% раствор высокомолекулярного каучука в нефтяном сольвенте, при этом вязкость связующего вещества составляет 5,8-6,9 Н\*с/см<sup>2</sup>.

- впервые обнаружен эффект изменения кривой заполнения вертикального неравномерного зазора расплавом припоя и предложен механизм формирования паяного соединения избыточным количеством порошкового припоя ВПр11-40Н при пайке стали ХН78Т

- впервые разработана методика компьютерного моделирования распределения температуры в сотовом уплотнении при нагреве до температуры пайки в вакууме. Определено, что отставание тонкостенного сотового блока от массивного корпуса составляет 20-25 °С, при этом разница температур провоцирует преждевременное растекание припоя по сотовому блоку до достижения  $T_{\text{ликвидуса}}$  припоя.

### **Практическая значимость**

- впервые получен пластифицированный порошковый припой в виде ленты методом шликерного литья на подложку с использованием высокомолекулярного каучука в качестве связующего вещества обладающий плотностью 0,7 от уплотненной насыпной плотности порошка;

- данные полученные при исследовании влияния формы, размера частиц порошка, составу и вязкости связующего вещества на свойства ленты могут быть использованы для аналогичных материалов для наплавки с применением различных органических соединений;

- разработанная компьютерная модель тепловых процессов, протекающих при пайке сотового уплотнения в вакууме позволяет использовать ее для разработки технологических процессов на аналогичные изделия без необходимости проведения большого количества экспериментальных нагревов.

- в результате проведенных исследований сформулированы общие рекомендации по расчёту припоя для пайки сотового уплотнения с гексагональной шестигранной ячейкой, подготовительным операциям и технологическим режимам пайки в вакууме

### **Методология и методы исследований**

Для решения поставленных в работе задач были использованы следующие методы:

- Электронная металлография – для исследования структуры некапиллярного паянного зазора, заполненного припоем ВПр11-40Н при различных технологических условиях.

- Метод конечных элементов – для численного решения уравнения теплопроводности при расчёте распределения температур во время термического цикла пайки. Компьютерное моделирование нагрева проводилась в ПО ProCast.

### **Положения и результаты, выносимые на защиту:**

- способ получения порошковой ленты на органическом связующем, методом шликерного литья на подложку с использованием высокомолекулярного каучука в качестве связующего вещества;

- закономерность влияние формы и размера частиц на плотность и однородность укладки порошкового наполнителя в пластифицированной ленты на органическом связующем;

- механизм формирования паяного соединения в неравномерном вертикальном зазоре при пайке стали ХН78Т припоев ВПр11-40Н;

- компьютерная модель распределения тепловых процессов при пайке сотового уплотнения, адекватность которой подтверждена визуализацией процесса пайки макета в вакууме;

- технология пайки сотового уплотнения газотурбинного двигателя пластифицированным порошковым припоем на органическом связующем.

**Соответствие паспорту специальности** Содержание диссертации соответствует следующим пунктам паспорта специальности 05.02.10 «Сварка, родственные процессы и технологии»: физические процессы в материалах при сварке и родственных технологиях, фазовые и структурные превращения, образование соединений и формирование их свойств; тепловые процессы и деформации при сварке, пайке и наплавке.

**Реализация и внедрение результатов работы** по разработанной технологии получения порошковых пластифицированных припоев в виде ленты изготовлены ленты из припоев ВПр11-40Н, ВПр42, разработаны технические условия на пластифицированную порошковую ленту ТУ-244521-001-94123571-2020.

Припои прошли апробацию на отечественных предприятиях-производителя газотурбинных двигателей ПК «САЛЮТ и ОАО «Металлист-Самара».

**Апробация работы** Основные положения настоящей работы доложены: на ежегодной Международной научно-технической конференции "Быстрозакаленные материалы и покрытия" (2016, 2020 г., Россия), Международной молодежной научно-технической конференции «Гагаринские чтения» (2018, 2019 г., Россия), Научно-техническом конгрессе по двигателестроению (2018 г., Москва), Международной научно-технической конференции «Пайка-2018» (2018 г., Москва), X Всероссийской научно-технической конференции молодых специалистов (2019 г., Уфа).

**Публикации** Основное содержание диссертации опубликовано в 9 научных работах, из них 3 в рецензируемых изданиях из перечня ВАК РФ, 6 сборников трудов научных конференций.

**Структура и объем работы** Структура и объем работы Диссертация состоит из введения, пяти, общих выводов по работе, списка использованной литературы из 75 наименований. Изложена на 128 страницах машинописного текста, содержит 59 рисунков и 8 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулирована цель, показана ее научная новизна и практическая значимость.

**Первая глава** содержит сведения о высокотемпературной пайке в газотурбостроительной области, дозировки и нанесении порошковых припоев, использовании сотовых уплотнений их материалах. Рассмотрены вопросы капиллярного течения припоя. Приведены методы компьютерного моделирования тепловых процессов применительно к пайке.

Сотовое уплотнение – конструкция, состоящая из двух основных узлов – сотового блока и корпуса сотового уплотнения. Наиболее распространенными материалами для изготовления сотовых уплотнений являются стали ХН78Т – для сотовых блоков, ХН62ВМЮТ – для корпуса сотового уплотнения и припой ВПр11-40Н. (рис. 1).

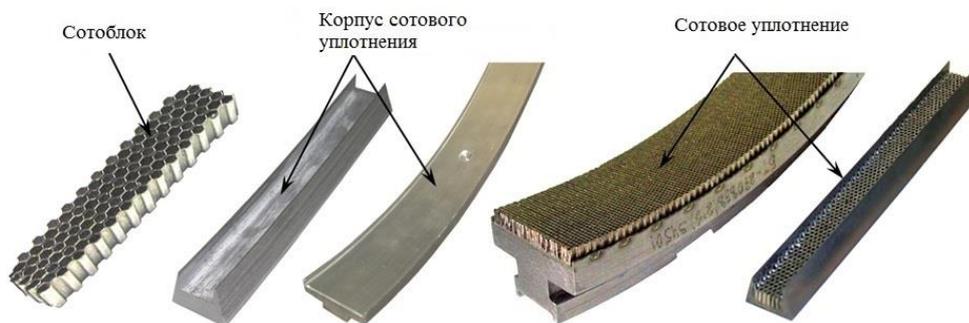
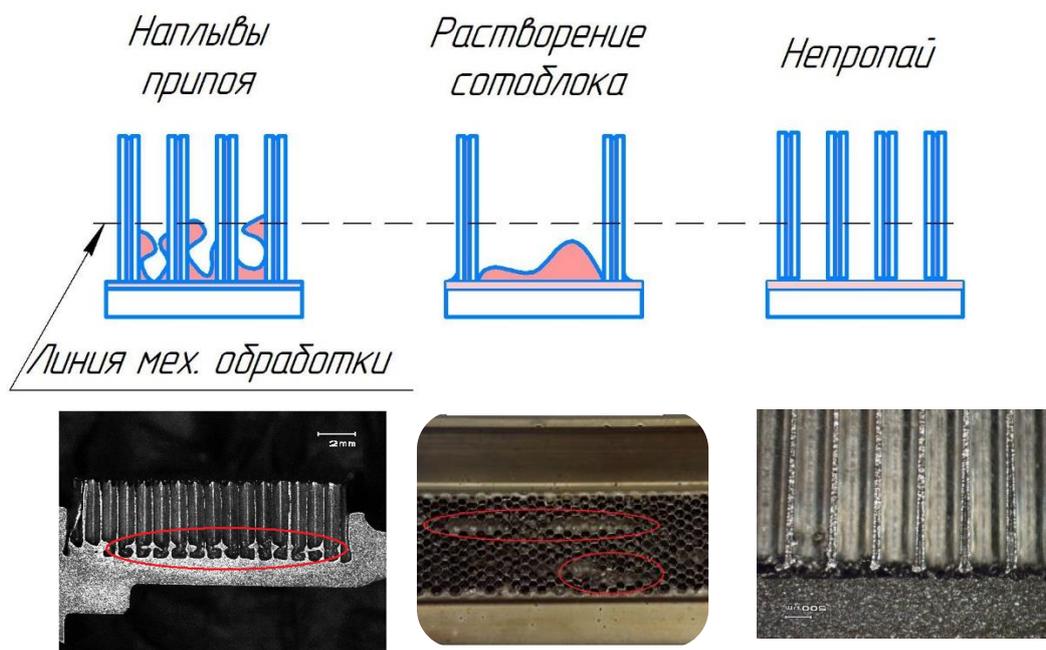


Рисунок 1 – Конструкция сотового уплотнения

При пайке сотовых уплотнений встречаются со следующими видами дефектов:

- наплывы припоя в ячейках сотового блока препятствующие визуальному контролю и выходящие за пределы припуска на механическую обработку;
- растворение тонкостенного сотового блока;
- непропай между корпусом сотового уплотнения и сотовым блоком. (рис. 2)



## Рисунок 2 – Дефекты паяный соединений сотовых уплотнений

Дефекты связаны с двумя основными параметрами пайки – точное равномерное дозирование порошкового припоя и равномерный нагрев разнотолщинной детали, толщина листа из которого формируют сотовые блоки как правило составляет 0.05-0.1 мм, при этом корпус сотового уплотнения может достигать 20-40мм.

Применимо к сотовым уплотнениям используется два способа нанесения порошковых припоев. Первый способ – засыпка припоя с помощью специальных дозаторов, второй – применение порошковых лент на органических пластифицированных связующих. Засыпка порошка припоя является не технологичной, требует специального оборудования, а также не применима на сотовых уплотнениях, где доступ дозатора ограничен.

Использование порошковых лент проще, а стабильность и равномерность дозировки порошка обеспечивается самим полуфабрикатом. За рубежом подобные материалы получили широкое распространение не только для пайки, но и для наплавки функциональных покрытий, однако в России их производством и продажей занимается только ФГУП ВИАМ и ленты их производства имеют ряд ограничений, связанных с пластическими свойствами, сроком хранения и получением ленты «бесконечной» длины.

Порошковые ленты припоя на органическом пластифицированном связующем представляют собой металлический порошок, связанный пластичной связкой, которая не оказывает влияние на растекание припоя и придает ленты пластические свойства, что позволяет наносить ее на сотовый блок. Способы получения ленты и связующие вещества отображены во множестве патентов, однако данные по влиянию физических свойств порошков и связки на основные параметры ленты – плотность и однородность распределения порошка отсутствуют.

Во время пайки сотового уплотнения требуется заполнение большого количества вертикальных неравномерных зазоров, которое осуществляется под действием капиллярных сил. Методики исследования капиллярного соединения известны и находят применение для определения свойств припоев. На формирование паяных соединений в таких зазорах оказывает влияние количество припоя, который располагается внизу капилляра, динамика нагрева детали и температура пайки.

Разнотолщинная конструкция не технологична с точки зрения нагрева в вакууме. Для выравнивания температуры используют технологичные приемы: ступенчатый нагрев или экранирующую оснастку. Для проектирования режимов нагрева или технологической оснастки необходимо понимать, как распределяется температура в детали. Для решения тепловых задач по распределению температур применяют методы

математического моделирования в частности метод конечных элементов. На практике реализация моделирования происходит с помощью специального программного обеспечения, которое позволяет смоделировать различные процессы нагрева.

Разработка процесса пайки конструкции типа «сотовое уплотнение» требует комплексного исследования, включающего в себя разработку пластифицированного порошкового припоя в виде ленты, которая позволит равномерно и точно дозировать припой, исследования влияния количества припоя и температурных характеристик на формирование паяного соединения в неравномерном вертикальном зазоре, а также проведения компьютерного моделирования тепловых процессов, протекающих в сотовом уплотнении при нагреве до температуры пайки.

**Вторая глава** посвящена разработке порошкового припоя в виде ленты на пластифицированном связующем. Описана технология получения ленты, разработаны методики по определению плотности и однородности порошкового наполнителя в ленте, исследовано влияние физических свойств порошков и состав связующего вещества на свойства ленты.

На рис. 3. представлена технологическая схема получения ленты. В качестве связующего вещества использовали 8-ми %-й (по массе) раствор высокомолекулярного каучука в нефтяном сольвенте. Каучук, заливали нефтяным сольвентом, тару помещали в лабораторный смеситель С2.0 «Турбула» и замешивали в течении 12-ти часов, до полного визуального растворения каучука. В связующее вещество добавляли порошок припоя, получая однородный шликер. Концентрацию порошка припоя в шликере составляла 90% по массе. Шликер замешивали в открытом смесителе в течении 15-ти минут после чего его разливали в ложементы, обеспечивающие одинаковую толщину будущей ленты. На ложементы предварительно закрепляли бумагу с силиконовым покрытием для предотвращения адгезии связующего вещества к ложементу. Ложементы со шликером помещались в сушильный шкаф. Сушку шликера осуществляли в течении 15-ти минут при температуре 80 °С. После сушки из ложемента вместе с силиконовой бумагой изымали готовую ленту припоя толщиной 0,5 мм.



Рисунок 3 – Технологическая схема изготовления порошкового припоя в виде ленты.

Исследование влияния формы и размера частиц на свойства порошковой ленты проводили на модельных порошковых сплавах применяемых в качестве припоев. В качестве модели сферического порошка использовали медно-фосфорный припой П14 с широким разбросом фракции 0-160 мкм, с малым разбросом 70-100, а также мелкодисперсную фракцию 0-70. Для моделирования припоя с различной формой частиц использовали композиционный припой ВПр11-40Н, который представляет собой механическую смесь сферического порошка ВПр11и округлых частиц 40Н. Для исследования порошка с пластинчатой (чешуйчатой) формой использовали медно-никелевый припой МНМц 9-23,5.

Свойства используемых в исследовании порошков определяли по стандартным методикам: размеры частиц определяли ситовым анализом по ГОСТ 27562-87; морфология частиц определяли визуально с использованием оптического бинокулярного микроскопа МБС-10; насыпная плотность в свободной и уплотненном состоянии измеряли по ГОСТ 19440-94; истинную плотность порошковых сплавов определяли пикнометрическим методом.

Плотность лены рассчитывали по количеству порошка припоя на единицу объема. Для этого получали ленты припоя из различных порошковых припоев длиной  $L=400$  мм; шириной  $W=20$ мм и толщиной  $h=0,8$  мм. Ленты взвешивали на весах с точностью до 0,01гр. Далее помещали их в муфельную печь, прогретую до температуры 400 °С и выдерживали 20 минут для удаления связующего вещества. После порошок припоя остужали до комнатной температуры и проводили повторное взвешивание. Плотность порошковой ленты припоя рассчитывали по:

$$\rho_l = \frac{M_{\Pi}}{L \times W \times h} \quad (2)$$

Однородность распределения порошка определяли взвешиванием отдельных одинаковых по объему образцов ленты припоя. Для этого изготавливали образцы со следующими параметрами: ширина  $W=20$  мм; толщина  $h=0,5$ мм; длина 50мм. Полученные образцы взвешивали с точностью до 0,01 гр. Однородность рассчитывали в % как разницу между наибольшей и наименьшей массой образца ленты, полученной из одного порошка.

На рис. 5 представлена диаграмма отображающая разброс масс образцов ленты припоя, который характеризует однородность распределения порошка в ленте. Наименьший разброс массы показал образец, изготовленный из припоя П14 с размером частиц 0-70 мкм. Разброс составлял 3,5% от максимальной массы образца. Ленты из

порошков с широкого фракционного состава: П14 0-160 мкм и композиционный припой ВПр11-40Н фракцией 40-160 мкм показали большую неоднородность порошка в ленте, которая составила 8,6% и 7,1% соответственно. Максимальный разброс содержание припоя показали образцы ленты, изготовленные из порошков: П14 узкой фракцией 70-100 мкм – 11,9% и чешуйчатого порошка МНМц 9-23,5 – 14,3%.

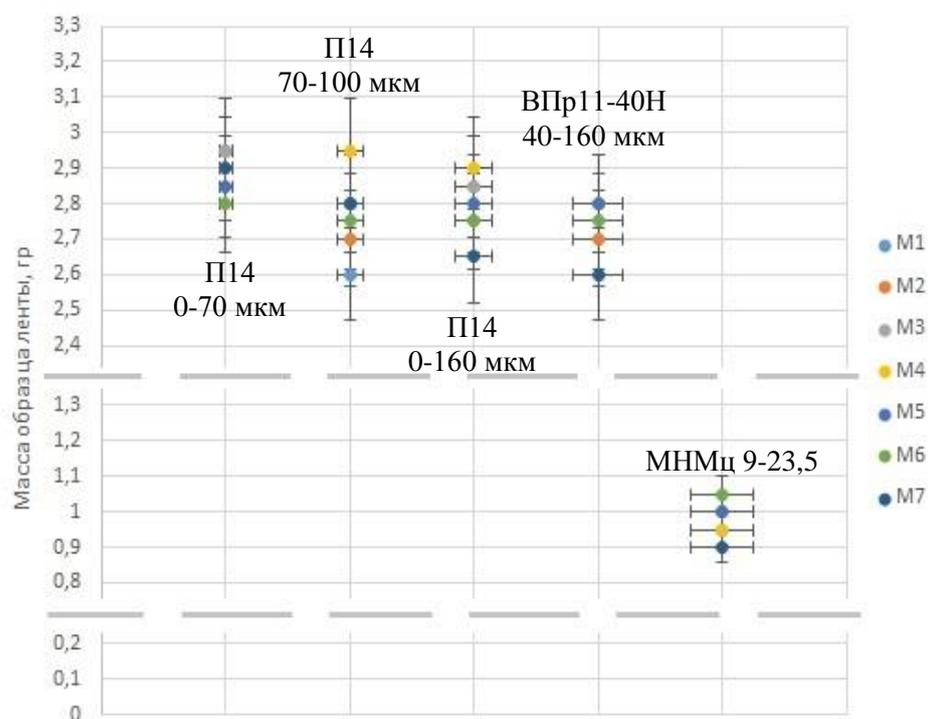


Рисунок 5 – Диаграмма распределения частиц порошка припоя в ленте. М1, М2,...,М7 масса образца

Размер сферических частиц порошка припоя не оказывает значительного влияния на плотность ленты (рис. 6). Плотность порошковой ленты, изготовленной из сферического припоя П14 различного фракционного состава, а также из композиционного припоя ВПр11-40Н во всех случаях составляла 68-75 % от уплотненной насыпной плотности. Лента, изготовленная из чешуйчатого порошкового припоя МНМц 9-23,5 оказалась наименее плотной. Плотность ленты составила всего 46% от насыпной уплотненной плотности исходного порошка.

Определено, что высокомолекулярный каучук обладает пределом растворимости, который составляет 9% по массе. В диапазоне концентраций 6-9% по массе, шликер из связующего вещества и порошка припоя был стабилен, сегрегации в течении 60-ти минут не наблюдалось, при этом вязкость связующего вещества составляла 4-10 Н\*с/см<sup>2</sup>. (рис. 7). В диапазоне концентраций каучука 6,8-7,5 % по массе наблюдался эффект утяжки частиц порошкового припоя (рис. 8), который возникал в виду испарения растворителя из связующего вещества.

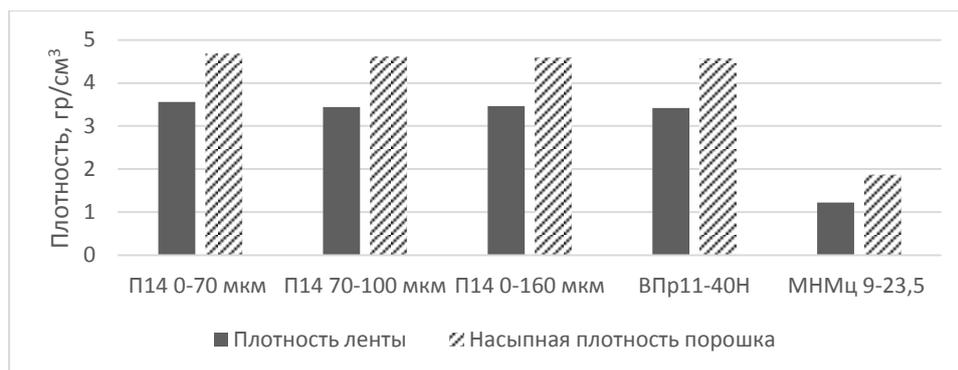


Рисунок 6 – Сравнение насыпной плотности порошков с плотностью лент припоя.

В результате проведенного исследования было определено, что для получения максимально плотной и однородной ленты припоя, требуемой для пайки сотовых уплотнений, необходимо использовать сферический порошок с размером частиц 40-70мкм, а для шликера использовать 7-ми% раствор высокомолекулярного каучука на нефтяном сольвенте.

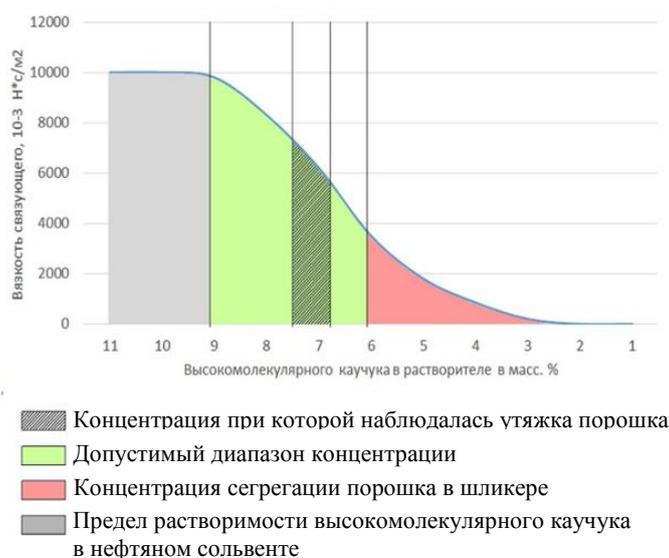
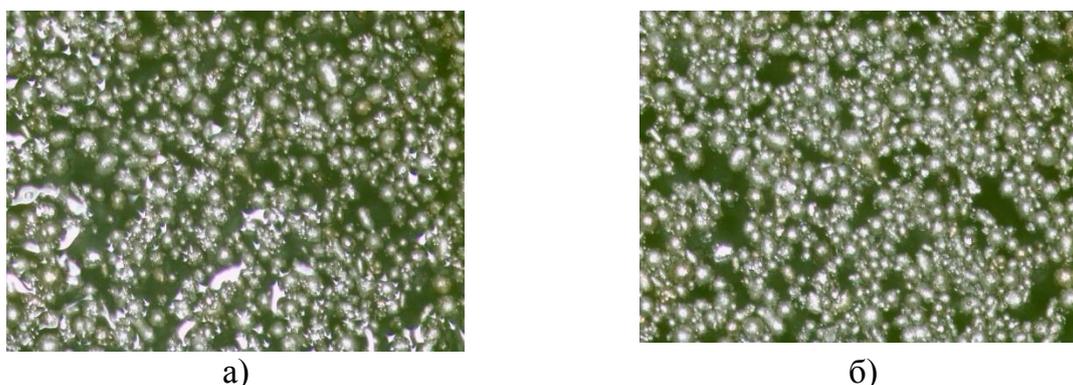


Рисунок 7 – Диаграмма изменения вязкости связующего вещества в зависимости от концентрации высокомолекулярного каучука



а) б)

Рисунок 8 – Утяжка порошка припоя

а – до испарения растворителя; б – после испарения.

**Третья глава** посвящена исследованию заполнения вертикального неравномерного зазора расплавом припоя ВПр11-40Н при пайке стали ХН78Т. Предложен механизм заполнения некапиллярного зазора расплавом припоя.

Для образцов использовали пластины из стали ХН78Т размером 3\*40\*40 мм полученные из листа (ГОСТ 24982-81) гидроабразивной резкой. Клиновидность зазора обеспечивали вольфрамовой проволокой диаметром 2,5 мм. Фиксация пластин и проволоки обеспечивалась аргонно-дуговой сваркой. Поверхности образцов зачищали с помощью наждачной влагостойкой бумаги на основе карбида кремния с зернистостью в 1000 единиц и обезжиривали растворителем марки Р-5 и обезвоживали спиртом.

Образцы помещали в керамический тигель, предварительно заполненный порошком припоя ВПр11-40Н (рис. 9). Количество припоя рассчитывали исходя из объема паяного соединения, для заполнения переменного зазора требовалось 5 гр. Для исследования влияния избытка жидкой фазы количество припоя увеличивали в два раза.

Пайку образцов проводили в лабораторной вакуумной печи с резистивным нагревом ВЕГА-3 с молибденовыми нагревателями в вакууме  $1,3 \times 10^{-3}$  Па при температуре до 1090 °С. Температуру пайки выбирали исходя из интервала плавления припоя. После пайки образцы резали с помощью электроэрозионного станка с шагом 5 мм от уровня расплава припоя, схема резки образцов представлена на рис. 9.

Определение высоты подъема припоя и замер зазоров осуществляли с помощью оптического бинокулярного микроскопа МБС-10 оснащенным окуляром с линейкой.

Исследование микроструктуры паянных швов и диффузионной зоны проводили методом микрорентгеноспектрального анализа (МРСА) на сканирующем электронном микроскопе TESCAN VEGA 3 SBH оснащенным системой рентгеновского энергодисперсного микроанализа Oxford Instruments Advanced AZtecEnergy.

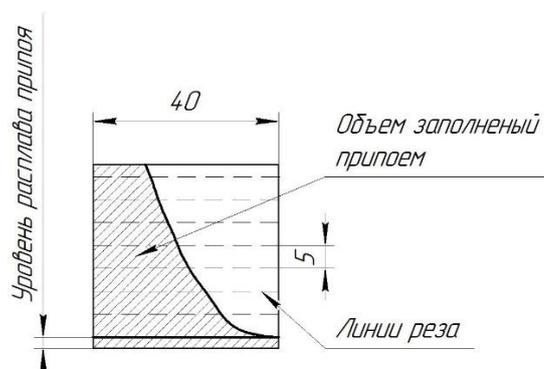
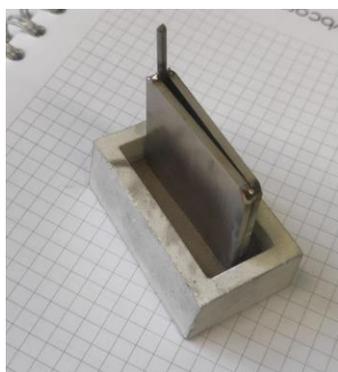


Рисунок 9 – Слева - образец для исследования заполнения зазора,; справа – схема резки образца.

С увеличением количества припоя характер заполнения существенно меняется (рис. 10). При увеличении количества припоя в два раза и температуре пайки  $1040\text{ }^{\circ}\text{C}$  кривая заполнения зазора припоем отклоняется от классической гиперболической формы. При одинаковой температуре, и увеличении количества припоя в два раза, количество жидкого расплава, втянутого в клиновидный зазор, увеличилось более чем в три раза. Учитывая, что величина зазора составляет один миллиметр, нельзя говорить, что он заполнился только при помощи капиллярных сил. При этом подняв температуру пайки на  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  выше температуры ликвидуса припоя, ощутимой разницы в заполнении зазора в зависимости от количества припоя уже нет и графики идут довольно близко друг к другу, а значения измерений лежат в пределах доверительного интервала.

При заполнении переменного зазора припоем помимо капиллярных сил дополнительно оказывают влияние диффузионные процессы, протекающие на границе припоя и материала пластин, которые меняют химический состав расплава во время заполнения и тем самым меняют его поведение в зазоре. Этапы процесса высокотемпературной пайки борсодержащим никелевым припоем представлена на рис. 12. При достижении  $T_{\text{солидуса}}$  припоя появляется первичная жидкая фаза, которая активно смачивает основной материал и начинает заполнять зазор. При этом бор и кремний из расплава припоя начинают диффундировать в основной материал, а железо и кремний в расплав припоя. За счет этого смещается интервал плавления припоя в доэвтектическую область. При выдержке на  $T_{\text{пайки}}$  компоненты стали растворяются в расплаве до того момента, пока состав жидкости не приблизится к равновесному составу во всем объеме. При этом в случае если нет избытка жидкой фазы начинается процесс изотермической кристаллизации припоя. Но когда внизу зазора находится избыток жидкой фазы, образовавшийся в результате изотермической кристаллизации капиллярный зазор начинает затягивать в себя этот избыток, тем самым меняя кривую заполнения.

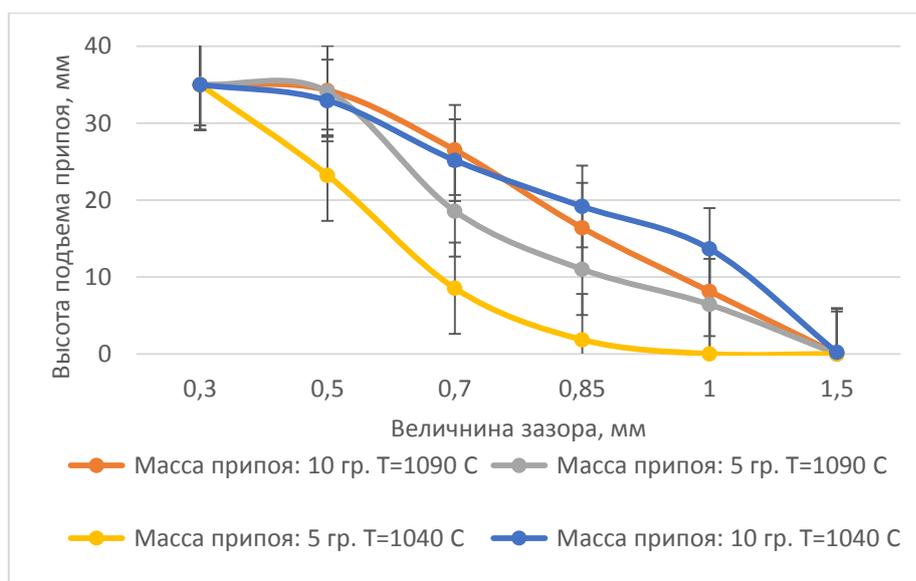


Рисунок 10 – Заполнение вертикального зазора в зависимости от величины зазора, количества припоя и температуры пайки.

Во время металлографического исследования структуры паяных соединений образцов обнаружено, что в процессе заполнения зазора припой взаимодействует с основным материалом. Компоненты, снижающие температуру плавления припоя (В, Si) диффундируют в основной металл. Начинается кристаллизация припоя в паяном соединении и выпадение первичных дендритов (рис. 12 а), которые уменьшают величину зазора и повышают вязкость расплава. В случае, когда количество жидкой фазы ограничено, процесс заполнения зазора останавливается и кривая заполнения не отличается от классической гиперболической. Структура паяного соединения в этом случае более однородная по содержанию кремния (рис. 12 б). Подобный механизм формирования паяного соединения объясняет появление дефектов при пайке сотовых уплотнений в виде наплывов.

При достижении  $T_{\text{солидуса}}$  первичная жидкая фаза начинает активно смачивать тонкостенный сотовый блок и заполнять зазоры между гофрированными фольгами. В момент достижения  $T_{\text{пайки}}$  припой на подложке изменяет свой химический состав, интервал плавления и не плавится полностью, при этом облуженные сотовые блоки начинают растворяться. Для предотвращения этого необходимо не только дозирование порошкового припоя без избытка, но минимальный градиент температуры между сотовым блоком и корпусом в момент выхода на  $T_{\text{солидуса}}$ .

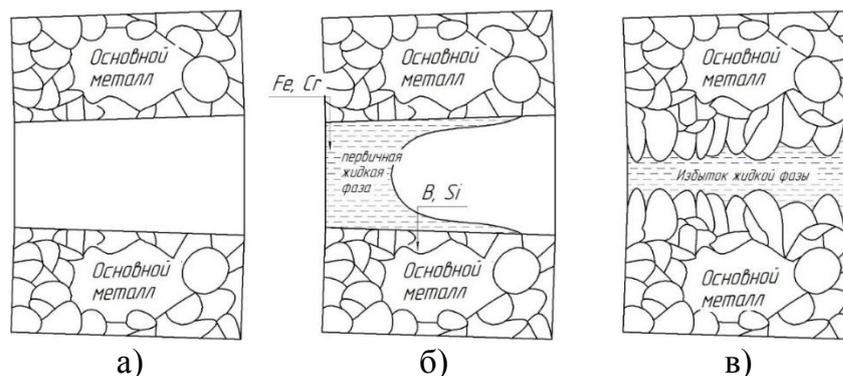


Рисунок 11 – Механизм заполнения неравномерного зазора расплавом припоя  
 а – зазор не заполнен расплавом  $T_{\text{образца}} < T_{\text{солидуса}}$ ; б – начало заполнения зазора первичной жидкой фазой, взаимная диффузия компонентов расплава припоя и основного материала  $T_{\text{солидуса}} < T_{\text{образца}} < T_{\text{ликвидуса}}$ ; в – начало изотермической кристаллизации в результате достижения расплава припоя равновесной концентрации.

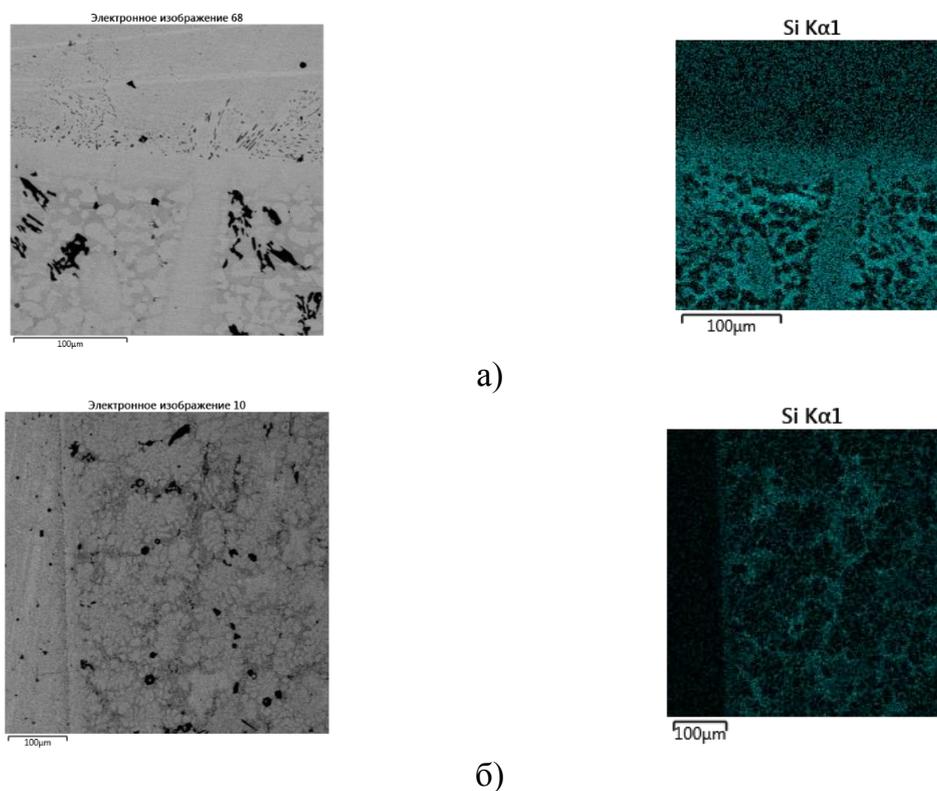


Рисунок 12 – Микроструктура паяного шва при пайке различным количеством припоя ВПр11-40Н.

**В четвертой главе** представлено компьютерное моделирование тепловых процессов, протекающих при пайке макета сотового уплотнения, а также подтверждена адекватность модели визуализацией процесса пайки.

Расчеты проведены в системе компьютерного моделирования ProCAST. Для расчетов была использована 3D-модель макета сотового уплотнения газотурбинного двигателя. Необходимые для расчетов теплофизические свойства сталей ХН78Т и

ХН62ВМЮТ были рассчитаны по химическому составу сплава с помощью термодинамической базы данных COMPUTERM, входящей в состав ProCAST. Теплофизические свойства других материалов представлены в табл. 1.

Моделировался процесс нагрева по двум режимам, с непрерывным нагревом до температуры нагревателя 1220 °С, скорость нагрева 80 град/мин и нагрев с технологической выдержкой при температуре нагревателя 1000 °С, скорость нагрева 11 град/мин.

Процесс переноса тепла при непосредственном контакте конструктивных элементов контролируется коэффициентом теплопередачи  $\alpha$ . В контакте сотового блока и подложки из стали ХН62ВМЮТ принималось  $\alpha=10\text{Вт}/\text{М}^2\text{°С}$ , а для всех остальных тел  $\alpha=100\text{Вт}/\text{М}^2\text{°С}$ . Особенностью радиационного нагрева сотового уплотнения является наличие зон затенения и многократное отражение радиационного излучения. Для учета этих эффектов на первом этапе теплового расчета вычисляются угловые коэффициенты излучения, определяющие долю излучения, попадающего с одного элемента поверхностной сетки на другой.

Таблица 4.1. Теплофизические параметры материалов

Параметр	Свойство			
	$\lambda, \text{Вт}/(\text{м}^{\circ}\text{С})$	$\rho, \text{кг}/\text{м}^3$	$C_p, \text{кДж}/(\text{кг}^{\circ}\text{С})$	$\varepsilon$
Керамика	2,2	2500	1,2 – 200 <sup>0</sup> С 2,25 -1400 <sup>0</sup> С	0,5
Графит	180 – 20 <sup>0</sup> С 52 -1500 <sup>0</sup> С	1730	0,72 – 20 <sup>0</sup> С 2,04 -1320 <sup>0</sup> С	0,98
Тантал, лист	57,5	16650	0,14	0,6
Молибден, лист	132	10220	0,245	0,6

где  $\rho, C_p, \lambda$  - плотность, удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности.

Для уменьшения риска возникновения ошибок из-за малой толщины фольги, расчет проводился на геометрической модели, пропорционально увеличенной в соответствии с принципами теории подобия физических процессов.

Теплофизические свойства масштабированной модели, использованной в вычислительном эксперименте, определяются следующими соотношениями:

$$\rho_m = \rho, \quad \alpha_m = \alpha, \quad \lambda_m = m\lambda, \quad C_{p,m} = C_p/m \quad (3)$$

По результатам моделирования (рис. 13) определено, что вне зависимости от режима нагрева отставание сотового блока от корпуса составляет 20-25°С.

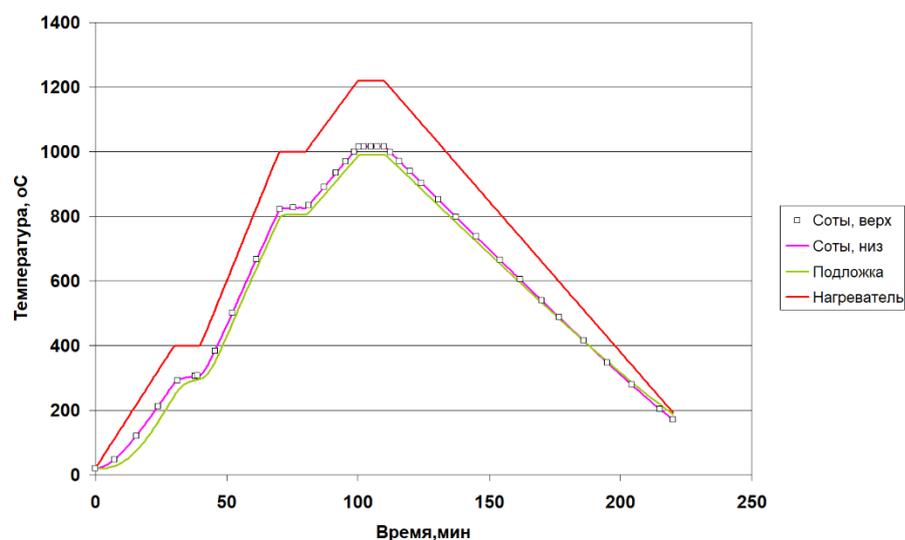


Рисунок 13 – Режим 1. Кривые изменения температуры в зависимости от времени процесса при скорости нагрева 11 град/мин.

Для подтверждения компьютерной модели была проведена пайка аналогичных макетов сотовых уплотнений на установке «ВЕГА-М», с возможностью видео фиксации процесса пайки. Визуализация процесса пайки макетов сотового уплотнения подтвердила отставание нагрева корпуса от сотового блока. Этой разницы температур достаточно для преждевременного растекания легкоплавкой фазы по сотовому блоку (рис. 14).

Для выравнивания температуры использовали затеняющий керамический экран, установленный на сотовый блок. При пайке макета с экраном разница температур между сотовым блоком и корпусом уплотнения не оказывает влияния на растекание припоя при скорости нагрева 80 град/мин, растекание по сотовому блоку и корпусу происходит одновременно.

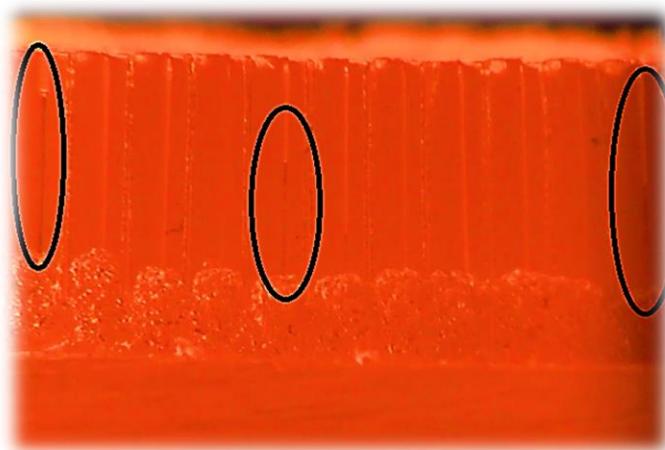


Рисунок 14 – Заполнение зазоров между гофрированными фольгами сотового блока.

$$T_{\text{подложки}} < T_{\text{ликвидуса припоя}}$$

**В пятой главе** изложены общие рекомендации по технологии пайки сотового уплотнения, описана методика по расчету припоя для пайки сотового уплотнения с гексагональной шестигранной ячейкой, выданы рекомендации по подготовке под пайку нанесению припоя, режимам пайки и технологической оснастке.

Минимальное количество припоя для пайки сотового уплотнения напрямую зависит от объема зазоров, которые требуется заполнить. В сотовом уплотнение комбинируется два типа соединений – тавровые между фольгами сотового блока и подложкой и нахлестанные между соседними фольгами сотового блока. Контакт всех паяемых поверхностей обеспечивается точечной контактной сваркой, поэтому зазор условно приняли считать равным 0,02мм, что соразмерно неровностям при шероховатости корпуса сотового уплотнения после механической обработки. Таким образом, количество припоя для пайки сотового уплотнения рассчитывается:

$$M_{\text{припоя}} = \rho_{\text{припоя}} * (S_{\parallel} * h_{\text{с.блока}} * 0,02 + S_{\perp} * 0,02) \quad (4)$$

Величина контактной площади по ячейкам сотового блока  $S_{\parallel}$  и по контакту сотового блока с корпусом  $S_{\perp}$  определяется в САПР, которая используются для конструирования сотового уплотнения.

Технологический процесс пайки сотового уплотнения заключается в подготовке паяемых поверхностей, нанесении порошкового пластифицированного припоя, сборки сотового блока и корпуса сотового уплотнения, фиксации деталей с помощью точечной, контактной сварки, монтажа изделия в оснастку, нагрев в вакуумной печи и контроль качества паянных соединений.

Подготовка паяемых поверхностей заключается в удалении остатков загрязнений после механической обработки корпуса сотового уплотнения и формирования сотового блока. Для удаления загрязнений во множестве мелких ячеек сотового блока рекомендуется использовать ультразвуковые ванны с органическим растворителем. Обезвоживание деталей осуществляется погружением в ацетон с последующей сушкой.

Порошковый припой, необходимой толщины наносится на сотовый блок (1) с помощью прокатного вала (4). Сотовый блок устанавливается в ложемент (2), предотвращающий деформацию гофрированных фольг. На сотовый блок укладывается лента припоя (3) и вдавливаются в ячейки. (рис. 15)

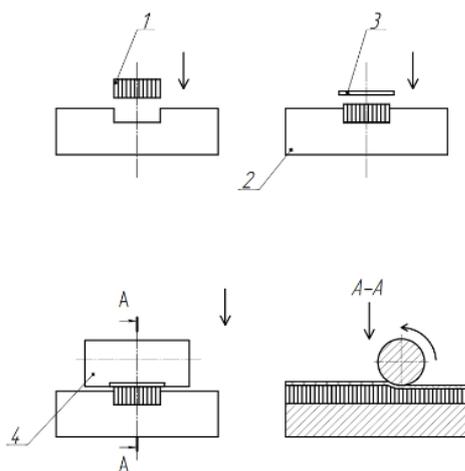


Рисунок 15 – Схема укладки припоя на сотовый блок

Сотовый блок, с нанесенным припоем монтируется в корпус сотового уплотнения припоем и фиксируется с помощью точечной контактной сварки.

Далее в зависимости от конфигурации сотового уплотнения (кольцо/сектор) устанавливается затеняющая оснастка. Сборка помещается в вакуумную печь. Пайку ведут по режиму, представленному на рис. 16.

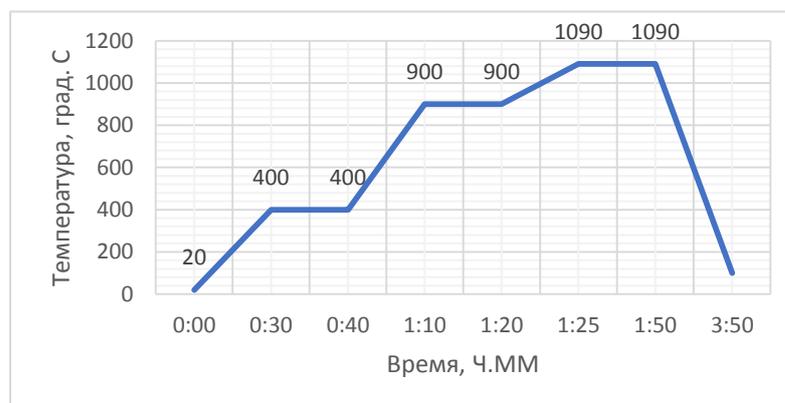


Рисунок 16 –Режим пайки сотового уплотнения припоем ВПр11-40Н (температура на корпусе сотового блока)

Контроль качества пайки сотового уплотнения осуществляется в два этапа: визуальный контроль на наличие растворения сотового блока, выхода галтелей и заполнения ячеек, ультразвуковой контроль на наличие непропаев между сотовым блоком и корпусом сотового уплотнения.

## ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

Разработан способ получения пластифицированного порошкового припоя в виде ленты на органическом связующем, методом шликерного литья на подложку, которая

обеспечивает равномерную и точную дозировку порошкового припоя, а также не имеет ограничений по нанесению припоя на все типы сотовых уплотнений.

Для получения максимально однородной и плотной ленты припоя следует использовать сферические порошки с размером частиц 40-70 мкм. Для повышения плотности ленты, за счет утяжки порошка припоя, необходимо использовать 6,8-7,5%-й раствор высокомолекулярного каучука в нефтяном сольвенте в качестве связки.

При заполнении вертикального неравномерного зазора избыточным количеством расплава припоя ВПр11-40Н кривая заполнения клина существенно отличается от классической гиперболической. Изменение кривой связано с активным взаимодействием первичной фазы расплава припоя, обогащенной бором и кремнием, которые диффундируют в основной материал, что приводит к повышению температуры плавления припоя. В результате изменения температуры плавления припоя происходит изотермическая кристаллизация расплава и образование первичных дендритов, которые образуют капилляр для подъема расплава припоя из ванны при его избытке.

Описанный механизм заполнения вертикального клиновидного зазора припоем объясняет образование дефектов в виде наплывов припоя, а также растворение тонкостенной конструкции сотового блока, которое происходит вверху сот, а не в месте сопряжения с подложкой, где располагается основной объем расплава припоя.

Для качественной пайки сотового уплотнения необходимо использовать минимальное количество припоя, требуемого для заполнения паяльных зазоров между гофрированными фольгами сотового блока, для предотвращения избыточного облуживания и последующего растворения сотовых блоков, а также обеспечить равномерность нагрева сотового уплотнения и быстрый выход детали на температуру пайки.

По результатам компьютерного моделирования процесса пайки макета сотового уплотнения было определено, что отставание массивного корпуса от тонкостенного сотового блока в момент выхода на температуру начала плавления припоя составляет порядка 20-25 °С. При этом снижение скорости нагрева детали не выравнивает разницу температур.

Экспериментальная пайка макета сотового уплотнения подтвердила разницу температур между сотовым блоком и подложкой. Было установлено, что разница температур влияет на растекание припоя в детали. При приближении температуры детали к интервалу плавления припоя идет активное растекание первичной жидкой фазы по сотовому блоку.

По результатам моделирования тепловых процессов при пайке сотового уплотнения и визуализации реального процесса рекомендуется использование технологической оснастки в процессе нагрева, которая будет экранировать тонкостенный сотовый блок тем самым выравнивая температуру в детали, а также форсированный режим нагрева, который обеспечит высокую динамику плавления порошка припоя.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:**

1. Монастырский В.П., Монастырская Е.В., Рожкова М.В., Морозов В.А., Опыт применения компьютерного моделирования технологического нагрева при разработке режима пайки «Технология машиностроения» №6, 2020г.
2. Пашков И.Н., Мисников В.Е., Морозов В.А., Таволжанский С.А., Индукционная пайка твердосплавных резцов горного инструмента. Выбор состава и формы припоя «Сварочное производство» №8 2020. с. 20–27.
3. Морозов В.А., Пашков И.Н., Мисников В.Е. Влияние формы и размера частиц порошковых припоев на свойства пластифицированных порошковых лент «Сварочное производство» №.7 2021. с. 46-53.

### **Статьи и материалы конференций:**

4. Морозов В.А., Пашков И.Н., Использование пластифицированных припоев при пайке сотовых уплотнений «Материалы XIV МНТК «Быстрозакаленные материалы и покрытия». Ноябрь 2016
5. Морозов В.А., Пашков И.Н., Монастырская Е.В. Пайка сотовых уплотнений газотурбинных двигателей порошковыми припоями в виде лент на пластичных полимерных связующих «Сборник тезисов научно-технического конгресса по двигателестроению». Том 2. Апрель 2018
6. Морозов В.А., Пашков И.Н. Использование порошковых припоев в виде лент на полимерных связующих для пайки узлов ГТД Сборник тезисов докладов «Гагаринские чтения – 2018». Том 3. Апрель 2018
7. Морозов В.А., Монастырская Е.В. Технологии и материалы для пайки сотовых уплотнений Сборник тезисов докладов «Гагаринские чтения – 2019» Апрель 2019
8. Морозов В.А., Пашков И.Н. Влияние физических свойств металлических порошков на технологические свойства ленточных припоев Сборник XVII-й Международной научно-технической конференции "Быстрозакаленные материалы и покрытия"