

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Московский авиационный институт (национальный  
исследовательский университет)»

---

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

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук  
Пашков Игорь Николаевич

Москва, 2021

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ.....	11
1.1 Использование технологий пайки в производстве ГТД .....	11
1.2 Применение сотовых уплотнений и их конструкции .....	14
1.3 Материалы для изготовления сотовых уплотнений.....	18
1.4 Нанесение порошковых припоев.....	25
1.4.1 Засыпка порошковых припоев.....	26
1.4.2 Порошковые припои в виде пластифицированной ленты на органическом связующем.....	33
1.5 Капиллярное течение припоев.....	39
1.6. Тепловые процессы при нагреве деталей под пайку.....	45
1.6.1 Решение тепловых задач методом конечных элементов .....	47
1.6.2 Применение методов компьютерного моделирования тепловых процессов при пайке .....	50
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1 .....	58
2. РАЗРАБОТКА ПОРОШКОВОГО ПРИПОЯ В ВИДЕ ПЛАСТИФИЦИРОВАННОЙ ЛЕНТЫ НА ОРГАНИЧЕСКОМ СВЯЗУЮЩЕМ ..	60
2.1 Технология получения порошкового припоя в виде пластифицированной ленты.....	60
2.2 Материалы используемые для исследования влияния технологических свойств порошков на плотность и однородность ленты припоя .....	62
2.3. Определение технологических свойств порошковых сплавов .....	64
2.4 Определение свойств порошковых лент на органическом связующем .....	66

2.5 Влияние формы и размера частиц порошка на свойства ленты припоя .....	69
2.6 Влияние состава связующего вещества на свойства ленты .....	72
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2 .....	73
3. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАПОЛНЕНИЯ КАПИЛЛЯРНОГО ЗАЗОРА ПОРОШКОВЫМ ПРИПОЕМ .....	75
3.1 Материалы и методика исследования .....	76
3.2 Исследование заполнения переменного вертикального зазора .....	80
3.3 Металлографическое исследование структуры шва при переменном зазоре .....	82
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3 .....	84
4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПАЙКЕ СОТОВОГО УПЛОТНЕНИЯ .....	85
4.1 Тепловые процессы при пайке сотового уплотнения .....	85
4.2 Визуализация процесса пайки макета сотового уплотнения .....	88
4.3 Компьютерное моделирование распределения температуры при нагреве сотового уплотнения .....	90
4.3.1 Постановка тепловой задачи .....	90
4.3.2 Методика моделирования .....	92
4.3.3 Результаты компьютерного моделирования .....	98
4.4 Визуализация пайки макета сотового уплотнения .....	100
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4 .....	106
5. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ПАЙКИ СОТОВОГО УПЛОТНЕНИЯ .....	108
5.1 Методика расчета припоя для пайки сотового уплотнения .....	108

5.2 Подготовка поверхности к пайке .....	111
5.3 Нанесение порошкового припоя в виде пластифицированной ленты .....	112
5.4 Пайка сотового уплотнения .....	113
5.5 Контроль паяных соединений сотового уплотнения .....	114
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 5 .....	116
ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ .....	117
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	119

## ВВЕДЕНИЕ

### Актуальность темы исследования

Для предотвращения утечек газового потока в горячей зоне газотурбинных установок широко применяются сотовые уплотнения. Одной из операций при производстве сотовых уплотнений является 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;
- конструкция сотового уплотнения из разнотолщинных элементов, которая склонна к неравномерному нагреву и высокой разнице температур между тонкостенным сотовым блоком и массивным корпусом сотового уплотнения в процессе пайки.

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 исследования** – разработка процесса создания неразъемного соединения конструкции типа «сотное 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 сотные 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 сотного 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 «сотное 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 сотного 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 Тликвидуса 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-производителях газотурбинных двигателей - ПК «САЛЮТ; 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 Диссертация состоит из введения, пяти, общих выводов по работе, списка использованной литературы из 75 наименований. Изложена на 126 страницах машинописного текста, содержит 59 рисунков и 8 таблиц.

## 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В 1-й главе диссертационной работы рассмотрено использование технологий пайки при производстве газотурбинных установок, в частности при изготовлении сотовых уплотнений. Описаны конструкции сотовых уплотнений и материалы из которых их изготавливают. Проанализированы особенности пайки сотовых уплотнений, существующие технологии пайки, а также проведен анализ дефектов паяных соединений.

Рассмотрены существующие технологии дозировки нанесения и закрепления порошковых припоев применительно к сотовым уплотнениям, проведен анализ материалов и технологий для получения металлопластичных порошковых лент.

Описаны физико-химические процессы, протекающие при образовании паяного соединения в частности капиллярное течение припоев, рассмотрены методики оценки заполнения капиллярного зазора расплавом припоя.

Проанализированы особенности нагрева разнотолщинных конструкций при печной пайке в вакууме, особенности плавления порошковых припоев. Описано применение метода конечных элементов для решения тепловых задач связанных с нагревом деталей до температуры пайки.

### 1.1 Использование технологий пайки в производстве ГТД

В современной технике разработано и используется множество различных типов двигателей, в том числе и газотурбинные двигатели (ГТД). ГТД широко применяются в авиационной, наземной и морской технике (рисунок 1.1).

В настоящее время в общем объеме мирового производства ГТД в стоимостном выражении авиационные двигатели составляют около 70%, наземные и морские – около 30%. Объем производства наземных и морских ГТД распределяется следующим образом:

- энергетические ГТД ~ 91%;

- ГТД для привода промышленного оборудования и наземных транспортных средств ~ 5%;

- ГТД для привода судовых движителей ~ 4%.

В современной гражданской и военной авиации ГТД практически полностью вытеснили поршневые двигатели и заняли доминирующее положение. Их широкое применение в энергетике, промышленности и транспорте стало возможным благодаря более высокой энергоотдаче, компактности и малому весу по сравнению с другими типами силовых установок[1].



Рисунок 1.1 – Схема объектов применения ГТД

Распространение таких высокотехнологичных агрегатов, как ГТД было бы невозможно без технического прогресса в различных областях. Сварка и родственные процессы занимают не малую долю в производстве ГТД. Пайка занимает особое место в производстве ГТД. Большинство узлов, созданных с

помощью пайки, не представляется возможным сделать каким-либо иным способом. Паяные соединения весьма технологичны и имеют высокие прочностные характеристики. Пайка позволяет соединять все виды сталей, жаропрочные никелевые, титановые и алюминиевые сплавы, металлы с керамикой, графитом, а также термодинамически несовместимые материалы. Пайка нашла широкое применение при соединении деталей направляющих аппаратов компрессора, соплового аппарата и рабочих лопаток турбины, форсунок топливного коллектора, сотовых уплотнений, трубопроводов, а также для исправления различных дефектов [2].

На сегодняшний день в современном ГТД встречаются практически все виды пайки. Это и печная высокотемпературная пайка в вакууме и контролируемой среде, которую применяют для изготовления деталей горячего тракта таких как рабочие лопатки турбины высокого и низкого давления, сопловые блоки лопаток, направляющие и спрямляющие аппараты компрессора, а также пайка топливного коллектора. Высокотемпературная газопламенная пайка и пайка токами высокой частоты для создания герметичных соединений деталей топливопроводов двигателя. Низкотемпературная пайка мягкими припоями используется для пайки фильтров и коммутации электрооборудования систем управления двигателем [3]. На рисунке 1.2. схематически показано, расположение узлов ГТД, в которых используются неразъемные соединения, созданные с помощью технологий пайки.

Несмотря на большую номенклатуру для большинства узлов процесс пайки происходит в следующей операционной последовательности:

1. комплектование;
2. подготовка деталей под пайку;
3. сборка деталей под пайку;
4. нанесение припоя;
5. пайка;
6. контроль паяного соединения.

В зависимости от индивидуальных особенностей технологии пайки могут добавляться такие операции как: нанесение барьерных покрытий, например, при пайке заглушек лопаток ТВД для предотвращения затекания припоя в охлаждающие каналы лопатки; промывка после пайки от остатков разложения флюса, и др [4].

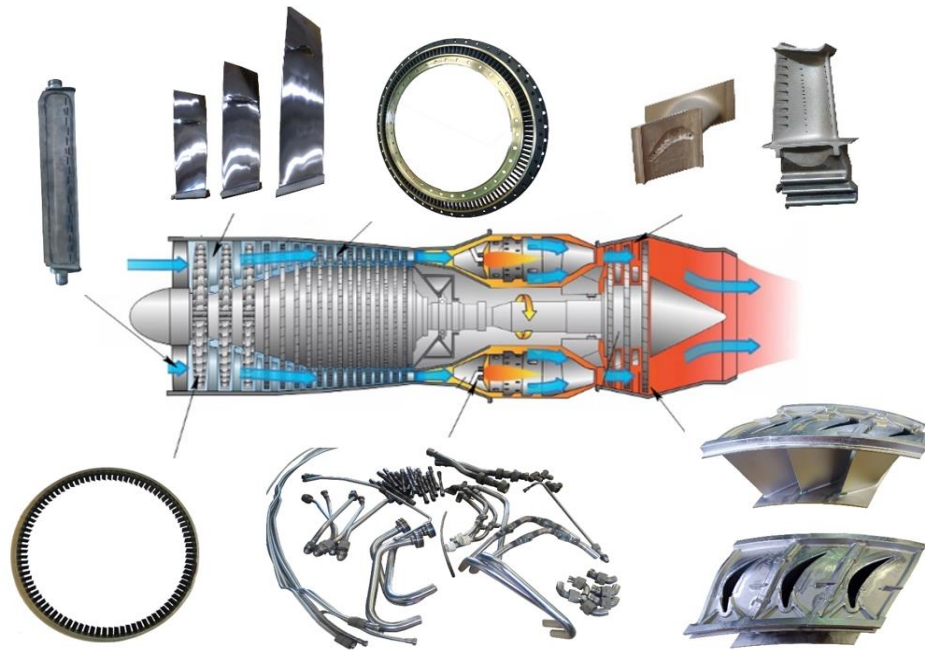


Рисунок 1.2 – Паяемые детали ГТД

## 1.2 Применение сотовых уплотнений и их конструкции

Одним из узлов производство которого непосредственно связано с технологией пайки является сотовое уплотнение, конструкция которого представлена на рисунке 1.3. Уплотнения предназначены для уменьшения вредных утечек воздуха (газа) из газоводушного тракта двигателя, для уменьшения внутренних перетеканий воздуха (газа) из области с повышенным давлением в область с пониженным давлением газового тракта двигателя.

Любые утечки воздуха (газа) из газового тракта двигателя, в том числе утечки из области с более высоким давлением в область с меньшим давлением, как правило, снижают КПД двигателя. Например, однопроцентная утечка воздуха из-за компрессора высокого давления на двигателе ПС-90А, ведет к увеличению

расхода топлива на 0.72% (при поддержании тяги двигателя постоянной), а на взлетном режиме к увеличению температуры газов перед турбиной на 0.72% (от температуры газов перед турбиной) [1].

Сотовое уплотнение является частью конструкции лабиринтного уплотнения. Лабиринтные уплотнения (рисунок 1.3) получили наибольшее распространение в виду их простоты и надежности [5].



Рисунок 1.2 – Сотовое покрытие статорной части лабиринтного уплотнения

Во время приработки лабиринтных уплотнений гребешки ротора контактируют с ответной частью, как показано на рисунке 1.4. Для облегчения приработки в компрессорах при высоких температурах (до 1000 С°) применяют сотовые покрытия из металлической фольги, припаяваемой к статорной части уплотнения – сотовое уплотнение. Сотовые уплотнения в виду высокотемпературных условий эксплуатации как изготавливают из жаропрочных никелевых сплавов [6].

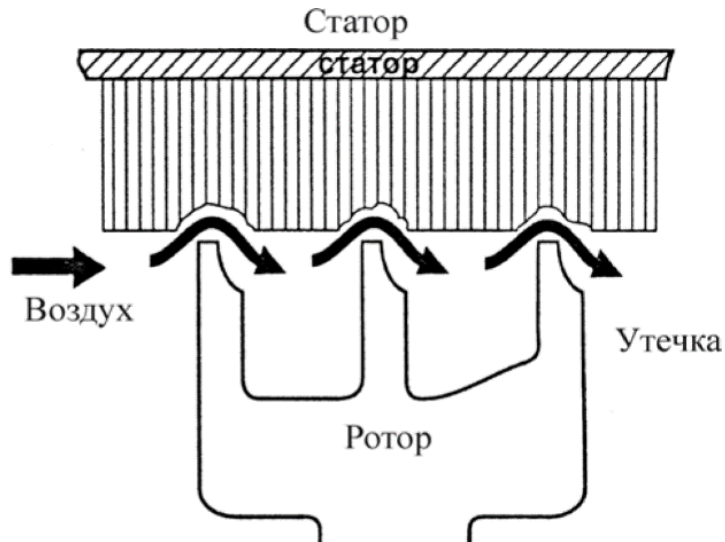


Рисунок 1.4 – Врезание гребешков лабиринта в сотовое уплотнение

Конструктивно сотовое уплотнение представляет собой сотовый элемент или блок с ячеистой структурой из жаростойкой хромоникелевой гофрированной фольги, закрепляемый в корпусе сотового уплотнения с помощью высокотемпературной пайки рисунок 1.5.

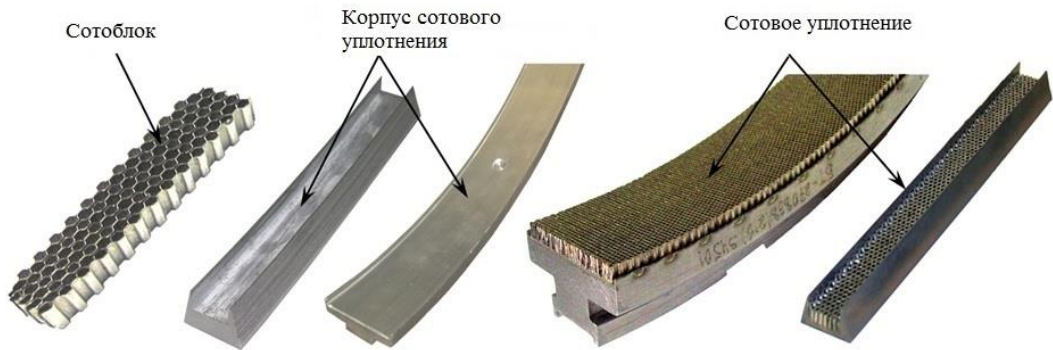


Рисунок 1.5 – Конструкция сотового уплотнения

Наиболее часто сотовые блоки имеют шестиугольные ячейки, реже четырёхугольные, (рисунок 1.6) с различным диаметром вписанной окружности, например, 0,9 или 1,5 мм. Производством четырёхугольных сот занималось предприятие ООО «Невский» [7,8]. Соты изготавливались из фольги толщиной



$0,3^{\pm 0,1}$  мм. Такие уплотнения имели довольно большую жесткость. Сотовые уплотнения с шестиугольными ячейками производило ОАО «Уралтурбо» [7]. Для сот использовалась фольга значительно меньшей толщины 0,05 мм в этом случае касание сот лопатками приводило к их сминанию или истиранию, не вызывая повреждения торцов лопаток.

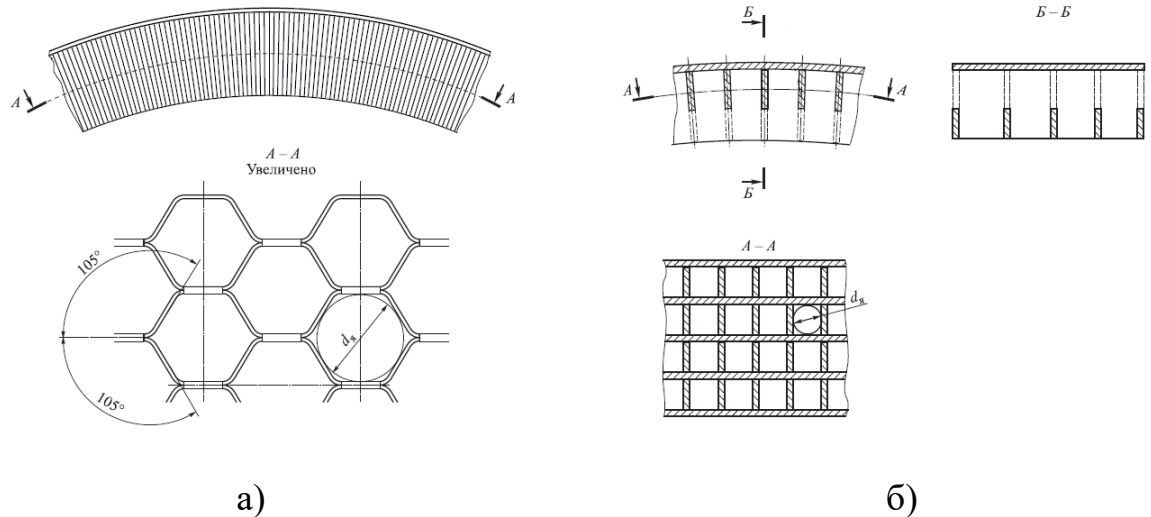


Рисунок 1.6 – Схемы сотовых блоков с различными ячейками:

а) шестиугольные; б) квадратные.

В 1980-х годах исследователями Института атомной энергии им. И.В. Курчатова [9] было обнаружено, что нагретая сотовая поверхность резко интенсифицирует теплообмен за счет турбулизации натекающего потока и образования самоорганизующихся смерчеобразных струй. Поэтому при использовании сотовых уплотнений не происходит местного разогрева ротора при взаимном касании, что позволяет уменьшить значения радиальных зазоров в уплотнении, не снижая надежность ГТД.

В виду конструкции сотового уплотнения можно выделить следующие особенности, связанные с пайкой:

- большое количество паянных 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 и разработка технологии их нанесения. Исследований взаимодействия расплава припоя с материалом тонкостенных сотовых блоков, протекающих при плавлении припоя в зазорах характерных для сотового уплотнения. Изучение тепловых процессов, протекающих при термическом цикле пайки сотового уплотнения с использованием методов математического моделирования и пайки макетов сотового уплотнения для исследования влияния градиента температур на растекание припоя.

### **1.3 Материалы для изготовления сотовых уплотнений**

В зависимости от условий работы сотовых уплотнений для их изготовления используют различные материалы. В компрессорах двигателей обычно соты изготавливаются из фольги нержавеющей стали [10,11]. Для более температурно-нагруженных ступеней турбин необходимы жаропрочные и жаростойкие материалы. Как правило для сотовых уплотнений применяют сплавы на основе никеля с высоким содержанием хрома. В Таблице 1.1 приведены марки сплавов и их химические составы, используемые для изготовления сотовых уплотнений в России и за рубежом.

Для изготовления сотовых блоков в нашей стране нашел широкое применение сплав ХН78Т, предназначенный для длительной работы при высоких температурах в окислительной среде. Максимальная температура длительного применения этого сплава до 10 тыс. часов составляет 1100 °С. При сокращении длительности работы

сплав ХН78Т способен работать при более высоких температурах. Для производства сотовых блоков указанный выше сплав используется в виде фольги толщиной от 0,05 до 0,3 мм.

Для корпусов сотовых уплотнений, которые могут представлять собой кольца или отдельные сектора, собираемые в кольцо, нашли широкое применение заготовки из сплава ХН62ВМЮТ в виде раскатных колец. Максимальная температура длительного применения этого сплава - до 10 тыс. часов, составляет 900 °С.

В зарубежной промышленности для изготовления сотовых уплотнений в массовом производстве также используют никелевые жаростойкие сплавы. Среди них наиболее часто для производства сот используются Hastelloy X и Haynes 214, в состав которого входит довольно значительное количество алюминия. Для некоторых специальных случаев упоминается об использовании сплава Nimonic 86. Кроме сплавов на никелевой основе в [10] сообщалось об использовании сплавов на основе железа системы FeCrAlY с высоким содержанием алюминия, легированных редкоземельными металлами Y, Hf и Zr или оксидом Y<sub>3</sub>O<sub>3</sub>. (таблица 1.1). Сплав марки MI 2100 уже применяется в газотурбинных двигателях, а композиция марки MI 2200 является экспериментальной. Сообщалось, что эти сплавы обладают высокой жаропрочностью и жаростойкостью при высоких температурах.

Ранее было сказано о том, что в производстве сотовых уплотнений сотовый блок, установленный в корпусном кольце, закрепляется в нем с помощью высокотемпературной пайки. Как правило, для этого используются жаропрочные припои на основе никеля. В зарубежной практике наряду с никелевыми припоями применяют также припои на основе кобальта. В таблице 1,2 приведены марки, химический состав и температуры плавления отечественных и зарубежных припоев, используемых для пайки сотовых уплотнений.

Таблица 1.1 – Сплавы, используемые для производства сотовых уплотнения в России и за рубежом

Сплав	Массовая доля элементов, %									
	Ni	Cr	Fe	Ti	Mo	Al	C	P	Si	Другие элементы
ХН78Т	осн.	19-22	до 6	0,15-0,35			до 0,12	до 0.01	до 0,8	(Mn) до 0,7;
ХН62ВМЮТ	осн.	17,5-20	до 4	1-1,4	4-6	1,9-2,3	0,05-0,1	до 0,02	до 0,4	(S) до 0,02; (Mn) до 0,05; (B) до 0.01; (W) 5.5-7.5
12Х18Н10Т	-	17-19	осн.	0,1-1	-	-	до 0,12	до 0,035	до 0,8	(S)до 0,02; (Mn) до 2; (Cu) до 0,3
Hastelloy X	Осн.	22	18		9					(Co) 2; (W) 0.6
Inconel 617	Осн.	22	3		9	1,2				(Co) 12
Nimonic 86	Осн.	25			10					Ce
Haynes 214	Осн.	16	3		4.5					Y, Zr
MI 2100		20	Осн.		6					Y, Zr, Hf
MI 2200*		16	Осн.		6					Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Hf

В нашей стране наиболее широкое применение в газотурбинных конструкциях для пайки сотовых уплотнений нашли припои марок ВПр4, ВПр11-40Н, ВПр42 [4].

Припой ВПр4 на медно-никелевой основе, содержит марганец. Для повышения жаростойкости и прочности при повышенных температурах медно-никелевые припои легируют хромом, марганцем, железом, кремнием и алюминием. Его температура начала плавления  $T_S = 895$  °С, окончания плавления  $T_L = 1020$  °С. Соответственно температура пайки согласно [12] находится в интервале  $T_{п} = 1050 - 1140$  °С. Входящий в химический состав припоя ВПр4 марганец при пайке в вакууме интенсивно испаряется. Это приводит к значительному повышению температур плавления припоя. Поэтому пайку в вакууме марганецсодержащими припоями можно проводить только в закрытых контейнерах или ампулах. Пайку сотовых уплотнений, как правило, проводят в печах с контролируемой средой, например, в аргоне. Припой ВПр4 является самофлюсующимся благодаря присутствию в нем натрия, лития, калия и фосфора, поэтому его можно применять в среде с газообразными флюсами, например, аргон с фтористым водородом, или аргон с трехфтористым бором. Припой ВПр4 выпускается в виде порошка и полосы [13].

Жаропрочные припои на основе никеля, как видно из Таблицы 2, в отличии от зарубежных припоев, являются многокомпонентными. Химический состав этих припоев максимально приближен к основному, паяемому сплаву для сохранения механизма его упрочнения. Введение в его состав депрессантов - кремния и бора понижает температуру начала плавления и, как правило, не приводит к существенным изменениям структуры и свойств паяемых сплавов.

ВПр11-40Н, ВПр42 широко применяют для пайки жаростойких жаропрочных и коррозионностойких сплавов и сталей. Они позволяют получать паяные соединения с высокой жаропрочностью, жаростойкостью и коррозионной стойкостью при высоких температурах [14].

Припой ВПр11-40Н имеет температуры плавления  $T_S = 908 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $T_L = 1020 \text{ }^\circ\text{C}$  соответственно, температура пайки  $T_{\text{п}} = 1050 - 1100 \text{ }^\circ\text{C}$ . Выпускается в виде порошка ТУ 1-809-108-83.

Припой ВПр42 системы Ni-Cr-Si-B имеет более высокие температуры плавления  $T_S = 1050^\circ\text{C}$  и  $T_L = 1070^\circ\text{C}$ . Соответственно температура пайки  $T_{\text{п}} = 1100 - 1120^\circ\text{C}$ . Припой может поставляться в виде порошка и аморфной ленты (ТУ1-595-4-1237-2011) [4].

Также известно, что для пайки сотовых уплотнений используют палладиевый припой ПЖК-1000 системы Pd-Cr-Ni, обеспечивающий равнопрочное соединение с основным сплавом, высокую коррозионную стойкость при высоких температурах и в контакте с агрессивными средами. Припой имеет  $T_L = 1237 \text{ }^\circ\text{C}$  и температуру пайки  $T_{\text{п}} = 1250 \text{ }^\circ\text{C}$ . Припой выпускается в виде полосы ТУ 48-1-408-8 и предназначен для вакуумной пайки [4].

Анализ зарубежных припоев (таблица 1,2), показывает, что они имеют более простой химический состав по сравнению с отечественными. Припои марок AMS 4778 и AMS 4779 являются трехкомпонентными: никель, легированный кремнием и бором, образующими с никелем легкоплавкие эвтектики. Припой AMS 4777 кроме никеля и депрессантов Si и B содержит хром и железо.

Припой AMS 4782, легирован хромом для повышения жаростойкости. Сплав содержит только один депрессант – кремний, благодаря чему имеет более высокую температуру  $T_L = 1135 \text{ }^\circ\text{C}$ . Температура пайки при этом предположительно должна равняться  $T_{\text{п}} = 1180 \text{ }^\circ\text{C}$ , что говорит о том, что он предназначен для пайки высокотемпературных материалов.

Таблица 1.2 – Припои для пайки сотовых уплотнений, используемые в России и за рубежом

Марка припоя	Вид поставки	Массовая доля элементов, %								
		Mn	Ni	Si	Fe	Cr	Al	B	Co	Другие эл-ты
ВПр11-40Н	Порошок		Осн.	4,0- 5,0	3,0- 5,0	14,0- 16,0	0,1- 1,0	2,0- 3,0	0,4- 0,7	O(0.00-0.08)
ВПр42	Порошок, аморфная лента		Осн.	5,5- 7,5	0,05- 0,15	8,0- 9,0	1,3- 2,0	1,1- 1,3	13,0- 15,0	Mo(1.0-1.5);W(4.0-7.8);Nb(1.1-1.3); ();Ti(0.5-1.2)
ВПр4	Лист, порошок	27- 30	28- 30	0,8- 1,2	1,0- 1,5			0,15- 0,25	4,0- 6,0	Li(0.15-0.3);K(0.01-0.2);Na(0.05-0.15);P(0.1-0.3)
AMS 4777	Паста, порошок		Осн.	4,5	3	7				
AMS 4778	Паста, порошок		Осн.	4,5						
AMS 4779	Паста, порошок		Осн.	3,5						
AMS 4782	Лист, аморфная лента, порошок		Осн.	10,0		19				
AMS 4783			17	8,0		19			Осн.	W(4)

Таблица 1.2 – продолжение

Марка припоя	Интервал плавления	Температура пайки	Среда пайки	Материалы для пайки
ВПр11-40Н	908-1020	1080-1120	В инертной среде или в вакууме	Жаропрочные сплавы и коррозионно-стойкие стали
ВПр42	1050-1070	-		
ВПр4	940-980	1070-1140	В инертной среде	
AMS 4777	971-999	1027-1054	В восстановительной или инертной среде	
AMS 4778	982-1038	1066-1093	В восстановительной или инертной среде	
AMS 4779	982-1066	1093-1121	В восстановительной или инертной среде	
AMS 4782	1079-1135	1163-1191	В инертной среде	
AMS 4783	1121-1149	1177-1204	-	



Высокотемпературный припой AMS 4783 с еще более высокой температурой  $T_L=1150$  °С имеет кобальтовую основу. Сплав легирован элементами никелем, хромом, вольфрамом, обеспечивающими его жаропрочность, жаростойкость и сопротивление газовой коррозии. В качестве депрессанта также, как и в припое AMS 4782 используется только кремний.

#### **1.4 Нанесение порошковых припоев**

Одна из проблем связанных с пайкой сотовых уплотнений является равномерное и точное нанесение и закрепление порошкового высокотемпературного припоя.

Известно несколько технологических приемов нанесения порошковых припоев и их закрепление на паяемой детали:

- засыпка порошка припоя в предусмотренное конструкцией паяемой детали место специальными дозаторами и закрепление порошка припоя с помощью клеевых растворов[15–17];
- получение из порошка металлопластичных лент с заданной однородной концентрацией порошка припоя в объеме ленты и нанесение лент на деталь с помощью адгезивных составов или их использование в качестве закладных элементов [18,19];
- приготовление из порошка паяльных паст, которые представляют собой смесь порошка и связующего вещества и нанесение паяльных паст с помощью дозаторов валиком вблизи паяльного зазора;[19,20]
- приготовление из порошковых припоев прессованных «таблеток» и использование их аналогично припою в виде закладного элемента, полученного высечкой из листа [21,22].

В виду особенностей конструкции сотовых уплотнений последние две технологии не применимы в связи с чем они не будут описаны в данном обзоре.

### 1.4.1 Засыпка порошковых припоев

Первые патенты, описывающие устройства для равномерного рассыпания припоя, были опубликованы во второй половине 70-ых годов.

Так в 1977 году был опубликован патент [23] на дозатор сыпучих материалов. Устройство представляло собой бункер с выпускным отверстием в днище и устройство регулирования дозы порошка. Регулирование дозы порошка осуществлялось с помощью поворотного шибера с отверстиями. Когда отверстия шибера совмещались с отверстиями на дне бункера, доза порошка высыпалась из выпускных отверстий.

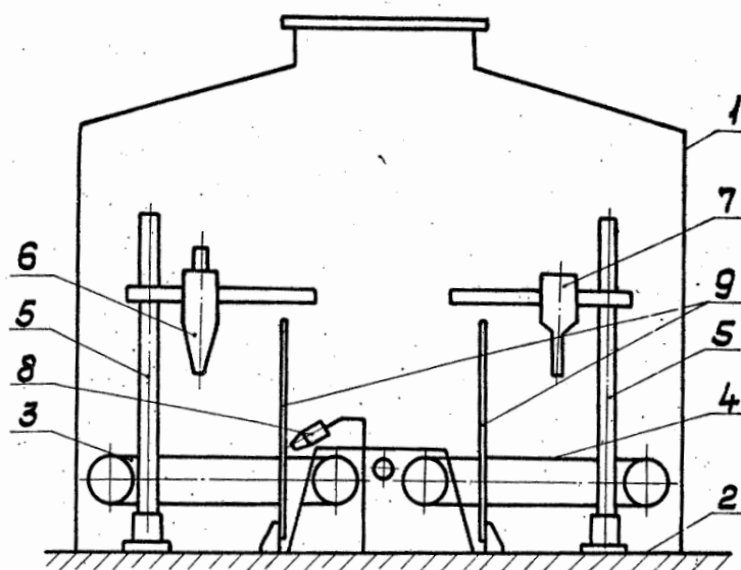
В 1979 году был опубликован патент [24] на устройство для объемного дозирования. Бункер был выполнен с двумя доньями, между которыми размещена дозирующая коробка. Донья бункера, крышка и дно коробки имели сквозные отверстия, которые совпадали в крайних положениях дозирующей коробки. Дозирующая коробка при этом имела возможность возвратно-поступательного перемещения в горизонтальной плоскости. В этом дозаторе авторы уже делают акцент на отверстия, через которые осуществлялась подача порошка. Отверстия в сечении имели форму трапеции. Они были расположены по всей площади доньев и крышки с возможностью попеременного и попарного совпадения по меньшему основанию трапеции.

Вышеописанные дозаторы не гарантировали равномерного распределения порошка припоя на единицу площади в единицу времени, что является основным требованием для нанесения припоя на сотовые конструкции.

В 1981 году был опубликован патент [25], в котором уже дозирующее устройство было в составе полноценной установки для нанесения припоя на сотовые конструкции (рисунок 1.5.). В патенте предлагается новый способ, нанесение порошкового припоя с последующим его закреплением его смолой из пульверизатора.

Установка представляет собой камеру 1, размещенную на столе 2. Внутри камеры для перемещения деталей расположены два транспортера 3 и 4. На столе

установлены два штатива 5, на которых закреплены питатель порошкового припоя 6 и пульверизатор связующего вещества 7, ориентированные относительно соответствующих транспортеров. Питатель порошкового припоя 6 представляет собой бункер с форсункой распыления. Пульверизатор связующего 7 представляет собой узел распылителя жидкости. Между транспортерами 3 и 4 установлена форсунка 8 и подсоединена к магистрали сжатого воздуха. Экраны 9 разделяют зону нанесения припоя от зоны распыления связующего.



1 – камера; 2 – стол; 3, 4 – транспортеры; 5 – штативы; 6 – питатель порошкового припоя; 7 – пульверизатор связующего; 8 – форсунка для обдувания детали, 9 – разделители зоны нанесения и закрепления припоя.

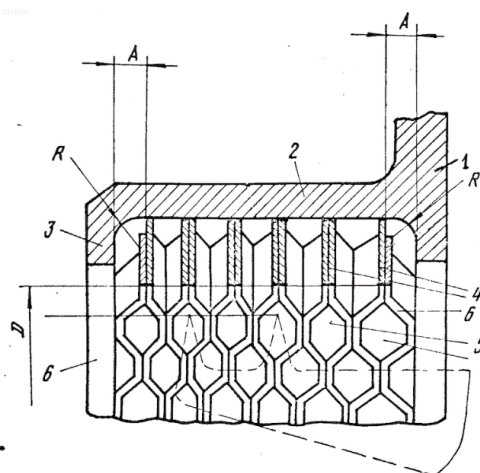
Рисунок 1.3 – Схема установки для нанесения припоя

Принцип работы установки заключался в следующем, деталь, установленная на транспортере 3, перемещалась под питатель порошкового припоя 6. Питатель подавал на деталь дозу порошкового припоя. После нанесения припоя деталь двигалась под форсункой 8, которая обдувала ее сжатым воздухом для избавления от излишков порошка припоя. Далее деталь переходила на транспортер 4 и подавалась под пульверизатор связующего вещества 7. Связующее вещество

наносили на деталь тем самым, не давая порошку припоя выпасть при дальнейшем перемещении до места пайки.

Авторы патента гарантировали повышение качества нанесения припоя и увеличение производительности в 15-20 раз. Также, по мнению авторов, установка позволила бы исключить потерю порошкового припоя, и повысить культуру производства. Однако данная установка позволяла наносить порошковый припой только на плоские сотовые конструкции. Для изготовления сотовых уплотнений, которые имеют кривизну с определенным радиусом данная установка не подходит.

1996 год. Публикуется патент [26], в котором сформулирована основная идея производства сотовых уплотнений ГТД. Данная технология используется и сегодня. Основная идея способа, описанного в патенте заключается в следующем, в корпус сотового уплотнения устанавливается сотовая полоса и закрепляется на корпусе. Установка сотового блока производится таким образом, чтобы обеспечить сопряжение с технологическими буртами. Далее в соты осуществляется засыпка порошкового припоя и его закрепление клеем. Далее процесс производства сотового уплотнения подразумевает пайку и последующую механическую обработку.



1, 2 – корпус сотового уплотнения; 3 – технологический бурт; 4 – сотовая полоса 5, 6 – гофрированные ленты.

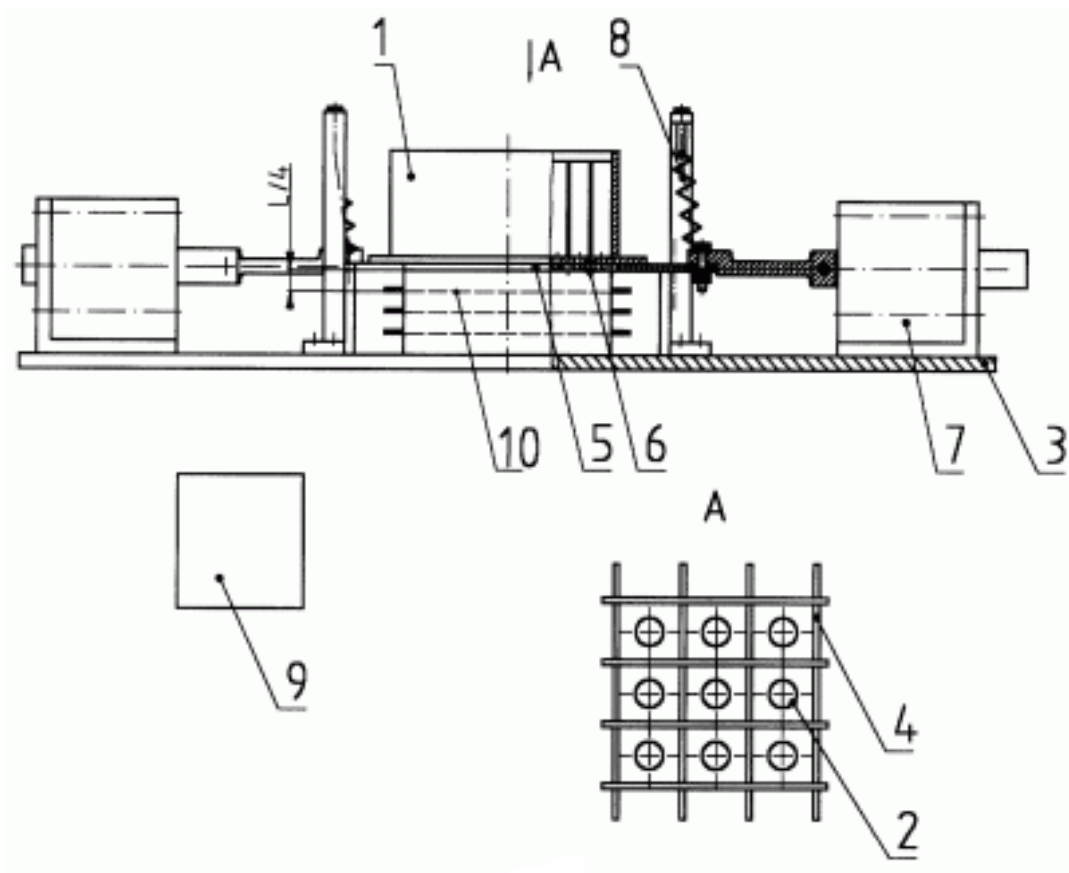
Рисунок 1.4 – Меридиональное сечение сотового уплотнения

Способ осуществляют следующим образом. Сотовую полосу 4 устанавливают в корпус 1 и предварительно закрепляют ее на цилиндрической части 2 корпуса 1 сваркой. Полосу 4 устанавливают с осевыми зазорами А относительно буртов 3, что обеспечивает равномерное прилегание полосы 4 к цилиндрической части 2 корпуса 1. Затем в зазоры А с натягом устанавливают гофрированные ленты 6. В соты полосы 4 и ленты 6 засыпают порошковой припой, например, ВПр11-40Н в таком количестве, чтобы высота припоя составляла 0,5-1,0 мм. Припой укрепляют клеем, например, смолой БМК-5 (ОСТ 6-01-26-75) или полимером БМК-5 (ОСТ 01-18-75), разведенным растворителем Р-5 (ГОСТ 7827-74). Затем припаивают сотовую полосу 4 и гофрированные ленты 6 к корпусу 1 и производят окончательную обработку полосы 4 и лент 6 на заданный диаметр уплотнения D [26].

На двигателестроительном предприятии АО «НПЦГ Салют» была сконструирована установка, предназначенная для нанесения припоя на сотовые уплотнения двигателей ГТД. Принципиальное различие ее от установки, описанной в патенте [25] заключается в отсутствии транспортеров и переход от распыления порошка к рассыпанию. Транспортеры в установке заменила планшайба. С помощью планшайбы осуществляется перемещение кольца или сектора с закрепленными контактной сваркой сотовых блоков под дозатором припоя. Планшайба приводится в движение электродвигателем, бункер с дозатором уже не распыляет, а рассыпает порошок припоя, установленный за ним пульверизатор, распыляет акриловую смолу для закрепления порошка припоя в ячейка сотовых блоков [15].

В 2006 году Филиппов Станислав Викторович публикует диссертацию на тему: «Технология и оборудование автоматизированного нанесения припоя при подготовке под пайку сотовых вставок уплотнений ГТД». Основное внимание в работах Филиппова было акцентировано на исследование истечения порошкового припоя и его рассеивание сеткой. На эти темы было выпущено несколько

публикаций, а также было запатентовано устройство для дозирования порошковых припоев.



1 – бункер; 2 – выпускные отверстия; 3 – подставки; 4 – перегородки; 5 – заслонка; 6 – отверстия заслонки; 7 – соленоиды.

Рисунок 1.5 – Устройство для дозирования порошка припоя

В 2005 году Филиппов С.В. Лунев А.Н. и Лахно П.П. патентуют устройство дозирующее порошок припоя, представленное на рисунке 1,7. Устройство состоит из бункера 1 в днище, которого имеются выпускные отверстия 2. Бункер располагается на четырех столбиках подставки 3. В бункере имеются вертикальные перегородки 4, отделяющие отверстия 2 друг от друга. Механизм регулировки дозы выполнен в виде заслонки 5 с отверстиями 6, совершающей, возвратно-поступательные перемещения под бункером с помощью соленоидов 7. Заслонка 5 прижимается к бункеру с помощью пружин 8. Блок управления 9 с помощью

микросхемы управляет перемещением заслонки 5. Под заслонкой 5 установлены сетки 10 [27].

В публикациях [28] и [29] была описана модель процесса истечения порошкового припоя при кратковременном открытии выпускного отверстия.

Модель позволяет определить:

- расход порошка при заданном законе перемещения выпускной заслонки;
- траектории падения частиц сыпучего материала при разных скоростях перемещения заслонки;
- оптимальные геометрические размеры и количество рассеивающих сеток с учетом диаметра выпускных отверстий, шага их расположения и траектории падения частиц.

В работе были выявлены новые закономерности при наблюдении движения сыпучих материалов в бункере, так, например, было выявлено вращательное движение частиц, что не учитывалось в более ранних публикациях посвященной этой теме.

Были исследованы такие факторы как:

- влияние удара цилиндрической поверхности заслонки при выпадении частицы из выпускного отверстия бункера;
- влияние скорости возвратно-поступательного перемещения заслонки;
- влияние расстояния от заслонки до сетки и др.

Также были сформулированы основные требования к нанесению припоя, глубина нанесения порошкового припоя по высоте ячейки от подложки должна быть в диапазоне  $(0,3...0,8) + 0,1$  мм, при этом припой должен быть распределен равномерно.

Однако исследования и построения модели истечения порошка были выполнены с некоторыми допущениями:

- сыпучее тело состоит из одинаковых абсолютно твердых сферических частиц припоя;

- в процессе движения сыпучего тела сферические частицы припоя на границе воронки истечения скользят друг по другу и вращаются;
- силы внутреннего трения между сферическими частицами припоя и внешнего трения сферических частиц припоя о стенку бункера пропорциональны соответствующим нормальным усилиям (закон Кулона).

В общих выводах Филиппов указал, что разработал технологическую схему автоматизированного нанесения порошкового припоя сразу на всю поверхность сотовых вставок и внедрил результаты исследования на ОАО КМПО.

Методика, разработанная Филипповым, по замыслу автора, позволяет равномерно наносить порошковый припой на соединение типа сотовый блок-подложка. Однако сейчас с развитием авиационных ГТД, в частности в двигателях 5-го поколения, возникает необходимость пайки сотовых блоков в труднодоступных местах. На рисунке 1.8 представлен эскиз кольца с припаянным сотовым уплотнением, в котором нет возможности нанести припой дозатором по вышеописанной теме. Проблему нанесения припоя традиционным методом решить в данном случае довольно затруднительно. Технологически решить эту задачу представляется возможным нанесением порошка припоя на сотоблок до установки его в корпус вставки [30].



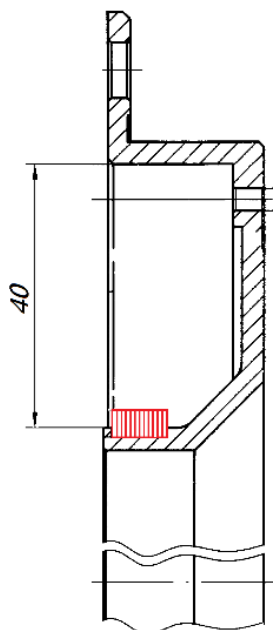


Рисунок 1.6 – Сотовое уплотнение с размещением сотового блока в труднодоступном месте

#### 1.4.2 Порошковые припои в виде пластифицированной ленты на органическом связующем

Вторым способом точной дозировки и закрепления порошкового припоя в конструкции типа сотовое уплотнения является использование порошкового припоя в виде пластифицированной ленты на органическом связующем. Такая форма припоя более технологична, позволяет точно дозировать порошок припоя так как плотность порошкового припоя в ленте регламентирована, а также благодаря пластическим свойствам позволяет наносить такие припои на сотовые блоки перед их закреплением на корпусе сотового уплотнения. Производством данных припоев занимаются крупные производители припоев и вспомогательных материалов для пайки такие как Innobraze [31] и Oerlikon [32]. На отечественном рынке на сегодняшний день известен только один производитель подобных припоев – ФГУП «ВИАМ» [33]. Также несколько патентов посвященных порошковым лентам в 2020-м году зарегистрировало АО «РОТЕК» которое занимается производством деталей ГТД в частности сотовыми уплотнениями

[34,35]. Порошковый полуфабрикат в виде ленты применяется не только в качестве припоев, но и используется в качестве функционального покрытия получаемое с использованием композиционной ленты состоящей из порошка припоя и наполнителя выполняющего функциональное назначение [36].

Первый патент, посвященный порошковым материалам для пайки в виде ленты с использованием органического связующего, датируется вторым марта 1965-го года. В качестве связующего вещества авторы патента предлагают использовать поливиниловый спирт, растворенный водой. Из недостатков такой ленты можно отметить что в процессе длительного хранения происходит охрупчивание ленты. Также отмечается, что затруднительно получение ленты заданной толщины [37].

В 1970-м году Уильям Уиллис и Гордон Брэдли регистрируют патент паяльные ленты и способ их изготовления. Авторы патента уже подробно описывают различные порошковые композиции, которые могут использоваться в этих лентах и области применения лент, а также предлагают способ изготовления лент припоя. Технология заключалась в следующем: на медный барабан наносился слой ацетатного покрытия, для предотвращения налипания ленты к барабану. Далее на барабан распыляли клеевой слой, состоящий из раствора акриловой смолы и трихлорэтилена который и являлся связующим веществом в ленте. Далее на барабан с помощью дозатора рассыпался слой порошкового припоя, который повторно смачивался клеевым составом. Нанесение клея и порошка припоя происходило до тех пор, пока не набиралась требуемая толщина ленты. После окончания нанесения на барабан порошка и связующего барабан вращали до испарения трихлорэтилена, далее нанесенный на барабан припой нарезали лентой [38]. Можно отметить, что такой процесс получения ленты достаточно производителен, а также его можно легко автоматизировать. Однако процесс имеет ограничения по длине получаемой ленты припоя.

Со середины 80-х годов начинают предлагать способы получения условно бесконечной ленты припоя полученной на своего рода конвейерах. В патентах [39,40] описан процесс получения шликера состоящего из связующего вещества и порошкового припоя. В связующее вещество представляет собой смесь основы, в качестве которой авторы предлагают поливинилбутераль, а также пластификатора, который обеспечивает пластические свойства ленты, например, олеат калия. В патентах предлагается одинаковая технология по отливке полученного шликера припоя из специального щелевого дозатора на подложку, которая не будет взаимодействовать со шликером. Далее отлитая лента проходит через сушку и наматывается на катушку. Такая технология не имеет ограничений по длине полученной ленты и легко автоматизируется, однако процесс получается сложный с точки зрения получения конечного продукта с требуемыми характеристиками. Авторы акцентируют внимание, на то что для получения ленты требуемой толщины необходимо учитывать усадку связующего вещества в результате испарения растворителей.

В 2013 году ВИАМ патентует ленту из порошкового высокотемпературного припоя на органическом связующем [41]. Лента припоя позиционируется как материал для пайки радиаторов, соединений трубопроводов, уплотнительных материалов, а именно сотовых уплотнений, а также сопловых и рабочих лопаток турбин. В патенте описывается состав связующего органического вещества который состоит из полимера акриловой смолы, который судя по всему является основным связующим веществом и дибутилфталата который является широко используемым пластификатором [42] и обеспечивает пластичность лент. Также в патенте говорится о возможности использования адгезивного покрытия на лентах для облегчения закрепления припоя на детали. Среди преимуществ данного материала отмечается высокая однородность порошка припоя, что важно для пайки сотовых уплотнений.

Не смотря на продолжительное использование подобных материалов для пайки и наплавки функциональных покрытий информации о факторах, влияющих

на свойства ленты, например, технологических свойств порошковых материалов и вязкости связующего вещества на свойства ленты достаточно мало открытых источниках. Также практически отсутствует информация непосредственно о свойствах ленты как припоя, т.е. исследований, посвященных растеканию, смачиванию способности к заполнению зазора и т.д.

Статья [18] посвящена высокотехнологичным полуфабрикатам жаропрочных припоев (ленты и пасты на органическом связующем). В статье описывается широкое применение паст и лент припоя на органическом связующем, которые получили применение на ряде предприятий по технологиям, разработанным ранее в ВИАМ. Однако промышленное производство подобных полуфабрикатов затруднено в виду их малого срока годности, не более 10 суток с момента производства.

Для обеспечения равномерности упаковки порошкового припоя, авторы статьи, утверждают, что пространство между частицами порошка должно быть полностью заполнено органическим связующим. Также формулируется основное требование к органическому связующему – способность удаляться при нагреве в вакууме без образования зольного остатка. Наличие зольного остатка при начале плавления припоя может привести к непрояам, появлению неметаллических включений в паяных швах и другим дефектам паяного соединения.

В статье авторы приводят данные по удельной пористости упаковки различных припоев. Исследование проводили на 6-ти сплавах припоев по трем фракционным составам. Результаты исследования приведены в таблице 1.3. Из результатов видно, что марка припоя практически не влияет на вышесказанный показатель, а самую плотную упаковку имеет припой с большим фракционным разбросом, который является самым дешевым.

Поскольку основным недостатком припоев в виде лент являлся малый срок годности, ВИАМ делает акцент на исследование различных связующих.

В работе описывается использование нескольких связок (лаки АС-82 и АК-113, смолы эпоксидные Э-41 и ЭД-20 и др), приводится влияние содержания пластификатора на технологические характеристики припоев. Однако при использовании самой технологичной связки срок годности припоя не превышает 120 суток. Максимальный достигнутый срок годности припоя без герметичной индивидуальной упаковки был не более 6-ти месяцев.

Таблица 1.2 – Удельная пористость упаковки порошков различных припоев

		Фракционный состав порошка припоя, мкм		
		10-40	40-100	10-200
		Удельная пористость упаковки порошка, мл/г		
Припой	ВПр16	0,071 ↑	0,082	0,069 ↑
	ВПр24	0,061	0,080	0,068
	ВПр36	0,064	0,086 ↑	0,068
	ВПр42	0,066	0,075 ↓	0,056 ↓
	ВПр14	0,069	0,084	0,066
	ВПр50	0,058 ↓	0,079	0,065

В [43] авторы сообщают об изготовлении ленты припоя из никелевого порошкового припоя ВNi-2, который замешан на органическом связующем. В качестве связующего вещества использовался полимер полиакриловой кислоты, гликоль, а также четырёххлористый углерод. Ленту получали методом отливки по аналогии с патентами [39,40] на полимерную фольгу при этом изменяя соотношение связующего и порошкового припоя в следующих пропорциях: 9:1; 8:2; 7:3, однако при этом состав самого связующего авторы оставляют неизменным. В работе впервые упоминается влияние связующего вещества на физико-химические свойства припоя, такие как смачивание и растекание, а также исследуется возможность заполнения переменного зазора лентами припоя с различной концентрацией порошка. Результаты работы показали, что оптимальным показателем по смачиванию и растеканию припоя показывают

образцы, приготовленные в соотношении 8 частей порошка, 2 части связующего вещества. При этом авторы исследуют паяные соединения, полученные лентами с различным соотношением связующего вещества и порошка припоя. При пайке лентой с наименьшей концентрацией наполнителя наблюдается самое низкое диффузионное взаимодействие расплава припоя и основного материала. Это говорит о том, изменяя плотность порошкового наполнителя в ленте, можно регулировать количество расплава припоя, избыток которого растворяет тонкостенную конструкцию сотового блока.

Исследованию количества зольного остатка в зависимости от связующего вещества также исследуется в работе [44]. Авторы исследования подвергали образцы различного связующего вещества нагреву в вакууме до температуры 900 °С и исследовали зольные остатки. Определено, что после нагрева в вакууме сополимеры акриловой смолы и дисперсия поливинилацетата разлагаются полностью без остатка. Также было проведено исследование содержания углерода в припое в исходном состоянии и после нагрева в вакууме смеси припоя со связующим веществом (таблица 1.4). Из результатов видно, что только сополимер акриловой смолы не оказывает существенного влияния на состав припоя.

Таблица 1.4 – Результаты определения примесей в припое в исходном состоянии и после нагрева с различными основами органического связующего

Основа органического связующего	Содержание, % (по массе)			
	C	S	O	N
В исходном состоянии	0,011	0,0017	0,071	0,0007
Сополимер акриловой смолы БМК-5	0,026	0,0031	0,040	0,0010
Дисперсия поливинилацетата марок:				
Д50Н	0,399	0,0010	0,015	0,0034
Д50С	0,470	0,0031	0,018	0,0009
Д50В	0,590	0,0055	0,020	0,0008

Также в работе начинают рассматривать влияние состава связующего вещества на технологические характеристики ленты. Так, например, формулируется, что для придания лентам необходимых свойств, таких как пластичность требуется введение модифицирующих добавок – пластификаторов.

### **1.5 Капиллярное течение припоев**

Из определения пайка - это образование соединения с межатомными связями путем нагрева соединяемых материалов ниже температуры их плавления. В процессе пайки происходит смачивание паяемых материалов припоем, затекание его в зазор и последующее затвердевание.[45] В процессе пайки протекают физико-химические процессы на границе твердой жидкой и газообразной фаз. Один из физико-химических процессов, который используют для качественной оценки паяемости материалов является капиллярное течение припоя в паяльном зазоре.[4,46–48] Капиллярное течение жидкостей по поверхности твердого или жидкого тела обусловлены наличием в них внутренних и поверхностных силовых полей. Характер смачивания и капиллярного течения припоев во многом зависит от величины коэффициента поверхностного натяжения их расплавов, значения межфазного натяжения в контактах среда пайки – жидкий припой – паяемый материал, а также величины поверхностной энергии основного металла, находящегося в твердом состоянии [49].

При оценке капиллярного течения припоя пользуются статистической теорией, рассматривающей форму жидкости на поверхности твердого тела в условиях наименьшей свободной энергии системы, и динамической, рассматривающей течение жидкостей. Статической теорией пользуются для оценки силы, в следствии которых осуществляется процесс течения припоя во время пайки. Динамической теорией пользуются чтобы установить причины, которые влияют на заполнение зазора припоем. Согласно статической теории, высота подъема жидкости в капилляре круглого сечения прямо пропорциональна

ее поверхностному натяжению и смачивающей способности и обратно пропорциональна диаметру  $d$  капилляра и плотности жидкости (рисунок 1.9, а).

$$h = \frac{4\sigma_{1,2}\cos\theta}{d\rho g} \quad (1.1)$$

где,  $\rho$  – плотность жидкости;  
 $g$  – ускорение силы тяжести.

В случае капиллярного течения между двумя параллельными пластинами, находящимися на расстоянии  $\alpha$  (рисунок 1.9, б), высота подъема жидкости определяется из того же соотношения:

$$h = \frac{2\sigma_{1,2}\cos\theta}{\alpha\rho g} \quad (1.2)$$

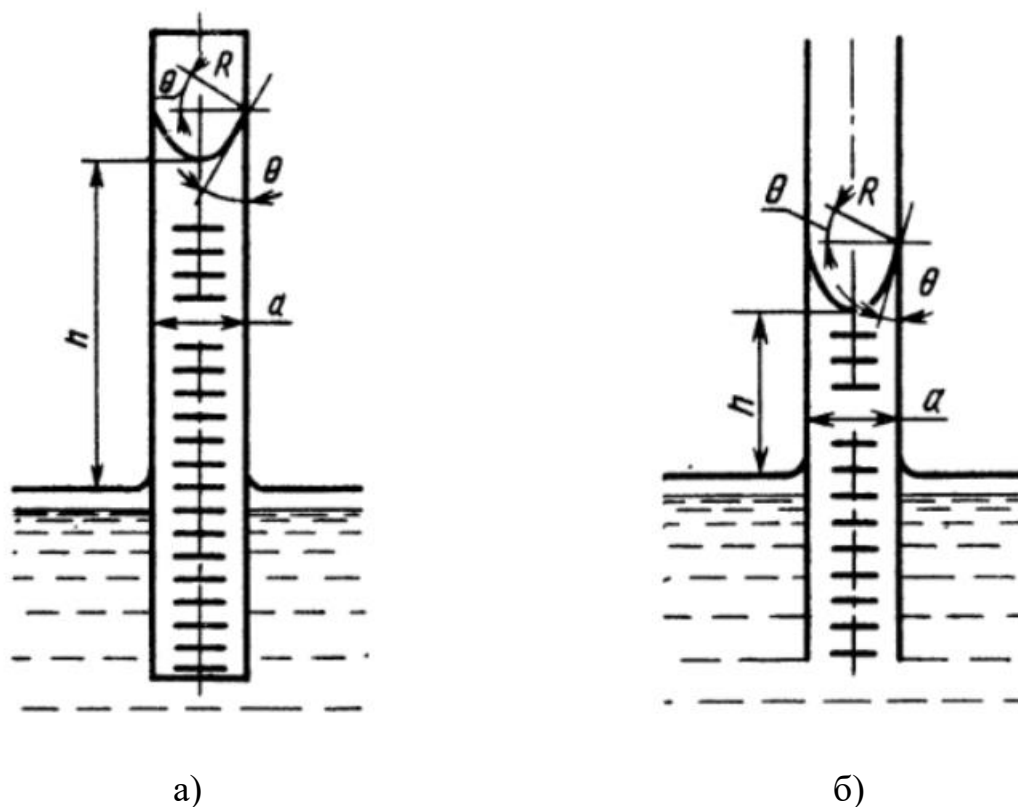
По (1.1) и (1.2) видно, что высота подъема жидкости в круглом капилляре в два раза меньше чем в плоском зазоре между двумя пластинами, который характерен для паяного соединения сотового уплотнения. В обоих случаях, если вес жидкости, находящейся в зазоре, превышает результирующую капиллярных сил, то эти силы не могут удержать ее, и она будет опускаться до такого уровня, при котором вес ее уравновешивается капиллярными силами.

Согласно динамической теории, скорость течения жидкости в зазоре зависит от величины нахлестки и зазора, разности давлений на входе и выходе из зазора, а также от вязкости жидкости. Так для расчета глубины затекания жидкости в горизонтальный зазор, согласно динамической теории, определяется формулой:[50]

$$l = \sqrt{\frac{\sigma_{1,2}}{3\eta} t} \quad (1.3)$$

где,  $\eta$  – вязкость жидкости;  
 $t$  – время, необходимое для затекания припоя на глубину  $l$ .





а – круглого сечения, б – между параллельными пластинами

Рисунок 1.9 – Схема поднятия жидкости по капилляру

Согласно формуле между глубиной затекания припоя и величиной зазора прямая зависимость, которая на практике не соблюдается. При прочих равных условиях наибольшая глубина затекания жидкости в зазор будет при оптимальном значении последнего. Кроме того, глубина затекания, согласно выведенному уравнению, не ограничивается, если имеется неограниченное количество жидкости.

Поверхностные свойства жидких растворов зависят от характера распределения в объеме и в поверхностном слое растворенных элементов. Если взаимодействие между атомами растворенного вещества и атомами растворителя меньше, чем взаимодействие между атомами растворителя, то растворенные вещества будут преимущественно выталкиваться из объема на поверхность.

Накопление их в поверхностном слое приведет к уменьшению атомного взаимодействия, в результате чего поверхностное натяжение с ростом концентрации растворенных веществ падает. Но при этом под действием диффузионных процессов по всему объему расплава припоя концентрация стремится стать равновесной. В результате действия этих противоположенных процессов достигается равновесие в распределении элементов в объеме и в поверхностных слоях жидкости.

Связь величины изменения поверхностного натяжения с характером распределения растворенного вещества в объеме и в поверхностных слоях описывают уравнением Гиббса:[51]

$$\Gamma = -\frac{C}{RT} \left( \frac{\partial \sigma}{\partial C} \right)_T \quad (1.3)$$

где,  $\Gamma$  – избыток растворенного вещества в поверхностном слое;

$R$  – универсальная газовая постоянная;

$T$  – абсолютная температура;

$C$  – концентрация растворенного веществ

Таким образом количество растворенного вещества в поверхностном слое зависит от концентрации его в объеме и температуры. Однако при пайке происходит взаимодействие припоя с паяемым материалом, что приводит к изменению вязкости расплава. Во время заполнения зазора припой изменяет температурный интервал плавления в виду легирования припоя компонентами основного металла. В связи с этим может наблюдаться образование первичных отдельных кристаллов и кристаллических образований, появившихся в результате изотермической кристаллизации. В некоторых случаях величина образовавшихся кристаллов может превышать величину зазора и в таком случае дальнейшего течения в зазоре не будет. Температурно-временные характеристики пайки зачастую зависят от конфигурации детали и при пайке одинаковыми одинаковых сплавов одинаковыми припоями температура пайки может быть различна, что влияет на заполнение зазоров. Также стоит отметить что не малую роль, могут

влиять, способы подготовки поверхности, активные среды и флюсы, применяемые в пайке так как они влияют на поверхностное натяжение жидкого припоя. Поэтому применительно к припоям влияние растворенных веществ на изменение поверхностного натяжения в целом не исследуется, а способность заполнения зазора припоем оценивается специальными методиками с воспроизведением технологических особенностей процесса пайки конкретного изделия [52,53].

Для определения максимально допустимого зазора для конкретного изделия используют методики по исследованию заполнения переменного зазора. На рисунке 1.10 схематично представлены образцы для этих экспериментов. Максимально допустимый зазор при пайке в зависимости от высоты поднятия припоя определяют по формуле (Рисунок 1.10, а):

$$\alpha_{max} = \frac{\alpha_0}{2} \left[ 1 - \cos \frac{57.3(\pi r - bh^n)}{r} \right] \quad (1.4)$$

где  $\alpha_{max}$  – максимально допустимый зазор в шве, соответствующий высоте  $h$  поднятия припоя;

$\alpha_0$  – максимальный зазор между втулкой и стержнем;

$r$  – радиус стержня;

$b, n$  – справочные значения для конкретных припоев.

Для определения заполнения припоем горизонтального зазора используют пластины из паяемого материала размерами 40x40 и 20x20 мм толщиной 1-2мм. Навеску припоя должна составлять 150% от объема заполняемого расплавом зазора. Подготовку поверхности образцов, способ пайки, температурный режим и другие особенности процесса выбирают в соответствии с применяемой технологией пайки. Пластины укладывают друг на друга, соблюдая фиксированный зазор на всей площади сопряжения, который обеспечивается прокладками инертными по отношению к расплаву припоя. При этом следует учитывать ТКЛР прокладок, так как при их расширении зазор увеличится.

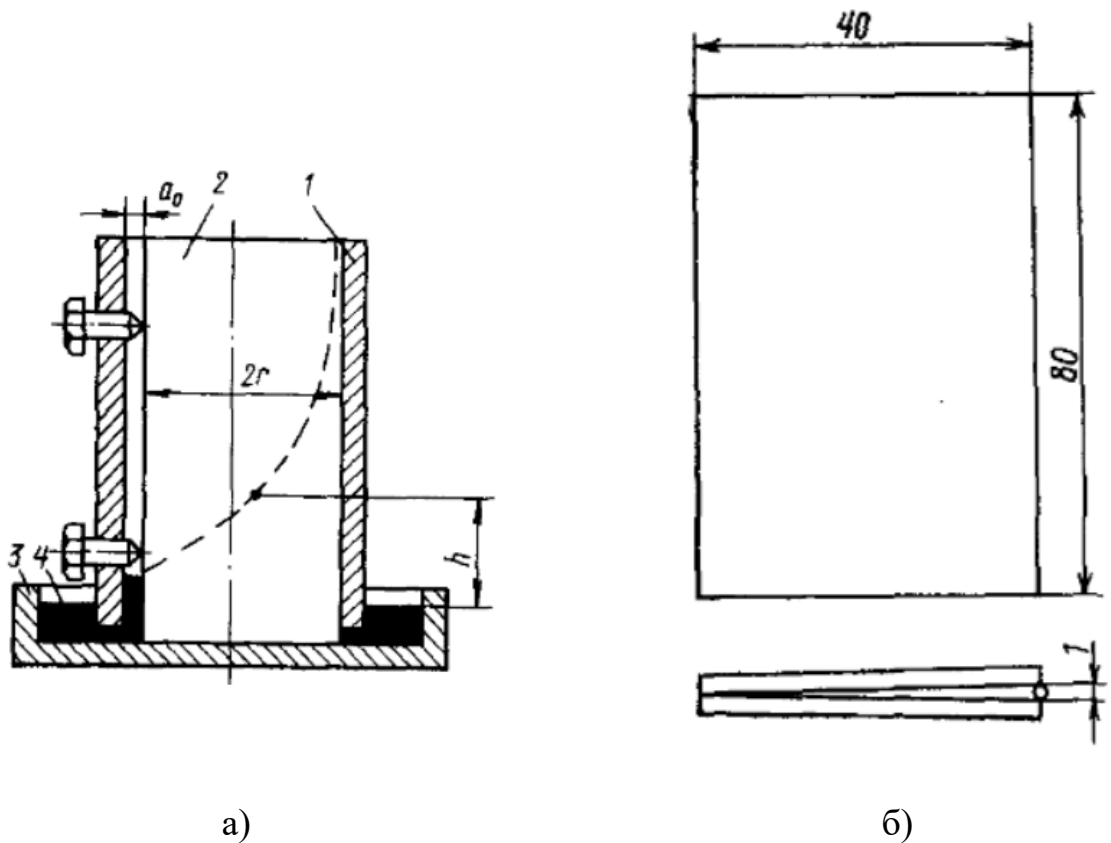


Рисунок 1.10 – Определение высоты заполнения подъема припоя в зависимости от величины зазора:

1 – втулка; 2 – стержень; 3 – чаша; 4 – расплав припоя.

Регистрация температуры проводится термопарами по ГОСТ 6616-61 и приборами по ГОСТ 7164-71 класса точности не ниже 0,5. Для корректного значения производят пайку не менее пяти одинаковых образцов в одинаковых условиях. Коэффициент заполнения зазора припоем рассчитывают по формуле:

$$K_3 = \frac{S_3}{S_0} * 100 \quad (1.5)$$

где  $S_3$  - площадь заполнения зазора припоем

$S_0$  – площадь меньшей пластины за вычетом площади прокладок.

Коэффициент пористости  $K_{\text{п}}$  рассчитывают по формуле:

$$K_{\text{п}} = \frac{S_{\text{п}}}{S_3} * 100 \quad (1.6)$$

где  $S_{\text{п}}$  – площадь пластины, занятая порами.

Суммарную площадь занятую порами определяют рентгенографическим методом или визуально после разрушения паяного шва. Погрешность измерения пористости – не менее 0,5 мм.

Значение коэффициента заполнения зазора и пористости принимают как среднее арифметическое из пяти или более измерений [54].

На рисунке 1.10, б представлены образцы для определения заполнения вертикального зазора. Толщина используемых пластин составляет 1-2 мм. Как и при определении заполнения горизонтального зазора поверхность образцов и режимы пайки выбирают, опираясь на используемую технологию. Материал прутка обеспечивающий клин между пластинами должен иметь температуру плавления выше чем температура пайки и быть инертным к расплаву припоя. Образец и навеска припоя помещается в ванну, которая также не должна взаимодействовать с расплавом в процессе пайки. Контрольно-измерительные приборы используются те же что и при исследовании заполнения горизонтального зазора [53].

### **1.6. Тепловые процессы при нагреве деталей под пайку**

Для образования паяного соединения, в частности возникновения металлической или неметаллической в связи основной материал – припой, необходимо обеспечить следующие условия:

- активация поверхности основного материала и припоя;
- химическая реакция между основным материалом и расплавом припоя;
- кристаллизация жидкости, заполняющей зазор между соединяемыми пайкой материалами [52].

Все эти этапы образования паяного соединения напрямую связаны с температурой. Без достижения определенной температуры расплава припоя и поверхности паяемого материала не начинаются процессы смачивания и растекания припоя. При неравномерном нагреве детали припой стремится растечься по более горячей ее части, что может привести к непропаям. Особенно важно контролировать равномерность прогрева детали при использовании порошковых припоев. Известно, что массо- и теплоперенос внутри соединения происходит по-разному в зависимости от вида используемого припоя. Так при компактном закладном элементе в виде ленты или таблетки разогрев припоя происходит при хорошем тепловом контакте со стенкой детали, динамика плавления выше, припой разогревается равномерно, а разрыву расплава при его течении препятствуют силы когезии. Процесс формирования паяного соединения при пайке порошковым припоем отличается тем, что между частицами припоя полное плавление растягивается примерно в два раза. При этом легкоплавкая составляющая припоя стремится смочить более разогретую часть детали, при этом происходит разрыв между частями порошкового припоя, что приводит к еще большему увеличению времени полного плавления, а также к обеднению основной массы припоя легкоплавкой составляющей и повышению его температуры плавления [19]. Зная градиент температуры на детали в процессе пайки и управляя им можно управлять процессом растекания припоя и тем самым предотвращать дефекты паяных соединений.

Компьютерное моделирование тепловых процессов достаточно широко применяется в различных областях машиностроения. Например, в литейном производстве зачастую необходимо моделировать процесс нагрева формы под заливку или распределение температуры в форме, находящейся в условиях радиационного теплообмена с нагревателем и холодильником в вакуумной литейной установке [55–57]. Для этих целей используют системы компьютерного моделирования литейных процессов СКМ «ПолигонСофт», ProCAST, ANSYS, SolidWorks и т.д. обладающие необходимым функционалом для выполнения таких

расчетов [58–60]. Не смотря на большое количество различного программного обеспечения, существующего сегодня, в большинстве случаев любая тепловая задача решается путем задачи граничных условий, составления системы дифференциальных уравнений и их решение методом конечных элементов.

### **1.6.1 Решение тепловых задач методом конечных элементов**

Любую тепловую задачу можно описать системой дифференциальных уравнения. Для решения этих задач и определению температур в конкретной точке детали и времени применяют метод конечных элементов. Данный метод решения дифференциальных уравнений, впервые был использован в 1943 г. Курантом для решения задачи о кручении стержня [61]. В последующие годы с развитием цифровых электронных вычислительных машин применение данного метода решения распространилось на решение не только задач, связанных с анализом деформационного состояния конструкций, но и для термического анализа, для решения гидродинамических задач и задач электродинамики [62].

Первоначальным объектом применения метода конечных элементов считается материальное тело (область, занимаемая сплошной средой), которое разделяют на части – конечные элементы (рисунок 1.11). Результатом разбивки является сетка, состоящая из границ элементов. Пересечения границ элементов образуют узлы. На границах и внутри элементов при необходимости создаются дополнительные узловые точки. Ансамбль из всех конечных элементов и узлов является основной конечно-элементной моделью деформируемого тела при этом модель должна максимально приближённо покрывать область исследуемого объекта.

Выбор формы, типа и размера конечного элемента зависит от формы исходного материального тела и от разновидности расчета. Конечные элементы наделяются свойствами, которые задаются с помощью констант и опций. Например, геометрических параметров.

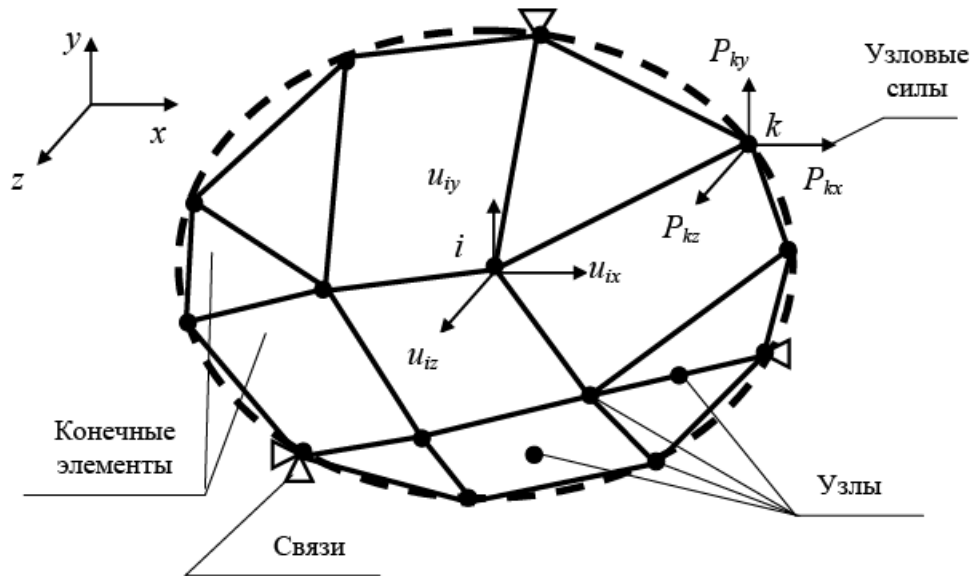


Рисунок 1.11 – Схема конечного элемента

Узлы и элементы нумеруют. Нумерация узлов может быть общей для всей конечно-элементной модели и локальной – внутри элементов. Нумерацию элементов и общую нумерацию узлов производят таким образом, чтобы максимально минимизировать трудоемкость вычислений. Для оптимизации нумерации используют отдельные алгоритмы. Также необходимо определить массивы связей между номерами элементов и общими номерами узлов, а также между местными и общими номерами узлов.

Для расчета температурных полей с помощью метода конечных элементов в рассматриваемой области определяют материалы элементов и задают их свойства. В стационарных задачах теплопроводности для конкретного материала задается коэффициент теплопроводности. При нестационарной теплопроводности дополнительно задают плотность материала и его теплоемкость. При решении нелинейной задачи теплопроводности, указанные физические свойства определяют, как функции температуры.

Характеристикой состояния тела считают конечное число независимых параметров, определенных в узлах конечно-элементной сетки. Таки параметры



называют – степенями свободы. В задачах теплопроводности степенями свободы являются температуры узлов. Один узел с глобальным параметром  $i$  имеет одну степень свободы – температуру  $T_i$ . Глобальный вектор степеней свободы при этом будет иметь вид:

$$\{T\} = \begin{Bmatrix} T_i \\ \vdots \\ T_n \end{Bmatrix} \quad (1.7)$$

Обоснование метода конечных элементов для тепловых задач обычно проводится или путем минимизации соответствующего функционала, или способом Гэрёлкина. Для конечного элемента в случае стационарной теплопроводности получается соотношение:

$$[K]_e \{T\}_e = \{Q\}_e + \{Q\}_e^q + \{Q\}_e^g + \{Q\}_e^h \quad (1.8)$$

где  $[K]_e$  – матрица теплопроводности элемента;

$\{T\}_e$  – вектор узловых температур элемента;

$\{Q\}_e$  – условные узловые тепловые нагрузки элемента от других элементов;

$\{Q\}_e^q$ ,  $\{Q\}_e^g$ ,  $\{Q\}_e^h$  – векторы узловых тепловых нагрузок элемента, эквивалентных соответственно поверхностному тепловому потоку, тепловым потокам от внутренних теплоисточников и от конвективной теплопередачи.

При решении задач нестационарной теплопроводности добавляют слагаемое, которое учитывает накопление тепла в материале. В конечном счете получается матричное дифференциальное уравнение:

$$[C]_e \frac{\partial}{\partial t} \{T\}_e + [K]_e \{T\}_e = \{Q\}_e + \{Q\}_e^q + \{Q\}_e^g + \{Q\}_e^h \quad (1.9)$$

где  $[C]_e$  – матрица теплоемкости элемента.

Из условий равновесия узлов или с помощью вариационных принципов, а также методов невязок, которые применяют ко всей конечно-элементной модели, составляют общую систему уравнений равновесия всей модели исследуемого тела.

Разрешающие уравнения стационарной задачи теплопроводности для модели получают из условий баланса тепловых потоков в узлах или путем минерализации функционала, определенного для все модели путем Граёлкина, применённого ко всей модели:

$$[K]\{T\}_e = \{Q\} + \{Q\}^q + \{Q\}^g + \{Q\}^h \quad (1.10)$$

Разрешающие дифференциальные уравнения нестационарной задачи теплопроводности для всей модели получают аналогично:

$$[C] \frac{\partial}{\partial t} \{T\} + [K]\{T\}_e = \{Q\} + \{Q\}^q + \{Q\}^g + \{Q\}^h \quad (1.11)$$

Эти уравнения называются уравнениями баланса тепловых потоков. Все тепловые нагрузки могут быть нестационарными. Компоненты всех общих матриц определяют путем суммирования соответствующих компонентов с одинаковыми индексами всех элементных матриц [63–68].

### **1.6.2 Применение методов компьютерного моделирования тепловых процессов при пайке**

Как уже отмечалось ранее для получение качественного паянного соединения крайне важно понимать какую температуру имеют детали под пайку в конкретный момент времени, в частности при достижении хотя бы одной из детали температуры солидуса припоя. В крупносерийном производстве однотипных изделий как правило разницу температур между деталями определяют экспериментальным путем, с использованием контрольных термопар, зафиксированных на разных деталях, однако при мелкосерийном производстве таких узлов как сотовые уплотнения экспериментально определить разницу температур затруднительно, как в виду конструктивных особенностей детали, так и в виду высокой трудоемкости проведения экспериментов под разные детали.

Для решения тепловых задач применяют компьютерное моделирование тепловых процессов. Ключевой фактор, который определяет достоверность

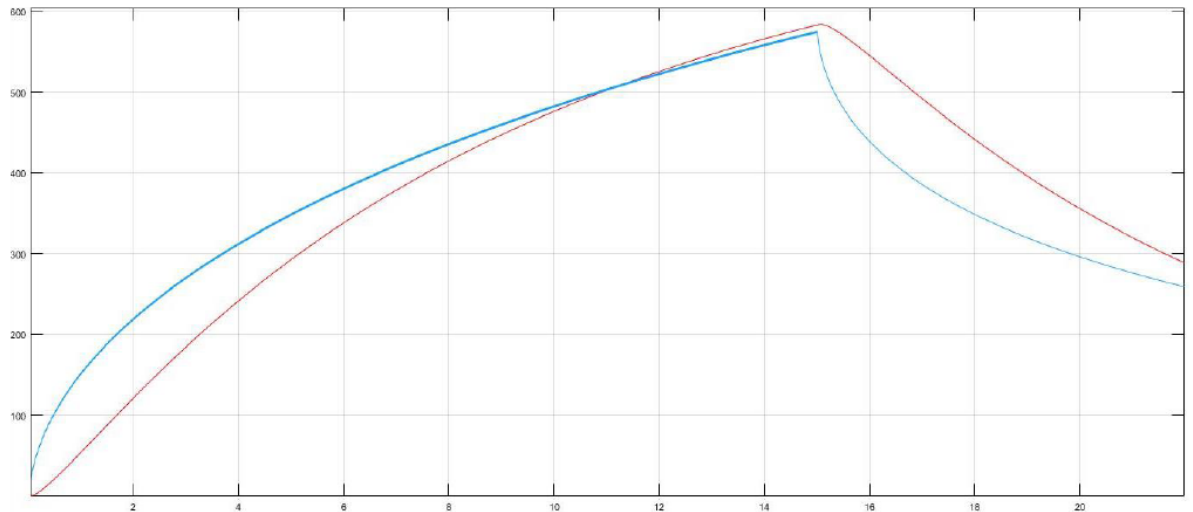
результата моделирования, является ее адекватность, т.е. правильное определение совокупности всех важных аспектов объекта управления в достаточной мере отражающий тепловой процесс в целом. Для упрощения разработки модели, имея объективную оценку ключевых факторов процесса и требований к точности иногда выбирают уже имеющуюся адекватную математическую модель или составляют новую на основе известных решений дифференциальных уравнений теплопроводности [69].

Так, например, для компьютерного моделирования процесса индукционной пайки волноводных трактов из алюминиевых сплавов с целью разработки алгоритма управления в проектируемой системе [70] были приняты упрощения, которые позволили использовать уже имеющуюся модель нагрева непрерывно действующего источника теплоты в бесконечном стержне, для описания распространения энергии в волноводной трубе. При приложении к расчетной формуле модели бесконечного стержня учета конечных размеров нагреваемого тела, для описания процесса индукционного нагрева фланца была получена математическая модель, позволяющая определить разницу нагрева детали до температуры пайки (рисунок 1.12) [69].

Компьютерным моделированием тепловых процессов, протекающих в деталях при нагреве решают также задачи по проектированию специального оборудования и оснастки для пайки. Для обеспечения равномерного нагрева в вакуумной печи, где передача тепла осуществляется исключительно за счет излучения от нагревателей, применяют различные технологические приемы и конструкционные особенности печей.

Так, например, одно из требований к вакуумным печам для пайки и термообработки электроракетных двигателей является равномерность температуры в объеме от 5-20 °С [71]. Для проведения процессов термической обработки деталей в столь однородном тепловом поле используют цилиндрические печи с многозонными нагревателями, в конструкции которых присутствуют

отдельные независимые нагреватели с отдельными источниками питания, регулирование мощности на которых позволяет получать требуемую температурную равномерность в рабочей зоне.



Ось y – температура, ось x – время, синий график – температура волноводной трубы, красный график – температура волноводного фланца.

Рисунок 1.12 – Результат моделирования индукционного нагрева волновода.

Однако стоимость такого оборудования весьма высока и не на каждом предприятии возможно держать подобные печи. Авторы публикации [72] для проектирования новой печи использовали способ последовательных тепловых моделирований методом конечных элементов. Компьютерное моделирование осуществлялось в программном пакете ANSYS. Для модели детали использовали магнитопровод электродвигателя. Деталь характеризовалась тонкостенной конструкцией сложной формы и наличием множества экранирующих поверхностей, что идентично конструкции сотового уплотнения. Так объем печи в процессе нагрева находится в вакууме, расчёт температуры в объеме провести невозможно, поэтому авторы приняли допущение, что обеспечение однородности температуры на магнитопроводе сложной формы позволит считать, что на деталях более простой формы температурная неоднородность будет меньше.

Первоначально было предложено использовать экранирующую оснастку, которая бы обеспечила равномерность температурного поля рисунок 1.13.

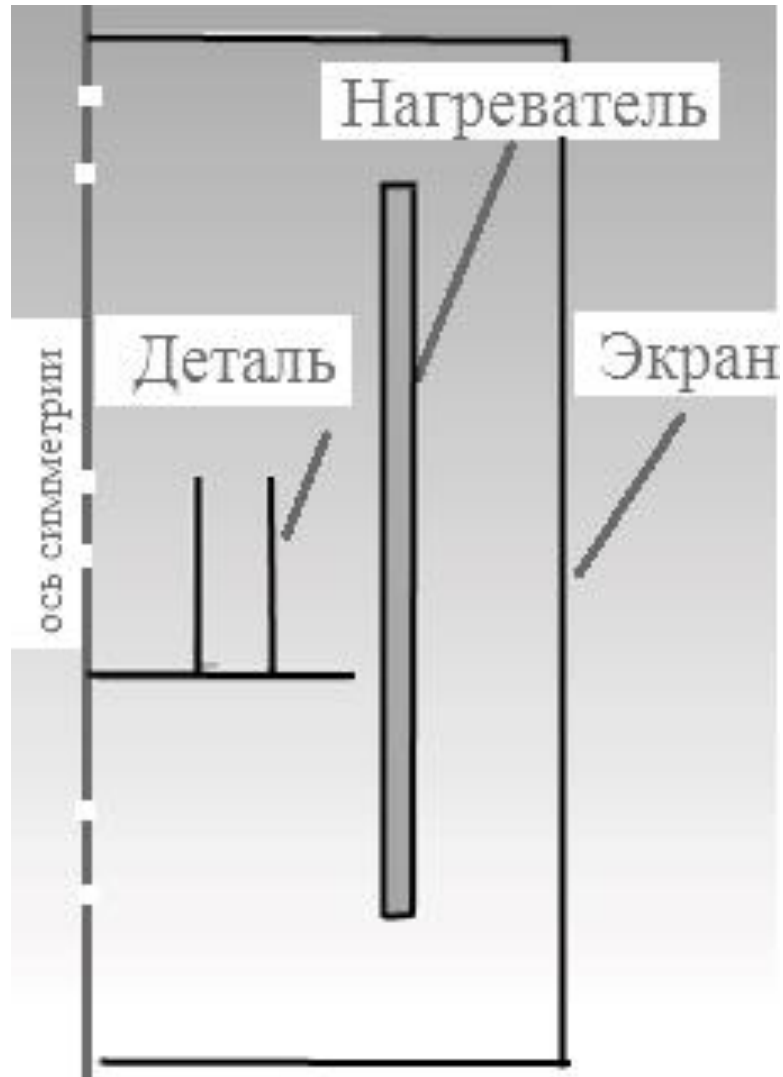


Рисунок 1.13 – Расчётная модель печи

Была проведена серия моделирований с различным количеством, толщиной экранов и различных материалов не дало однородности теплового поля. Расчёты показали, что при использовании даже 6-ти экранов (рисунок 1.14) не удастся добиться требуемой равномерности температурного поля внутри объема печи.

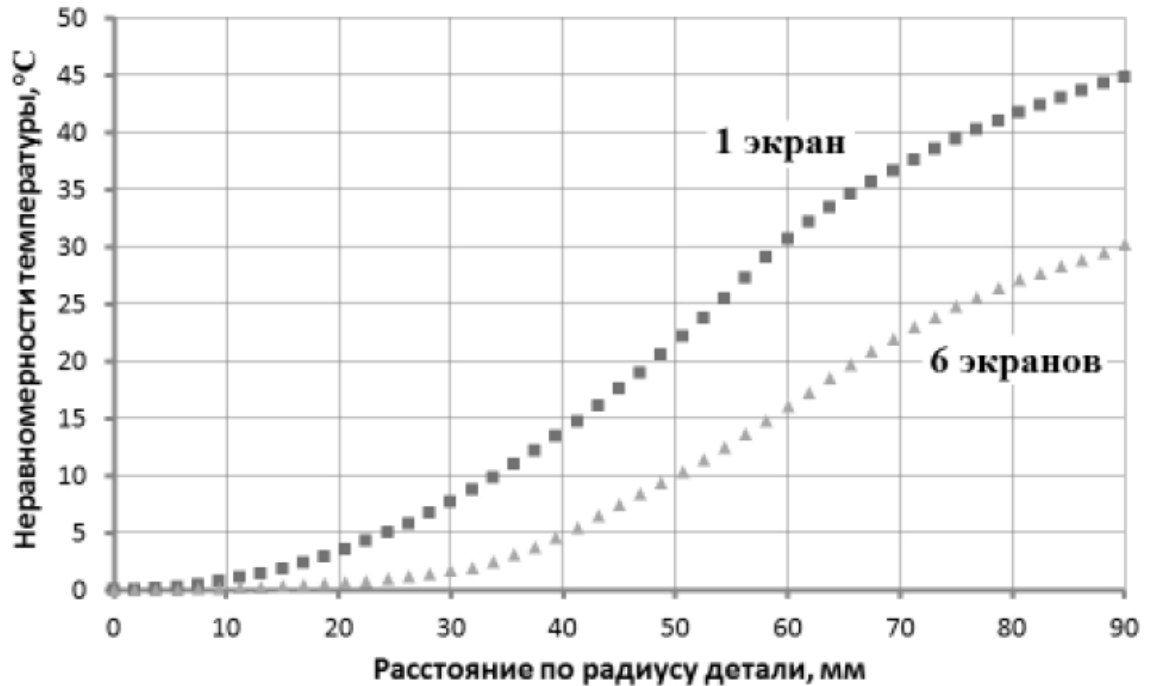


Рисунок 1.14 – Зависимость неравномерности температуры от радиуса основания модельной детали при различном числе экранов.

После этого авторами был произведен расчет нагрева аналогичной печи при условии, что объем разогревается тремя независимыми нагревателями. Расчёт показал, что для обеспечения требуемой равномерности температурного поля необходимо чтобы зоны нагревателя делились по тепловыделению со следующим соотношением:

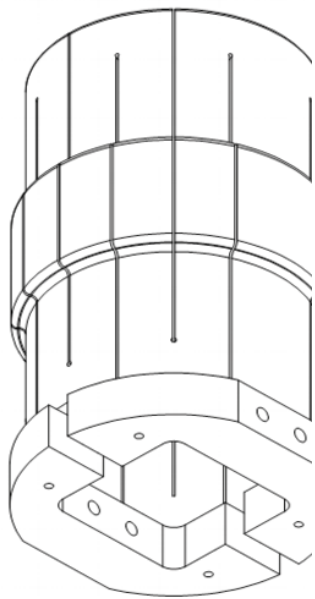
$$N = N_1 + 2N_2 \quad (1.12)$$

где  $N$  – общая электрическая мощность, подаваемая на нагреватель;

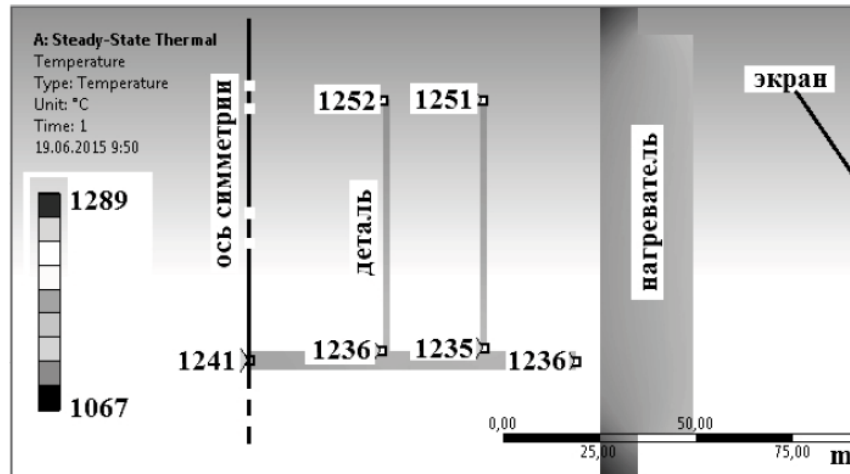
$N_1$  – мощность выделяемая в центральной зоне;

$N_2$  – мощность выделяемая на каждой из периферийных зон.

Определив разницу мощностей центральной части и периферии нагревателя был спроектирован цилиндрический нагреватель переменного сечения, который выделял большее количество теплоты в центральной части (рисунок 1.15, а) и обеспечивал требуемую равномерность температурного поля (рисунок 1.15, б).



а)



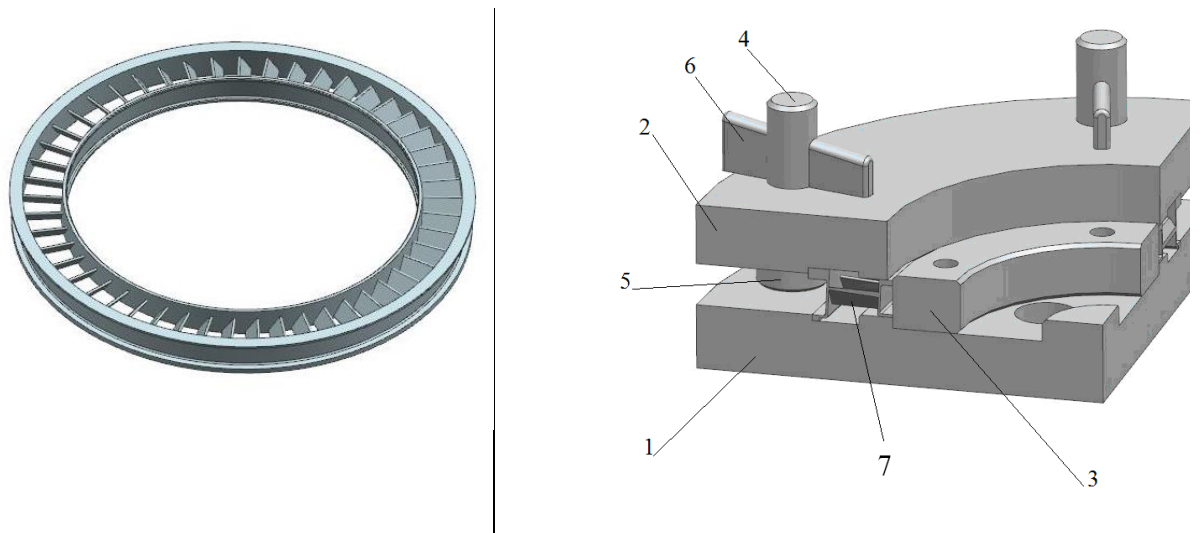
б)

а – 3д модель нагревателя; б – распределение температур в объеме печи.

Рисунок 1.15 – Результат применения компьютерного моделирования при проектировании вакуумной печи.

При нагреве деталей до температуры пайки оснастка может как способствовать равномерному нагреву, так и препятствовать. В работе [73] рассмотрено использование компьютерного моделирование распределение температуры при нагреве направляющего аппарата ГТД рисунок 1.16, а до температуры пайки в массивной оснастке рисунок 1.16, б и определение причин локальных непропаев.

В работе моделировался процесс пайки в шахтной индукционной печи (рисунок 1.17) Процесс пайки вели в потоке аргона, что накладывало свои особенности на конвекцию температуры в объеме.



а – общий вид; б – в приспособление для пайки. 1 – основание; 2 – крышка; 3 – центровочное кольцо; 4 – колонка; 5 – шайба; 6 – клин; 7 – направляющий аппарат.

Рисунок 1.16 – Трехмерные модели для исследования распределения температур при нагреве.

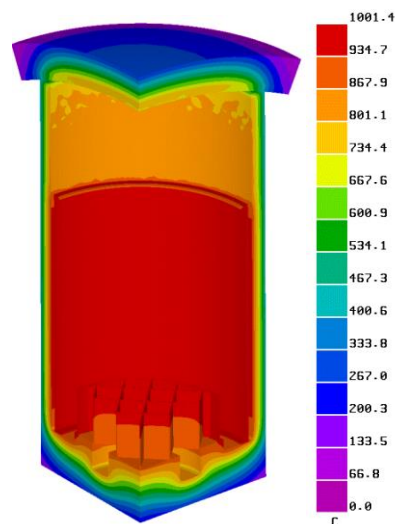


Рисунок 1.17 – Распределение температур в печи перед загрузкой детали.

При этом в работе указано множество допущений, которые существенно упрощают расчет, при этом не влияют на адекватность модели, которая



проверялась в дальнейшем экспериментальным путем. Так на пример для расчёта использовалась только четверть трехмерной модели печи и детали, так как они представляют собой тело вращения. Также в работе экспериментально были подобраны параметров теплообмена, так как процесс проводился с принудительной подачей аргона в объем печи следовало учитывать теплообмен излучением, теплопередачу через поверхности контакта конструктивных элементов и непосредственно конвективный теплообмен аргоном.

В результате серий расчётов и сопоставления их с экспериментальными данными полученными реальными нагревами детали в печи и регистрацией температур в разных зонах термопарой была получена адекватная компьютерная модель, позволяющая с требуемой для пайки точностью рассчитать градиент температур в момент выхода на температуру солидуса припоя (рисунок 1.18).

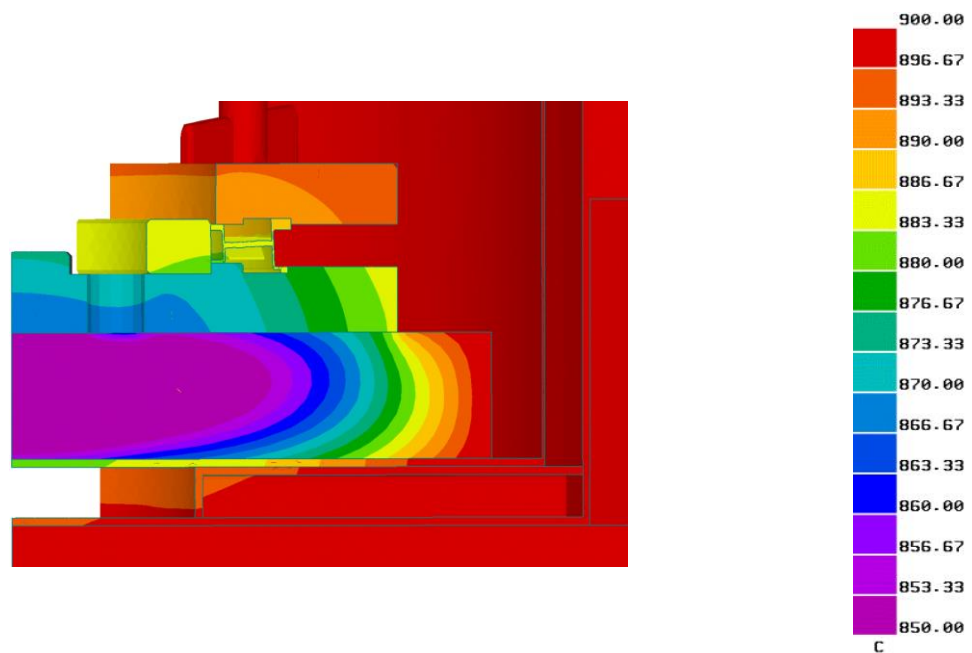


Рисунок 1.18 – Распределение температуры в детали

## ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1

Сотовое уплотнение является узлом газотурбинных установок, который широко применяется как в газотурбинных двигателях авиационного назначения, так и в наземных установках для повышения их эффективности. Конструктивно сотовое уплотнение представляет собой тонкостенный сотовый блок с шестиугольной равносторонней ячейкой и массивный корпус выпаленный в виде кольца или сектора. Температура эксплуатации сотовых уплотнений может достигать до 900 °С, что вызывает необходимость использования жаропрочных никелевых сталей и припоев на никелевой основе для их производства. В современной промышленности для производства сотовых уплотнений получили следующие материалы: ХН78Т – сотовый блок; ХН62ВМЮТ – корпус сотового уплотнения; ВПр11-40Н – припой. В виду конструктивных особенностей сотовых уплотнения существует ряд проблем, связанных с пайкой:

- сложность укладки и закрепления порошкового припоя;
- большое количество вертикальных капиллярных зазоров сотового блока;
- сложность равномерного нагрева разнотолщинной конструкции сотового уплотнения.

Самым технологичным способом дозировки, нанесения и закрепления порошкового припоя на сотовые уплотнения — это использование пластифицированных порошковых припоев в виде лент. Для этого требуется разработать технологию их получения, определить влияние свойств порошковых материалов на однородность и плотность ленты, а также выбрать связующее вещество для скрепления порошка и формирования ленты.

В результате заполнения множества капиллярных зазоров, образованных ячеистой структурой сотового блока возможно значительное изменение химического состава припоя в процессе пайки повышая его температурный интервал плавления, особенно при использовании порошковых припоев, так как динамика их плавления значительно ниже нежели у компактных припоев.

Для моделирования распределения температур при нагреве широко используются САЕ – системы моделирования. Основным методом решения математических задач по термодинамики является метод конечных элементов. Методы компьютерного моделирования позволяют строить адекватные модели распределения температур в сложных деталях при нагреве до температуры пайки, вне зависимости от способа и среды нагрева. Для определения распределения температур при нагреве сотового уплотнения требуется построить компьютерную модель с проверкой ее адекватности экспериментально.

## **2. РАЗРАБОТКА ПОРОШКОВОГО ПРИПОЯ В ВИДЕ ПЛАСТИФИЦИРОВАННОЙ ЛЕНТЫ НА ОРГАНИЧЕСКОМ СВЯЗУЮЩЕМ**

Во второй главе описана технология получения порошковых припоев в виде пластифицированных лент на органическом связующем. Представлена методика получения лент, описаны материалы, используемые для их изготовления.

Разработана методика определения плотности упаковки порошка припоя в ленте и определения равномерности распределения порошка.

Представлены данные, как форма и размер частиц порошкового припоя влияют на свойства ленты. Определен оптимальный состав связующего вещества и свойства порошка для получения максимально плотной и однородной ленты припоя.

### **2.1 Технология получения порошкового припоя в виде пластифицированной ленты**

В ходе работы была разработана технология получения припоя в виде ленты на органическом связующем. На рисунке 2.1. представлена схема получения ленты. Сначала приготавливали связующее вещество, которое представляло собой 8 - ми %-й (по массе) раствор высокомолекулярного каучука в нефтяном сольвенте. Высокомолекулярный каучук помещали в пластиковую тару, заливали нефтяным сольвентом, тару помещали в лабораторный смеситель С2.0 «Турбула» и замешивали в течении 12-ти часов, до полного визуального растворения высокомолекулярного каучука. Далее в связующее вещество добавляли порошок припоя, получая однородный шликер. Концентрация 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 2.2).

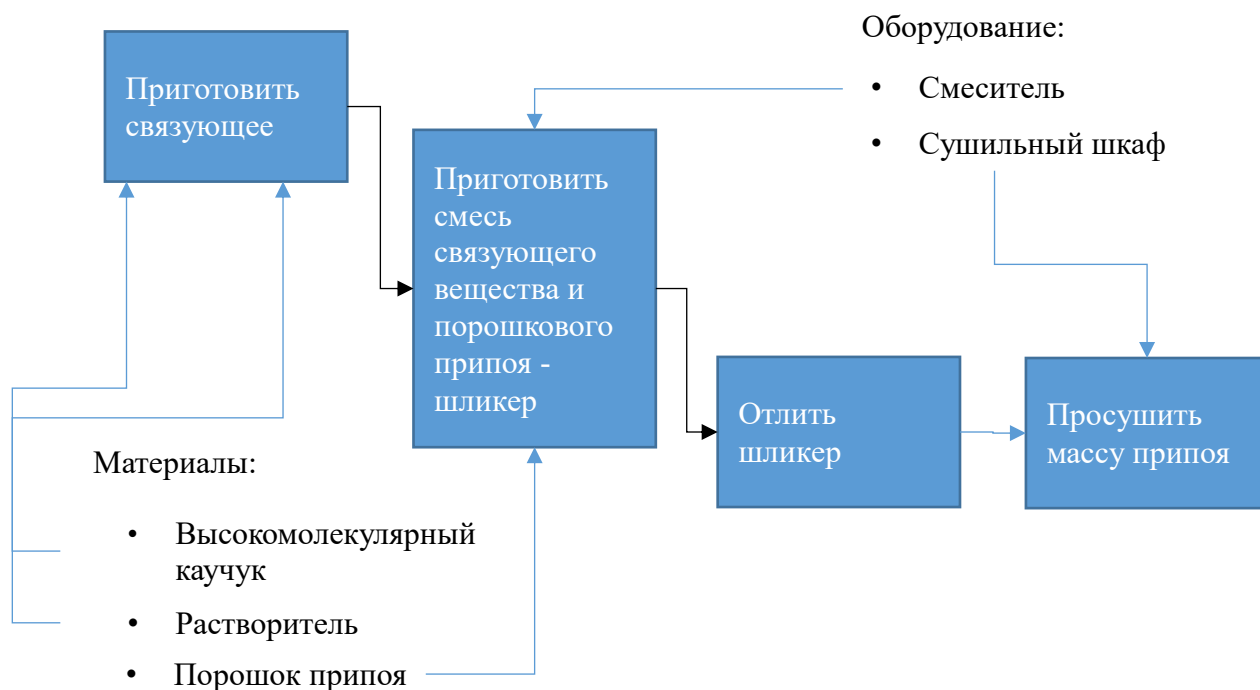


Рисунок 2.1 – Технологическая схема изготовления порошкового припоя в виде ленты.

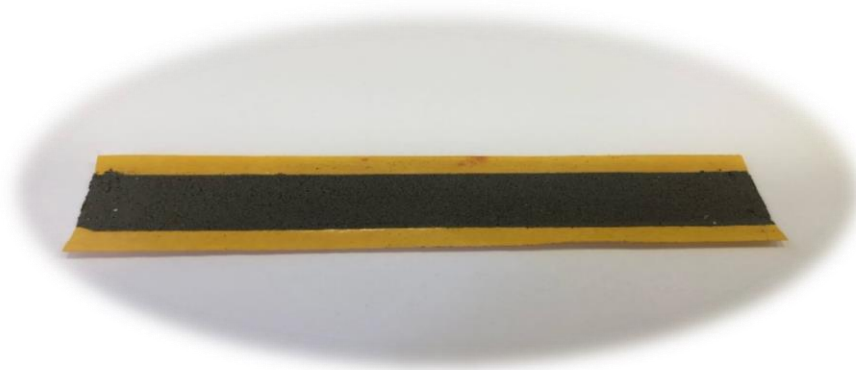


Рисунок 2.2 – Фрагмент порошкового припоя в виде ленты на органическом связующем.

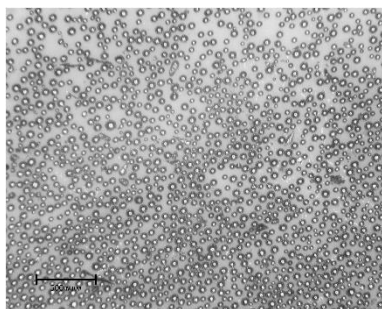
## 2.2 Материалы используемые для исследования влияния технологических свойств порошков на плотность и однородность ленты припоя

В ходе работы были проведены исследования влияния технологических свойств модельных порошковых сплавов на свойства ленты. Основным критерием выбора модельных порошков была форма и размер частиц. Среди порошковых припоев чаще всего используются сплавы следующих форм: распыленные сферические порошки с размером частиц 40-200 мкм, порошки представляющие механическую смесь из сферических и округлых частиц той же фракции и чешуйчатые порошки, полученные путем механического измельчения.

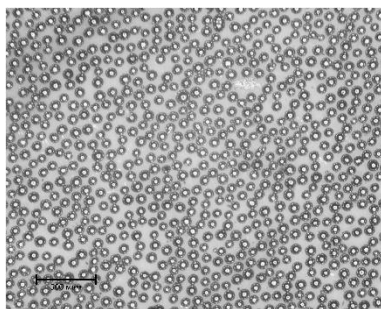
В качестве модели сферического порошка использовали медно-фосфорный припой П14 ( $92\text{Cu}6\text{P}4\text{Sn}$ ) широким разбросом фракции 0-160 мкм (рисунок 2.3, а), с малым разбросом 70-100 (рисунок 2.3, б), а также мелкодисперсную фракцию 0-70 (рисунок 2.3, в). Для моделирования припоя с различной формой частиц использовали композиционный припой ВПр11-40Н, который представляет собой механическую смесь сферического порошка ВПр11 и округлых частиц 40Н (рисунок 2.3, г). Для исследования порошка с пластинчатой (чешуйчатой) формой использовали медно-никелевый припой МНМц 9-23,5 ( $67\text{Cu}9\text{Ni}24\text{Mn}$ ) внешний вид которого представлен на рисунке 2.3, д. Физические свойства используемых в исследовании порошков представлены в таблице 2.1.

Основой связующего вещества для получения порошковой ленты служил высокомолекулярный каучук, растворенный в нефтяном сольвенте. Высокомолекулярный каучук представляет собой бесцветный аморфный полимер, кристаллизующийся при большом растяжении; среднемассовая мол. м. (70–225) ·103. Растворим в ароматических, алифатических и хлористых углеводородах, минеральных маслах, набухает в диэтиловом эфире, сложных эфирах, жирах и растительных маслах, не растворим в воде. Плотность 0,920 г/см<sup>3</sup> (25 °С); полиизобутилен 1,5070 1,5080; т. стекл. ок. –70 °С; теплостойкость по Мартенсу

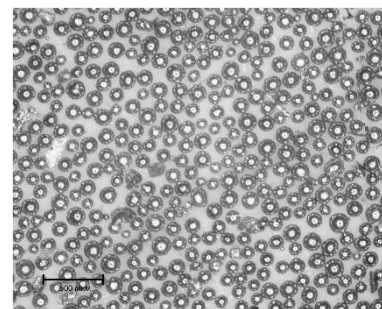
65–80 °С;  $C_v$  1,88·103 Дж/(кг·К), коэффициент теплопроводности 0,116–0,139 Вт/(м·К); полиизобутилен. Обладает очень низкой паро- и газопроницаемостью; через пленку толщиной 1 мм проницаемость водяного пара 0,0006 г/(м<sup>2</sup> · ч), водопоглощение за 24 ч не более 0,1%. Эластичные свойства сохраняются до –50 °С; при дальнейшем понижении температуры он медленно теряет эластичность, становится хрупким.[74]



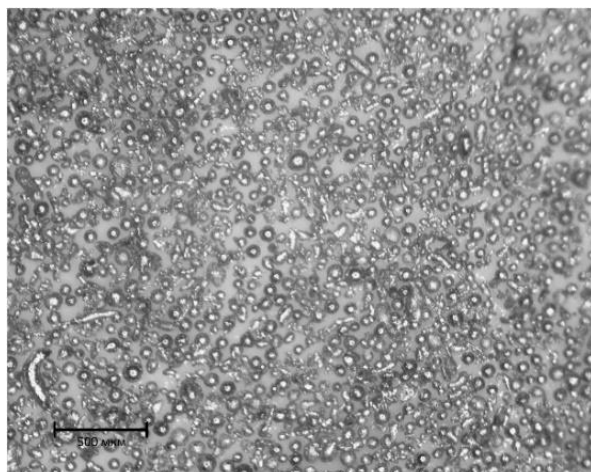
а) П14 0-70 мкм



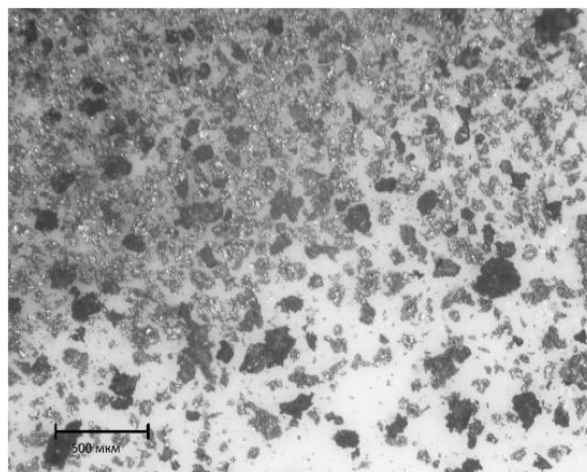
б) П14 70-100 мкм



в) П14 0-160 мкм



г) ВПр11-40Н 40-160 мкм



д) МНМц 9-23,5

Рисунок 2.3 – Внешний вид исследуемых порошковых припоев.

Таблица 2.1 – Физические свойства исследуемых порошковых припоев

Наименование материала	Размер частиц порошка, мкм	Форма частиц	Насыпная плотность, г/см <sup>3</sup>		Пикнометрическая плотность г/см <sup>3</sup>
			Свободная	Уплотненная	
П14	0-160	Сферическая	4,59	4,79	7,85
П14	70-100		4,61	5,01	
П14	0-70		4,68	5,05	
ВПр11-40Н	40-160	Сферическая (ВПр11) + Округлая (40Н)	4,22	4,57	7,9
МНМц 9-23,5	-	Чешуйчатая (пластинчатая)	1,87	2,64	7,66

### 2.3. Определение технологических свойств порошковых сплавов

Для описания технологических свойств порошковых припоев были использованы стандартные методики.

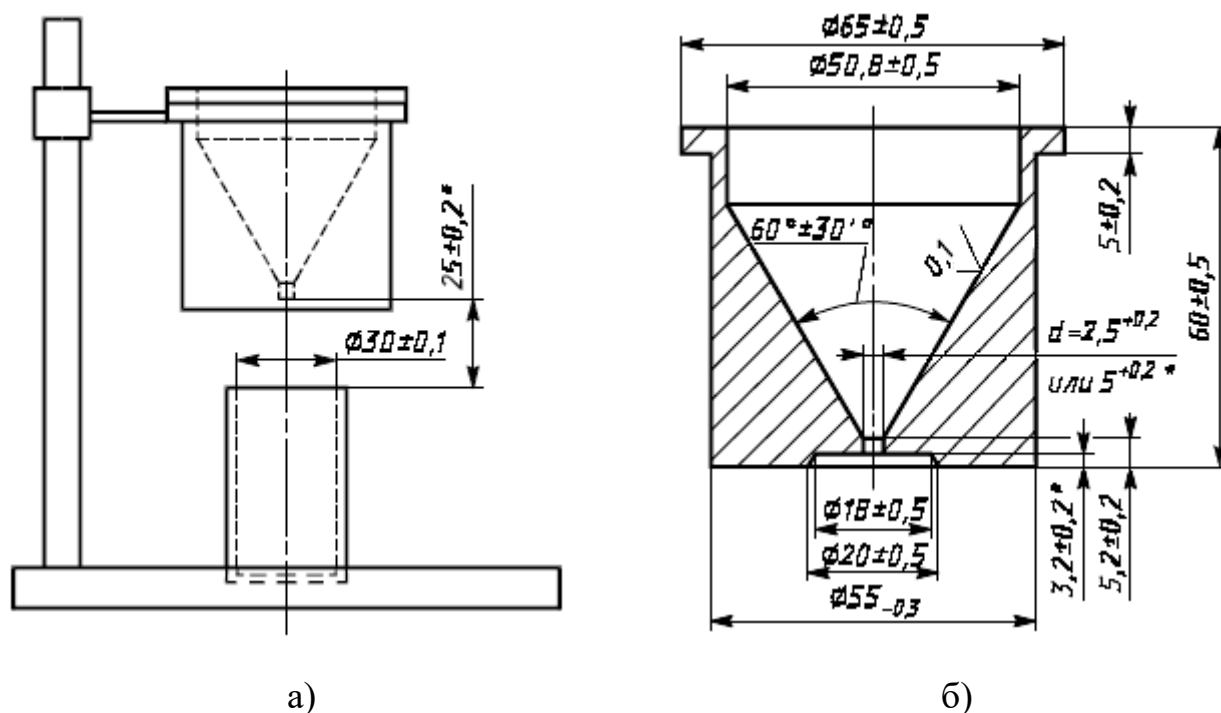
Рассев порошков осуществляли ситовым методом по ГОСТ 18318-94. На лабораторный вибрационный стол устанавливали комплект сит для просеивания порошков с размером ячеек: 0,2;0,16;0,1;0,07;0,04 мм. Навеску порошка припоя массой 100гр предварительно просушенную высыпали в верхнее сито (0,2 мм) и производили рассев по следующему режиму: скорость вращения вибратора 300 обо/мин, частота встряхиваний 170 в мин. Рассеянные порошки с требуемым размером частиц использовали в исследовании.

Форму частиц определяли визуально с использованием оптического бинокулярного микроскопа МБС-10 (см. рисунок 2.3).

Насыпную плотность в свободной и уплотненном состоянии измеряли по ГОСТ 19440-9, на приборе для определения насыпной плотности (рисунок 2.4, а) Для определения насыпной плотности брали пробу предварительно просушенного порошка каждого типа объемом 200 см<sup>3</sup>. Воронку с параметрами, представленными на рисунке 2.4, б, с закрытым выходным отверстием заполняли исследуемым



порошком. Далее открывали воронку и заполняли емкость порошком до начала пересыпания через край емкости.



а) общий вид; б) параметры воронки.  
а – общий вид; б – параметры воронки.

Рисунок 2.4 – Устройство для измерения насыпной плотности порошков.

Далее одноразовым движением с помощью линейки выравнивали поверхность порошка в емкости. Далее определяли массу порошка на лабораторных весах с точностью до 0,05г. Насыпную плотность рассчитывали по (2.1). Насыпную плотность считали, как среднее арифметическое значение трех испытаний.

$$\rho_{ac} = \frac{m}{V} \quad (2.1)$$

где  $m$  – масса испытуемого порошка в емкости, г;

$V$  – объем емкости,  $\text{см}^3$ .

Для определения пикнометрической плотности порошков сосуд с известной массой объемом 50мл заполняли исследуемым порошком до отметки в 2/3 объема. Фиксировали массу порошка в пикнометре. Далее колбу заполняли изопропиловым спиртом до отметки 50мл. После пикнометр встряхивали до полного визуального

смачивания порошка спиртом и доливали последний до отметки 50мл. В конце производили взвешивание пикнометра с порошком и спиртом. Расчет пикнометрической плотности производили по (2,2) [75]:

$$\gamma_{\text{пикн}} = \frac{M_2 - M}{V_{\text{пикн}} - V_{\text{ж}}} \quad (2,2)$$

где  $\gamma_{\text{пикн}}$  – пикнометрическая плотность порошка;  
 $M_2$  – масса пикнометра с порошком;  
 $M$  – масса пикнометра;  
 $V_{\text{ж}}$  – объем спирта.

#### **2.4 Определение свойств порошковых лент на органическом связующем**

К порошковым припоям в виде лент на органическом связующем предъявляют следующие основные требования:

- высокая равномерность порошка припоя в объеме ленты для обеспечения равномерной дозировки по площади
- высокая плотность порошка в ленте, которая должна стремиться к свободной насыпной для оптимального плавления припоя.
- высокие пластические свойства ленты, для возможности ее нанесения на ячеистую структуру сотовых блоков, а также для обеспечения плотного контакта с деталями сложной геометрии.

На рисунке 2.5 схематично изображено заполнение ленты порошком припоя. Плотная равномерная укладка порошком припоя показана на рисунке 2.5 а. В этом случае обеспечивается точная дозировка припоя по всей площади сотового блока, при этом за счет высокой плотности обеспечивается максимальная динамика плавления металла при нагреве до температуры пайки, а также достигается высокая повторяемость дозировки припоя на изделие. Не однородная лента припоя схематично изображена на рисунке 2.5 б. В этом случае возможны паяного

соединения сотового блока к корпусу уплотнения, при локальной нехватки припоя, либо локального растворения тонкостенного сотового блока в случае избытка припоя. Существенное снижение плотности ленты, как показано на рисунке 2.5 в, также негативно влияет на пайку такими припоями, так как из-за плохого теплового контакта между частицами порошка динамика плавления существенно снижается и при пайке сотовых конструкций происходит быстрое обеднение расплава припоя легкоплавкой фазы, что повышает температуру плавления и также может приводить к дефектам паяного соединения.

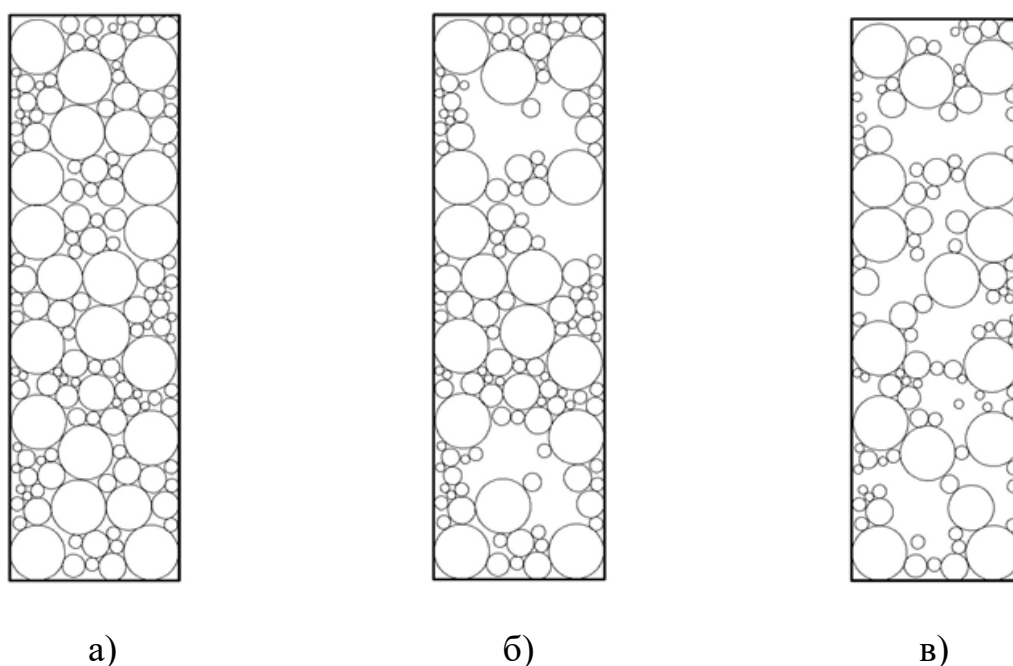


Рисунок 2.5 – Схематичное изображение заполнения ленты порошком припоя

Для определения плотности лены рассчитывали количество порошка припоя на единицу объема. Так как точную плотность частично растворенного каучукового эластомера в ленте рассчитать затруднительно использовали следующую методику:

Получали ленты припоя из различных порошковых припоев с одинаковыми геометрическими параметрами длиной  $L=400$  мм; шириной  $W=20$  мм и толщиной  $h=0,8$  мм. Ленты взвешивали на весах с точностью до 0,01гр. Далее ленты

помещали в муфельную печь, прогретую до температуры 400 °С на время равное 20-ти минутам для полного удаления связующего вещества. После удаления связующего вещества порошок припоя остужали до комнатной температуры на воздухе и проводили повторное взвешивание. Далее по (2.4) рассчитывали плотность порошковой ленты припоя.

$$\rho_l = \frac{M_{\text{п}}}{L \times W \times h} \quad (2.4)$$

где  $\rho_l$  – плотность ленты;  
 $M_{\text{п}}$  – масса порошка припоя;  
 $L$  – длина ленты;  
 $W$  – ширина ленты;  
 $h$  – толщина ленты.

Однородность распределения порошка определяли взвешиванием отдельных одинаковых по объему фрагментов ленты припоя. Для этого изготавливали ленту максимально возможной длины. Далее из нее 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 одной ленты.

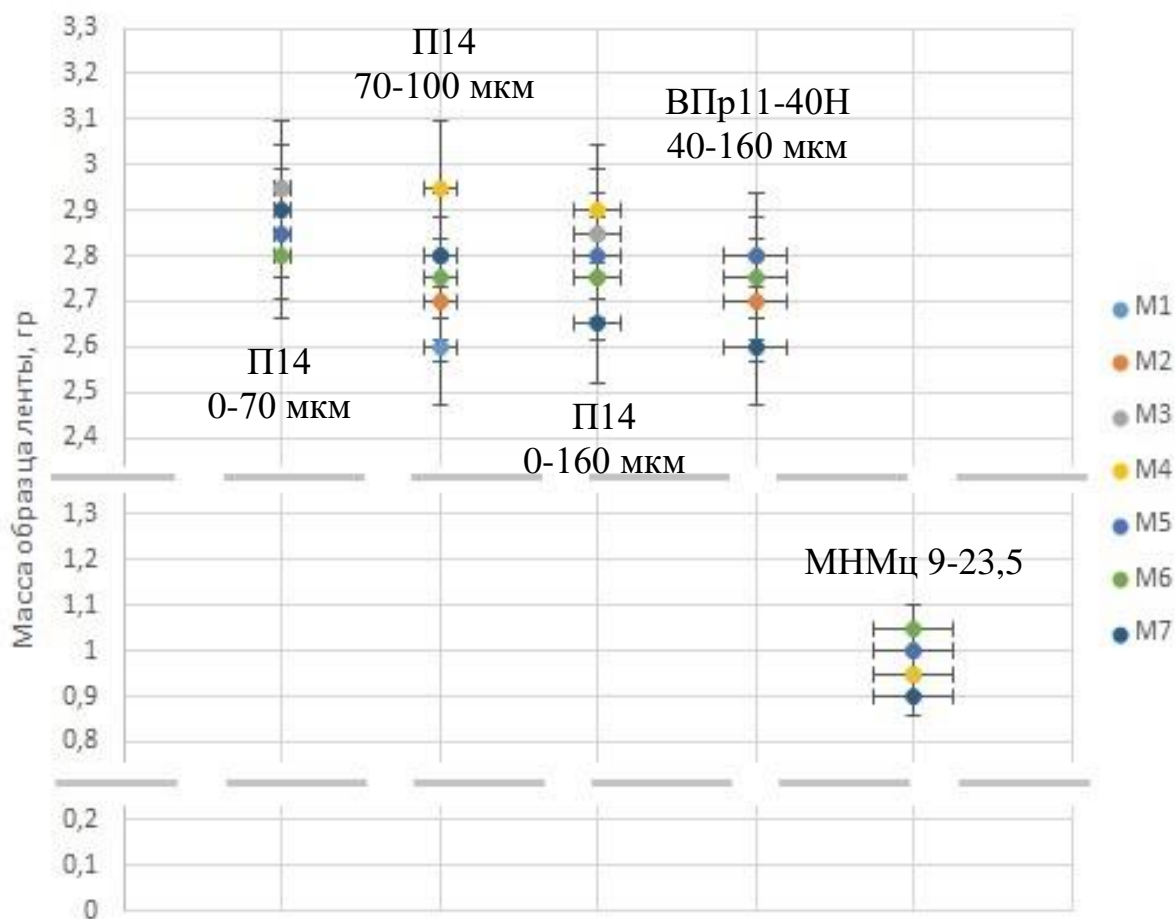
Также в работе исследовалось влияние состава связующего вещества, а именно концентрация высокомолекулярного каучука в нефтяном сольвенте на технологические свойства шликера. Для получения стабильной ленты требовалось, чтобы в процессе ее замешивания и разливки не происходило сегрегации порошка в объеме. Это достигается путем поддержания определенной вязкости связующего вещества при которой порошок припоя не оседает, при этом вязкость связующего вещества должна обеспечивать свободное течение шликера для разливки ленты в ложемент. Для определения требуемой вязкости связующего вещества изготавливали различные растворы высокомолекулярного каучука, часть раствора замешивали с порошком часть оставляли в виде пробы для замера вязкости с помощью ротационного вискозиметра. Шликер помещали в стеклянную колбу для

фиксации сегрегации порошка. Удовлетворительным результатом считалось отсутствие сегрегации порошка в шликере в течении 60-ти минут.

Также исследовалось влияние состава связующего вещества на способность повышения плотности ленты за счет утяжки связки, которая происходит в следствии испарения растворителя при сушке ленты. Для этого изготавливали шликер концентрацией порошка припоя 50 % - масс, наносили шликер на предметное стекло таким образом, чтобы толщина шликера была соизмерима с диаметром частиц порошка. Далее осуществляли сушку шликера с видео фиксацией через лабораторный микроскоп МБС-10.

## **2.5 Влияние формы и размера частиц порошка на свойства ленты припоя**

На рисунке 2.6. представлена диаграмма отображающая разброс масс образцов ленты припоя, по которому оценивалась однородность распределения порошкового припоя в объеме ленты в зависимости от формы и размера частиц. Для определения однородности были проанализированы массы семи одинаковых по объему образцов ленты, изготовленные из каждого исследуемого порошка. Разница между максимальной и минимальной массой образцов выражены в процентах. 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%.



M1, M2,...,M7 масса образца

Рисунок 2.6 – Диаграмма распределения частиц порошка припоя в ленте.

Таким образом, можно сделать вывод, что для изготовления припоя в виде порошковой ленты на органическом связующем с точной однородной концентрацией припоя в объеме, рекомендуется использовать мелкодисперсный сферический порошок. Однако в случае если точность дозирования может колебаться в пределах 10 – 15 % допускается использование порошков различной формы и размера частиц. Определение точного интервала количества порошкового припоя зависит от конструкции изделия

Для анализа влияния формы и размера частиц были изготовлены образцы ленты известного объема и рассчитаны их плотности по методике, описанной ранее. На рисунке 2.7 представлена диаграмма, отображающая плотности полученных лент из исследуемых порошков в сравнении с их свободной насыпной плотностью. На диаграмме видно, что размер сферических частиц порошка припоя не оказывает значительного влияния на плотность ленты. Плотность порошковой ленты, изготовленной из сферического припоя П14 различного фракционного состава, а также из композиционного припоя ВПр11-40Н во всех случаях составляла около 70 % 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.

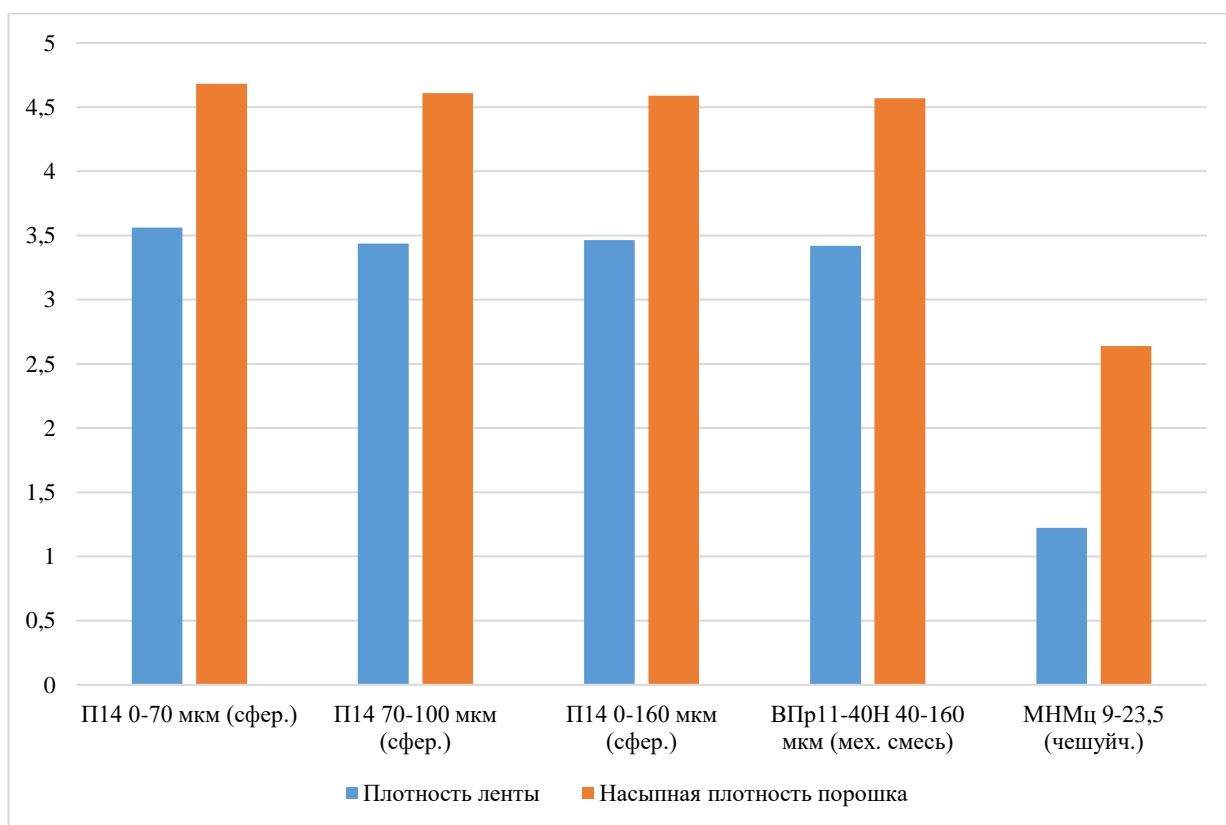
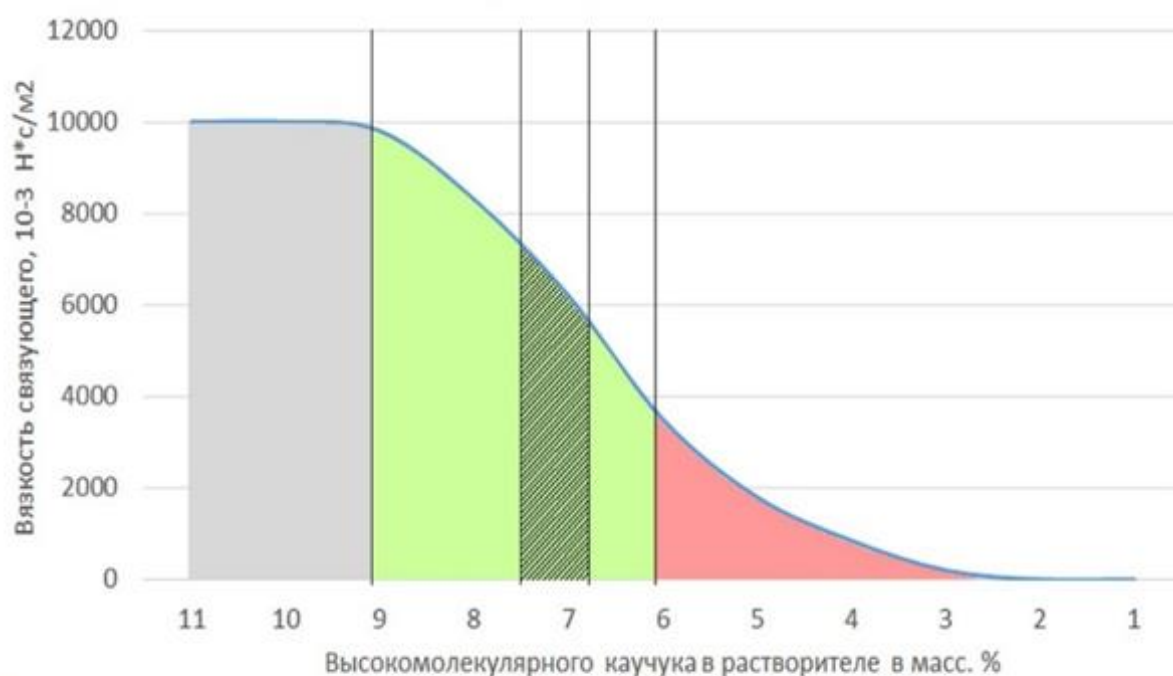


Рисунок 2.7 – Сравнение насыпной плотности (уплотненной) различных порошков с плотностью лент припоя.

## 2.6 Влияние состава связующего вещества на свойства ленты

На рисунке 2.8 представлена диаграмма на которой изображена зависимость вязкости связующего вещества от концентрации высокомолекулярного каучука в нефтяном сольвенте. 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>. При снижении концентрации каучука и соответственно снижении вязкости







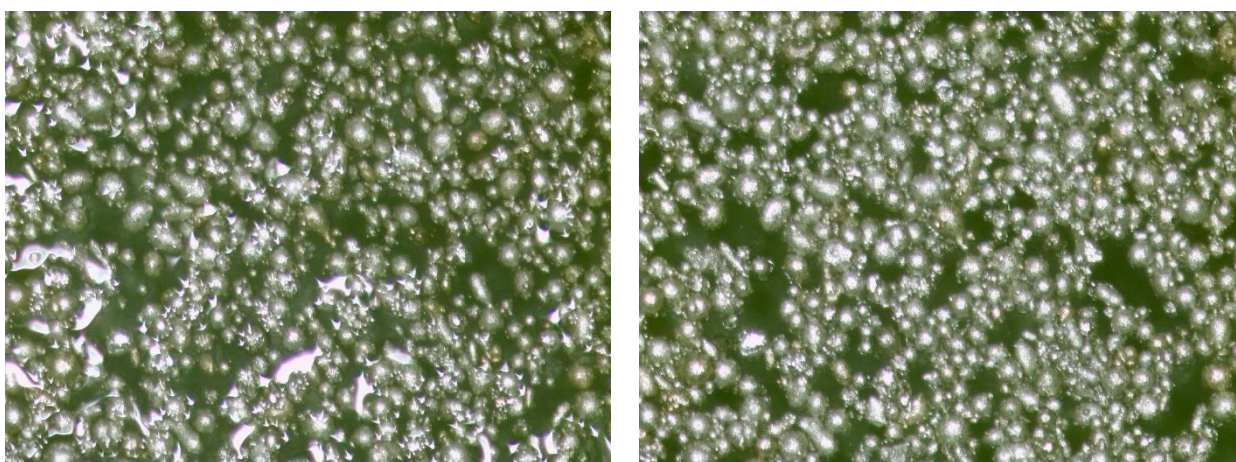
-  Концентрация при которой наблюдалась утяжка порошка
-  Допустимы диапазон концентрации
-  Концентрация сегрегации порошка в шликере
-  Предел растворимости высокомолекулярного каучука в нефтяном сольвенте

Рисунок 2.8 Диаграмма изменения вязкости связующего вещества в зависимости от концентрации высокомолекулярного каучука



В диапазоне концентраций каучука 6,8-7,5 % по массе наблюдался эффект утяжки частиц порошкового припоя, который возникал в виду испарения растворителя из связующего вещества (рисунок 2.9). Вероятно, при увеличении концентрации высокомолекулярного каучука высокая вязкость связующего вещества не позволяет сблизиться частицам припоя в момент испарения растворителя. В то же время при низкой концентрации каучука связующее вещество не может сдвинуть частицы припоя ввиду слишком низкой вязкости.



а)

б)

а – до испарения растворителя; б – после испарения растворителя

Рисунок 2.9 – Снимки шликера. Концентрация высокомолекулярного каучука в связующем веществе 7,2 % оп массе.

## ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

В результате исследования было определено, что форма и размер частиц оказывают влияние как на плотность укладки, так и на однородность порошкового припоя в объеме пластифицированной ленты.

Наибольшей однородности удастся добиться при использовании сферических порошков мелкой фракции, с размером частиц в диапазоне 0-70 мкм. При повышении насыпной плотности порошков наблюдается снижение

однородности ленты. При использовании чешуйчатого порошка МНМц 9-23,5 с минимальной насыпной плотностью однородность и плотность ленты была наименьшей.

На плотность укладки припоя в ленте не оказывает существенного влияния размер сферических части, а как следствие и изменение насыпной плотности в небольших пределах. Это может говорить о том, что свободный объем между крупными частицами порошка не существен применительно к припоям в виде ленты и заполняется связующим веществом.

Оптимальный диапазон концентрации высокомолекулярного каучука в растворителе для связующего вещества составляет 6,8-7,5 % по массе. В данном диапазоне не происходит сегрегации шликера в течении 60-ти минут, а вязкость связующего вещества позволяет дополнительно стягивать частицы припоя в результате испарения растворителя и изменения объема связки.

### 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАПОЛНЕНИЯ КАПИЛЛЯРНОГО ЗАЗОРА ПОРОШКОВЫМ ПРИПОЕМ

Конструкция сотового уплотнения подразумевает множество вертикальных капиллярных переменных зазоров, которые во время пайки заполняются расплавом припоя. При этом одним из распространенных дефектов являются наплывы припоя в виде козырьков. На рисунке 3.1 представлена макроструктура паяного соединения сотового блока с корпусом с наплывом припоя. По своей сути подобный наплыв припоя не является дефектом паяного соединения, так как паяный шов непосредственно между сотовым блоком и корпусом присутствуют, а гофрированные фольги пропаяны между собой. Однако из-за подобных наплывов могут возникать трудности с визуальным контролем паяного соединения, так как они ограничивают контролеру осмотр подложки. При наличии множественных наплывов в граничащих друг с другом ячейках подобный дефект может оказывать влияние на ультразвуковую дефектоскопию, так как зазор между наплывом и подложкой воспринимается дефектоскопом, как неприлегание сотового блока к корпусу и как следствие непропай. Также известны случаи, когда подобные наплывы достигают уровня технологического припуска сотового блока и после электроэрозионной обработки выходят на поверхность, что недопустимо так как может повредить роторную часть двигателя, контактирующую с сотовым уплотнением.

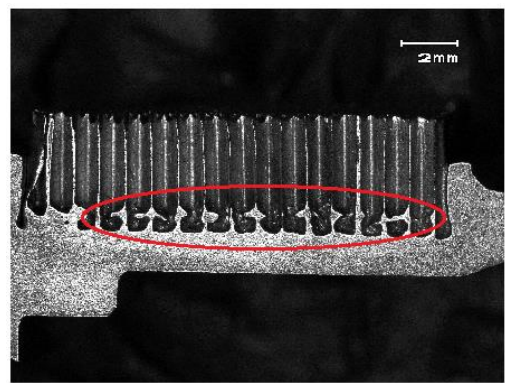


Рисунок 3.1 – Наплыв припоя в виде козырька в ячейке сотового уплотнения

Для определения причины наплывов припоя было проведено исследование заполнения вертикального переменного зазора в зависимости от количества припоя и температуры пайки. В исследовании использовали материалы, которые широко применяются для изготовления сотовых уплотнений во всех областях, сталь ХН78Т и порошковый композиционный припой ВПр11-40Н.

### 3.1 Материалы и методика исследования

Никелевый сплав ХН78Т относится к жаростойким гомогенным сплавам, имеющий аустенитную структуру  $\gamma$ -твердого раствора. Сплав обладает высокой окалинотойкостью за счет легирования хромом (см. таблицу 1.1). Сплав хорошо деформируется как в твердом, так и в холодном состоянии, что крайне важно при изготовлении гофрированных лент для сотовых блоков. Предел прочности при температуре  $T=800^{\circ}\text{C}$  лежит в диапазоне  $\sigma_b=180-220\text{МПа}$  [76].

Композиционный припой ВПр11-40Н (ПНХ9ЖСР) относится к жаропрочным коррозионностойким припоям на никелевой основе и является механической смесью порошка припоя марки ВПр11 (ПР-НХ15ЖСР) и металлического порошка марки 40Н (ПР-НСР). Химический состав припоя и наполнителя представлен в таблице 3.1. Припой является самофлюсующимся за счет легирования бором. Припой используется преимущественно при пайке узлов из жаропрочных сплавов. Соединения, паянные припоем ВПр11-40Н, способны работать при температуре до  $T_{\text{раб}} < 900^{\circ}\text{C}$ . Широкое применение припой получил при пайке узлов ГТД. Пайку данными припоями ведут в печах как в защитных средах, так и в вакууме. Температура начала плавления припоя  $T_s=960^{\circ}\text{C}$ , температура конца плавления  $T_L=1036^{\circ}\text{C}$ . Рекомендуемый температурный диапазон пайки для припоя ВПр11-40Н  $\Delta T_{\text{пайки}}=1080 - 1200^{\circ}\text{C}$  [77].

Таблица 3.1 Химический состав компонента композиционного припоя ВПр11-40Н

Марка компонентов припоя	Массовая доля, %							
	Ni	Al	Si	B	C	Cr	Fe	O
ВПр11 (ПР-НХ15ЖСР)	Осн.	0,1-1,0	4,0-5,0	2,0-3,0	0,4-0,7	14,0-16,0	3,0-5,0	<0,08
40Н (ПР-НСР)	Осн.	-	1,8-2,2	0,6-1,2	-	-	-	<0,08

В настоящем исследовании использовали порошок припоя ВПр11-40Н фракции 40-100 мкм производства АО «Полема», изготовленный методом распыления расплава газом. Припой соответствует ТУ 14-22-44-2011.

Для исследования заполнения зазора были собраны образцы с вертикальным клиновидным зазором. 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 аргоно-дуговой сваркой в 4-х точках. Непосредственно перед пайкой поверхности образцов зачищали с помощью наждачной влагостойкой бумаги на основе карбида кремния с зернистостью в 1000 единиц, обезжиривали растворителем марки Р-5 и обезвоживали спиртом.

Образец помещали в керамический тигель, предварительно заполненный порошком припоя ВПр11-40Н таким образом, чтобы образец стоял непосредственно на дне тигля (рисунок 3.2). Количество припоя рассчитывали исходя из объема паяного соединения, так для заполнения переменного зазора требовалось 5 гр припоя. 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. Пайку образцов при одной температуре вели в одной садке.

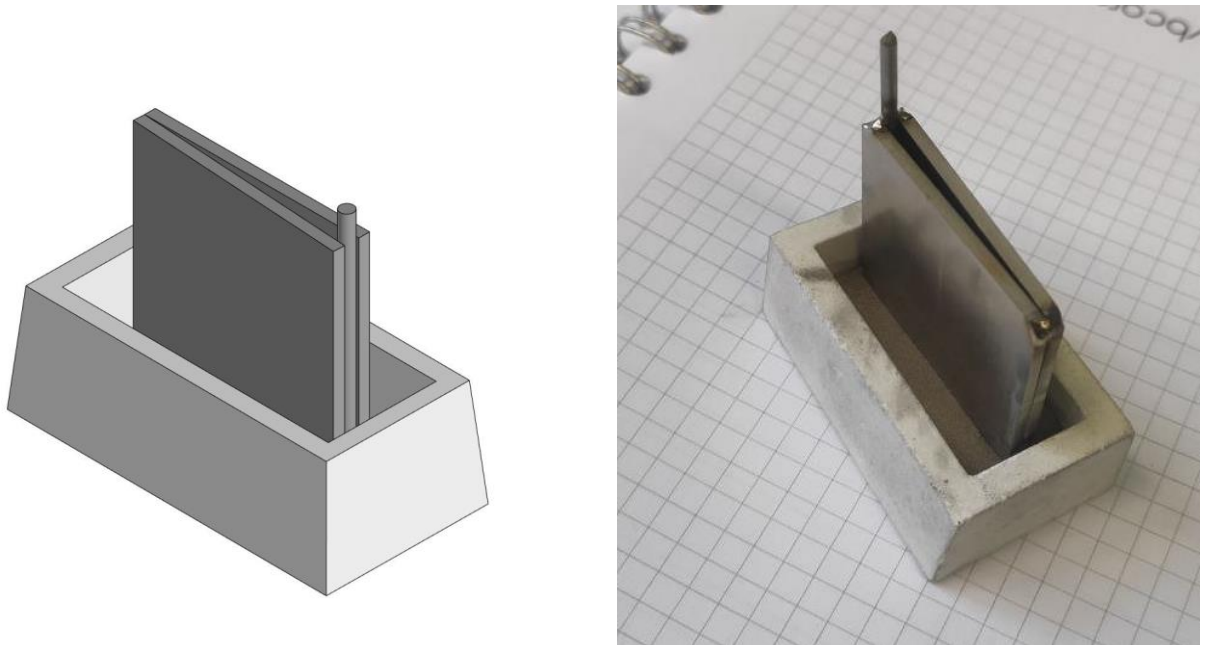


Рисунок 3.2 – Внешний вид образца для исследования заполнения вертикального клиновидного зазора.

После пайки образцы резали с помощью электроэрозионного станка с шагом 5 мм от уровня расплава припоя, схема резки образцов представлена на рисунке 3.3.

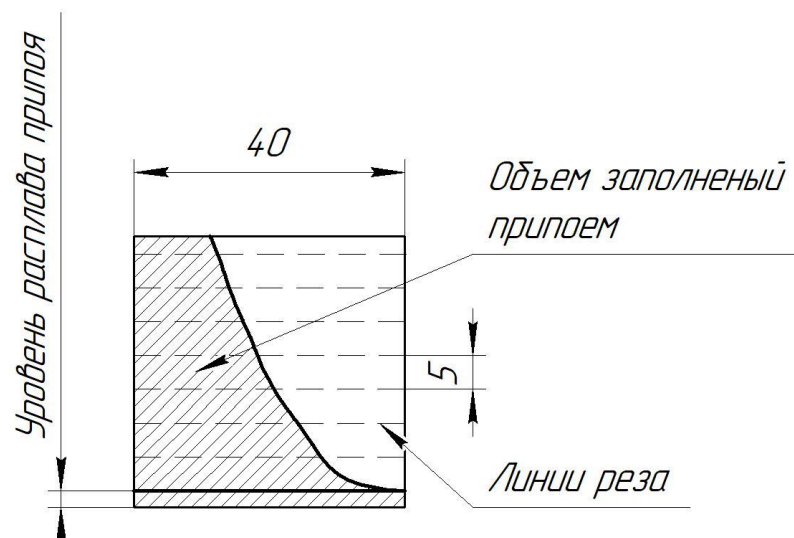


Рисунок 3.3 – Разметка резки образцов

Подготовка образцов для металлографического исследования осуществлялась по стандартной технологии изготовления шлифов. Для дальнейшей шлифовки разрезанные образцы заливали в темплеты двухкомпонентной проводящей смолой для холодной заливки на основе меди Technovit 5000. Залитые смолой образцы подвергались шлифовке и полировке. Работа проводилась на шлифовальном металлографическом станке Metapol 1250S. Скорость вращения диска 50-500 об/мин. Процесс осуществляли в следующем порядке: вначале шлифовка на бумаге с разной зернистостью (120, 320, 600, 1200), затем полировка на алмазных суспензиях 3/1 мкм на тонком гладком носителе из натурального или искусственного шелка и окончательное полирование на коллоидной кремниевой суспензии с зерном 0,05 мкм на эластичном носителе. Для выявления микроструктуры для исследования на оптическом микроскопе использовали травление раствором, содержащим 33 мл H<sub>2</sub>O – 33 мл HF – 33 мл HNO<sub>3</sub> (концентрированная) в течение 30 секунд.

Определение высоты подъема припоя и замер зазоров осуществляли с помощью оптического бинокулярного микроскопа МБС-10 оснащенным окуляром с линейкой. Анализ результатов замеров и построение кривых заполнения осуществляли с помощью программного обеспечения Microsoft Excel.

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. Внешний вид микроскопа представлен на рисунке 3.4.

Для предотвращения образования газообразных продуктов, затрудняющих получения высокого вакуума при откачке микроскопа и загрязнения его колонны образцы, тщательно промывались в ультразвуковой ванне с ацетоном. Промытые образцы помещали в вакуумную камеру микроскопа, откачивали камеру до требуемой степени вакуума и облучали сфокусированным направленным пучком

электронов высокой энергии, при различных напряжениях и токах электронного зонда. Анализ характерного рентгеновского спектра, полученного от исследуемого образца, проводили энергодисперсионным спектрометром Oxford Instruments Advanced AZtecEnergy (разрешение 133 эВ, чувствительность 0,2 масс. %), который сортирует рентгеновские фотоны по их энергии. Управление детекторами реализовывалось с помощью программного обеспечения Inca Energy 350+.



Рисунок 3.4 – Электронный сканирующий микроскоп TESCAN VEGA 3 SBH с системой рентгеновского энергодисперсионного микроанализа Oxford Instruments Advanced AZtecEnergy

### **3.2 Исследование заполнения переменного вертикального зазора**

На рисунке 3.5 представлены данные заполнения переменного зазора в зависимости от температуры пайки и массы припоя. На графике видно, что с увеличением количества припоя характер заполнения существенно меняется. При увеличении количества припоя в два раза и температуре пайки чуть выше температуры ликвидуса угол падения кривой заполнения припоя значительно снижается. Т.е. 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 примерно один миллиметр, нельзя говорить, что он заполнился только при помощи капиллярных сил. При этом подняв температуру пайки на 50 градусов 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.

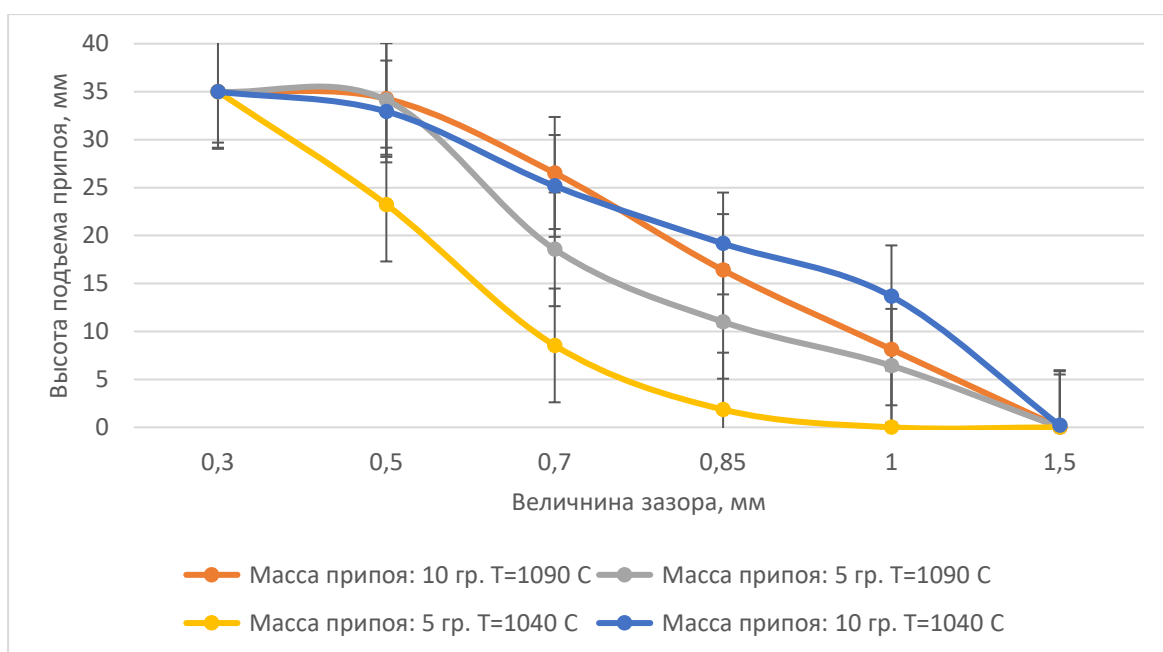
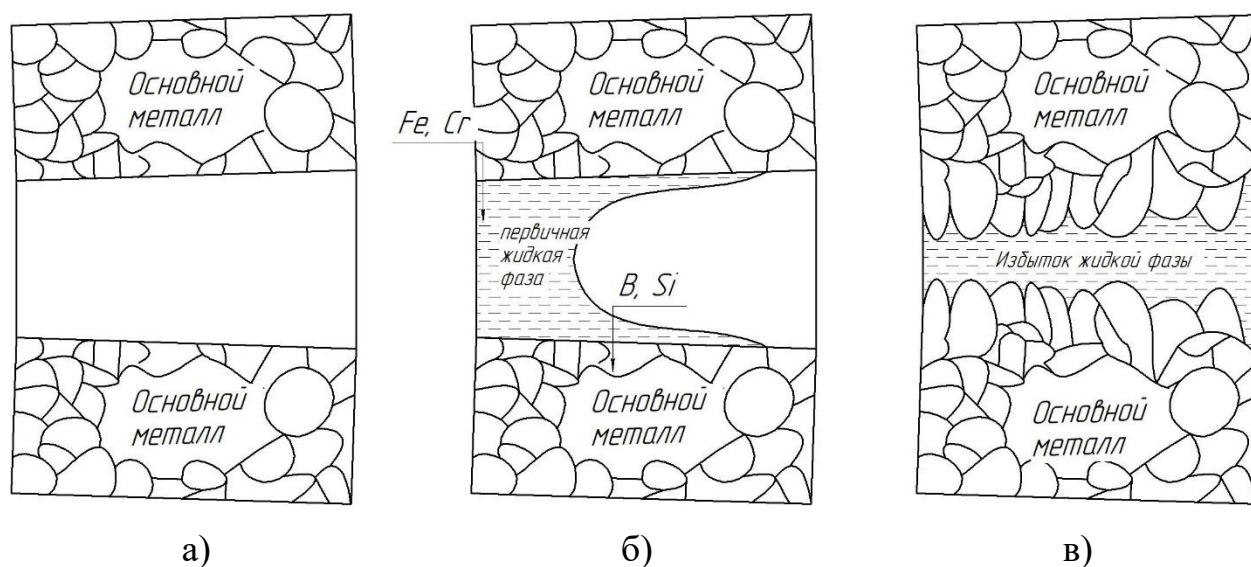


Рисунок 3.5 – Заполнение вертикального зазора в зависимости от величины зазора, количества припоя и температуры пайки.

В процессе заполнения переменного зазора 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 рисунке 3.6. 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 до эвтектической области. При выдержке на  $T_{\text{пайки}}$  компоненты стали растворяются в расплаве до того момента, пока состав жидкости не приблизится к равновесному во всем объеме составу  $C_{\text{ж}}$  в припое. 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.



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 3.6 – Механизм заполнения неравномерного зазора расплавом припоя

### 3.3 Металлографическое исследование структуры шва при переменном зазоре

После замеров заполнения расплавом припоя переменных вертикальной зазоров было проведено металлографическое исследование структуры паяных соединений образцов. Для исследования были выбраны сечения с самым большим

различием кривой заполнения образцы паяные при температуре 1040 °С разным количеством припоя.

По результатам металлографического исследования видно, что в процессе заполнения зазора легкоплавкая фаза взаимодействует с основным материалом снижая количество бора в припое, тем самым повышая его температуру плавления. При этом вероятно происходит изотермическая кристаллизация припоя в паяном соединении и выпадение первичных дендритов (рисунок 3,7 а), которые уменьшают величину зазора и повышают вязкость расплава.

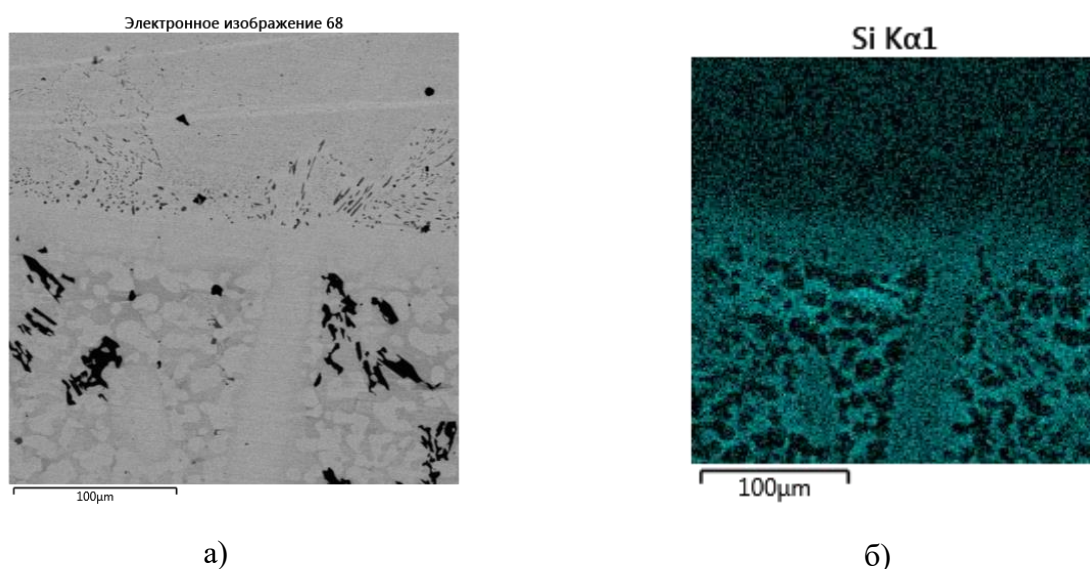


Рисунок 3.7 – Микроструктура паяного шва при пайке припоем ВПр11-40Н в количестве 10 гр.

В случае, когда количество жидкой фазы ограничено процесс заполнения зазора останавливается и кривая заполнения клиновидного зазора практически не отличается от классической и структура паяного соединения в этом случае более однородной по содержанию кремния (рисунок 3,8). Однако в случае избытка жидкой фазы питающий расплав снизу происходит дальнейшее заполнение паяльного зазора жидкой фазой обогащенной кремнием каркасу первичных дендритов, который служит своего рода капилляром и тем самым заполняя зазор все большим количеством припоя.

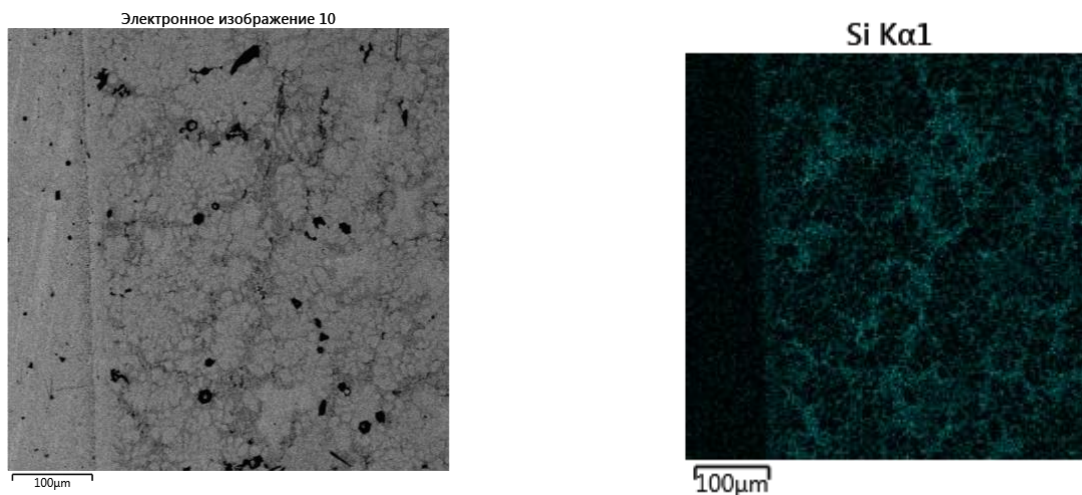


Рисунок 3.8 – Микроструктура паяного соединения при пайке припоем ВПр11-40Н в количестве 5 гр.

### ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3

При увеличении количества припоя ВПр11-40Н при пайке клиновидного зазора между пластинами ХН78Т обнаружено, что кривая заполнения клина существенно отличается от классической гиперболической.

Изменение кривой в первую очередь связано с активным взаимодействием первичной фазы расплава припоя, обогащенной бором, которая растворяет материал пластин тем самым повышая температуру плавления припоя. По мере повышения температуры припоя происходит изотермическая кристаллизация расплава и образование первичных дендритов, которые образуют капилляр для подъема расплава припоя из ванны при его избытке.

Описанный механизм формирования вертикального клиновидного зазора объясняет образование наплывов припоя в ячейках сотовых блоков, а также растворение тонкостенной конструкции сотового уплотнения, которое происходит сверху сот, а не в месте сопряжения с подложкой, где располагается закладной припой.

#### **4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПАЙКЕ СОТОВОГО УПЛОТНЕНИЯ**

Основной областью применения порошкового припоя в виде ленты на эластичном связующем является пайка сотовых уплотнений ГТД. В виду сочетания тонкостенной конструкции сотового блока и массивного корпуса сотового уплотнения большое влияние на процесс пайки имеют следующие параметры:

- температура пайки;
- скорость нагрева до температуры пайки;
- расположение детали в объеме печи относительно нагревателей.

Для определения влияния градиента температур на растекание припоя при пайке сотового уплотнения была разработана математическая модель нагрева сотового уплотнения при пайке в вакуумной печи. Для упрощения расчёта и возможности последующей проверки адекватности компьютерной модели, распределение температур моделировалось на макете сотового уплотнения, который обладал максимально приближенными теплофизическими свойствами, что и полноценное изделие.

Для проверки адекватности компьютерной модели была разработана методика визуализации процесса пайки макета сотового уплотнения в вакууме с возможностью видео фиксации процесса.

##### **4.1 Тепловые процессы при пайке сотового уплотнения**

Макеты сотового уплотнения собирали из фрагментов сотового блока и корпуса сотового уплотнения (рисунок 4.1) газотурбинного двигателя. Сотовый блок был изготовлен из гофрированной фольги толщиной 0,05мм, материал - сталь ХН78Т. Подложка из стали ХН62ВМЮТ толщиной 2 мм. Пайка припоем ВПр11-40Н. Для предотвращения заминания тонкостенных фольг сотового блока резку блоков осуществляли проволокой на электроэрозионной установке это позволило добиться лучшей визуализации процесса растекания по капиллярному зазору между фольгами сотового блока. Сборку образцов производили по следующей

технологии: подготовка материалов, нанесение припоя на сотовый блок, закрепление сотового блока в корпусе сотового уплотнения.

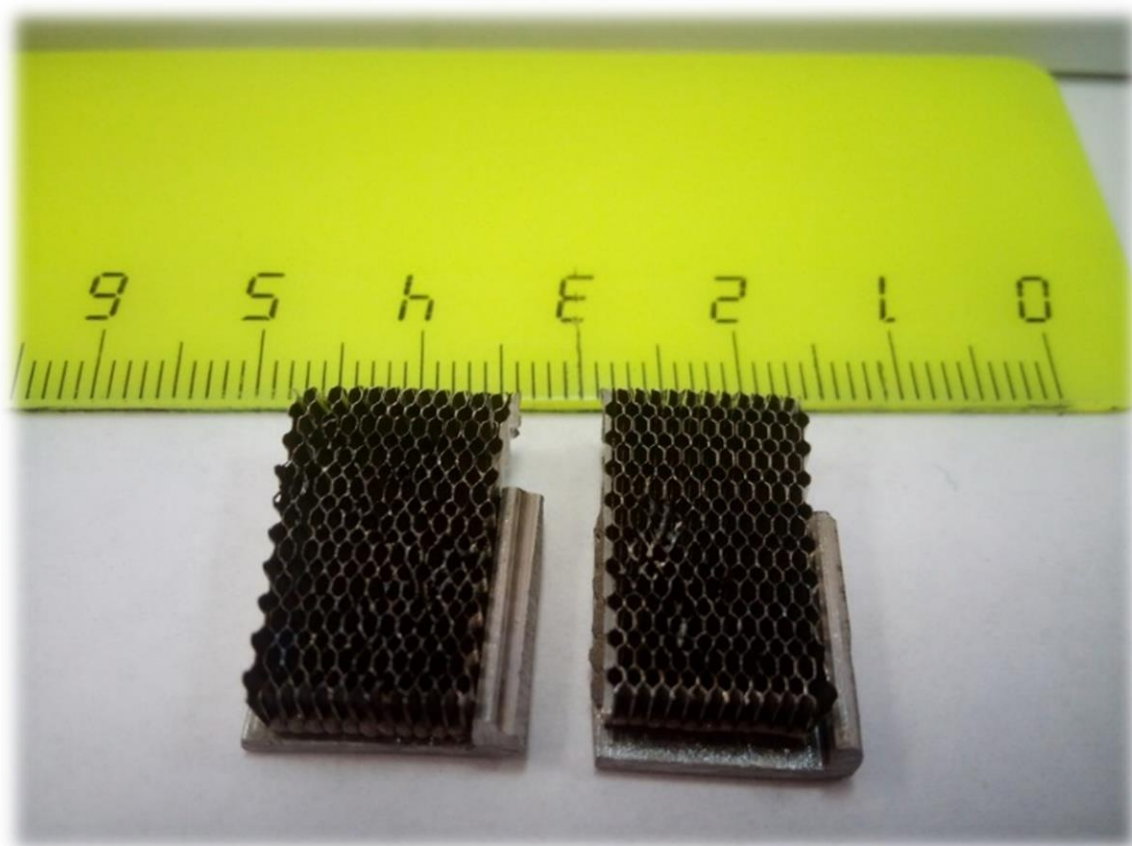
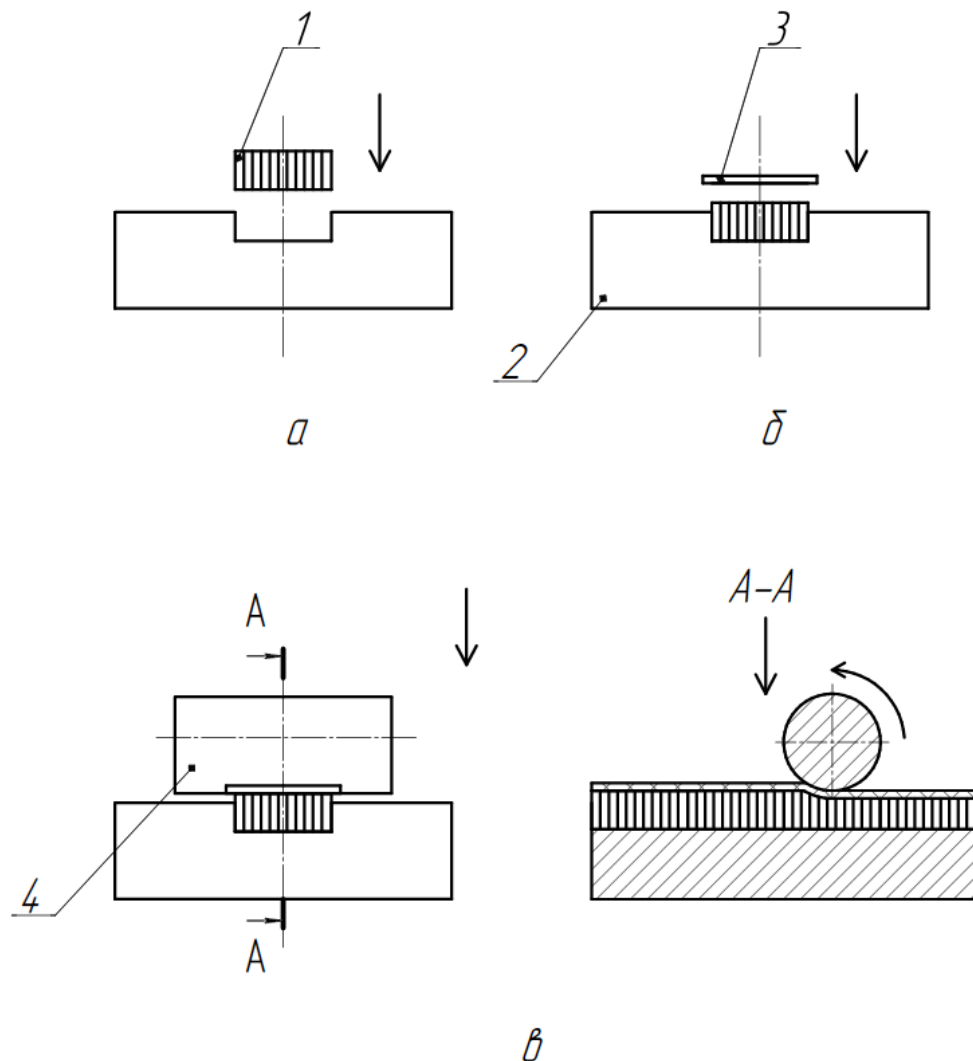


Рисунок 4.1 – Фото макетов сотового уплотнения

Сотовый блок и корпус сотового уплотнения обезжировали протиркой хлопчатобумажной салфеткой смоченной в бензине марки «Нефрас». Далее детали обезвоживали пятикратным окунанием в спирт. После обезвоживания на сотовый блок наносили порошковый припой ВПр11-40Н в виде ленты на эластичном связующем. Схема нанесения припоя указана на рисунке 4.2. Сотовый блок 1 предварительно устанавливали в приспособление 2 предотвращающее смятие тонкостенных сот. Затем на блок укладывали ленту припоя 3 и прокатывали массивным металлическим валиком 4 до полного вдавливания ленты припоя в ячейки сотового блока. После нанесения припоя сотовый блок с припоем монтировали во фрагмент корпуса сотового уплотнения, нанесенным припоем к

корпусу, и фиксировали точечной контактной сваркой через медную пластину аппаратом «БЛИЦ».



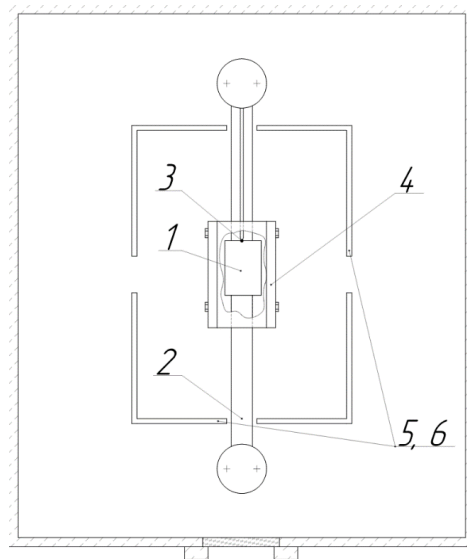
1 – сотовый блок; 2 – приспособление; 3 – припой; 4 – валик  
 а – установка блока в приспособление; б – укладка припоя; в – вдавливание припоя в ячейки сотового блока.

Рисунок 4.2 – Схема нанесения порошкового припоя в виде ленты на пластичном связующем на сотовый блок

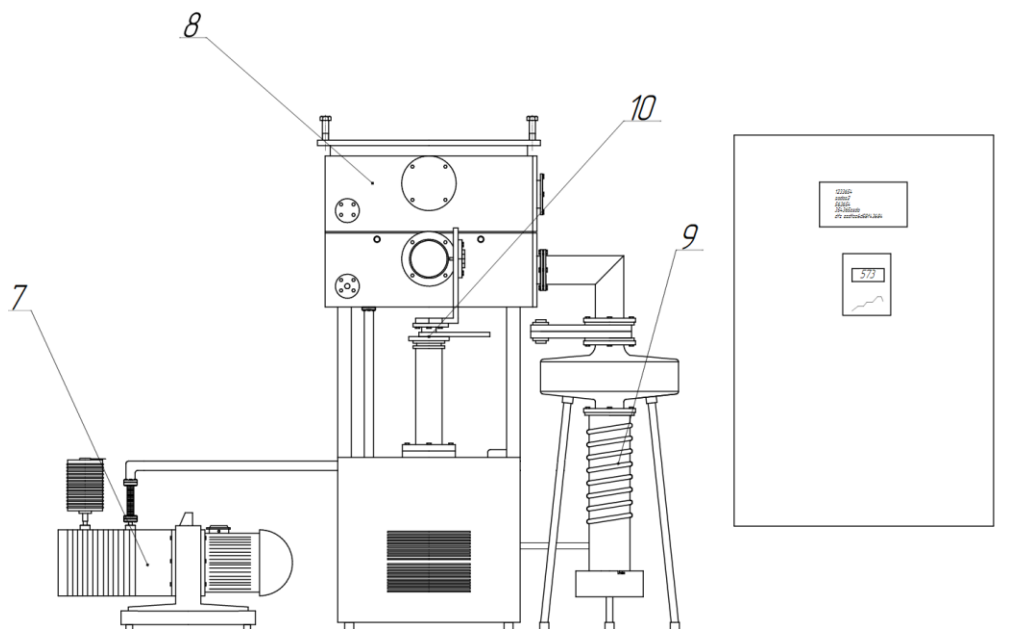
## 4.2 Визуализация процесса пайки макета сотового уплотнения

Пайку образцов проводили на установке для определения смачивания. в свободном состоянии сотовыми блоками вверх. Было осуществлено две пайки в одинаковом режиме. В первом случае образец паяли таким образом, чтобы сотовый блок прогревался более интенсивно. Во втором случае сотовый блок прикрывали керамической пластиной для равномерного нагрева всего макета. Схема нагревательной камеры, расположение макета и общий вид установки представлены на рисунке 4.3. Макеты устанавливали на графитовый столик 1 и упирали в термопару 2. После установки образца нагреватель 3 окружали экранами 4,5,6 для снижения тепловых потерь во время процесса пайки. Процесс пайки проводили в условиях динамического вакуума. Для предотвращения падения вакуума из-за интенсивного выделения компонентов связующего в процессе пайки было решено осуществлять предварительный нагрев образцов в условиях низкого вакуума. Нагрев производили до температуры  $T=400$  °С используя только форвакуумный насос 7 и отжигали образец при этой температуре в течении 10 минут. Далее из камеры 8 откачивали воздух диффузионным насосом 9 до остаточного давления порядка  $3,3 \cdot 10^{-3}$  Па и продолжали нагрев до температуры пайки  $T_{\text{пайки}}=1100$  °С (по контрольной термопаре). Контроль остаточного давления вели по термопарно-инизационному вакуумметру ВИТ-3. Нагрев осуществляли в ручном режиме, увеличивая мощность на 10% каждые 3 минуты от 0 до 50%. Контроль температуры осуществляли по термопаре вольфрам-рений подключенной к контроллеру ТРМ 251. Процесс пайки фиксировали с помощью видеокамеры установленной на штативе 10. Для фиксации температуры во время съемок вслух проговаривали достижение температуры пайки.





а)



б)

а) схема рабочего пространства печи; б) общий вид установки.

1 – образец; 2 – графитовый столик; 3 – термопара; 4 – нагреватель; 5,6 – экраны; 7 – форвакуумный насос; 8 – вакуумная камера; 9 – диффузионный насос; 10 – штатив для камеры.

Рисунок 4.3 – Схема установки для определения смачивания

### **4.3 Компьютерное моделирование распределения температуры при нагреве сотового уплотнения**

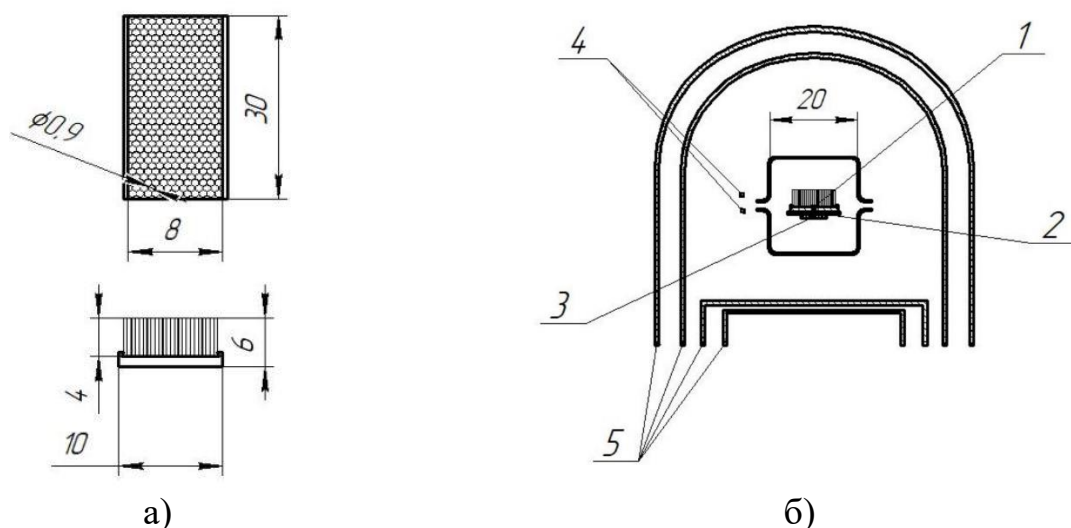
#### **4.3.1 Постановка тепловой задачи**

Поскольку диаметр кольцевой подложки много больше ее толщины, предполагается, что кривизной поверхности подложки можно пренебречь. Поэтому в качестве объекта исследования был принят экспериментальный образец - макет сотового уплотнения, состоящий из плоской подложки и сотового блока. Толщина подложки мала по сравнению длиной окружности кольца, тепловое состояние этой конструкции в приближении вполне может рассматриваться в виде плоской полосы с бесконечной длиной и конечной шириной.

Эскиз макета, представлен на рисунке 4.4, а. Длина образца 30 мм, что существенно больше толщины подложки. Это позволяет считать, что тепловое состояние центральной части образца хорошо описывается приближением бесконечной полосы. На рисунке 4.4, б показан эскиз теплового узла вакуумной печи для пайки макета сотового уплотнения.

На рисунке 4.5 представлена 1/4 часть 3D-модель теплового узла печи, используемой для пайки. Модель разрезана по плоскостям симметрии.

Паяемый узел установлен на тонкую керамическую пластину, лежащую на графитовом столике. Крепление столика в модели отсутствует, поскольку предполагалось, что оно не оказывает влияние на температурное поле внутри нагревателя. Поскольку конструкция имеет две плоскости симметрии, в расчете участвовала только 1/4 часть 3D-модели, что существенно сократило время расчета.



1 – макет сотового уплотнения; 2 – керамическая подложка толщиной 1 мм; 3 – графитовый столик толщиной 2 мм; 4 – Танталовые нагреватели, лист толщиной 1 мм; 5 – молибденовые экраны толщиной 1 мм.

Рисунок 4.4 – а) - эскизы макета сотового уплотнения; б) - эскиз теплового узла вакуумной печи.

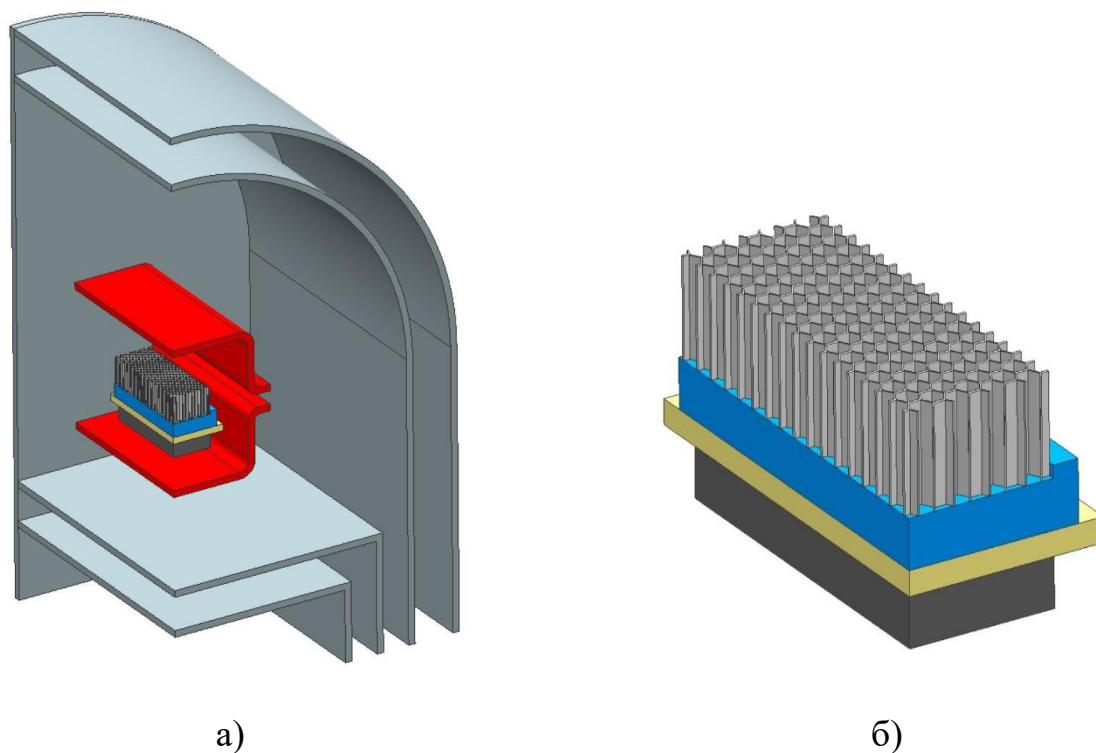


Рисунок 4.5 – 3D-модель 1/4 части теплового узла вакуумной печи (а) и макета сотового уплотнения с керамической подложкой и графитовым столиком(б).

### 4.3.2 Методика моделирования

Расчеты были проведены в системе компьютерного моделирования ProCAST. Для расчетов была использована 3D-модель, показанная на рисунке 4.5.

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 таблице 4.1.

Моделировалась следующая последовательность технологического процесса. Макет сотового уплотнения помещалась в холодную печь, (Тпечи=20 С). После откачки камеры до требуемого разрежения начинался процесс нагрева по заданному режиму. Рассматривались два температурных режима пайки, показанные на рисунке 4.6 а и б.

Таблица 4.1. Теплофизические параметры материалов

Параметр	Свойство			
	$\lambda$ , Вт/(м <sup>0</sup> С)	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$C_p$ , кДж/(кг <sup>0</sup> 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

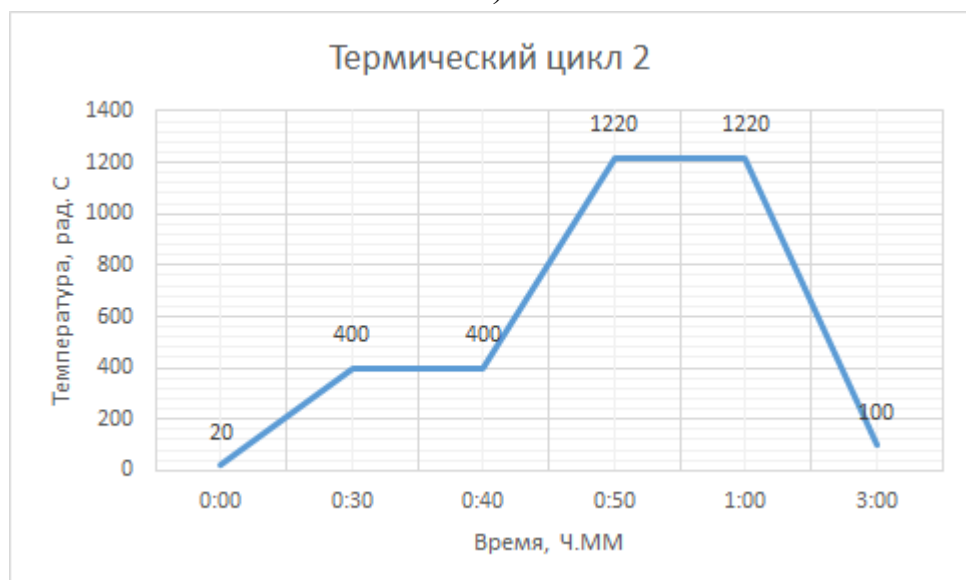
где  $\rho, C_p, \lambda$  - плотность, удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности.

В системе ProCAST расчет распределения температуры происходит путем численного решения уравнения теплопроводности методом конечных элементов.

Для выполнения этого расчета необходимо создание сеточной модели расчетной области. В процессе создания сеточной модели исходная 3D-модель расчетной области разбивается на тетрагональные элементы. Размеры этих элементов должны быть согласованы с характерной толщиной во всех сечениях исходной 3D-модели. Необходимое требование к качеству сеточной модели состоит в том, что в любом сечении исходной 3D-модели должно быть не менее двух элементов.



а)



б)

Рисунок 4.6 – Температурные режимы пайки (температура, задаваемая на нагревателях).

В условиях вакуума основным механизмом передачи тепла является теплообмен излучением. Поэтому, результирующее поле температуры существенно зависит от степени черноты поверхности конструктивных элементов. Показанные значения степени черноты  $\varepsilon$  соответствуют состоянию материалов, подвергавшихся неоднократному нагреву в условиях глубокого вакуума и имеющих матовую поверхность.

Процесс переноса тепла при непосредственном контакте конструктивных элементов контролируется коэффициентом теплопередачи  $\alpha$ . В контакте сотового блока и подложки из стали ХН62ВМЮТ принималось  $\alpha = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$ , а для всех остальных тел  $\alpha = 100 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$ . 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.

Поскольку сотовый блок изготовлен из фольги толщиной 0.05 мм, в этой конструкции должна быть создана сетка, состоящая из большого числа ультра мелких элементов с размером ребра порядка 0.025мм. Столь малое расстояние между узлами сетки может приводить к ошибкам численного решения, которые трудно проконтролировать, а большое количество элементов сетки на поверхности сот приводит к резкому увеличению времени расчета.

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.

Математическая постановка задачи для масштабированного технологического процесс была сформулирована на основании теории подобия тепловых процессов. Основным уравнением в этой задаче является уравнение теплопроводности:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (4.1)$$

где  $T$  - температура;  $\rho, C_p, \lambda$  - плотность, удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности;  $x, y, z$  - координаты;  $\tau$  - время. Поскольку расчетная область состоит из нескольких материалов, теплофизические свойства, в общем случае, являются функциями не только температуры, но и координат.

Уравнение (4.1) решается при следующих граничных условиях. На поверхностях ( $S_1$ ) непосредственного контакта тел граничное условие имеет вид

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} \Big|_{S_1} = \alpha(T_1 - T_2), \quad (4.2)$$

где  $\mathbf{n}$  - нормаль к поверхности;  $\alpha$  - коэффициент теплопередачи;  $T_1, T_2$  - температура на контактирующих поверхностях.

На поверхностях, участвующих в радиационном теплообмене ( $S_2$ ), граничное условие имеет вид

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} \Big|_{S_2} = q_{\text{рез}}, \quad (4.3)$$

где  $q_{\text{рез}}$  - плотность результирующего теплового потока на элементарной площадке поверхности  $S_2$ .

Вводя масштабы длины  $l_0$  и теплопроводности  $\lambda_0$ , можно записать уравнение (4.1) в безразмерном виде

$$\frac{\partial T}{\partial Fo} = \frac{\partial}{\partial X} \left( \Lambda \frac{\partial T}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left( \Lambda \frac{\partial T}{\partial Y} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left( \Lambda \frac{\partial T}{\partial Z} \right). \quad (4.4)$$

Граничные условия (2), (3) в безразмерном виде записываются как

$$-\Lambda \frac{\partial T}{\partial \mathbf{N}} \Big|_{S_1} = Bi(T_1 - T_2) \text{ или } -\Lambda \frac{\partial T}{\partial \mathbf{N}} \Big|_{S_2} = Bi_{\text{изл}} \quad (4.5)$$

В уравнениях (4.4), (4.5) -  $Fo = a\tau/l_0^2$  - число Фурье, безразмерное время;  $a = \rho C_p / \lambda_0$  - коэффициент температуропроводности;  $\Lambda = \lambda / \lambda_0$  - безразмерный коэффициент теплопроводности;  $X = x/l_0, Y = y/l_0, Z = z/l_0$  - безразмерные координаты;  $Bi = \alpha l_0 / \lambda_0$ ,  $Bi_{\text{изл}} = q_{\text{изл}} l_0 / \lambda_0$  - безразмерное число Био для теплоотдачи в контакте двух тел и для теплообмена излучением, соответственно.

В системе уравнений (4.4), (4.5) безразмерные величины  $Fo$  и  $Bi$  являются критериями подобия процессов теплопереноса в исходной и масштабированной геометрических моделях.

В соответствии с теорией подобия, процессы теплопереноса в исходной и масштабированной геометрических моделях будут подобны, если критерии  $Fo$ ,  $Bi$  и  $Bi_{\text{изл}}$  численно равны. Решение уравнения (4.4) при граничных условиях (4.5) дает распределение температуры в безразмерных координатах, которое справедливо для любой расчетной области, полученной из исходной расчетной области пропорциональным увеличением ее геометрических размеров. В соответственных точках расчетной области, независимо от ее реальных размеров, будет достигаться одинаковая температура при данном значении безразмерного времени  $Fo$ . Реальное время достижения одинаковой температуры в сходственных точках, определяется соотношением  $\tau_2 = \tau_1 m^2$ ,  $m$  - коэффициент увеличения линейных размеров расчетной области. Таким образом, время достижения той же температуры в сходственной точке расчетной области, увеличенной в  $m$  раз, возрастает в  $m^2$  раз.

Для того, чтобы при моделировании в системе ProCAST получить истинную зависимость температуры от времени, необходимо в соответствии с теорией



подобия задать модельные теплофизические свойства материалов, рассчитанные из следующих соотношений:

$$Fo = \frac{a\tau}{l_0^2} = \frac{a_m\tau}{m^2l_0^2} \quad (4.6)$$

$$Bi = \frac{\alpha l_0}{\lambda} = \frac{\alpha}{\lambda_m} ml_0 \quad \text{и} \quad Bi = \frac{q_{\text{изл}} l_0}{\lambda} = \frac{q_{\text{изл}}}{\lambda_m} ml_0 \quad (4.7)$$

В этих выражениях  $a_m$ ,  $\lambda_m$  - температуропроводность и коэффициент теплопроводности модельного сплава.

Плотность, коэффициент теплопередачи  $\alpha$  и плотность теплового потока  $q_{\text{изл}}$  предполагались неизменными.

Считалось, что  $\alpha$  не зависит от размеров геометрической модели, поскольку определяется свойствами контактирующих поверхностей. Величина  $q_{\text{изл}}$  также не зависит размеров геометрической модели, поскольку определяется только безразмерными средними угловыми коэффициентами излучения и температурой тел, участвующих в теплообмене излучением.

Из (4.6) видно, что полное подобие тепловых процессов при масштабировании расчетной области достигается при следующих условиях:

$$\lambda_m = m\lambda \quad \text{и} \quad a_m = m\rho C_p / \lambda_0$$

Таким образом, теплофизические свойства масштабированной модели, использованной в вычислительном эксперименте, определяются следующими соотношениями:

$$\rho_m = \rho, \quad \alpha_m = \alpha, \quad \lambda_m = m\lambda, \quad C_{p,m} = C_p / m \quad (4.8)$$

### 4.3.3 Результаты компьютерного моделирования

Были выполнены расчеты процесса нагрева сотового уплотнения Рисунок 4.4 в условиях, когда температура нагревателей изменялась в соответствии диаграммами, представленными на Рисунке 4.6, а и б.

Расчеты проводились на увеличенной модели сотового уплотнения с коэффициентом масштабирования  $m=10$  и модельными теплофизическими свойствами материалов, рассчитанными по соотношениям (4.8).

На рисунке 4.7 показано распределение температуры на поверхности макета сотового уплотнения и конструктивных элементов печи в момент достижения максимальной температуры.

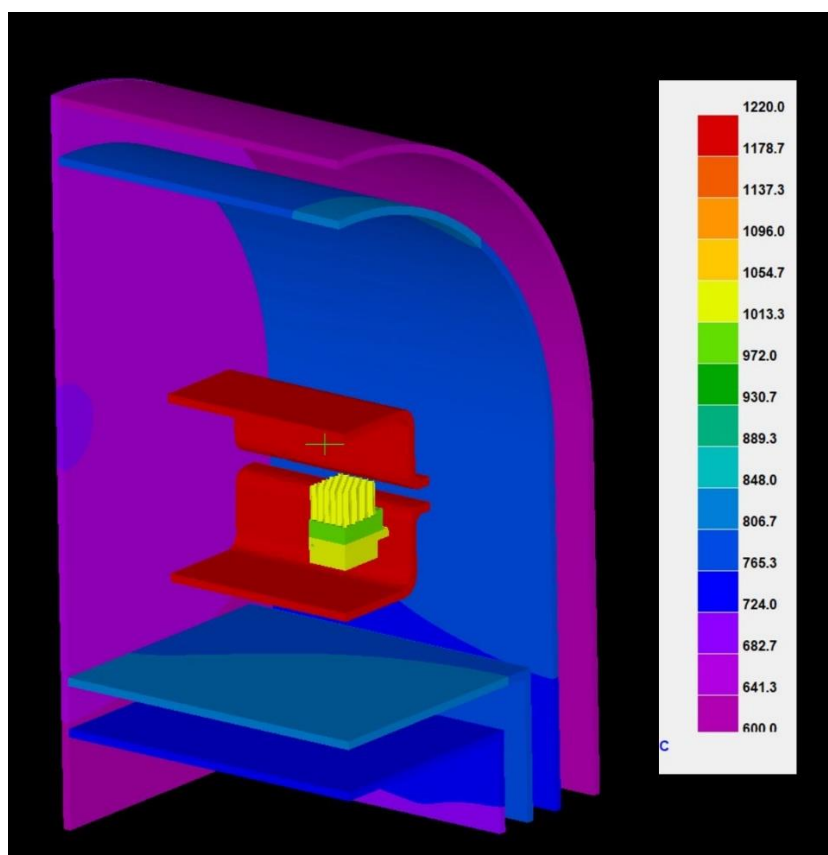


Рисунок 4.7 – Распределение температуры на поверхности макета соплового уплотнения и конструктивных элементов печи.

На рисунке 4.8 показаны кривые изменения температуры на поверхности сотовой конструкции, на сотах и подложке в месте их контакта и на нагревателях в

зависимости от времени процесса. Температура нагревателя изменяется по режиму 1 (см. Рисунок 4.6, а).

При максимальной температуре нагревателя  $1220^{\circ}\text{C}$  температура подложки составляет  $991^{\circ}\text{C}$ , а температура сотовой конструкции –  $1016^{\circ}\text{C}$ . Температура наверху сот практически не отличается от температуры внизу.

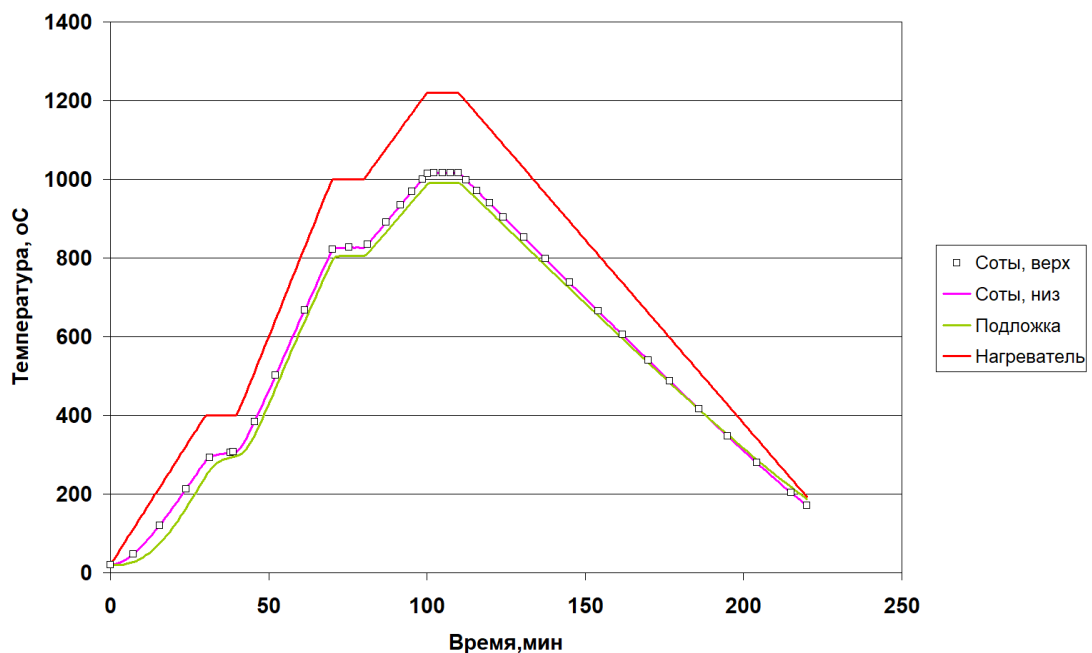


Рисунок 4.8 – Режим 1. Кривые изменения температуры в зависимости от времени процесса.

На рисунке 4.9 показаны кривые изменения температуры на поверхности сотовой конструкции, на сотах и подложке в месте их контакта и на нагревателях в зависимости от времени процесса. Температура нагревателя изменяется по режиму 2 (см. рисунок 4.6, б).

При максимальной температуре нагревателя  $1220^{\circ}\text{C}$  температура подложки составляет  $991^{\circ}\text{C}$ , а температура сотовой конструкции –  $1015.7^{\circ}\text{C}$ , т.е практически те же, что и режиме 1. Температура наверху сот практически не отличается от температуры внизу.

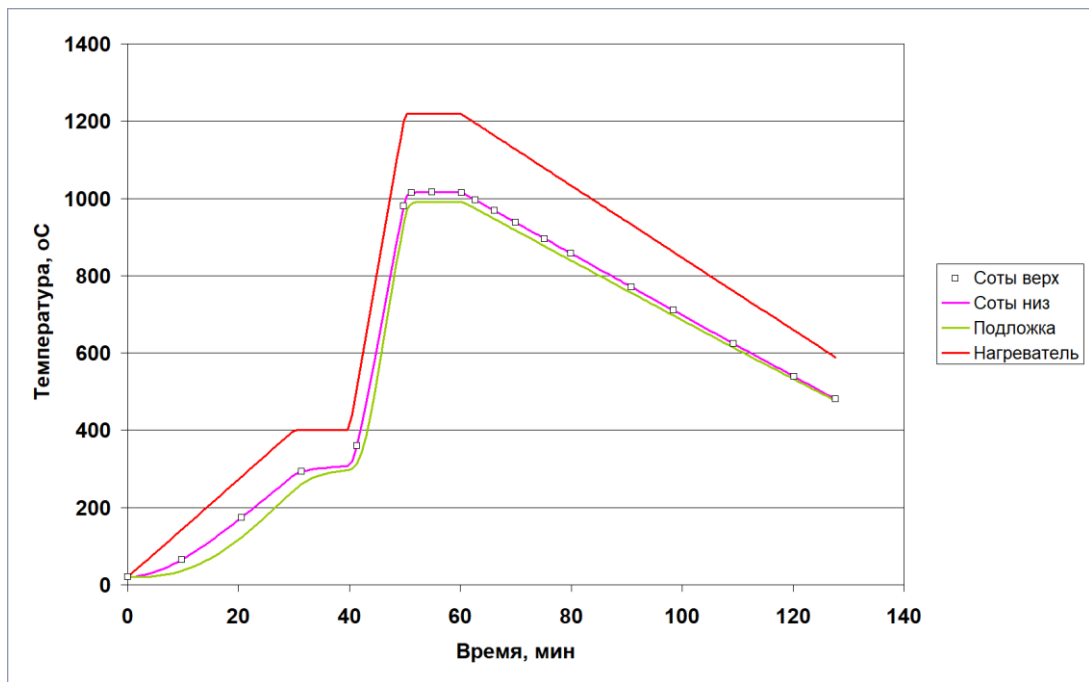


Рисунок 4.9 – Режим 2. Кривые изменения температуры в зависимости от времени процесса.

#### 4.4 Визуализация пайки макета сотового уплотнения

Для проверки адекватности компьютерной модели была проведена пайка аналогичных макетов сотового уплотнения на установке с возможностью видео фиксации процесса. Поскольку моделирование показало, что выдерживание перед температурой пайки и медленный подъем температуры не оказывает существенного влияния было решено использовать экран для затенения сотового блока от нагревателя. Для этого были спаяны образцы по методике, описанной в пункте 4.2. Ниже представлены стоп кадры съемок процесса пайки образцов. Рисунки 4.10 – 4.14 без использования экрана, 4.15 – 4.20 с использованием экрана.

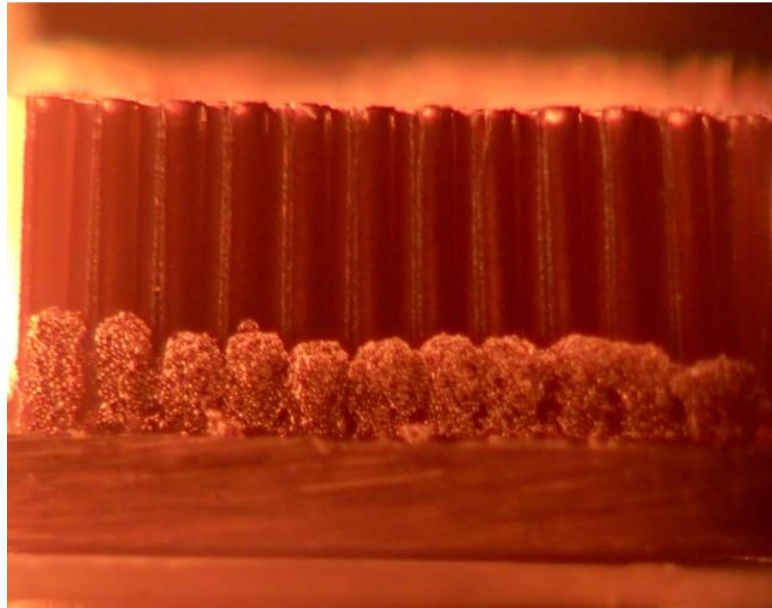


Рисунок 4.10 –  $T=1100\text{ }^{\circ}\text{C}$  начало процесса пайки

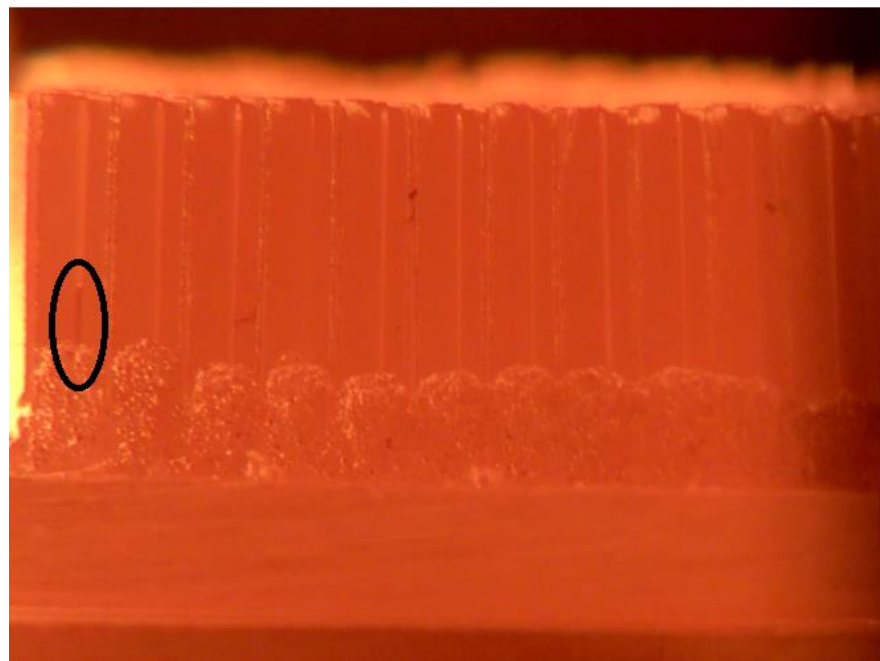


Рисунок 4.11 –  $T=1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; время выдержки 1 минута. Заполнение первого зазора между гофрированными фольгами сотового блока

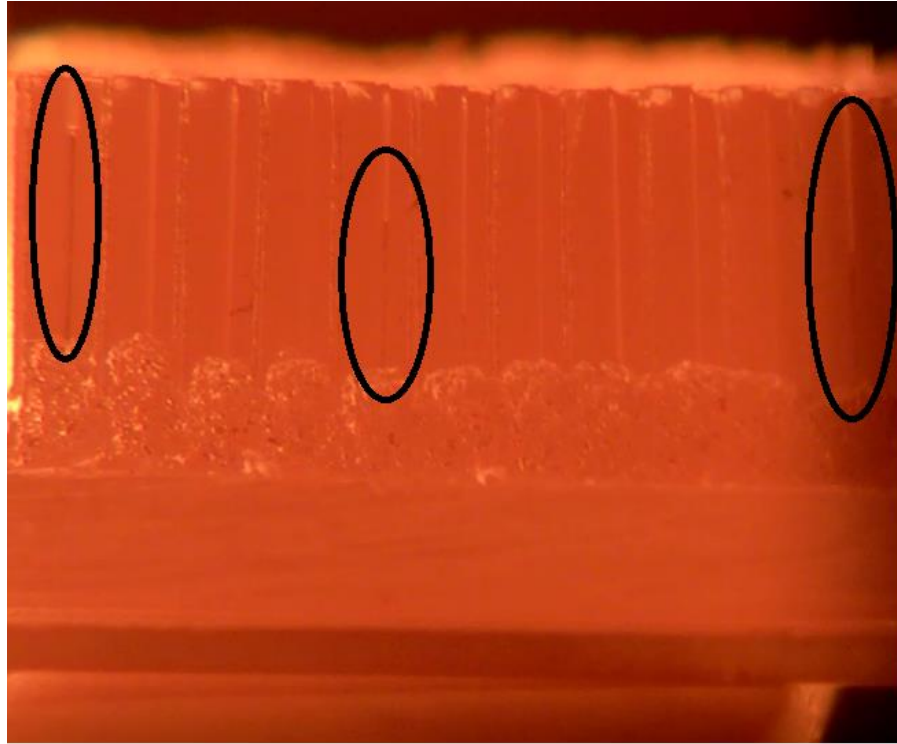


Рисунок 4.12 –  $T=1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; время выдержки 3 минуты. Активное заполнение зазоров между гофрированными фольгами сотового блока

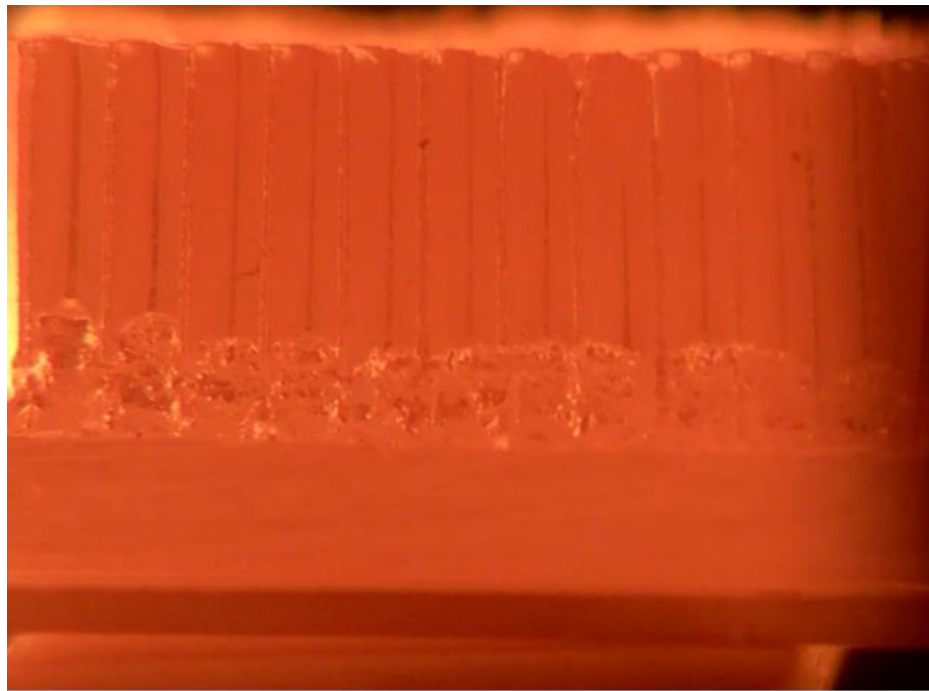


Рисунок 4.13 –  $T=1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; время выдержки 5 минут. Заполнение всех зазоров между гофрированными фольгами

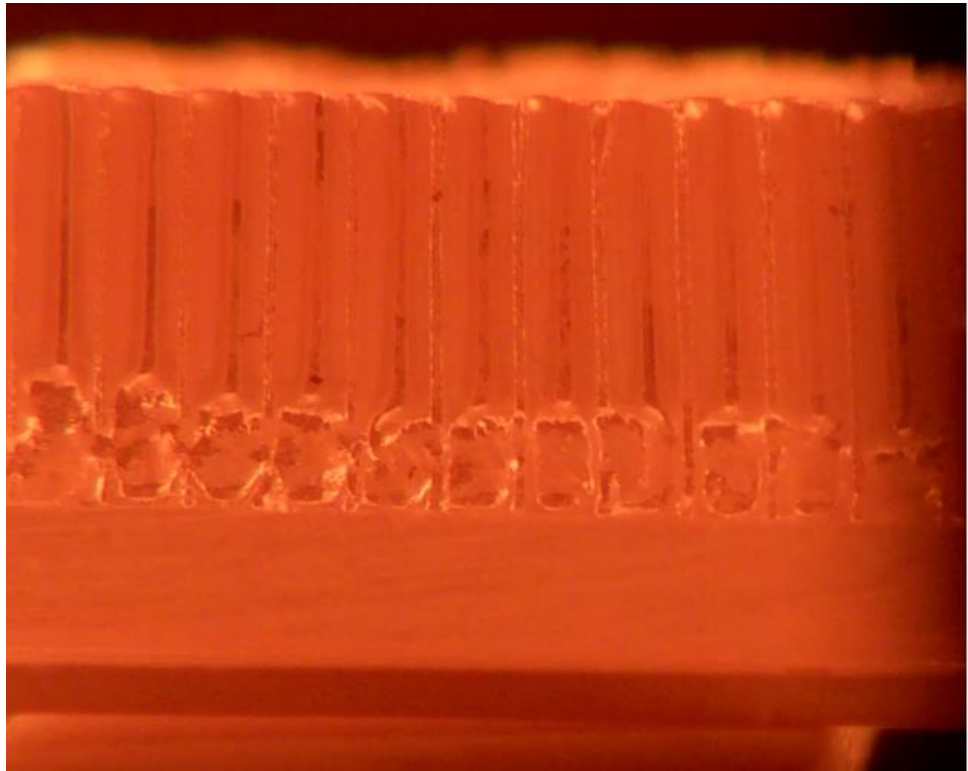


Рисунок 4.14 –  $T=1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; время выдержки 8 минут. Полное расплавление припоя на подложке

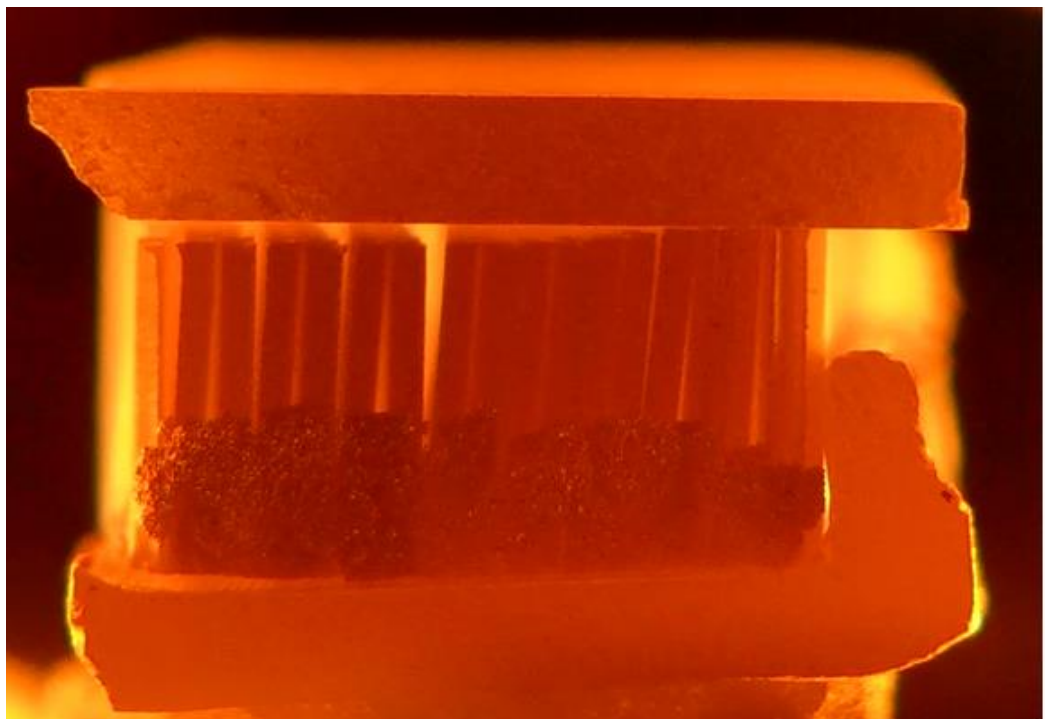


Рисунок 4.15 –  $T=1100\text{ }^{\circ}\text{C}$  начало процесса пайки

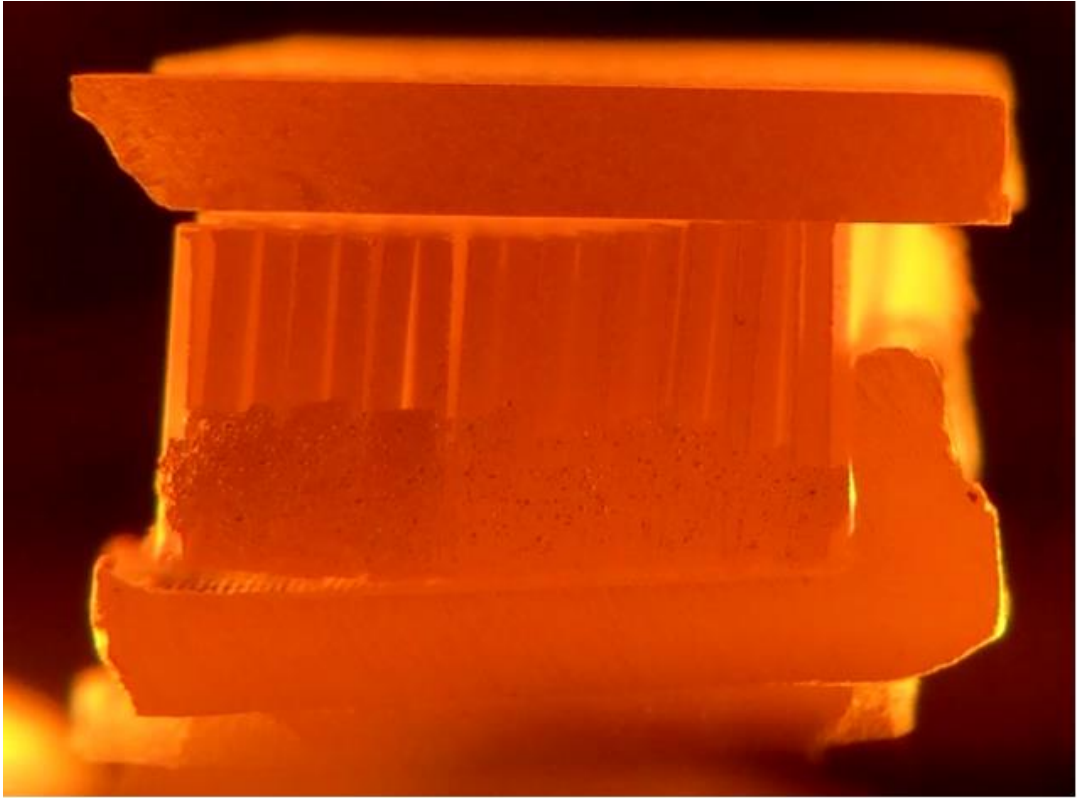


Рисунок 4.16 –  $T=1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; время выдержки 1 минута. Начало плавления припоя на корпусе уплотнения

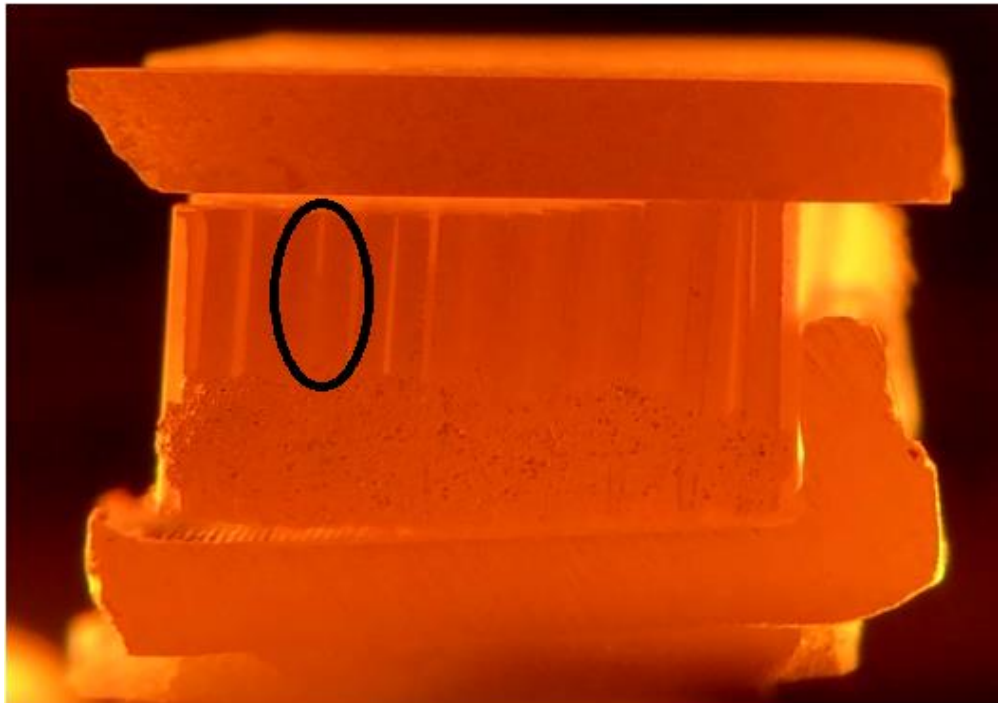


Рисунок 4.17 –  $T=1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; время выдержки 3 минуты. Заполнение зазора между гофрированными фольгами



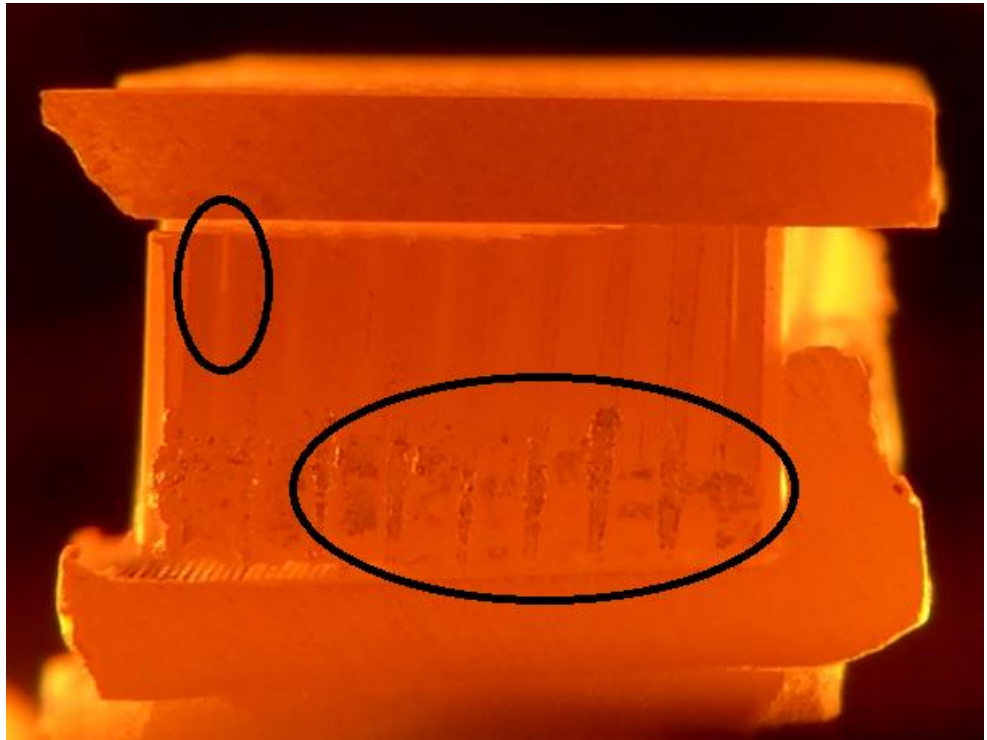


Рисунок 4.18 –  $T=1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; время выдержки 5 минут. Заполнение последнего зазора между гофрированными фольгами, припой на корпусе сотового уплотнения расплавлен

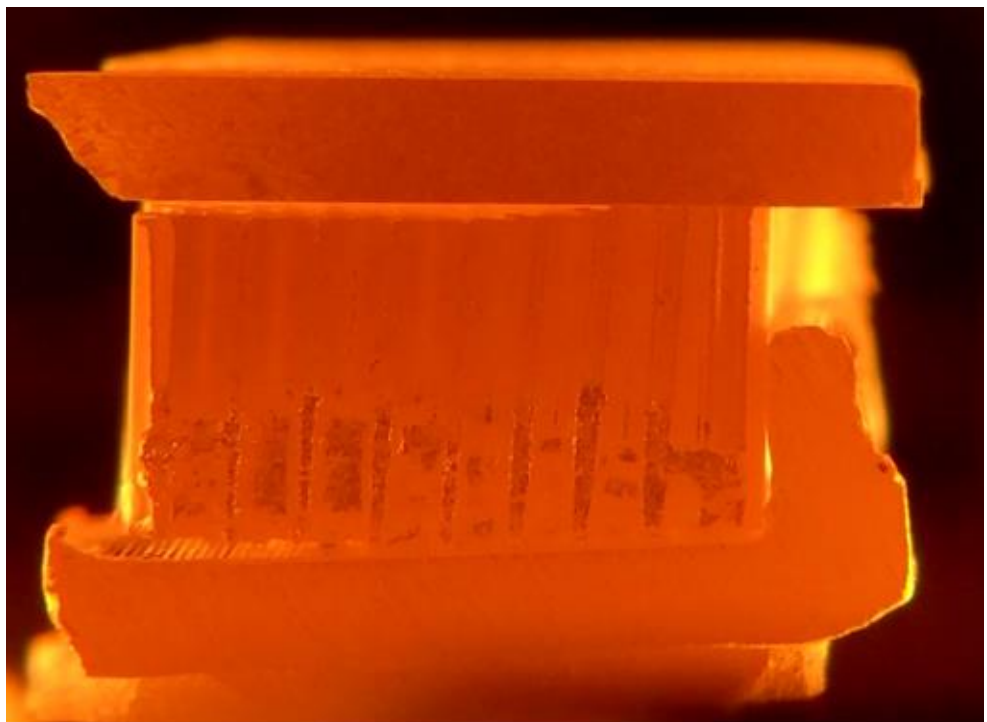


Рисунок 4.19 –  $T=1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; время выдержки 8 минут

На снимках видно, что без использования экрана происходит активное заполнение капиллярных зазоров между гофрированными фольгами сотового блока (Рисунок 4.11 и 4.12) первичной жидкой фазой, образовавшейся в припое. После заполнения всех зазоров между фольгами (Рисунок 4.13) происходит полное плавление припоя (Рисунок 4.14). С использованием экрана плавление припоя происходит иначе. Можно заметить, что при использовании экрана после начала плавления припоя заполнение зазоров между фольгами происходит менее интенсивно. На Рисунке 4.16. видно, что произошел сдвиг левой части сотового блока в виду начала плавления припоя, однако зазоры между фольгами не заполнены. Также на Рисунке 4.18 видно, что на подложке припой полностью расплавлен, но последний зазор между фольгами не заполнен. Это объясняется тем, что при использовании экрана основная теплота для плавления припоя поступает от корпуса сотового уплотнения, а не от сотового блока, как в случае с пайкой без экрана.

#### **ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4**

По результатам компьютерного моделирования процесса пайки макета сотового уплотнения было определено, что отставание массивного корпуса от тонкостенного сотового блока в момент выхода на температуру солидуса припоя составляет порядка 20-25 °С. При этом снижение скорости нагрева детали не выравняет 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 и может приводить к повышению температуры плавления припоя, оставшегося на подложке, тем самым вызывая дефект в виде «kozyрьков».

Для снижения градиента температуры между тонкостенным сотовым блоком и массивной подложкой следует использовать технологическую оснастку, которая будет затенять сотовый блок.

## **5. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ПАЙКИ СОТОВОГО УПЛОТНЕНИЯ**

На основании данных полученных в проведенном исследовании, а также анализе технологий используемых на предприятиях газотурбостроительной промышленности была разработана методика по расчету количества припоя для пайки сотового уплотнения, а также описан технологический процесс пайки включающий подготовительные операции, операцию нанесения припоя, сборки детали, фиксации сотового блока в корпусе сотового уплотнения, режим пайки в вакуумной печи и контроль качества паянных соединений сотового блока. По данной технологии были спаяны сотовые уплотнения турбины низкого давления турбореактивного авиационного двигателя АЛ-31Ф, который используется на тяжелых истребителях Су-27 и его модификациях.

### **5.1 Методика расчета припоя для пайки сотового уплотнения**

На основании полученных данных в разделах 3 и 4 было определено, что для пайки сотового уплотнения необходимо использовать минимально возможное количество припоя, для предотвращения подпитки капилляров сотового блока избытком расплава, образования наплывов и растворения сотовых блоков.

Количество припоя, требуемое для пайки сотового уплотнения, рассчитывается исходя из объема, который требуется заполнить припоем. В сотовом уплотнение комбинируется два типа соединений: нахлесточные в местах сопряжения гофрированных фольг сотового блока и тавровые в местах контакта сотового блока и корпуса сотового уплотнения (рисунок 5.1).

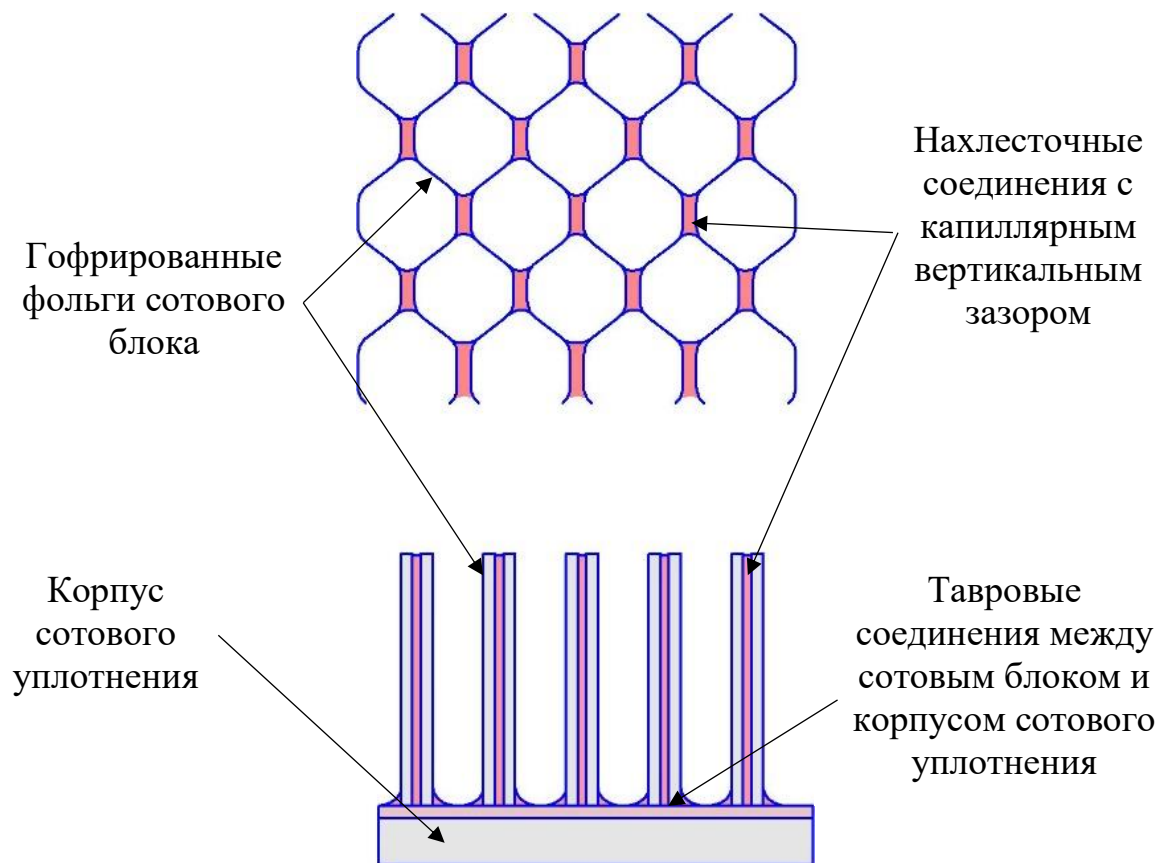


Рисунок 5.1 – Схема паянных соединений сотового уплотнения

На суммарный объем паяного соединения сотового уплотнения влияют три основных конструктивных фактора: диаметр окружности, вписанной в шестиугольную ячейку сотового уплотнения; высоты сотового блока; толщины фольги, которую используют для изготовления сотового блока. Первые два оказывают влияние на объем вертикальных паяльных зазоров, третий на объем зазоров между сотовым блоком и корпусом.

В общем виде количество припоя, требуемое для пайки сотового уплотнения можно записать в следующем виде:

$$M_{\text{припоя}} = 1,5 * \rho_{\text{припоя}} * (V_{\parallel} + V_{\perp}) \quad (5.1)$$

где  $\rho_{\text{припоя}}$  – плотность припоя

$V_{\parallel}$  - объем зазоров между гофрированными фольгами

$V_{\perp}$  - объем зазоров между сотовым блоком и корпусом сотового уплотнения

Технология сборки сотового уплотнения подразумевает фиксацию сотового блока к корпусу сотового уплотнения точечной контактной сваркой, а контакт между гофрированными фольгами как правило обеспечивается либо технологическим буртом на корпусе, либо точечной контактной сваркой при формировании сотового блока. Исходя из этого все зазоры между частями сотового уплотнения можно считать «нулевым» и для расчёта условно принять равным 0,02 мм. Тогда (5.1) можно записать, как:

$$M_{\text{припоя}} = \rho_{\text{припоя}} * (S_{\parallel} * h_{\text{с.блока}} * 0,02 + S_{\perp} * 0,02) \quad (5.2)$$

В виду сложной формы гофрированной фольги и нелинейного влияния диаметра вписанной окружности на площадь нахлестки гофрированных фольг для расчёта площади нахлестки гофрированных фольг  $S_{\parallel}$  и площади нахлестки сотового блока с корпусом  $S_{\perp}$  рационально пользоваться САПР в которой проектируется сотовое уплотнение.

По вышеуказанной методике было рассчитано необходимое количество припоя ВПр11-40Н требуемое для пайки двух типов сотовых уплотнений, используемых для газотурбинных авиационных двигателей. Так как объем паяного соединения прямо пропорционален площади сотового уплотнения количество припоя рассчитывалось для пайки  $1\text{см}^2$ . Параметры сотовых блоков указаны в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Параметры сотовых блоков

Условное обозначение сотового блока	Диаметр вписанной окружности, мм	Высота сотового блока, мм	Толщина гофрированной фольги, мм
Тип 1	0,9	4	0,05
Тип 2	1,5	8	

Расчёт площади нахлестки производили в САПР КОМПАС-3D по сегменту чертежа сотового блока. На рисунке 5.2 показан пример расчёта площади нахлестки сотового блока типа 2 по соединению с корпусом сотового уплотнения. Расчет приведен на 100 мм<sup>2</sup> сотового блока.

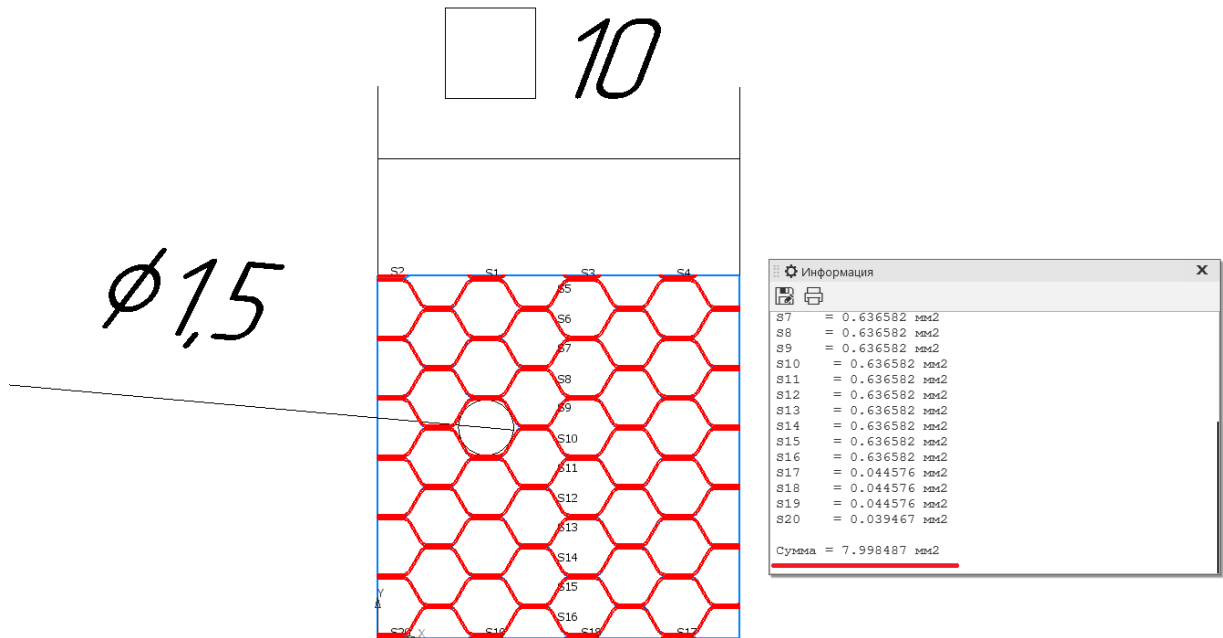


Рисунок 5.2 – Пример расчета площади нахлестки сотового блока

Определив площади нахлестки было рассчитано количество припоя, требуемое для пайки двух типов сотовых уплотнений:

$$M_{\text{тип1}} = 0,269 \text{ гр/см}^2$$

$$M_{\text{тип2}} = 0,386 \text{ гр/см}^2$$

## 5.2 Подготовка поверхности к пайке

Чистота паяемой поверхности одно из самых главных требований при высокотемпературной пайке в вакууме. В виду отсутствия флюсов, механических воздействий во время пайки, любое загрязнение на паяемой поверхности может привести к отсутствию растекания припоя и непропаям.

Технология изготовления сотовых блоков и корпусов сотового уплотнения подразумевает операции механической обработки и гофрировании фольг в которых используются смазывающие охлаждающие жидкости. Сотовые блоки с диаметром ячейки вписанной окружности 0,9 мм затруднительно отчищать от остатков масла без механического воздействия.

Для подготовки поверхности необходимо использовать органические растворители в совокупности с воздействием ультразвуковых колебаний в специальных ваннах.

После промывки от остатков загрязнения необходимо обезводить паяемые поверхности путем 5-ти кратного погружения деталей в ацетон или спирт.

### **5.3 Нанесение порошкового припоя в виде пластифицированной ленты**

Одним из преимуществ использования порошковых лент для пайки сотового уплотнения является нанесение припоя на сотовый блок до его монтажа в корпус.

Нанесение припоя на сотовый блок представлена на рисунке 5.3. 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.

Прокатка ленты припоя осуществляется таким образом, чтобы продавить ее торцами гофрированных фольг сотового блока. В дальнейшем это обеспечит плотный контакт сотового блока с корпусом и позволит зафиксировать его точечной контактной сваркой. Для обеспечения данного условия необходимо осуществлять зачистку торцов шабером до появления металлического блеска, либо использовать мягкие полиуретановые валки, которые будут вдавливать ленту припоя в ячейки.



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

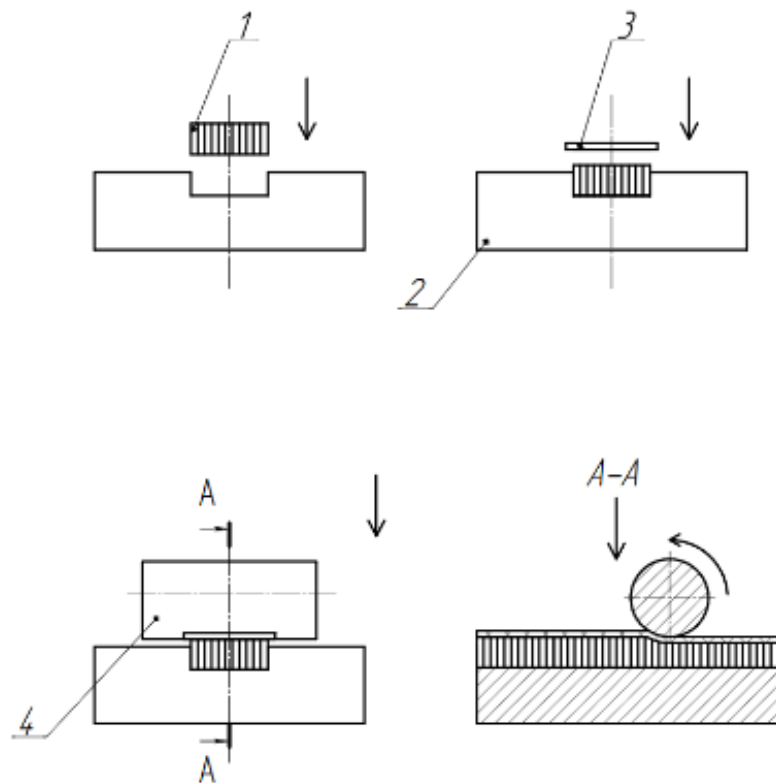


Рисунок 5.3 – Схема укладки припоя на сотовый блок

#### 5.4 Пайка сотового уплотнения

Далее в зависимости от конфигурации сотового уплотнения (кольцо/сектор) устанавливается затеняющая оснастка. Сборка помещается в вакуумную печь. По результатам данных полученных в главе 4 пайку сотового уплотнения необходимо вести на форсированном режиме, для быстрого перехода интервала плавления припоя. На Рисунке 5.4 представлен режим пайки сотового уплотнения припоем ВПр11-40Н. Первая выдержка при температуре  $T=400\text{ }^{\circ}\text{C}$  служит для снижения интенсивности испарения связующего вещества из ленты. Выдержка при  $T=900\text{ }^{\circ}\text{C}$  служит для выравнивания температуры садки в печи. Данная выдержка необходима только в реальных производственных условиях где осуществляется полная загрузка объема печи. Во время третьей выдержке при  $T=1090\text{ }^{\circ}\text{C}$

происходит процесс пайки сотового уплотнения. Все температуры указаны непосредственно для детали, контроль процесса осуществляется по образцу с контрольной термопарой.

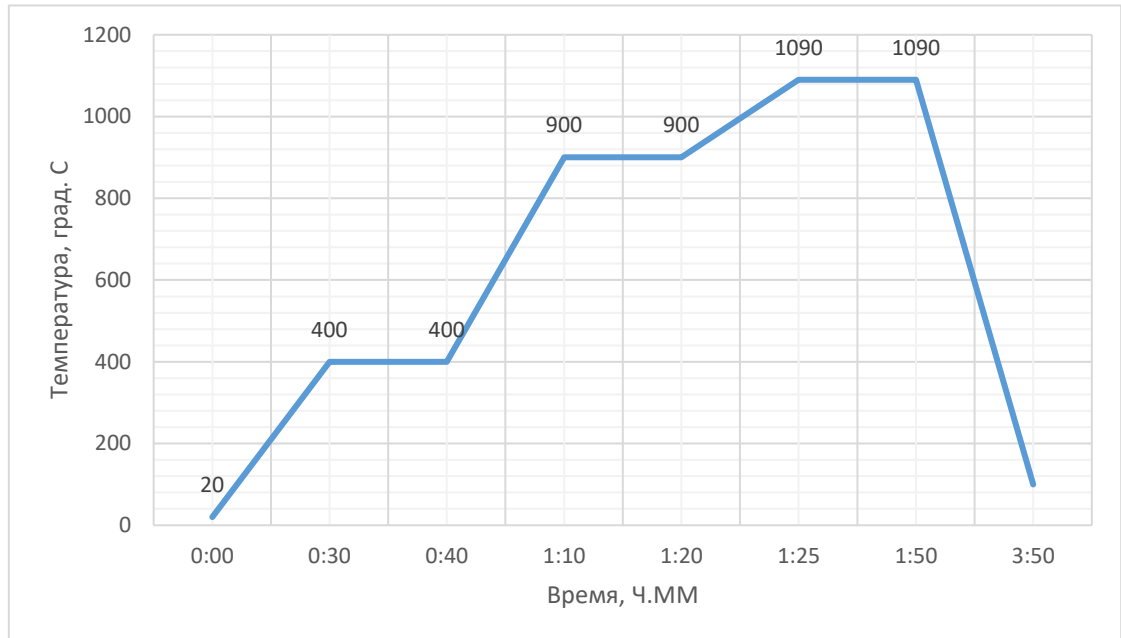


Рисунок 5.4 –Режим пайки сотового уплотнения припоем ВПр11-40Н  
(температура на корпусе сотового блока)

### 5.5 Контроль паяных соединений сотового уплотнения

Контроль качества пайки сотовых уплотнений осуществляется на 100% деталей. Контроль осуществляется неразрушающими методами: визуальным и акустическим. Данные методы позволяют оценить качество пайки, к которому предъявляются в следующие требования: гофрированные фольги сотового блока должны быть спаяны между собой, не допускается заполнение ячеек припоем, сотовый блок должен быть припаян к корпусу по всей площади прилегания. Первые два критерия качества контролируются визуально, третий с помощью ультразвукового дефектоскопа.

Акустический контроль образцов осуществляли эхо-импульсным методом, который основан на послылке в контролируемую деталь ультразвуковых колебаний, регистрации и анализе параметров импульсов, отраженных от дна контролируемой детали. Для контроля использовали промышленный ультразвуковой дефектоскоп

УСД-50. Для ввода ультразвуковых колебаний в контролируемую деталь и приема отраженных эхо-сигналов использовали раздельно-совмещённый пьезоэлектрический преобразователь (ПЭП). Настройку дефектоскопа производили по используемому в производстве контрольному образцу, который представляет собой фрагмент сотового уплотнения с заранее размеченными не пропаянными участками.

Для проведения акустического контроля поверхность ввода ультразвуковых колебаний полировали на войлочном круге для удаления неровностей, чистота поверхности  $R_a < 1.6$  мкм. Для обеспечения акустического контакта ПЭП с образцом поверхность образца обильно покрывалась контактной смазкой – МС-20 ГОСТ 21743-76. Затем ПЭП перемещали по образцу, фиксируя дефекты и их расположение мелом (рисунок 5.5).

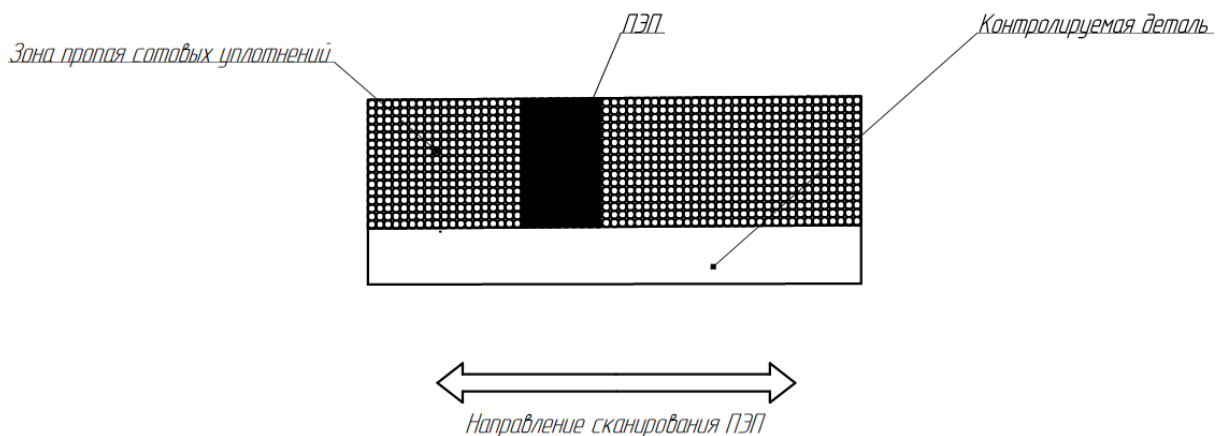


Рисунок 5.5 – Схема акустического контроля сотового уплотнения

Для подтверждения данных, полученных ультразвуковым методом контроля, и исследования макро и микроструктуры паяных соединений использовали металлографическое исследование по методике, описанной в разделе 3.

## ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 5

Спаянные по разработанной технологии сотовые уплотнения ГТД АЛ31-Ф прошли все виды контроля, предусмотренные техническими условиями. На рисунке 5.6 представлена макроструктура паяного соединения сотового уплотнения с сотовым блоком типа 1. В ячейках сотового уплотнения не наблюдается наплывов припоя. Сотовый блок припаян к корпусу сотового уплотнения (подтверждено ультразвуковым контролем). Растворения сотового блока не обнаружено.

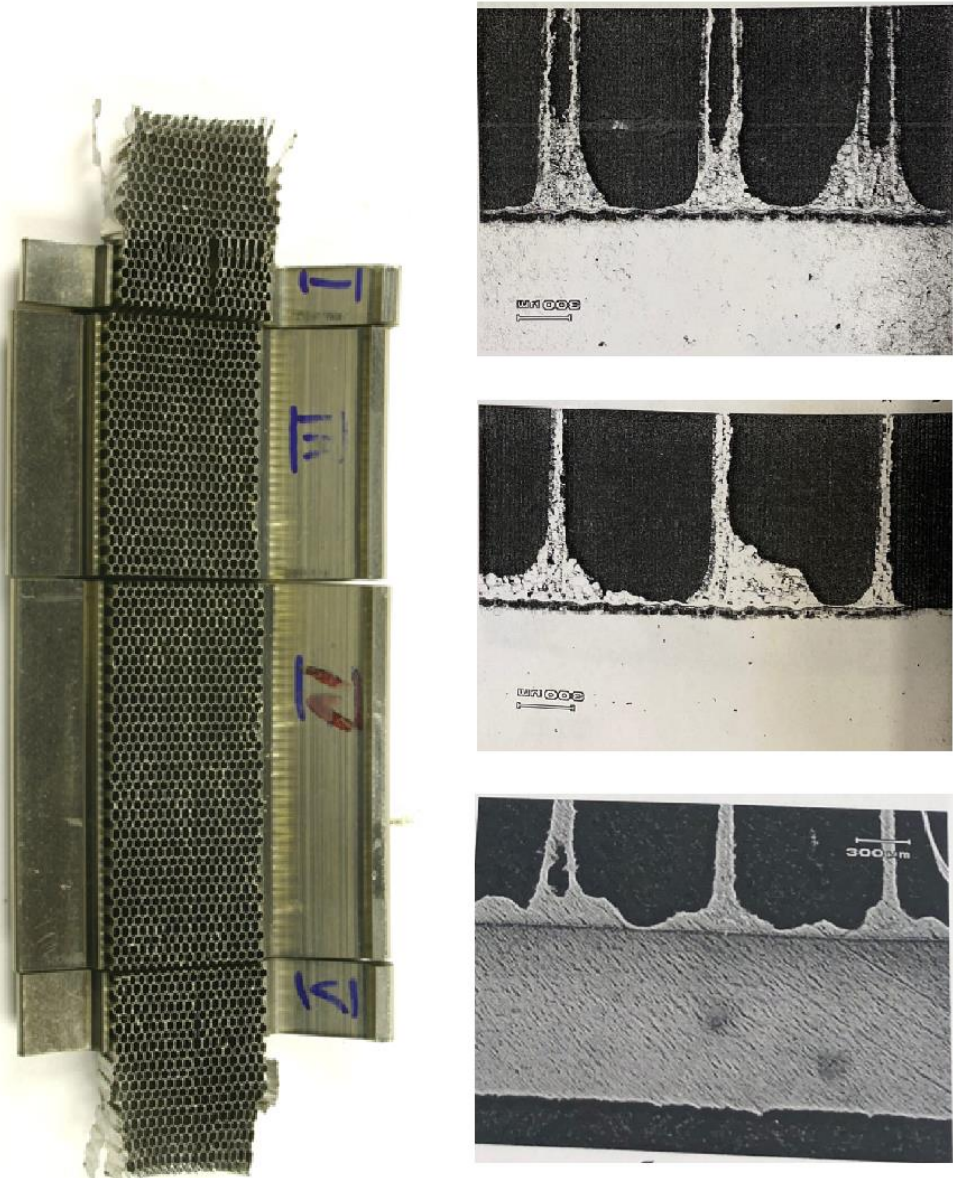


Рисунок 5.6 – Макроструктура паяного соединения сотового уплотнения

## ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

Разработана методика 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 ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Иноземцев А.А., Сандрацкий В.Л. Газотурбинные двигатели. Пермь: ОАО “Авиадвигатель,” 2006. 1204 p.
2. 2 Елисеев Ю.С., Гейкин В.А., Поклад В.А. Прогрессивные процессы сварки и пайки в современном производстве газотурбинных двигателей. – М.: Материалы семинара к 50-летию Отдела Главного сварщика ФНПЦ ММП «Салют» материалы семинара, 12.04.2001, с 1-6.
3. Brazing : for the engineering technologist : Schwartz, Mel M : Free Download, Borrow, and Streaming : Internet Archive [Electronic resource]. URL: <https://archive.org/details/brazingforengine0000schw> (accessed: 19.08.2021).
4. Петрунин И.Е., Др. И. Справочник по пайке. Москва: Машиностроение, 2003. 480 p.
5. Никитин А.Н. Технология сборки двигателей летательных аппаратов. Москва: Машиностроение, 1982. 269 p.
6. Сотовые уплотнения в турбомашинах: монография / В. Т. Буглаев [и др.]; Брян. гос. техн. ун-т. - Брянск: Изд-во БГТУ, 2002. - 148 с. - Брян. гос. техн. ун-т.
7. Заричный А.Ф., Ильичев В.Ю. Сотовые уплотнения турбоустановок и направления их совершенствования // НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРИБОРО - И МАШИНОСТРОЕНИИ И РАЗВИТИЕ ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В ВУЗЕ. Калуга, 2015. Р. 221–227.
8. Актуальность задачи унификации и оптимизации уплотнений в газотурбинных двигателях // Газовая промышленность. 2017. Vol. 6, № №11. Р. 56–61.
9. 4. В.В. Алексеев, И.А. Гачечиладзе, Г.И. Кикнадзе, В.Г. Олейников. Смерчевой энергообмен на трёхмерных вогнутых рельефах – структура

самоорганизующихся течений, их визуализация и механизмы обтекания поверхностей. // Труды Второй Российской конференции по .

10. Sporer D., Fortuna D. Braze materials for brazing seal honeycomb: Trends, challenges and a market outlook // IBSC 2012 - Proceedings of the 5th International Brazing and Soldering Conference. 2012.
11. Ushinin S. V. Experience with the introduction of honeycomb seals in steam turbines // Power Technol. Eng. 2009. Vol. 43, № 6. P. 382–388.
12. В.С. Р., А.Н. А.-Х., М.И. К. Исследование ремонтной технологии исправления дефектов паяных соединений топливных коллекторов // Труды ВИАМ. Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов», 2013. № 12.
13. ОСТ 1.90208-75 Полосы припоев марок ВПр1, ВПр2, ВПр4 и ВПр7. Общие технические условия. - М., 1975. - 12с.
14. В.С. Р., В.И. Л. Припой, применяемые для пайки материалов авиационного назначения // Труды ВИАМ. Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов», 2013. № 8.
15. Морозов В.А., Пашков И.Н. Использование пластифицированных припоев при пайке сотовых уплотнений // Материалы XIV МНТК «Быстрозакаленные материалы и покрытия. 2016.
16. Морозов В.А., Пашков И.Н., Монастырская Е.В. Пайка сотовых уплотнений газотурбинных двигателей порошковыми припоями в виде лент на пластичных полимерных связующих . Том 2. Апрель 2018 // «Сборник тезисов научно-технического конгресса по двигателестроению» Том 2. Москва, 2018. P. 341.
17. Вольфганг Ш. Способ нанесения клея и припоя на сотовое изделие: pat. 2051014 USA. Германия, 1989. Vol. 6, № 19. P. 1–5.



18. Афанасьев-Ходыкин А.Н., Лукин В.И., Рыльников В.С. Високотехнологичные полуфабрикаты жаропрочных припоев (ленты и пасты на органическом связующем) // Электронный научный журнал Труды ВАИМ. 2013. № №9. Р. статья 2.
19. Пашков И.Н. et al. Индукционная пайка твердосплавных резцов горного инструмента. Выбор состава и формы припоя // Сварочное производство. 2020. № №8. Р. 20–27.
20. Sakai M., Sasaki T., Miyazawa Y. Mechanism of void formation during brazing of Ni paste brazing filler metal // Materials Science Forum. 2021. Vol. 1016 MSF.
21. Коган Б.И. ТЕХНОЛОГИЯ ПАЙКИ БУРОВЫХ РЕЗЦОВ // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», 2004. № 4 (25).
22. Yan S. et al. Numerical and experimental investigation of sintering deformation of brazing powder compacts // J. Adv. Mech. Des. Syst. Manuf. 2018. Vol. 12, № 2.
23. Денискин В.П., Ермаченко В.П., Киров Б.Г. Устройство для дозирования сыпучих материалов: pat. А.с. 654857 USA. СССР: 12, 1977.
24. Восканян Р.. Устройство для дозирования сыпучих материалов: А.с. 651834. СССР: 10, 1979.
25. Уржунцев М.А. et al. Установка для нанесения порошкового припоя: pat. А.с. 880645 USA. СССР: 42, 1981.
26. Скворцов В.Л. et al. Способ изготовления сотового уплотнения: pat. А.с. 1037698 USA. Россия: 33, 1996.
27. Лунев А.Н., Лахно П.П., Филиппов С.В. Дозатор сыпучих материалов: pat. 2246100 С2 USA. Россия: №4, 2005.

28. Филиппов С.В. Моделирование истечения порошкового припоя при изготовлении заготовок сотовых вставок ГТД // Известия- ВУЗов. Авиационная техника. 2005. № 5. Р. 65–67.
29. Лунев А.Н., Филиппов С.В. Моделирование распределения порошкового припоя при нанесении в сотовые уплотнения // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2005. № 4. Р. 12–14.
30. 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 // Сборник тезисов докладов «Гагаринские чтения – 2018» Том 3. Москва, 2018. Р. 453.
31. BrazeCoat | INNOBRAZE [Electronic resource]. URL: <http://innobraze.de/produkte/brazecoat/> (accessed: 19.08.2021).
32. Material Product Data Sheet Amdry Braze Tapes and Preforms [Electronic resource]. 2021. Р. [https://www.oerlikon.com/ecoma/files/DSM\\_0290.0\\_Am](https://www.oerlikon.com/ecoma/files/DSM_0290.0_Am).
33. ВИАМ | Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов [Electronic resource]. URL: [https://catalog.viam.ru/search\\_tag/?tag\\_name=лента порошкового припоя](https://catalog.viam.ru/search_tag/?tag_name=лента порошкового припоя) (accessed: 19.08.2021).
34. Лифшиц М.В., Иванов В.В. Лента припоя: pat. 2741605 USA. 2020. № 19. Р. 1–10.
35. Лифшиц М.В., Иванов В.В. Паяльная лента: pat. 2746732 USA. 2020. № 19. Р. 1–13.
36. Boretius M., Krappitz H., Rass I. Wear protection coatings generated by brazing, sintering and heat treatment in vacuum // Tribol. und Schmierungstechnik. 2017. Vol. 64, № 2.
37. Berson J.A., Cape A.T. BRAZING COMPOSITIONS HAVING EPOLYWNY.

- ALCOHOL AS A BNDER: pat. 3,171,734 USA. США, 1965. Vol. 2. P. 2–3.
38. Willis W., Bradley G. BRAZING TAPE AND METHOD OF MAKING THE SAME: pat. 3.513.013 USA. 1970. Vol. 3. P. 1–3.
39. Howard M., Ronald W. C. FLEXIBLE BRAZING ALLOY TAPE AND METHOD OF MAKING SAME: pat. 4,325,754 USA. 1982. № 19. P. 54–56.
40. Hermanek F.J. Braze filler metal alloy flexible tape: pat. 0686457A1 USA. 1995. P. 1–7.
41. Каблов Е.Н. et al. ЛЕНТА ИЗ ПОРОШКОВОГО ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ПРИПОЯ НА ОРГАНИЧЕСКОЙ СВЯЗКЕ: pat. 2515157 USA. 2013. № 19. P. 1–7.
42. Кнунянц И.Л., Зефиоров Н.С., Кулов Н.Н. и др. Химическая энциклопедия в пяти томах. – М: Советская энциклопедия, 1988.
43. Sharma A. et al. AISI 304 steel brazing using a flexible brazing foil fabricated by tape casting method // J. Korean Inst. Met. Mater. 2017. Vol. 55, № 12.
44. Ospennikova O.G. et al. Advanced developments in the field of the high-temperature soldering of heat resisting alloys // «Aviation Mater. Technol. 2017. № S. P. 144–158.
45. ГОСТ 17325-79. Пайка и лужение. Основные термины и определения. – М., 1979. – 22 с.
46. Маркова И.Ю. Пайка металлических материалов с неметаллическими. Дефекты паяных соединений и контроль качества пайки. Конспект лекций. Информэлектро, 1988. – 53 с.
47. Фролов В.П. и др. Пайка: опыт, искусствл, наука. Сборник докладов научно-технических коференций за 1967-2002 гг. в двух томах . Том 1. (Лоцманов С.Н., Петрунин И.Е., Фролов В.П. Достижения и перспективы развития пайки (1967)). – М.: АльфаДоминанта, 2005. .

48. Понимаш И.Д., Орлов А.В., Рыбкин. Б.В. Вакуумная пайка реакторных материалов. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 192 с.
49. K. Tamaru, Interface Chemistry. - Iwanami Shoten, Publ., 1983. - 272 с.
50. Белевич М.Ю., Гидромеханика. Основы классической теории. - Спб.: - РГГМУ, 2006. - 214 с.
51. Семиохин И.А. Физическая химия. - М: изд. МГУ, 2001. - 272 с.
52. Лоцманов С.Н., Петрунин И.Е., Фролова В.П., Справочник по пайке. - М.: Машиностроение, 1975. - 475 с.
53. Петрунин И.Е., Маркова И.Ю., Металловедение пайки. - М.: Металлургия, 1976. - 264 с.
54. ГОСТ 20485-75. Пайка. Метод определения затекания припоя в зазор. - М., 1975. - 6 с.
55. В.А.Поклад, О.Г.Оспенникова, С.В.Рудницкий, В.П.Монастырский. CALS-технологии в производстве особо ответственных литых деталей из жаропрочных никелевых сплавов и высокопрочных сталей. В кн.: Российская энциклопедия CALS. Авиационно-космическое машиностроение.
56. Монастырский В.П., Кондратьева М.С. Моделирование направленной кристаллизации отливок из никелевых жаропрочных сплавов в установке с водоохлаждаемым кристаллизатором\\ Литейщик России, №1, 2013, сс..23-27.
57. В.А.Поклад, О.Г.Оспенникова, С.В.Рудницкий, А.И.Алферов и др. Применение CALS-технологий в литейном производстве ФГУП ММПП «Салют»\\ Литейное производство, №8, 2007, сс.6-8, с.15-17.
58. ProCAST, торговая марка ESI Group, France, [www.esi-group.com](http://www.esi-group.com).
59. СКМ ЛП ПолигонСофт, торговая марка CSoft Development, РФ, [www.poligonsoft.ru](http://www.poligonsoft.ru).

60. Ланин В., Первенецкий А., Лаппо А. Лазерная пайка SDM - компонентов при высокой плотности монтажа. 2018. Vol. 1, № 3. P. 6–9.
61. Courant R. Variational Method for the Solution of Problems of Equilibrium and Vibration. Bull. Amer. Math. Soc., 49, 1943, p. 1-43.
62. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике/Пер. с англ. - М.: Мир, 1975. - 541с.
63. Тренг Г., Фикс Дж. Теория метода конечных элементов / Пер. с англ. - М.: Мир, 1979. - 392с.
64. Образцов И.Ф., Савельев Л.М., Хазанов Х.С. Метод конечных элементов в задачах строительной механики летательных аппаратов: Учеб. пособие для студентов авиац. спец. вузов. - М.: Высш. шк., 1985. - 392 с.
65. Вержбицкий В.М. Основы численных методов: Учебник для вузов. - М.: Высш. шк., 2005. - 840 с.
66. Бате К.Д., Вилсон Е.Л. Численные методы анализа и метод конечных элементов / Пер. с англ. - М.: Стройиздат, 1982. - 448 с.
67. Норри Д, Де Фриз Ж. Введение в метод конечных элементов / Пер. с англ. - М.: Мир, 1981. 304 с.
68. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов / Пер. с англ. - М.: Мир, 1979. - 392с.
69. Петренко В.Е., Тимофеев Г.С., Бугаев А.Д. Компьютерное моделирование тепловых процессов и его практическое применение В сборнике: Инновационные технологии в науке и образовании. сборник статей победителей IV Международной научно-практической конференции :
70. Коновалов, А.В. Теория сварочных процессов / А. В. Коновалов, А. С. Куркин, Э. Л. Макаров. -М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. – 351 с.
71. Гладков А.С., Подвигина О.П., Чернов О.В. Пайка деталей электровакуумных

- приборов. - М.: Энергия, 1967 - 288 с.
72. Кошелев Н.Н., Лоян А.В., Цаглов А.И., Разработка вакуумной высокотемпературной печи с минимальной неравномерностью температуры в рабочей зоне. Вестник двигателестроения №2, 2015, 25-28 с.
73. Монастырский В.П., Морозов В.А., Монастырская Е.В., Рожкова М.К. Опыт применения компьютерного моделирования технологического нагрева при разработке режима пайки. Технология машиностроения. 2020. № 6. С. 56-61.
74. Аносов В. И., в кн.: Синтетический каучук, под ред. И. В. Гармонова, 2 изд., Л., 1983, с. 277.
75. Либенсон Г.А., Лопатин В.Ю., Комарницкий Г.В. Процессы порошковой металлургии. Т.1. Производство металлических порошков: Учебник для вузов. - М.: МИСиС, 2001. - 368 с.
76. Авиационные материалы : (Справ. в 12 т.) / Под общ. ред. Е.Н. Каблова; Федер. гос. унитар. предприятие "Всерос. науч.-исслед. ин-т авиац. материалов". - 7. изд., перераб. и доп. - [М.] : ФГУП "ВИАМ", 2002.
77. 18 Сорокин Л.И. Свариваемость жаропрочных сплавов, применяемых в авиационных газотурбинных двигателях// «Сварочное производство». 1997 г. выпуск №4.