

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

**ИНСТИТУТ МАШИНОСТРОЕНИЯ**

(наименование института полностью)

Кафедра «Сварка, Обработка материалов давлением и родственные процессы»

(наименование кафедры)

15.04.01 Машиностроение

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Технология и оборудование для пайки

(направленность (профиль))

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

на тему Исследование возможности пайки пеноалюминия

Студент	<u>С.О. Светкин</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)
Руководитель	<u>А.Ю. Краснопевцев</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)
Консультанты	_____	_____	(личная подпись)
	_____	_____	(личная подпись)
	_____	_____	(личная подпись)

Руководитель программы \_\_\_\_\_

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017г.

**Допустить к защите**

Заведующий кафедрой д.т.н., проф., В. В. Ельцов \_\_\_\_\_  
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия) (личная подпись)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017г.

Тольятти 2017

## Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА .....	5
1.1. Сэндвич-панели с заполненным слоем из пеноалюминия.....	5
1.2. Существующие способы изготовления сэндвич-панелей с заполненным слоем из пеноалюминия .....	8
1.2.1. Изготовление сэндвич-панели, заполненной пеноалюминием методом порошковой металлургии .....	9
1.2.2. Изготовление сэндвич-панели с заполняющим слоем из пеноалюминия методом литья.....	13
1.2.3. Изготовление сэндвич-панели с заполняющим слоем из пеноалюминия при помощи пайки.....	16
1.2.3.1. Пайка.....	17
1.2.3.2. Особенности пайки алюминия и его сплавов.....	18
1.2.3.3. Сложности пайки пеноалюминия .....	21
1.3. Задачи магистерской диссертации .....	25
2. Методика исследования.....	26
2.1. Методика исследований пайки пеноалюминия .....	34
2.2. Методика исследований микрошлифов .....	67
3. Результаты исследований .....	76
3.1. Результаты исследования пайки пеноалюминия в вакууме .....	76
3.2. Результаты исследования пайки алюминия путем создания вакуума в паяемом зазоре.....	84
3.3. Результаты исследования пайки сэндвич-панели пеноалюминия .....	91
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	99
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	100

## ВВЕДЕНИЕ

Сложные композиционные материалы всегда представляли огромный интерес для исследования и для промышленности. Они решают многие инженерные проблемы, с которыми обычным материалам не справиться, и соединяют в себе такие характеристики, которые, на первый взгляд, не сочетаются. При этом любые попытки добиться в проектируемых конструкциях схожих комбинаций свойств, стандартными методами приводят к резкому увеличению себестоимости продукта, или к потере всей конструкцией других главных свойств.

Наибольшее распространение на сегодняшний день среди композитных материалов получили сэндвич-панели. Значительную популярность они обрели в строительной отрасли, но также их используют и в авиации, машиностроении, аэрокосмической отраслях. Зачастую сэндвич-панель имеет трехслойную структуру из двух внешних панелей и внутреннего слоя. Иногда панель может содержать и большее количество слоев, такие панели не имеют широкого распространения на рынке и производятся только для решения каких-то конкретных задач.

Материалы, из которых выполняют сэндвич-панели сегодня, достаточно разнообразны.

Внешние панели чаще всего представляют собой листы гладкого цельного и достаточно прочного материала, играющего роль несущей структуры, а внутренний слой обычно выполняют из легких пенистых материалов, обеспечивающих изоляционные свойства сэндвич-панелей.

В последние десятилетия появились особые металлоконструкции в виде сэндвич-панелей с металлическими сотовыми наполнителями. Такие панели способны выдерживать большие нагрузки при незначительном увеличении массы всей конструкции.

Совсем недавно появился новый высокотехнологичный материал, постепенно внедряющийся в различные отрасли промышленности и сферы жизни людей, вспененный алюминий его еще называют пеноалюминий или пористый алюминий, эти названия с почти равной частотой встречаются в научных изданиях. Мы же будем называть его пеноалюминий. Сегодня этот материал довольно дорог, а его промышленное производство налажено лишь на нескольких заводах в мире, но уникальная комбинация его характеристик и большой спектр возможного применения сулят ему большое будущее.

В результате проведенных исследований и вследствие необычных свойств пеноалюминия ученые пришли к выводу, что одним из лучших способов использования данного материала, при котором он мог бы реализовать все свои положительные стороны, является применение его в качестве наполнителя в сэндвич-панелях.

Неразъемные крупногабаритные изделия из алюминия на сегодняшний день соединяют преимущественно сваркой. Сварка, несмотря на явные преимущества по сравнению с пайкой, имеет существенный недостаток – невозможность создания широких протяженных швов, например для создания сэндвич-панели с заполненным слоем из пеноалюминия.

Целью данной магистерской диссертации является исследование возможности пайки пеноалюминия.

# 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

## 1.1. Сэндвич-панели с заполненным слоем из пеноалюминия

Сэндвич-панели с заполненным слоем из пеноалюминия именуют вспененный пористый слой алюминиевого сплава, покрытый (плакированный) с двух сторон листами алюминиевого сплава.

Впервые пеноалюминий появился приблизительно в 1950 году, практически в то же время, что и пены из пластиков, среди которых примечателен такой материал, как пенополиуретан, широко используемый при изготовлении мебели и в качестве обивки салона автомобилей [28]. Пенополистирол – один из широко употребляемых материалов при производстве стаканчиков для горячих продуктов, а также упаковки для чипсов. Вспенить пластик – несложная задача, вспенить же алюминиевый сплав очень проблематично. Поэтому сэндвич-панели из данного материала появились гораздо позже своих аналогов из других наполнителей. Только к середине 1990-х годов ученым удалось освоить все тонкости получения пеноалюминия и вывести его производство на уровень, близкий к промышленному [31]. При этом прямых конкурентов у сэндвич-панелей с таким высокотехнологичным наполнителем, как пеноалюминий сегодня нет, потому что в тех сферах, где предполагается его применение, не все конкуренты решатся попробовать свои силы.

Вспененным металлам присущи сложные системы микро- и макроструктуры. Микроструктуру вспененных материалов, а также механические свойства их можно регулировать, меняя состав сплава, параметры режимов вспенивания и охлаждения, изменяя среду при этих операциях. Механические свойства и структура подвержены изменениям при помощи последующих операций термической обработки после вспенивания. Немаловажным фактором влияния на механические свойства конструкции сэндвич-панели служат: частота, вариативность и постоянство размера пор;

кривизна стенок поры; открытая ячеистая структура или закрытая ячеистая структура. В конструкциях с большими нагрузками, отдают предпочтение закрытым ячеистым структурам. В конструкциях, используемых в качестве фильтров и не испытывающих огромные нагрузки, отдают предпочтение открытым ячеистым структурам пен. Однако при всей вариативности своих характеристик, пеноалюминий всегда остается легким, прочным, способным поглощать большое количество механической энергии, электромагнитное излучение, материалом. Как и все пеноматериалы, пеноалюминий обладает завидной тепло- и шумоизоляцией. Пеноалюминий, в отличие от большинства других пен, обладает примечательной способностью повторного использования путем переплавки [11].

Следует отметить, что ни одна характеристика металлической пены не является уникальной, большинство характеристик присутствуют в пенах из других материалов. Коммерческий интерес к вспененным металлам – в частности, к пенам из алюминиевых сплавов – заключается в уникальности комбинации свойств этого материала, неприсущих ни одному другому материалу. Вспененные металлы наиболее конкурентоспособны в конструкциях, где задействовано не одно, а как минимум два и большее характеристик этого материала. Как только вспененный алюминий появился на рынке, им заинтересовались разные отрасли. Благодаря своим физическим свойствам, пеноалюминий нашел применение в различных областях. Вспененные алюминиевые сплавы применяются в основном в качестве структурных материалах в легких конструкциях, в качестве материалов поглощения энергий удара, а еще в качестве изоляционных материалов.

Пеноалюминий это ячеистый материал с закрытыми или открытыми порами. Вариативность размеров пор, изменяющихся от сотой доли миллиметра до 20 – 30 мм и более обусловлена зависимостью от параметров технологии производства. Вспененные алюминиевые сплавы обладают плотностью, варьирующейся в пределах от 1,5 до 0,3 и менее г/см<sup>3</sup> [31]. Вспененным алюминиевым сплавам, характерны и присущи главные

достоинства исходного материала: коррозионная стойкость, свариваемость, хорошая обрабатываемость, высокая удельную прочность. Вспененный алюминий хорошо окрашивается и склеивается. Вес изделий из вспененного алюминиевого сплава не превышает веса аналогичных изделий из пластмасс или дерева, при этом вспененный алюминиевый сплав не выделяет токсинов, не поддается горению, термо- и биостоек, не поддается разрушению воздействием горюче-смазочных веществ, растворителей, радиации и ультрафиолетовых лучей. Пеноалюминий плавает в воде, но не набухает, под действием открытого огня, размягчается, если температура нагрева превышает 650 °С.

В таблице 1 приведены физико-химические свойства пеноалюминия.

**Таблица 1 - Физико-механические свойства пеноалюминия (при  $\rho=0,7$  г/см<sup>3</sup>) [29]**

Свойства	Значение
Теплопроводность, Вт/(м · град)	< 5
Прочность, МПа	32
Звукопроводимость, дБ/см	< 1,1
Электропроводимость, МСм/м	< 0,2
Модуль Юнга (E), МПа	450
Демпфирование, % при $P_{const}$	75

## **1.2. Существующие способы изготовления сэндвич-панелей с заполненным слоем из пеноалюминия**

Сам по себе пеноалюминий не является оптимальным решением инженерных задач и проблем. Оптимизация жесткости такого материала как раз и привела к созданию сэндвич-панелей с прочными внешними листами из того же металла, что и сама пена, а не к простым панелям из вспененного материала. Сэндвич-панель с заполненным слоем пеноалюминия представлена на рисунке 1.



**Рисунок 1 - Сэндвич-панель с заполняющим слоем из  
пеноалюминия с закрытой ячеистой структурой [27]**

Большой интерес в последнее время представляют многослойные конструкции, в которых сердцевина изготовлена из пеноалюминия, придающая жесткость при сохранении легкости. Плакирующие листы могут быть изготовлены из алюминиевых сплавов, титановых сплавов, стали,

сверхпрочных синтетических волокон, которые обеспечат прочность конструкции. Эти листы могут быть покрыты декоративными элементами из пластика, дерева, стекла и других материалов.

Известны такие отрасли применения сэндвич-панелей с заполняющим слоем пеноалюминия, как машиностроение, строительство, аэрокосмическое производство, бронетехника.

***Области применения сэндвич-панелей с заполняющим слоем из пеноалюминия:***

*транспорт* – перегородки, полы, стеновые внутренние панели в авиалайнерах, морских и речных судах, в железнодорожных вагонах; бампера и кожуха автомобиля, шумопоглотители, фильтрующие элементы у глушителя;

*строительство* – пожаробезопасная облицовка, не подверженная био-разложению, стены, напольные и потолочные покрытия (подвесные потолки) в качестве электромагнитных отражателей;

*промышленность* – шумо- и теплоизоляционные корпуса для оборудования.

*военная промышленность* – баллистическая защита бронетехники и взрывоопасных объектов, скоростные и устойчивые (с пониженным центром тяжести) морские средства передвижения.

Известно два способа получения сэндвич-панелей, заполненных пеноалюминием. Подробнее рассмотрим их ниже.

### **1.2.1. Изготовление сэндвич-панели, заполненной пеноалюминием методом порошковой металлургии**

Метод порошково-металлургического процесса производства сэндвич-панели, заполняющий слой у которой, выполнен из пеноалюминия, именуемый AFS – Aluminium Foam Sandwich, был разработан в 1994 году Институтом Фраунгофера в городе Бремен, совместно с германским заводом по производству автомобилей Karmann GmbH [27].

Самый известный своей простотой порошковый метод получения сэндвич-панели, заполненной пеной из алюминиевого сплава включает главную процедуру смешивание металлических порошков, либо порошков различных сплавов или смесей – со вспенивающим веществом (порофором). После этого, смесь подлежит уплотнению до получения плотной заготовки – это необходимо, чтобы при вспенивании выделяющийся газ не улетучивался из материала.

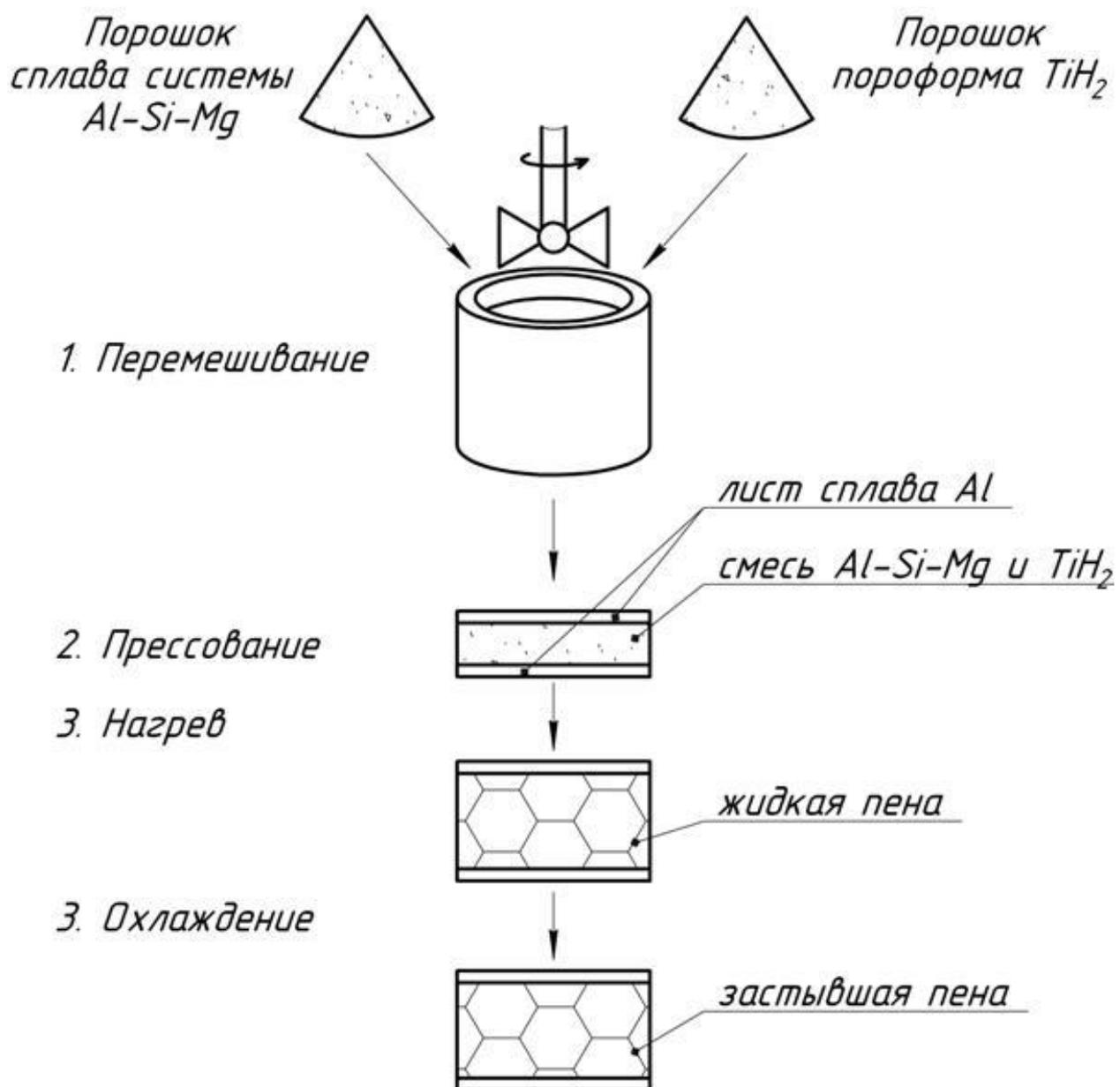
Уплотнение достигается при помощи холодного прессования порошковой смеси с последующей холодной экструзией, или при помощи проката металлического порошка. Трение частиц порошка друг об друга в процессе этих операций разрушает оксидную пленку на них и соединяет частицы вместе. Производство требует тщательности, по причине возможности возникновения излишней пористости или возможных других различных дефектов, способных привести к неудовлетворительным результатам при выполнении последующих операций.

Помимо, холодного прессования, порошковая смесь может быть спрессована с подогревом до температуры ниже разложения порофора. Но есть и исключения, частный случай, когда можно спрессовать порошок при температурах превышающих температуру разложения пороформа (вспенивающего вещества) – это обусловлено плотной запрессовкой частиц пороформа в металлическом порошке, что приводит к нагреву до температуры, не превышающей температуру плавления их. Разложение пороформа сдерживается высоким давлением на него. Структура пеноматериалов сильно зависима от температур прессования и спекания, а также длительности последней. Используемые сплавы, скорость нагрева и длительность нагрева играет важную роль на образование пористой структуры [23].

Метод горячего прессования применяется, как правило, в большинстве при производстве вспененных алюминиевых сплавов, а не сэндвич – панелей. В качестве вспенивающих агентов выступают добавки в размере 0,5% - 1%

от общей массы: гидрид титана ( $TiH_2$ ), бикарбонат натрия ( $NaHCO_3$ ) или карбонат кальция ( $CaCO_3$ ).

Процесс такого производства представлен на рисунке 2.



**Рисунок 2 – Принцип порошково-металлургического производства сэндвич-панели с заполненным слоем из пеноалюминия 1) Перемешивание порошков. 2) Трёхслойный композит с центральным слоем из уплотнённой смеси металлических порошков и термически измененного пенообразователя  $TiH_2$ . 3) Нагретая расширенная**

**трехслойная композитная панель. Лицевые листы остаются без изменений, а центральный слой подвергается структурным изменениям.**

#### **4) Сэндвич-панель затвердевшая, остывшая и полностью готовая.**

Метод горячего прессования позволяет вспенивать алюминиевые сплавы, пористость которых, после вспенивания будет варьироваться в пределах 63 - 89%, и диаметром пор в один миллиметр. Этот же метод является основой технологии производства сэндвич-панелей, заполненных пеноалюминием благодаря тому, что позволяет легко получать заготовки, имеющие изначально листовую форму.

Технология изготовления таких сэндвич-панелей начинается с плакирования (совместная прокатка) двух обычных листов металла с листом вспениваемого материала, размещенного между ними [30]. Затем заготовку формируют с применением обычных штамповочных операций с последующим нагревом.

Немаловажным фактором, при формировании пор, является степень чистоты металлических порошков от различных загрязнителей: влага, пыль. Загрязнители и примеси увеличивают размер пор. В случае, когда размер пор больше, чем толщина плакирующего слоя, прочность уменьшается. Использование сплавов алюминия содержащих магний, вместо меди, повышает коррозионную стойкость панели.

Порошково-металлургический способ изготовления сэндвич-панелей, заполненных пеноалюминием позволяет:

- изготавливать различные по форме панели с прочным соединением плакирующих листов к пеноалюминию;
- получать мелкопористую структуру;
- получать вспененный алюминий с закрытой ячеистой структурой.

К недостаткам этого способа производства можно отнести:

- использование дорогих металлических порошков и порообразователя;

- вспененный алюминий, возможно, получить только из узкой группы сплавов, чаще с низкой коррозионной стойкостью;
- большая стадийность процесса;
- панели могут быть плакированы листами, только из алюминиевых сплавов;
- вспениваемый слой может иметь только структуру с закрытыми ячейками;
- поры содержат газовую составляющую пенообразователя;
- дороговизна производства.

### **1.2.2. Изготовление сэндвич-панели с заполняющим слоем из пеноалюминия методом литья**

В Тольяттинском государственном университете на кафедре сварки был разработан способ изготовления сэндвич-панелей, заполняющий слой которой выполнен из пеноалюминия, методом литья. По этой технологии плакирующие листы сэндвич-панели могут быть стальными или титановыми. Между плакирующими листами находится слой пены, получаемый путем заливки перегретого алюминиевого расплава в форму, заполненную гранулами из водорастворимых солей с температурой плавления выше температуры нагрева расплава и формы, с плотностью выше плотности алюминиевого расплава, а после затвердевания панель извлекается из формы и помещается в воду для вымывания соли [23]. Процесс заключается в засыпке гранул из водорастворимой соли NaCl и связующего вещества - желатина между двумя листами, заложенными в стальную литейную форму. Предпочтение было отдано соли NaCl из-за ее низкой стоимости, плотность и температуру плавления большую, чем у алюминия, а также низкую склонность к химическим взаимодействиям с алюминием. Большая плотность соли позволяет гранулам не всплывать во время заливки. Перед заливкой гранулы соли должны быть закалены при температуре 300 °С, а

пластины предварительно покрыты флюсом «NOCOLOC». Флюс «NOCOLOC» это белый порошок, состоящий из смеси калий фтор алюминиевых солей с общей формулой  $K_{1-4}AlF_{4-6}$ . Флюс обладает диапазоном температуры плавления от 565 °С до 572 °С. Этот флюс выбран не случайно, он некоррозивен и негигроскопичен, вступает в реакцию с алюминием только в расплавленном состоянии.

Заливку алюминиевого расплава производят в предварительно подогретую форму. Чаще используют алюминиевый сплав марки А7, состав сплава представлен таблицей 2

**Таблица 2- Химический состав в % сплава А7 [2]**

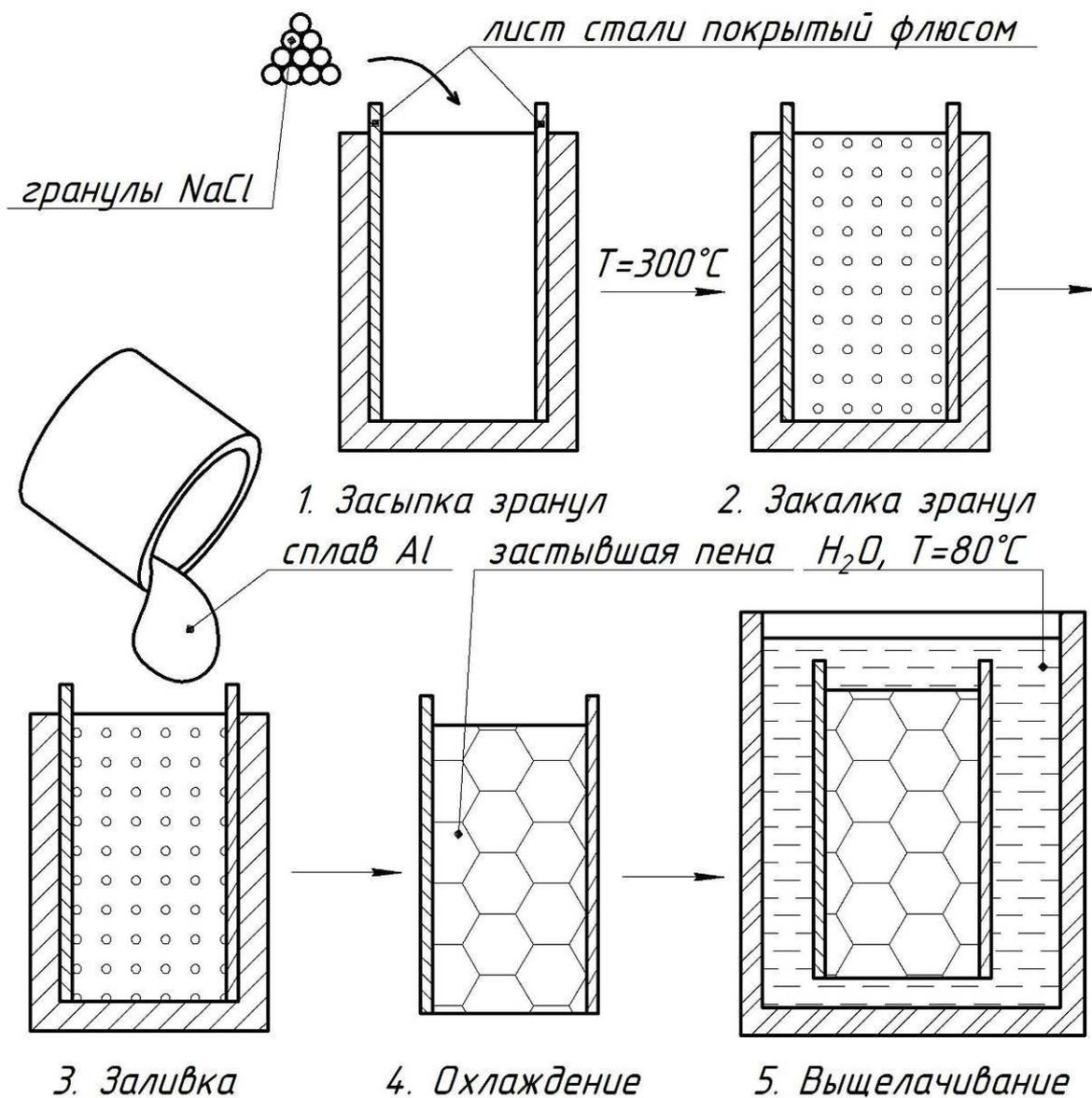
Fe	Si	Ti	Al	Cu	Zn	Примесей
до 0,16	до 0,16	до 0,02	min 99,7	до 0,01	до 0,04	прочие, каждая 0,02; всего 0,3

Алюминиевый сплав, несмотря на температуру плавления 660 °С, перед заливкой нагревают до температуры 700-950 °С, по причине высокой теплопроводности алюминия. После охлаждения и извлечения отливки из формы она помещается в горячую воду для выщелачивания соли. Процесс литейного способа производства сэндвич-панелей, заполненных пеноалюминием представлен на рисунке 3.

Литейный способ изготовления сэндвич-панелей, заполненных пеноалюминием:

- Позволяет регулировать размеры пор путем изменения размера гранул;
- Позволяет повторно использовать порообразующий материал;
- Существенно дешевле порошкового метода;
- Позволяет использовать в качестве вспененного материала практически любой алюминиевый сплав;

- Позволяет производить композитные материалы со строго заданными параметрами.



**Рисунок 3 – Принцип литейного производства сэндвич-панели из вспененного алюминия**

К недостаткам этого способа производства можно отнести:

- Невозможность использования лакирующих листов для сэндвич-панели из алюминиевых сплавов;
- Трудности при заливке сложных форм;

- Уменьшение размера гранул ухудшает качество заливки;
- Применяемые стальные листы коррозионно не стойки, а титановые очень дороги;
- Невозможность получения пеноалюминия с закрытой ячеистой структурой.

На сегодняшний день, существующие способы производства сэндвич-панелей, заполненных пеноалюминием, трудоемки и дороги (порошково-металлургический способ), или не дают возможности изготавливать сэндвич-панели, плакированных листами из алюминиевых сплавов (литейный способ).

Производство сэндвич-панелей, плакируемых алюминиевым сплавом предпочтительнее, так как такие панели:

- Равной прочностью всей конструкции;
- Одинаковый коэффициент термического расширения исключает отслаивание или напряжения в месте соединения плакирующего слоя и пеноматериала;
- Плакирующие листы из алюминиевых сплавов обладают отличной коррозионной стойкостью, в отличие от стали.

Пайка, возможно, будет лишена недостатков существующих способов изготовления сэндвич-панелей, включающих пеноалюминий. Попробуем это реализовать.

### **1.2.3. Изготовление сэндвич-панели с заполняющим слоем из пеноалюминия при помощи пайки**

На сегодняшний день, существующие способы производства сэндвич-панелей с заполняющим слоем из пеноалюминия трудоемки и дороги (порошково-металлургический способ), или не дает возможности изготавливать сэндвич-панели, плакированные листами из алюминиевых сплавов (литейный способ). Пайка, возможно, будет лишена недостатков

существующих способов изготовления сэндвич-панелей, заполненных пеноалюминием. Попробуем это реализовать при помощи пайки.

### 1.2.3.1. Пайка

Пайкой называется образование соединения с межатомными связями путем нагрева соединяемых материалов ниже температуры их плавления, смачивания их припоем, затекания припоя в зазор и последующей его кристаллизации [3].

Пайка как способ соединения металлов, известен уже в течении многих веков. Появление соединения с межатомной связью, вследствие нагрева соединяемых материалов при температурах ниже их температуры плавления, смачивания их припоем, затеканием в зазор припоя с последующей его кристаллизацией называется пайкой [27].

Самое главное достоинство пайки - это возможность широкого выбора температуры процесса. Нагрев соединяемых деталей можно задать таким, что он не вызовет разупрочнения материала соединяемых деталей и даже потери других свойств. Использование общего нагрева соединяемых деталей, либо локального с очень низким градиентом температуры практически полностью исключает вероятность возникновения термических напряжений, а, следовательно, и деформаций.

Процесс пайки позволяет [21]:

- соединять разнородные материалы, включая и неметаллы;
- соединять детали изделия не только по контуру, но и по всей поверхности примыкания;
- получать изделия с множественным количеством паяных соединений за одну операцию общего нагрева;
- получать соединения в скрытых и малодоступных местах изделий;
- выбирать температуру пайки, путем подбора припоя, это дает возможность сохранить механические свойства паяемых деталей и также совместить нагрев для пайки с термической обработкой.

Все эти преимущества позволили пайке найти применение в таких важнейших отраслях машиностроения: автомобилестроение, ракетостроение, радиотехника, роботостроение, производство режущего инструмента, военная и атомная промышленности.

Сегодня существует особый вид пайки, так называемая автовакуумная пайка.

### **1.2.3.2. Особенности пайки алюминия и его сплавов**

Алюминий долгое время считался труднопаяемым и даже не паяемым металлом; причиной тому стало то, что пайку алюминия и его сплавов пытались осуществить легкоплавкими припоями и флюсами, применимых для пайки сталей и медных сплавов. Паяного соединения не получалось, ведь припой не смачивали поверхность алюминиевых сплавов, так как эти флюсы для сталей и медных сплавов не удаляли оксидную пленку с поверхности алюминия. Трудности пайки алюминия и его сплавов обусловлены физико-химическими свойствами алюминия, в частности, высокой химической стойкости его оксида. Пайка алюминиевых сплавов обладает следующими особенностями.

Поверхность алюминиевого сплава при пайке всегда покрыта тугоплавким ( $T_{пл.}=2050\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) химически стойким оксидом ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), затрудняющим контакт расплавленного жидкого припоя с алюминием. Образование естественной окисной пленки на алюминии при соприкосновении металлической поверхности алюминия с кислородом воздуха происходит очень быстро. Естественная окисная пленка на алюминиевых сплавах прозрачна, а потому невидима. Окисная пленка уже в течении первых нескольких секунд достигает определенной толщины, затем ее рост замедляется и продолжается в течении 70-80 дней с дальнейшим прекращением [7]. Рост толщины окисной пленки на алюминии представлен на рисунке 4.

Образование на поверхности алюминия слоев оксида сравнительно небольшой толщины и отношение объема оксида алюминия к объему окислившегося металла равно 1,214 – это свидетельствует о сплошной оксидной пленке, покрывающей металл, отсутствию пор и трещин в первично образовавшемся слое оксидной пленки, через которые кислород атмосферы мог бы проникнуть в металл. Взаимодействие кислорода воздуха с алюминием осуществляется благодаря взаимному проникновению кислорода воздуха и алюминия через окисную пленку. После достижения окисной плёнки толщины 3-3,5 нм, она становится непреодолимым барьером диффузии кислорода и металла навстречу друг другу. Толщина образовавшегося слоя (нм) может быть вычислена по формуле:

$$\delta = \frac{P \cdot 0,213}{\gamma \cdot k},$$

где P – увеличение массы образца;  $\gamma$  – плотность пленки; k – коэффициент шероховатости поверхности, который для алюминиевых сплавов с обычным состоянием поверхности принимают равным 2.

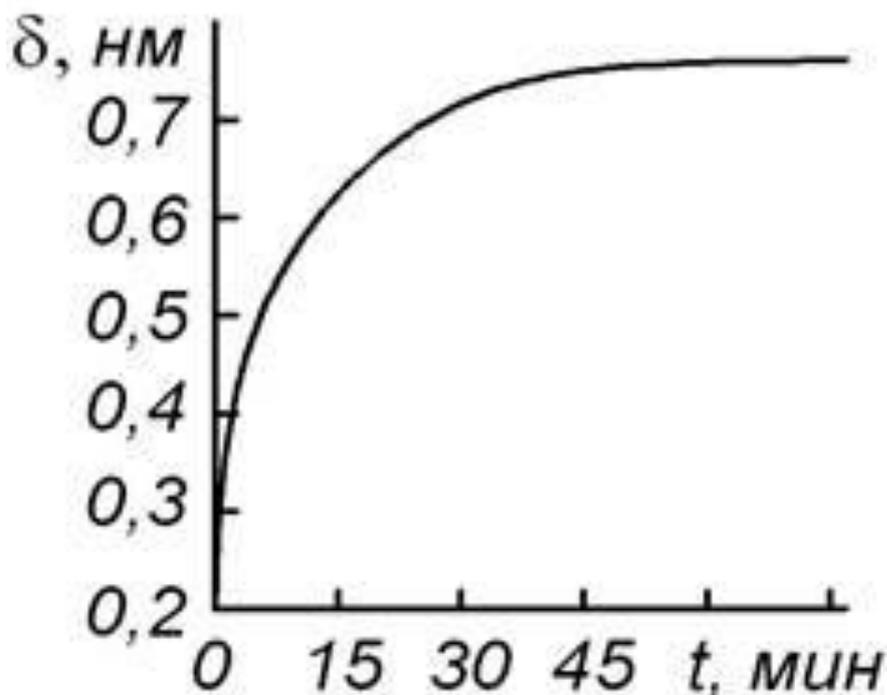


Рисунок 4 – Рост толщины оксидной пленки на алюминии [15]

Можно условно считать, что окисная пленка, образующаяся на поверхности алюминиевых сплавов в обычной атмосфере при нормальных условиях, состоит из двух слоев. Внутренний слой, который прилегает к металлу – барьерный. Он очень плотный, находится в аморфном состоянии и склонен к переходу в кристаллическую форму, после продолжительной выдержки на воздухе или же после двух часов выдержки при температуре 200 °С. Наружный слой воздушно-окисной пленки имеет пористую проницаемую структуру, которая содержит воду, ионы гидроксильных групп. Толщина наружного слоя воздушно-окисной плёнки зависит от времени выдержки на воздухе, влажности окружающей среды.

Пайку можно произвести, удалив или разрушив окисел непосредственно во время пайки.

Алюминий и его сплавы обладают большим относительным коэффициентом линейного расширения ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ). Линейный коэффициент расширения алюминия в интервале температур 20-400 °С равен  $26,5 \cdot 10^{-6}$ . Для сравнения коэффициент линейного расширения у железа в том же интервале температур равен  $13,9 \cdot 10^{-6} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ , у меди –  $18,1 \cdot 10^{-6} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$  [15]. Это вызывает значительные деформации конструкции при нагреве во время пайки, что создает трудности получения точных размеров изделия, ведь оснастка для пайки алюминия изготавливается из коррозионностойких аустенитных сталей или хромоникелевых сплавов, коэффициент линейного расширения у которых ( $16,96 \cdot 10^{-6} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$  при 300-600 °С) значительно отличается от коэффициента линейного расширения алюминиевых сплавов.

Алюминий характерен высокой теплоемкостью. Теплоемкость алюминия в интервале температур 0-300 °С равна 0,953 кДж/(кг•°С), а это в 2,5 раза превышает теплоемкость меди в аналогичном интервале температур, равной 0,397 кДж/(кг•°С) [24]. Поэтому пайка изделий из алюминиевых сплавов требует достаточно мощные источники тепла для нагрева изделий, а это приводит к появлению широкой зоны разогрева и значительным деформациям паяных изделий.

Припой, придающие паяным соединениям алюминиевых сплавов высокую коррозионную стойкость и механическую прочность паяных – это сплавы на основе алюминия. По этой причине разность между температурой пайки и температурой, при которой паяемый сплав алюминия может разрушиться под действием собственного веса, сравнительно мала, в отличие от пайки большинства других металлов. Например, пайка эвтектическим силумином ведется при нагреве до температуры 610 °С, а температуры начала плавления широко используемых для пайки алюминиевых сплавов АМг и АМц составляет 630 и 640 °С.

Используемые при пайке алюминия и его сплавов флюсы, служат активной коррозионной средой для паяемых материалов, поэтому остатки флюса требуют тщательного удаления после пайки.

Пайка алюминиевых сплавов припоями на основе цинка может вызвать эрозию основного металла, так как паяемый металл, в процессе пайки, активно растворяется в расплавленном припое. По причине высокой растворимости алюминия и его сплавов в цинковых припоях и повышения температуры ликвидуса, образующихся при этом расплавах затрудняется заполнение припоем зазоров между паяемыми деталями.

### **1.2.3.3. Сложности пайки пеноалюминия**

Вышеперечисленные особенности и сложности пайки алюминия и его сплавов также применимы и к пайке пеноалюминия. Пеноалюминий преимущественно используют в составе сэндвич-панелей. Следовательно, наиболее частое паяемое соединение предполагается между пеноалюминием и алюминием.

Особенности конструкции сэндвич-панелей, заполняющий слой которых, выполнен из вспененного алюминиевого сплава - является большая площадь сплошного паяного шва между слоем лакирующего листа и вспененного алюминиевого слоя. Конструктивные особенности этой детали затрудняют удаление остатков флюсов, это связано с весьма трудоемкими и

дорогостоящими операциями промывки и нейтрализации остатков флюсов. Например, операция пайки теплообменников во флюсовой ванне длится 1-2 мин, а отмывка остатка флюса в проточной горячей воде – в течение нескольких часов. Вторым существенным недостатком использования флюсовой ванны является – высокая стоимость флюсов и их большой расход.

Большая площадь сплошного паяного шва не позволяет применять флюсы, так как большинство флюсов для алюминиевых сплавов коррозионноактивны и требуют последующего их удаления, что затруднительно. А использование флюса «NOCOLOK» рискованно, так как он обладает достаточно большой температурой плавления. Известно, что благодаря контактно-реактивному плавлению, возможна бесфлюсовая пайка. Согласно ГОСТ 17325-79, контактно-реактивное плавление – это плавление паяемых материалов в контакте между собой или с технологическим покрытием, или с металлической подкладкой при температуре ниже температуры плавления наиболее легкоплавкого из них [3].

Это вид спая характеризуется особенностями [18]:

1. Процесс пайки происходит при температурах ниже точек плавления взаимодействующих металлов;
2. Образование спая начинает происходить при отсутствии жидкой фазы;
3. Во время образования жидкой фазы, взаимодействующие металлы достигли предела насыщения диффундирующим компонентом;
4. Процесс стремится к увеличению жидкой фазы в паяемом шве [18].

Контактно-реактивный спай осуществим, в случае, когда соединяемые металлы образуют эвтектики или непрерывные твёрдые растворы с минимумом по кривой ликвидуса [9]. Для контактно-реактивного плавления металлов необязательно: взаимная диффузия, образование твердых растворов и химических соединений на границе металлов.

Основными факторами, определяющими процесс контактно-реактивной пайки, являются химический состав контактируемых материалов, качество поверхности паяемых деталей, температура, время выдержки пайки,

усилие сжатие деталей, толщина прокладки (покрытия) и другие факторы [22].

На процесс контактно-реактивного плавления алюминия с другими металлами влияют:

- Свойства оксидов, присутствующих на контактируемых металлах;
- Толщина этих оксидов;
- Взаимная растворимость металла с алюминием;
- Содержание алюминия в эвтектике;
- Атмосфера пайки.

Применение защитной атмосферы или вакуума предотвращает окисление контактирующих металлов при нагреве и в процессе пайки и этим способствует взаимодействию атомов поверхностных слоев контактирующих металлов. Жидкая фаза, образующаяся при нагревании в месте контакта паяемых деталей, служит припоем и при затвердевании образует паяный шов. Существенное значение имеет содержание алюминия в эвтектике, образующейся при контактно-реактивном плавлении (таблица 3). Чем больше содержание алюминия в эвтектике, тем тоньше должен быть слой покрытия.

Экспериментальным путем многие исследователи выяснили главную особенность контактно-реактивного плавления: При отсутствии окисных пленок на металлах, образование эвтектики в месте соприкосновения происходит мгновенно (примерно за  $10^{-2}$  с).

Из данных, представленных в этой таблице, очевидно, что для контактно-реактивного плавления алюминиевого сплава наименее благоприятно олово, по причине низкой растворимости алюминия в получаемой эвтектике при температуре 230 °С.

При выборе металла для контактно-реактивной пайки, а в нашем случае для алюминия и его сплавов, немаловажным значением обладают свойство окисной пленки металла и упругость испарения металла, которая характеризуется способностью переноса его сквозь дефекты окисной пленки.

**Таблица 3- Свойства эвтектик, образуемых алюминием с некоторыми металлами [12]**

Эвтектика	Тпл Эвтектики, °С	Содержание Алюминия в эвтектике, %	Пластичность эвтектики	Т контакта, °С	Вакуум, Па	Время образования жидкой фазы, с	Ткип, оС, в вакууме 0,01,Па
Al-Ni	640	94,3	-	642	0,04	0	934
Al-Si	577	88,2	Пластичная	579	0,08	800	1094
Al-Cu	548	67	Хрупкая	550	0,09	180	1025
Al-Ge	424	47	«	427	0,04	1200	1149
Al-Ag	566	29,5	«	568	0,07	300	828
Al-Mg	437	32,3	«	-	-	-	325
Al-Zn	382	5,0	Пластичная	384	0,04	300	250
Al-Sn	228	0,5	-	230-580	0,04	1200	1002

Согласно данным в представленной выше таблице, самое длительное время требуется для образования жидкой фазы эвтектике системы Al-Sn, что очевидно, так как при температуре 230 °С олово обладает низкой упругостью паров, а окисная пленка алюминия обладает малой проницаемостью при этой температуре [26]. Эвтектика системы Al-Ni обладает высокой температурой плавления равной 642 °С, что даже выше температуры солидуса некоторых алюминиевых сплавов [19]. Меди и серебру свойственно образовывать с алюминием хрупкие интерметаллиды. По времени появления жидкой фазы, наиболее подходящий для контактно-реактивного плавления металл - цинк. При этом цинк с алюминием образует пластичную эвтектику. Глядя, на диаграмму состояния системы Al-Zn (рисунок 5), очевидно, что алюминий образует с цинком эвтектику при температуре 382 °С. При этом температура плавления контактируемых металлов значительно выше температуры, образуемой эвтектики. Температура начала плавления цинка 419 °С,

алюминия 660 °С. Максимальная растворимость алюминия в цинке при температуре плавления эвтектики 382 °С достигает 2,5 % (ат.), растворимость же цинка в алюминии - 33,5 % (ат.).

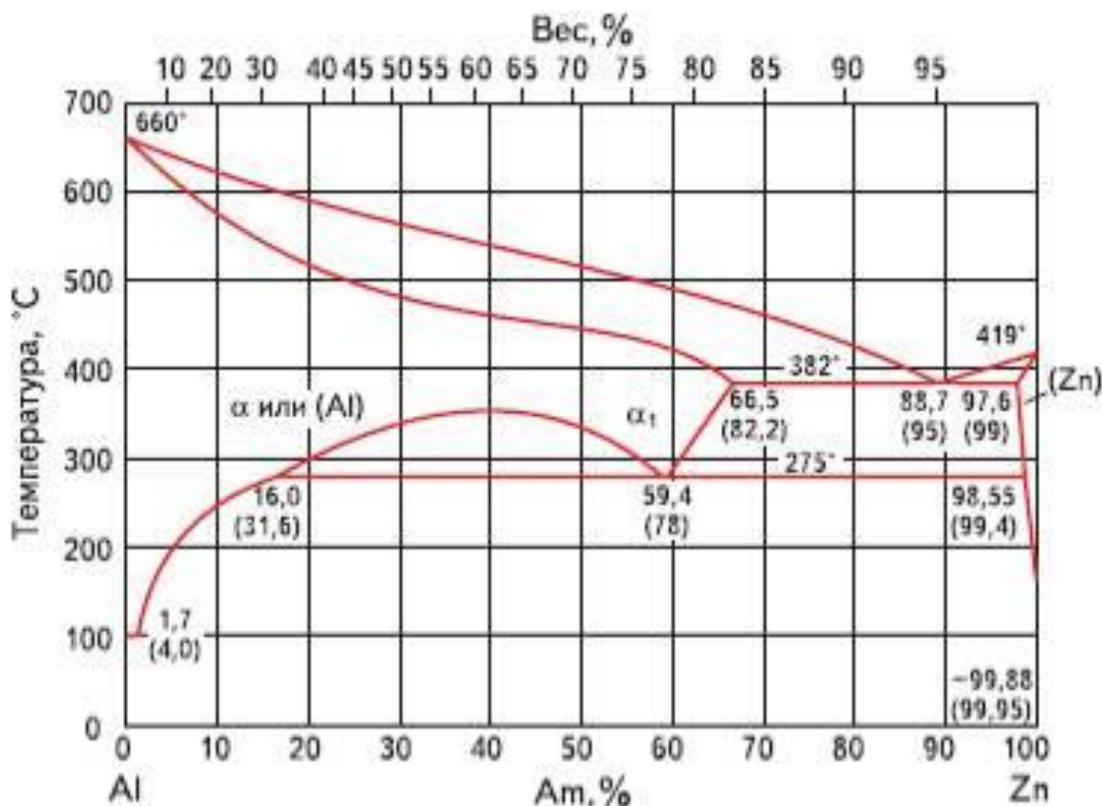


Рисунок 5 – Диаграмма состояния Al-Zn [15]

### 1.3. Задачи магистерской диссертации

Приведенные, выше размышления предполагают возможность пайки сэндвич-панелей, заполненных пеноалюминием, и плакируемых листами из алюминиевых сплавов. В процессе пайки будет проходить с применением контактно-реактивного плавления припоем цинка и созданием вакуума в паяемом зазоре.

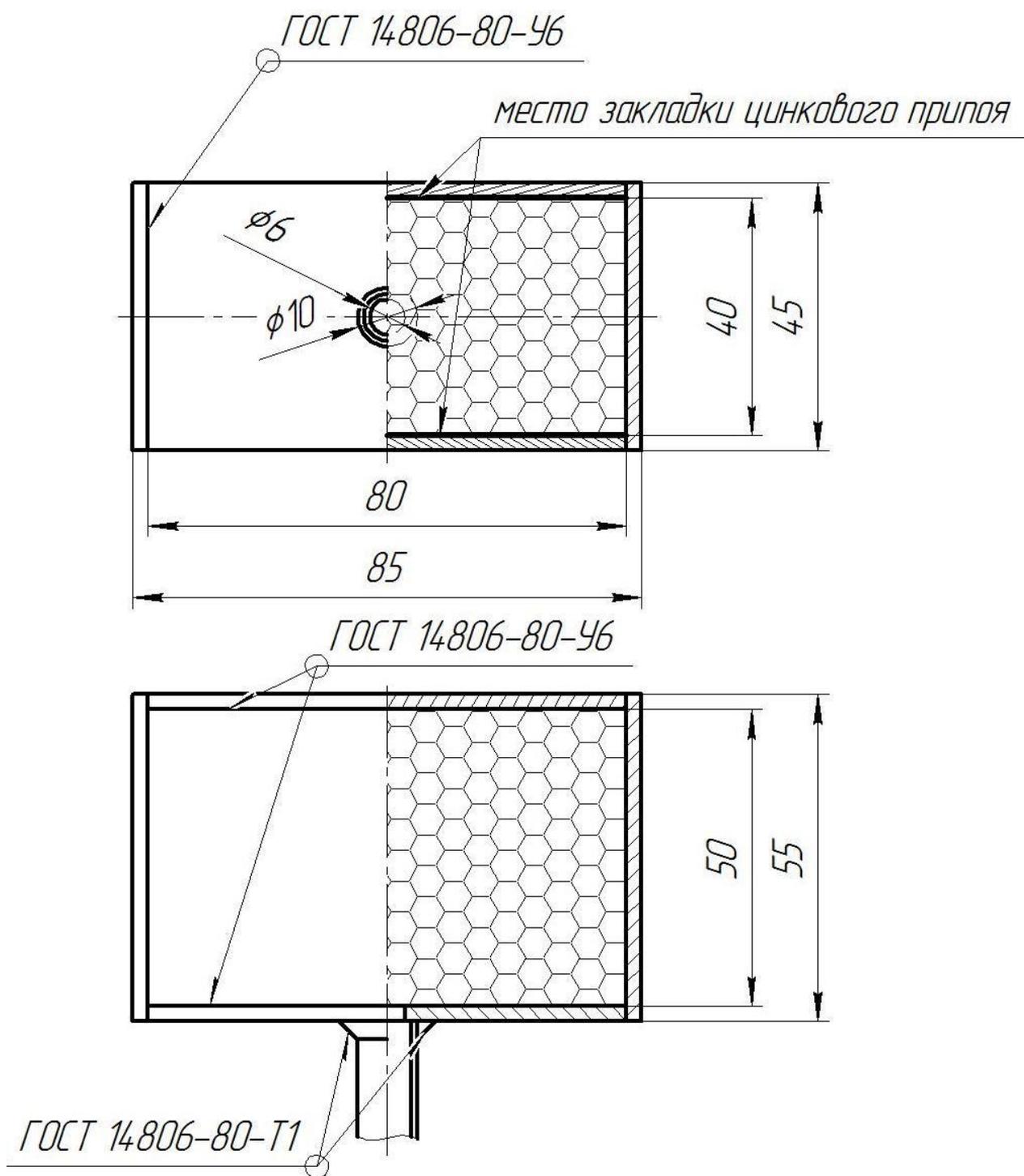
Таким образом, задачами магистерской диссертации является:

1. Исследование возможностей пайки алюминия и пеноалюминия.
2. Разработка технологических рекомендаций к процессу пайки пеноалюминия.

## 2. Методика исследования

Тема нашей магистерской диссертации «Исследование возможности пайки пеноалюминия». Как уже говорилось ранее, особенность нашей конструкции большая площадь паяного шва. Использование флюсов недопустимо. Бесфлюсовая пайка будет реализована контактно-реактивным плавлением в герметичном паяемом зазоре. Отсутствие флюса будет компенсировано созданием вакуума непосредственно в самом зазоре. Вакуум будет создаваться путем откачки воздушной среды из паяемой конструкции механическим вакуумным насосом. В качестве припоя будет служить фольга из цинка.

Так как конструкция затрудняет использование флюсов, был выбран контактно-реактивный способ создания паяного соединения. В качестве прослойки был выбран цинк. Цинк при нагреве быстро окисляется. Поэтому было принято решение производить пайку в вакууме. А так как использование вакуумных печей для производства сэндвич-панелей из вспененного алюминия экономически не оправдано, было принято решение создавать вакуум непосредственно в паяемом зазоре. Для этой цели была разработана конструкция паяемой заготовки (рисунок 6), в которой будет создаваться вакуум, путем откачки воздуха вакуумным насосом во время пайки. Герметичность панели будет достигнута путем соединения элементов конструкции аргонодуговой сваркой.



**Рисунок 6 – Сборочный чертеж образца**

Герметичность конструкции и вакуум обеспечат прижатие плакирующих листов к внутреннему слою будущей сэндвич-панели во время пайки. Закладка фольги припоя предполагается непосредственно перед сваркой. Толщиной закладки припоя, температурой пайки и временем

выдержки будет регулироваться степень растворения цинка в алюминиевом сплаве. Следует учитывать, что при всех достоинствах (низкая температура плавления, короткое время образования эвтектики, пластичность эвтектики), цинк склонен к образованию межкристаллитной коррозии в алюминиевых сплавах, что может привести к прожогам.

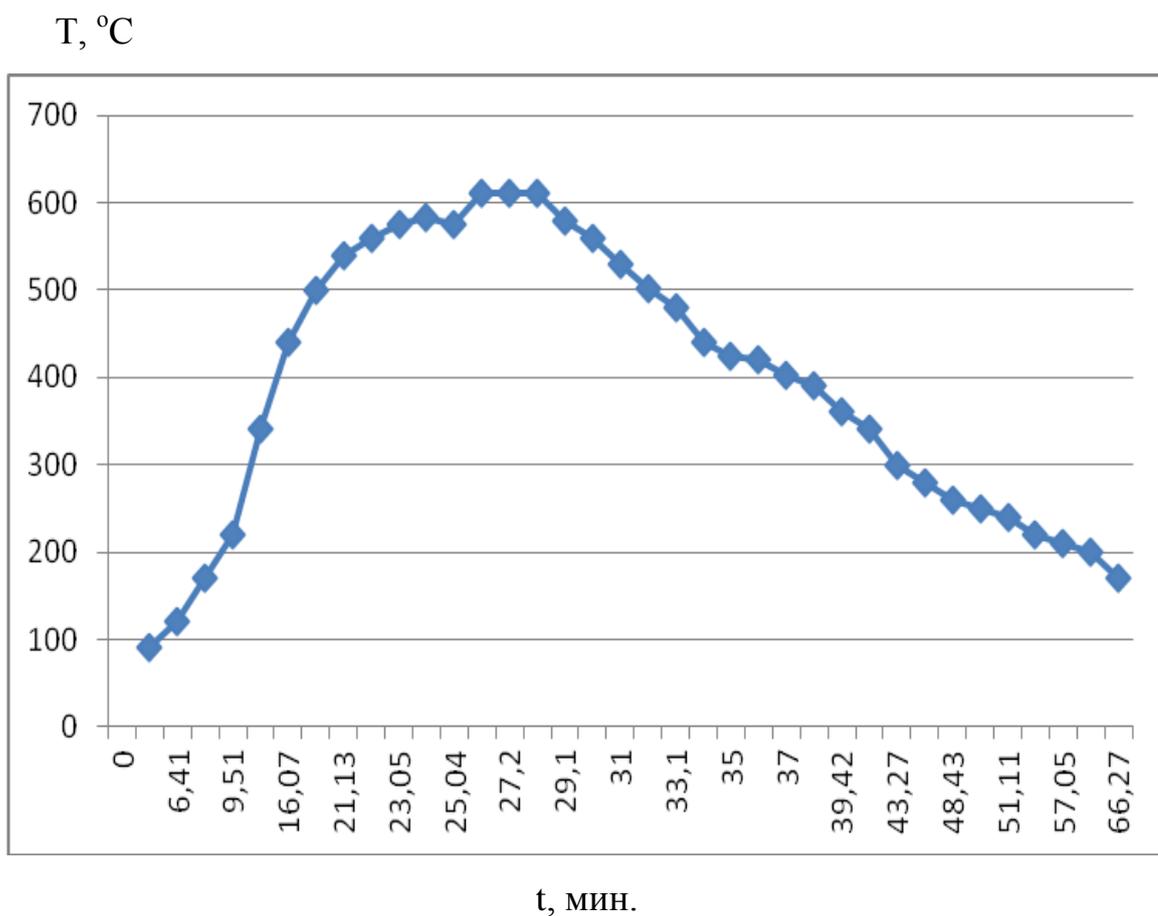
Вспененный алюминиевый сплав для среднего слоя панели будет изготавливать литейным способом, благодаря чему заготовка будет иметь открытую ячеистую структуру, что позволит откачивать воздух из всех полостей конструкции.

Чтобы оценить возможность контактно-реактивного плавления в вакууме, предварительно был проведен процесс контактно-реактивной пайки через цинковую прослойку сплава АД31 и вспененного сплава А7 в контейнере с низким вакуумом. Образец после пайки показан на рисунке 7.



**Рисунок 7 – Образец пайки контактно-реактивным плавлением припоем цинка в вакууме алюминия с пеноалюминием**

Пайка проходила при температуре 620 °С, время выдержки составило 10 минут. Рисунок 8 отражает изменение температуры образца во время пайки. Пайке подвергались лист толщиной 2 мм из сплава АД31 и вспененный сплав А7.

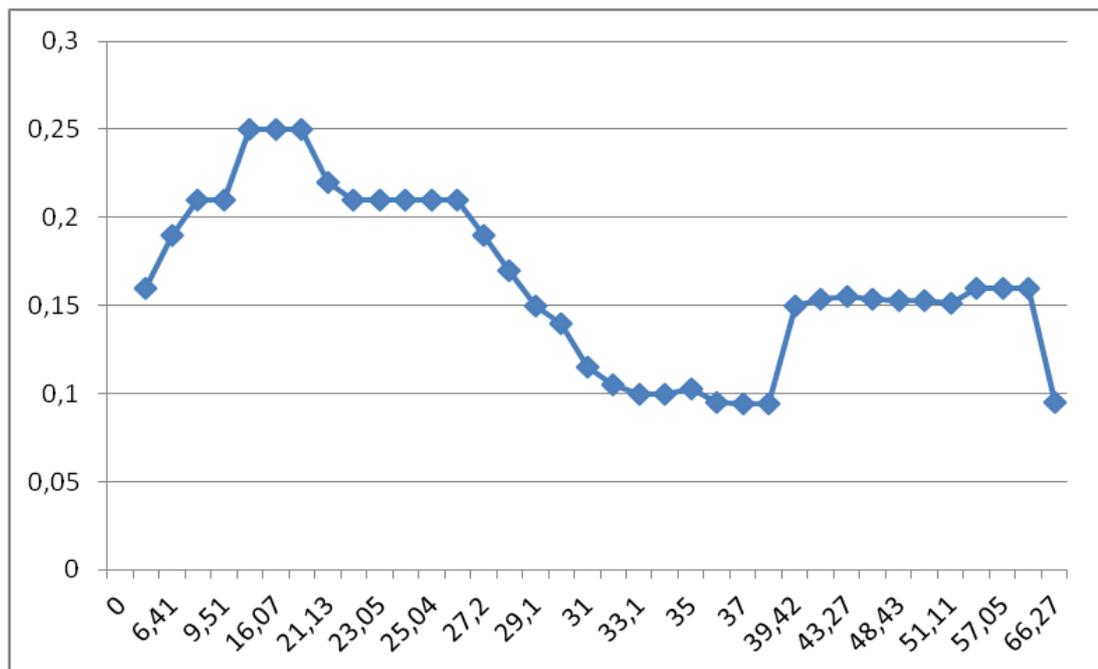


**Рисунок 8 – График изменения температуры образца при пайке в вакууме сплава АД31 и пеноматериал сплава А7**

Толщина закладки припоя составляла 0,15 мм. Изменение давления отражено рисунком 9.

Были сделаны микрошлифы, для более детального изучения места спая. Полученные шлифы показаны на рисунке 10.

P, мм. рт. ст.



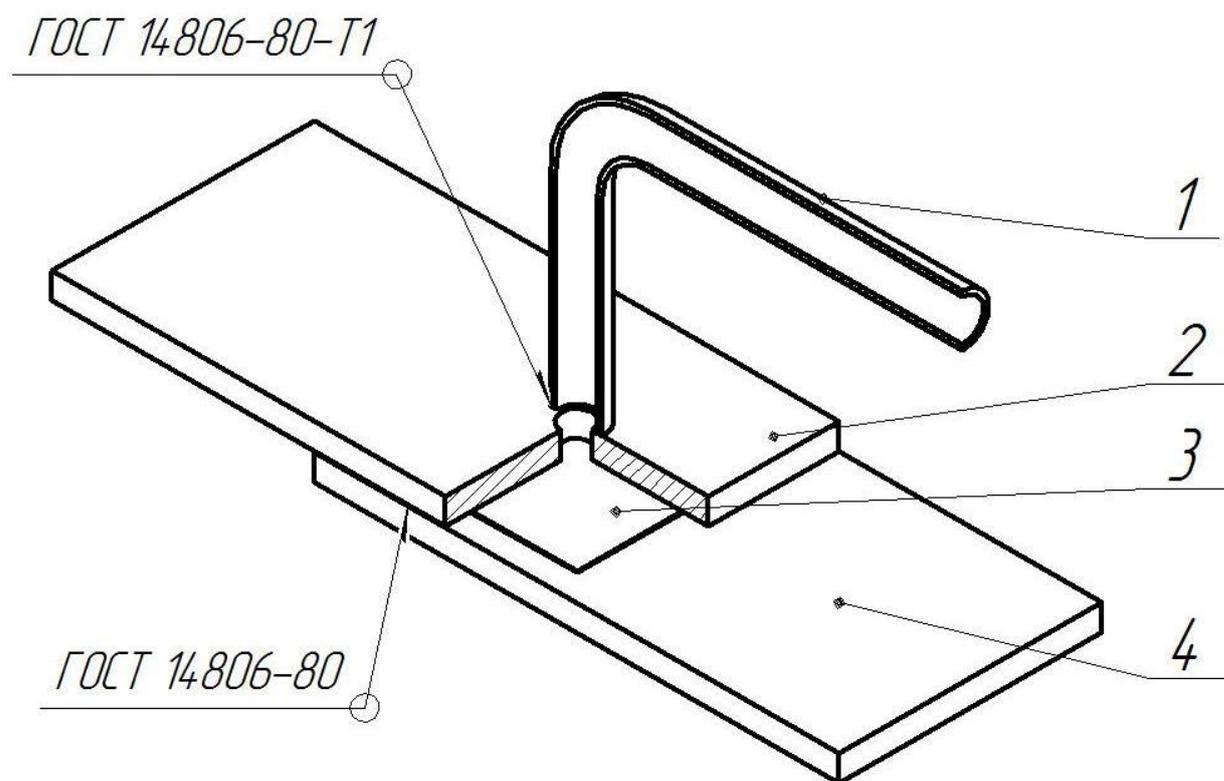
t, мин.

**Рисунок 9 – График изменения давления в контейнере при пайке в вакууме сплава АД31 и пеноматериал сплава А7**



**Рисунок 10 – Структура паяного соединения сплавов АД31 и А7  
цинковым припоем**

В целях экономии вспененного алюминия в рамках диссертации проводился ряд опытов с образцами конструкции представленной на рисунке 11.

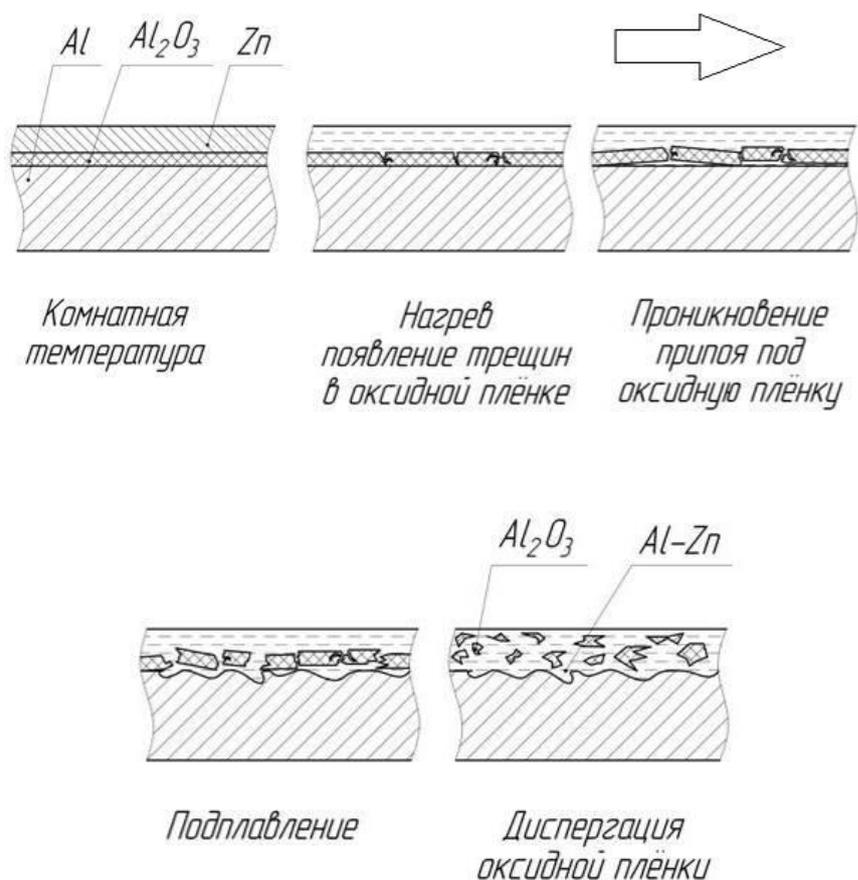


- 1 Труба выхода избыточного давления газов из сплава АД31Т1
- 2 Верхний лист с отверстием из сплавов АМц6
- 3 Раскатанный припой Zn толщиной 0,08 – 0,19 мм
- 4 Нижний лист без отверстия из сплава АМц6

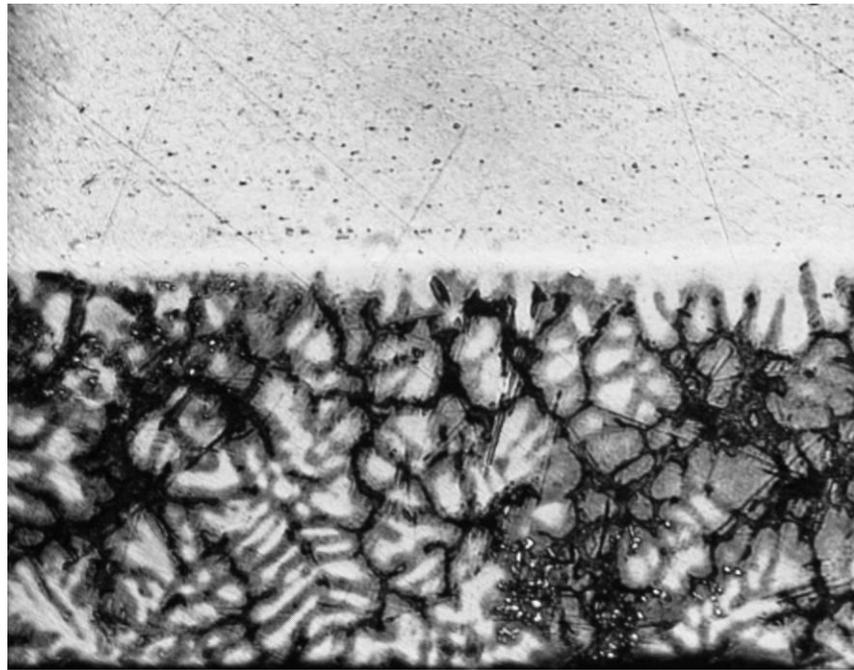
**Рисунок 11 – Сборочный чертёж образца перед пайкой с трубой для выхода избыточного давления**

Эти эксперименты продемонстрировали возможность пайки с созданием вакуума в зоне паяемого шва. Также эксперимент показывал влияние нагрева аргонодуговой сваркой во время герметизации паяемого шва перед пайкой. Интенсивный нагрев аргонодуговой сваркой значительно ускоряет образование оксидных пленок на поверхностях паяемого материала и припоя. Несмотря на это, спай произошел. Предположительно, механизм

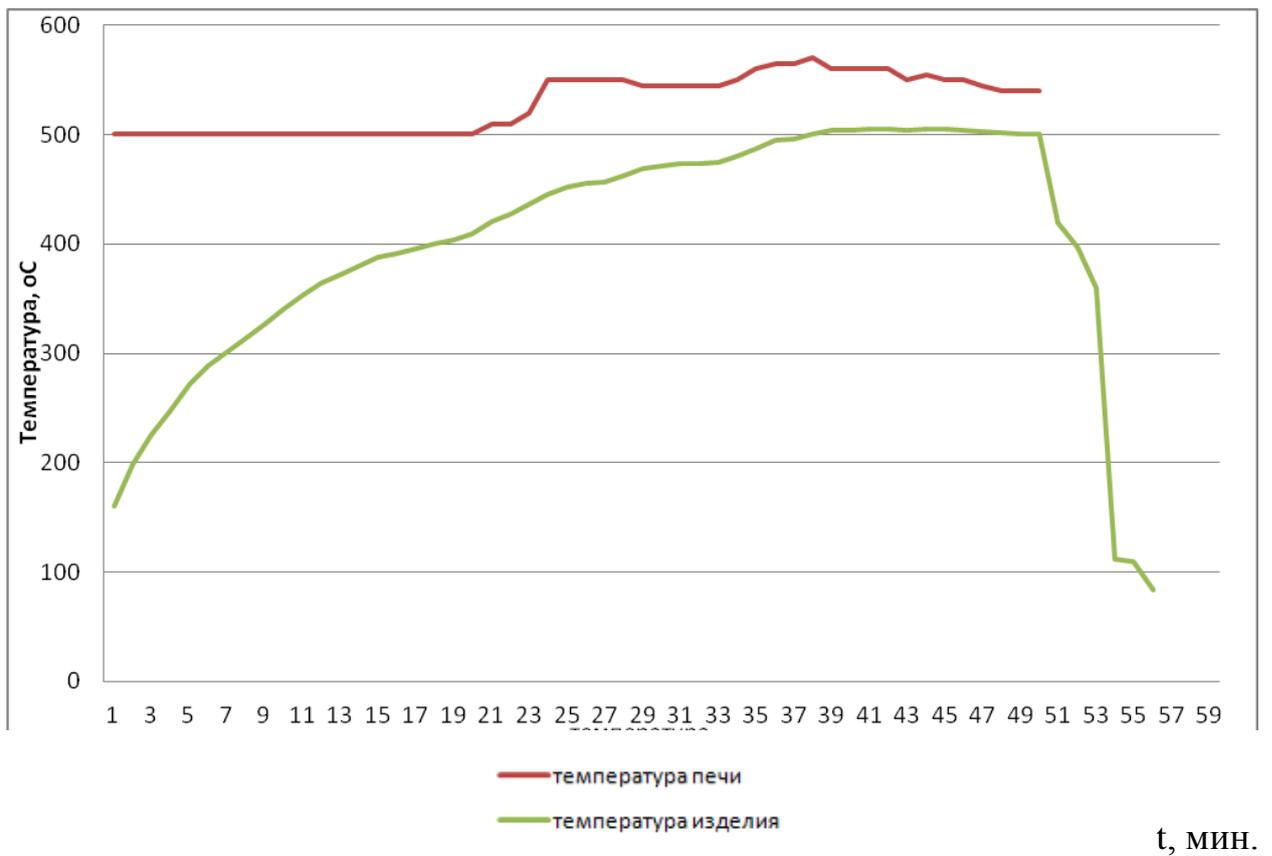
образования спая следующий (рисунок 12). Из-за разности коэффициентов линейного расширения алюминиевого сплава и оксида алюминия, на последнем образуются трещины. Создаваемый вакуум в зазоре препятствует образованию нового оксидного слоя в трещинах. В образовавшиеся трещины проникает припой и вступает в реакцию с основным металлом. Плотность  $Al_2O_3$  почти в два раза ниже плотности Zn – это способствует его отрыву и всплытию. Микрошлифы паяного шва представлены на рисунке 13. Этот микрошлиф взят из образца, паяемого при температуре 504 °С с выдержкой 10 мин. Припоем во время пайки листов сплава АМц толщиной 7 мм служила фольга из цинка толщиной 0,3 мм. Температурный режим пайки представлен на графике 14.



**Рисунок 12 – Процесс активирования поверхности алюминия цинком при контактно-реактивном плавлении**



**Рисунок 13 – Структура паяного соединения сплавов АМц  
цинковым припоем**



**Рисунок 14 – Графики изменения температур печи и паяемого  
образца сплава АМц**

В наших опытах попытаемся подобрать оптимальный режим контактно-реактивного плавания. Изменяемыми параметрами в наших экспериментах будут:

- Толщина фольги припоя;
- Толщина плакирующих листов;
- Материал плакирующих листов;
- Температура пайки;
- Время выдержки.

Постоянными же переменными наших экспериментов будут:

- Размеры образцов;
- Сплав вспененного материала;
- Скорость нагрева;
- Положение заготовки во время процесса пайки и заготовки.

Учитывая особенности паяемого изделия, постоянство положения образца при пайке очень важно. Наличие открытой ячеистой структуры пены и наклонное положение изделия во время пайки может привести к перетеканию и локальной концентрации расплавленного припоя цинка внутри конструкции. Это может привести к проплавлению цинком плакирующей пластины и разгерметизации всей паяемой конструкции, что приведет к непроям.

## **2.1. Методика исследований пайки пеноалюминия**

Со многими химическими элементами, являющимися основой легкоплавких припоев (Pb, Bi, Cd, Sn, In) алюминий и его сплавы имеют слабую взаимную растворимость, исключение цинк, это и обусловило его выбор.

Припой из чистого цинка в форме фольги не существует в продаже. Для этих целей использовался анод Zn марки Ц0 по ГОСТ 3640-94, вальцуемый до толщины фольги на ювелирных промышленных вальцах до нужных толщин. Состав сплава Ц0 представлен в таблице 4.

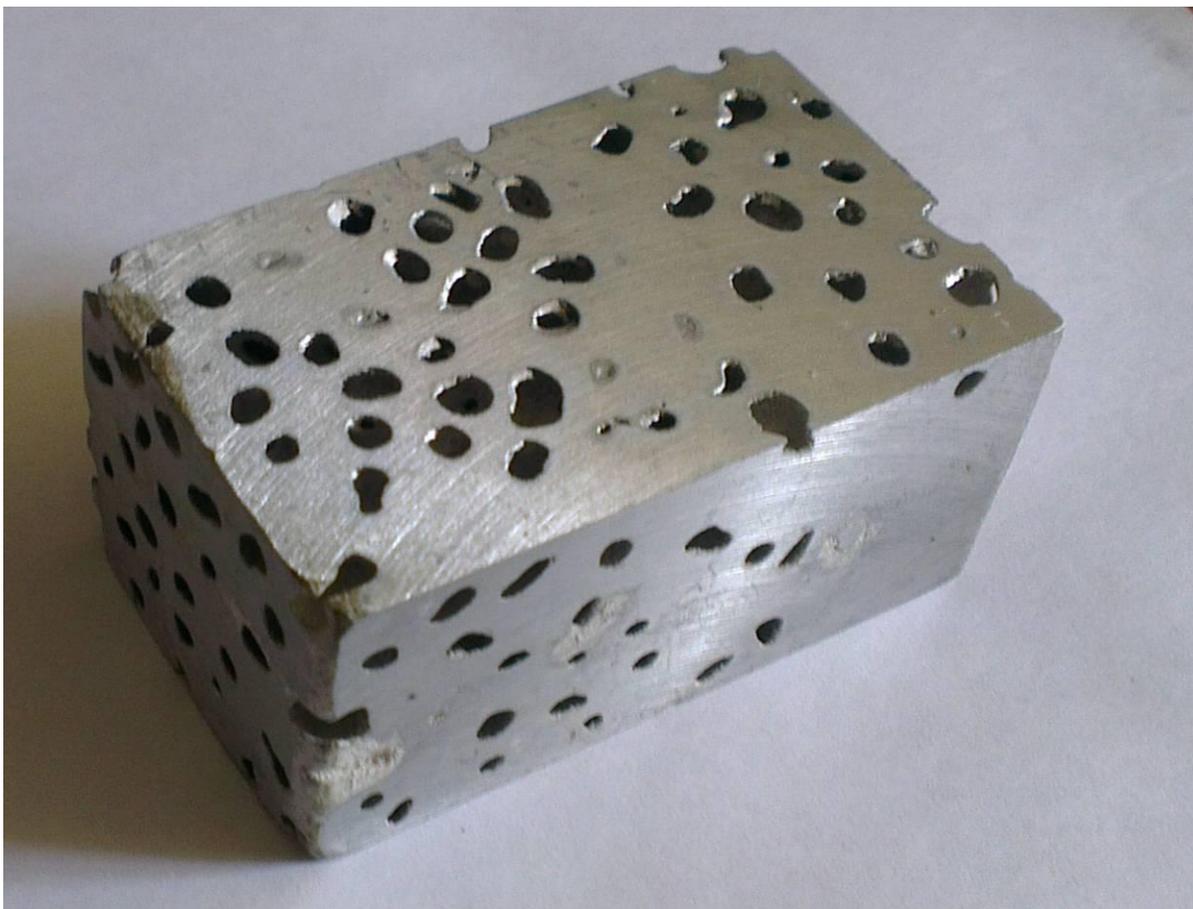
**Таблица 4- Химический состав сплава Ц0, масс. доля элементов в % [5]**

Обозначение марок	Цинк, не менее	Примесь, не более							
		свинец	кадмий	железо	медь	олово	мышьяк	алюминий	всего
ЦВ00	99,997	0,00001	0,002	0,00001	0,00001	0,00001	0,0005	0,00001	0,003
	99,995	0,003	0,002	0,002	0,001	0,001	0,0005	0,005	0,005
	99,99	0,005*	0,002	0,003	0,001	0,001	0,0005	0,005	0,01
	99,98	0,01	0,003	0,003	0,001	0,001	0,0005	0,005	0,02
	99,975	0,013	0,004	0,005	0,001	0,001	0,0005	0,005	0,025
	99,95	0,02	0,01	0,01	0,002	0,001	0,0005	0,005	0,05
	98,7	1,0	0,2	0,05	0,005	0,002	0,01	0,010**	1,3
	97,5	2,0	0,2	0,1	0,05	0,005	0,01	-	2,5

\* В цинке, применяемом для производства сплава марки ЦАМ4-1о, массовая доля свинца должна быть не более 0,004%.

\*\* В цинке, применяемом для проката, массовая доля алюминия должна быть не более 0,005%.

Заготовки пеноалюминия производились методом литья из сплава А7 на кафедре сварки Тольяттинского государственного университета. Получаемый на кафедре пористый алюминиевый сплав А7 обладает открытой ячеистой структурой, что позволит создавать вакуум во всех полостях конструкции. Заготовки вспененного сплава А7 путём распиливания доводились до кубической формы с размерами: высота - 40 мм, ширина 50 мм и длина не более 80 мм. Заготовки для выравнивания поверхностей, подвергались шлифовке наждачной бумагой на шлифовальном станке. Использовались наждачные бумаги с плотностью частиц зернистости не превышающие 120. Операции распила и шлифовки проводилась с участием проточной воды, в целях избегания перегрева заготовки вспененного сплава А7. Заготовка вспененного алюминиевого сплава представлена на рисунке 15.



**Рисунок 15 – Заготовка пеноалюминия**

В качестве плакирующих листов были выбраны сплавы наиболее часто используемые промышленностью, а именно алюминиевые сплавы АМцб, АД31, 1935ПС. Толщины листов выбранных сплавов были следующие: 2 мм, 2,5 мм, 5 мм, 7 мм и 10 мм. Подробно познакомится с химическим составом и механическими и физическими свойствами используемых сплавов можно в таблицах 5-13. Эти листы подвергались распиловки до нужных размеров с использованием проточной воды. Трубка, используемая для отвода газов из конструкции, выполнена из сплава АД31. Химический состав сплава представлен в таблице 6, механические свойства этого сплава отражены в таблице 9, а физические свойства находятся в таблице 12. Предпочтительнее для всех паяемых элементов конструкции использовать алюминиевые сплавы, содержащие магний, так как магний способен восстанавливать алюминий из его оксида  $Al_2O_3$  в вакууме или среде аргона.

**Таблица 5- Химический состав сплава АМцб, масс. доля элементов в % [6]**

Fe	Si	Mn	Ti	Al	Cu	Mg	Zn	Примеси
до 0,7	до 0,6	1-1,6	до 0,2	96,35-99	до 0,15	до 0,2	до 0,1	прочие, каждая 0,05; всего 0,1

**Таблица 6- Химический состав сплава АД31, масс. доля элементов в % [6]**

<u>Fe</u>	<u>Si</u>	<u>Mn</u>	<u>Cr</u>	<u>Ti</u>	<u>Al</u>	<u>Cu</u>	<u>Mg</u>	<u>Zn</u>	Примесей
до 0,5	0,2 - 0,6	до 0,1	до 0,1	до 0,15	97,65 - 99,35	до 0,1	0,45 - 0,9	до 0,2	прочие, каждая 0,05; всего 0,15

**Таблица 7 - Химический состав сплава 1935ПС, масс. доля элементов в % [16]**

Zn	Mg	<u>Mn</u>	<u>Zr</u>	Cu	<u>Al</u>	Fe	Si	Cr	Примесей
3,6 - 4,1	0,6 - 1,1	0,1 - 0,5	0,15 - 0,22	до 0,1	вск.	0,4	0,3	до 0,2	прочие, каждая 0,05; всего 0,2

**Таблица 8 - Механические свойства сплава АМц 6 при T=20 °С [6]**

Сортамент	Размер	Напр.	$\sigma_s$	$\sigma_T$	$\delta_s$	$\psi$	КСУ	Термообработка
-	мм	-	МПа	МПа	%	%	кДж/м <sup>2</sup>	-
Лист от окжеп			110	60	25			

**Таблица 9 - Механические свойства при T=20 °С сплава АД31 [6]**

Сортамент	Размер	Напр.	$\sigma_B$	$\sigma_T$	$\delta_5$	$\psi$	KCU	Термообр.
-	мм	-	МПа	МПа	%	%	кДж / м <sup>2</sup>	-
Трубы, ГОСТ 18482-79			130	60	12			
Профили, ГОСТ 8617-81	до 100		196	147	10			Закалка и искусственное старение
Профили, ГОСТ 8617-81			127	69	13			

**Таблица 10 - Механические свойства при T=20 °С сплава 1935ПС [16]**

Сортамент	Размер	Напр.	$\sigma_B$	$\sigma_T$	$\delta_5$	$\psi$	KCU	Термообр.
-	Мм	-	МПа	МПа	%	%	кДж / м <sup>2</sup>	-
Лента отожжен., ГОСТ 13726-97			245		10			

Принятые в таблицах 8-10 сокращения:

Твердость отожженного сплава АМцб по Бринеллю, НВ 10 = 30 МПа

$\sigma_B$  - Предел кратковременной прочности, [МПа]

$\sigma_T$  - Предел пропорциональности (предел текучести), [МПа]

$\delta_5$  - Относительное удлинение при разрыве, [%]

$\psi$  - Относительное сужение, [%]

KCU- Ударная вязкость, [кДж / м ]

НВ- Твердость по Бринеллю, [МПа]

**Таблица 11 - Физические свойства сплава АМц б [6]**

T	E 10 <sup>-3</sup>	$\alpha$ 10 <sup>5</sup>	$\lambda$	$\gamma$	C	R 10 <sup>3</sup>
°С	МПа		Вт / (м * град)	кз / м <sup>3</sup>	Дж / (кз * град)	Ом * м
20	0,71			2730		34,5
100		23,2	180		1090	
200		25				

**Таблица 12 - Физические свойства сплава АД31 [6]**

T	E 10 <sup>-5</sup>	$\alpha$ 10 <sup>6</sup>	$\lambda$	$\gamma$	C	R 10 <sup>9</sup>
Град	МПа	1/Град	Вт/(м·град)	кг/м <sup>3</sup>	Дж/(кг·град)	Ом·м
20	0.71			2710		34.4
100		23.4	188		921	

**Таблица 13 - Физические свойства сплава 1935ПС [16]**

T	E 10 <sup>-5</sup>	$\alpha$ 10 <sup>6</sup>	$\lambda$	$\gamma$	C	R 10 <sup>9</sup>
Град	МПа	1/Град	Вт/(м·град)	кг/м <sup>3</sup>	Дж/(кг·град)	Ом·м
20				2770		

Принятые в таблицах 11-13 сокращения:

T - Температура, [Град]

E - Модуль упругости первого рода, [МПа]

$\alpha$  - Коэффициент температурного (линейного) расширения (диапазон 20° - T), [1/Град]

$\lambda$  - Коэффициент теплопроводности (теплоемкость материала), [Вт/(м·град)]

$\gamma$  - Плотность материала, [кг/м ]

C - Удельная теплоемкость материала (диапазон 20° - T), [Дж/(кг·град)]

R - Удельное электросопротивление, [Ом·м]

Листы распиливаются таким образом, чтобы можно было собрать контейнер методом аргонодуговой сварки. Выступы листов будущего контейнера, не должны превышать одного сантиметра, в противном случае это затруднит доступ аргонодуговой сварки. Обязательное условие сборки контейнера сэндвич-панели – плотное прилегание плакирующих листов к вспененному алюминию по всей поверхности.

***При проведении исследований пользовались следующим оборудованием:***

- аккумуляторная дрель;
- полировальная машина;
- шлифовальный станок;
- микротвердомер ПМТ-3;
- электрическая плита;
- сушильный шкаф;
- установка для аргонодуговой сварки УДГУ 351 AC/DC;
- разрывная машина УММ –5;
- печь СНОЛ-1,6.2,5.1/11-М1 У.4.2;
- держатель образцов;
- Отрезной станок ПОЛИЛАБ Р30;
- Шлифовально-полировальный станок Полилаб П22М;
- металлографический микроскоп МИМ-8;
- измеритель температуры микропроцессорный ОВЕН 2ТРМО;
- микроскоп МБС-2.

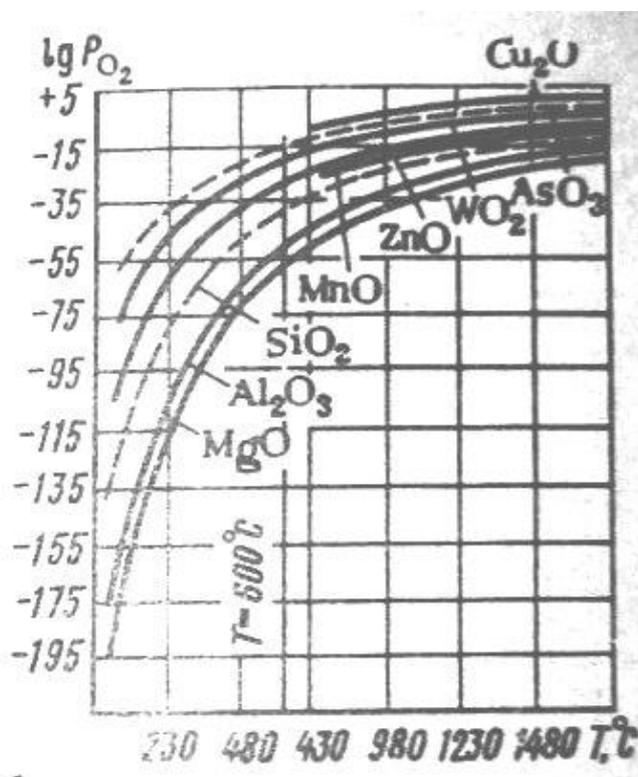
*Также во время исследования были задействованы приспособления и материалы:*

- слесарные инструменты (плоскогубцы, щипцы, пинцет, напильники разных форм и зернистости, ножовка по металлу);
- смола эпоксидная ЭДП-20 (ГОСТ 10587-84);
- химически стойкая и термостойкая тара;
- термопара хромель-алюмель;
- азотная кислота  $\text{HNO}_3$ ;
- щелочь  $\text{NaOH}$ ;
- вода;
- ацетон технический;
- травитель (95% -  $\text{H}_2\text{O}$ , 2,5% -  $\text{HNO}_3$ , 1,5% –  $\text{HCL}$ , 1% –  $\text{HF}$ );
- вата техническая;
- наждачная бумага различной зернистости;

- диск отрезной абразивный;
- этиловый спирт;
- ацетон технический;
- аргон Ar в газообразной форме (баллон).

Прочность окислов металлов и их сродство с кислородом показывает упругость диссоциации окислов. Упругость диссоциации окисла определяется парциальным давлением кислорода, при котором наблюдается равновесие реакции:  $2MeO \rightleftharpoons 2Me + O_2$  [9].

Чем меньше упругость диссоциации оксида, тем устойчивее оксид и ближе сродство металла к кислороду. Парциальное давление кислорода для оксида алюминия при температуре 600 °С  $\approx 10^{-42}$  Па [17]. Данные таблицы 14 и график влияния температуры на упругость диссоциации оксидов (рисунок 17) свидетельствуют о невозможности диссоциации оксидов алюминия путём нагрева его в вакууме или в среде аргона.



**Рисунок 16 – Влияние температуры на упругость диссоциации окислов [15]**

**Таблица 14 – Теплота образования окислов (25 °С) [10]**

Окислы	Реакция образования окисла	Теплота образования окисла	
		кДж/моль окисла	кДж/ моль кислорода
Au <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2Au+1,5O <sub>2</sub>	-46,1	-30,8
Ag <sub>2</sub> O	2Ag+0,5O <sub>2</sub>	30,6	61,2
CuO	Cu+0,5O <sub>2</sub>	157,1	314,2
PbO	Pb+0,5O <sub>2</sub>	217,9	435,8
NiO	Ni+0,5O <sub>2</sub>	244,7	489,4
CdO	Cd+0,5O <sub>2</sub>	260,6	521,2
FeO	Fe+0,5O <sub>2</sub>	270,3	540,6
SnO <sub>2</sub>	Sn+O <sub>2</sub>	578,6	578,6
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2Mn+1,5O <sub>2</sub>	974,2	649,4
ZnO	Zn+0,5O <sub>2</sub>	349,4	698,8
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2Cr+1,5O <sub>2</sub>	1129,2	752,8
SiO <sub>2</sub>	Si+O <sub>2</sub>	872,8	872,8
TiO <sub>2</sub>	Ti+O <sub>2</sub>	917,6	917,6
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2B+1,5O <sub>2</sub>	1445,6	963,4
ZrO <sub>2</sub>	Zr+O <sub>2</sub>	1083,1	1083,1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2Al+1,5O <sub>2</sub>	1676,0	1117,4
MgO	Mg+0,5O <sub>2</sub>	603,4	1206,8
BeO	Be+0,5O <sub>2</sub>	617,2	1234,4

Оксидная пленка на поверхности алюминия или его сплава прилегает непосредственно к металлу, при этом она плотная, без пор, трещин, рыхлот, защищает основной металл от дальнейшего взаимодействия с кислородом воздуха. Пленка характерна высокая плотность.

Прочная адгезия пленки окисла алюминия с металлом обусловлена структурой и параметрами окисла. Окисел  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  характерен кубической структурой с параметром решётки равным 0,79 нм, что почти соответствует двойному параметру ГЦК решетки алюминия равному 0,808 нм.

По причине большой температуры плавления окисла алюминия (2050 °С), он нерастворим в жидком алюминии и не образует с ним твердых растворов. В жидком алюминии кислород может присутствовать только в виде оксида в ничтожных количествах. Оксиду алюминия присущи свойства диэлектрика, электросопротивление его равно  $10^{14}$  Ом•м [20].

В диапазоне температур 0-600 °С окисная пленка алюминия обладает коэффициентом линейного расширения  $((6-8) \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})$  в 3 раза меньше, чем у алюминия  $(23 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})$  и его сплавов [12]. Это свойство будет способствовать образованию трещин в слое оксидной пленки, через которые будет проникать припой во время пайки в среде вакуума.

Пленка окисла алюминия обладает высокой адсорбцией к парам воды. Считается, что только первый слой оксида алюминия, примыкающий непосредственно металлу - это безводный  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , выше расположен моногидрат  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  и в самых верхних слоях дигидрат  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  и тригидрат  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ .

Пленку окислов можно удалить химическим, физическим или механическим (ультразвук, натирание, применение абразивов) способом. Механический способ удаления для поверхностей больших площадей, в нашем случае экономически не выгоден и длителен по времени. К тому же механический способ очистки менее эффективен. В нашем случае будет применяться химический способ очистки от окислов перед пайкой, это позволит убрать оксидную пленку со всех поверхностей (включая полости

вспененного алюминия) паяемых деталей, обработать большое количество паяемых деталей за короткий промежуток времени. Всем известно, что на очищенных от окислов поверхностях алюминиевых сплавов при контакте с воздухом или водой мгновенно образуется новый слой окисла алюминия и, поэтому полностью избавиться от этого барьера не получится. Смысл предварительной химической очистки состоит в том, что вновь образующаяся пленка значительно тоньше предыдущей.

***Подготовка образцов к пайке делится на несколько этапов:***

**1) Предварительное обезжиривание поверхностей заготовок.**

Подготовка поверхностей деталей перед пайкой – первая и главная операция технологического процесса, от которого зависит качество паяных соединений.

Для получения качественного соединения необходим физический контакт чистых поверхностей паяемого металла и припоя. Контакт могут препятствовать окисные пленки, пыль, грязь, жировые смазки. В процессе нагрева и пайки подобные загрязнения сгорая, увеличивают содержания газа в зазоре, тем самым способствуют образованию пор.

В случаях, когда паяемые детали покрыты большими слоями жира и грязи, то перед последующими операциями необходимо обезжирить поверхности. Бензин и ацетон хорошо растворяют масла и жиры, не вступая в реакцию с основным металлом. Для предварительной очистки поверхностей заготовок будущих образцов будет использоваться ацетон и техническая вата, это позволит удалить большинство неомыляемых жиров, которые невозможно удалить щелочью.

**2) Обезжиривание поверхностей заготовок.**

Омыляемые жирные кислоты удаляют с поверхностей путем химического взаимодействия щелочами. В результате образуется растворимые в воде мыла (соли жирных кислот и глицерина). Для алюминиевых сплавов в промышленности практически применяют только химическое обезжиривание. Для обезжиривания будет использоваться 5-15%

раствор едкого натра NaOH. Увеличение концентрации щелочи в растворе не оправдано, так как приведет к уменьшению растворимости образуемого мыла. Повышение температуры способствует увеличению скорости химических реакций омыления жиров. Поэтому температура обезжиривающего раствора будет 60 °С. Температура более 60 °С приведет к наводораживанию верхних слоев металла, что ухудшит пайку. Раствор следует помешивать - это ускорит процесс. Процесс обезжиривания обычно не превышает одну минуту.

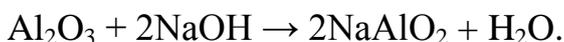
Чтобы полностью удалить остатки мыла или эмульсию с поверхностей заготовок, после обезжиривания их следует промыть сначала горячей водой, а затем холодной. Контроль качества обезжиривания производится визуально: на хорошо подготовленных образцах пленка не имеет разрывов.

Обезжиривание водными растворами щелочей отличается высокой эффективностью, простотой и низкой себестоимостью. За эти качества он широко применяется как в крупносерийном производстве, так и в мелкосерийном. К недостаткам такого способа обезжиривания можно отнести:

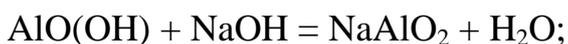
- необходимость подогрева обезжиривающих растворов;
- трудности регенерации растворов;
- большинству растворов присуще растравливающее действие алюминиевых сплавов.

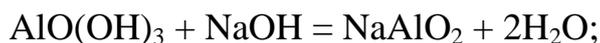
### 3) Щелочное травление заготовок.

Известно, что окислы и гидроокислы алюминиевых сплавов хорошо растворяются водными растворами щелочей, при этом образуется алюминаты (алюминиевая кислота и ее соли). В качестве травителя будет использоваться водный раствор едкого натра NaOH. Он взаимодействуя с окислами алюминия образует алюминат натрия, хорошо растворимый в воде:

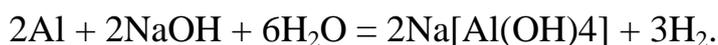


Аналогично происходит процесс удаления гидроокисных пленок:





После удаления гидроокисных пленок с поверхностей, открывшийся алюминий легко растворяется в щелочах, так как алюминий в ряду активности стоит левее водорода. Взаимодействие алюминия с водным раствором едкого натрия можно выразить реакциями:



Эти реакции характерны большим выделением водорода в виде газа, а также проникновением его в верхние слои металла.

В процессе травления алюминиевых сплавов в растворе щелочи накапливается алюминат натрия, и активность раствора снижается.

В мелкосерийном производстве в качестве травящего раствора часто применяют 5% раствор едкого натра, крупносерийном и массовом концентрации раствора увеличивают до 10-15%. Ванны для щелочного травления изготавливают из углеродистых сталей обыкновенного качества. Скорость травления зависит от температуры раствора, его концентрации и времени выдержки. Малая скорость травления наблюдается при 20 °С, при 30 °С скорость травления возрастает в 5 раз. Зависимость скорости травления от температуры представлена на рисунке 17 (время травления 1 минута). Повышение температуры лишь уменьшает время травления и не оказывает существенной роли на результат травления основного материала. Глядя на рисунок 18, очевидно, что скорость травления различных сплавов при равных условиях примерно одинакова.

При повышении температуры от 30 до 50 °С скорость травления возрастает примерно в 2 раза на каждые 10 °С; дальнейшем повышении температуры рост скорости травления замедлится [15]. При травлении деталей из АПС или деталей толщиной 0,1 мм, повышение температуры до 80 °С может полностью стравить плакирующий слой, а утонение стенок деталей толщиной 0,1 мм достичь 20 %. Это свидетельствует о

необходимости соблюдения постоянства температуры щелочного раствора во время травления.

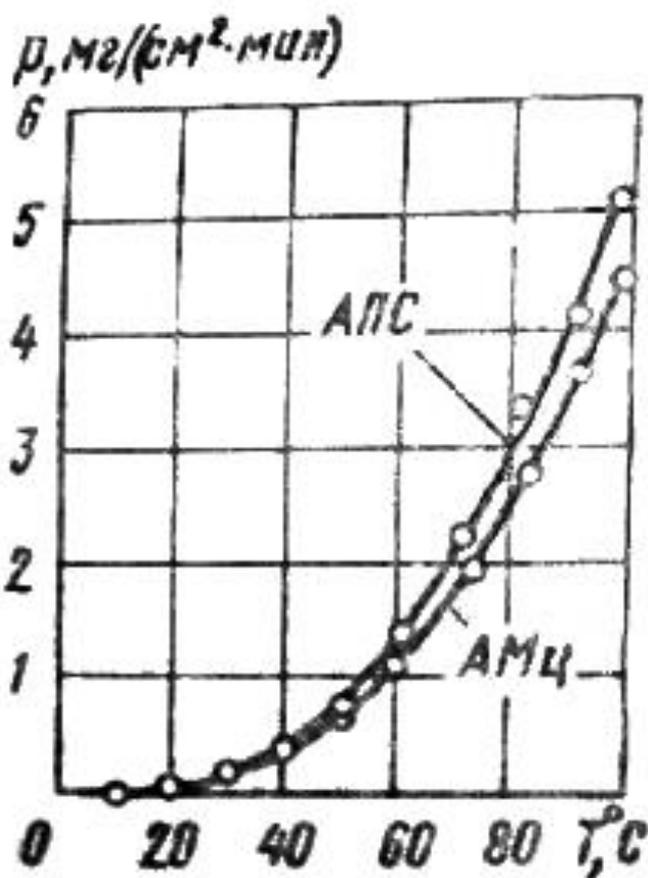
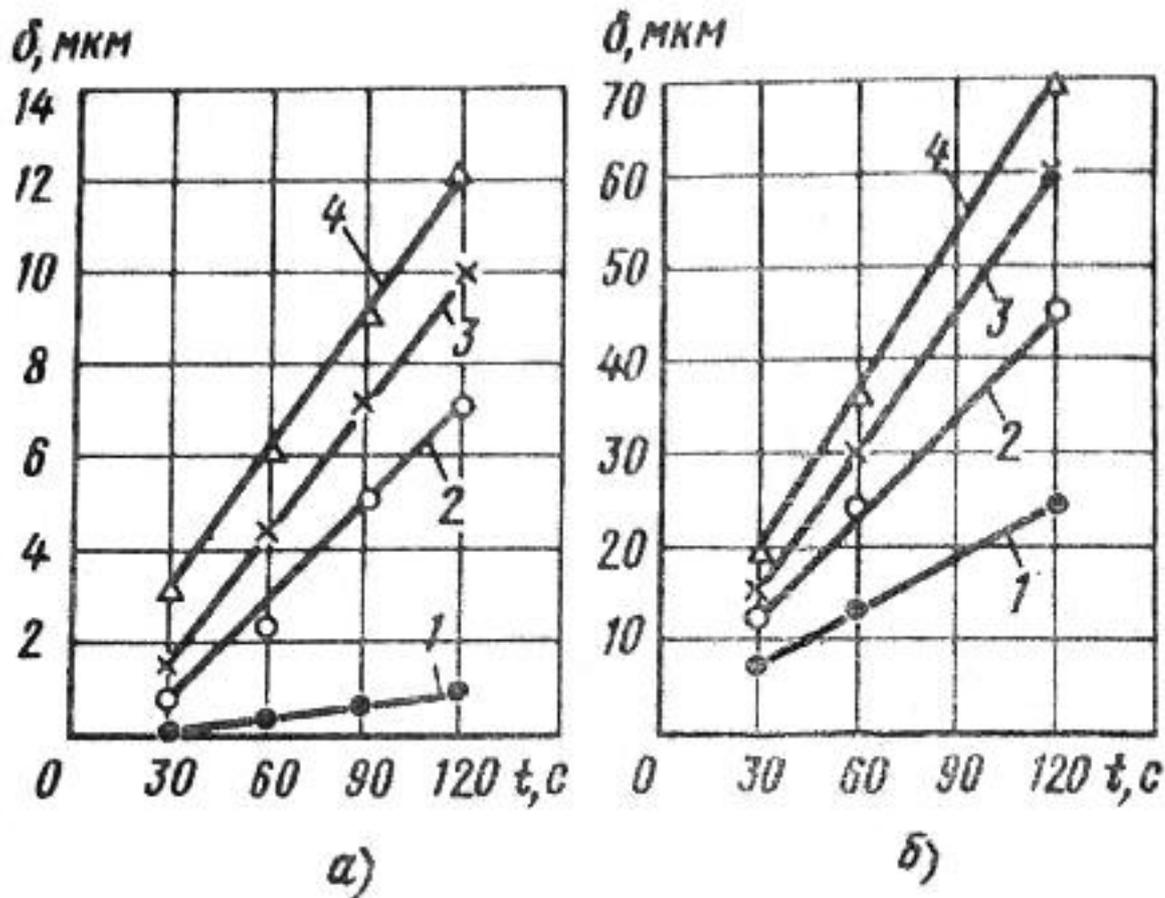


Рисунок 17 – Зависимость скорости травления АПС и сплава АМц от температуры 5% щелочным раствором [15]

Температура раствора в большинстве случаев не должна превышать 65 °C. Во время взаимодействия раствора щелочного раствора с алюминием одновременно происходит выделение теплоты и разогрев раствора, что затрудняет процесс контроля температуры. Наиболее спокойное и равномерное травление алюминия и его сплавов достигается в растворах с концентрацией едкого натра 50 г/л при температуре 60-70 °C в течении 30 – 60 с [14]. Увеличение продолжительности травления приведет к увеличению толщины стравливаемого слоя алюминия или его сплава, зависимость при этом прямая (рисунок 18).



**Рисунок 18 – Зависимость глубины травления АПС от времени травления при 55 °С (а) и 100 оС (б). Концентрация щелочного раствора 40; 60; 80; 100 г/л (1-4) [15]**

Скорость травления уменьшается в 2,3 раза при накоплении алюминия в щелочном растворе до 30 г/л. Это необходимо учитывать при производстве.

Учитывая особенности травления алюминиевых сплавов, травление будет проводиться в растворе едкого натра с концентрацией 50 г/л при температуре 60 °С в течении 60 с. После травления заготовки нужно обязательно тщательно промыть в холодной проточной воде, затем в горячей проточной воде.

#### 4) Осветление заготовок.

При травлении алюминиевых сплавов щелочными растворами происходит удаление и растворение окисной плёнки. Алюминий и его сплавы содержат примеси и легирующие элементы, которые с алюминием

образуют химические соединения, многие из которых не растворяются в щелочных растворах. Поэтому после травления в щелочных растворах поверхности заготовок покрыты темным или серым налетом. Для удаления этих налетов заготовки из алюминиевых сплавов после травления подвергают обработке в течение 3 - 30 мин (в зависимости от химического состава сплава) в растворе азотной кислоты (250 – 300 г/л), в результате поверхность приобретает светлый оттенок. Название этой операции осветление.

При осветлении ванны с кислотным раствором накапливают алюминий и другие металлы из состава легирующих компонентов. Осветление дюралевых сплавов приводит к накоплению в осветляющем растворе меди и алюминия. При содержании меди в растворе более чем 1,5 г/л приводит к существенному ухудшению качества поверхности заготовок.

Учитывая особенности осветления алюминиевых сплавов, осветление для наших заготовок будем проводить в растворе азотной кислоты  $\text{HNO}_3$  (250 г/л) в течение трех минут при комнатной температуре. После операции осветления заготовки нужно обязательно тщательно промыть в холодной проточной воде, затем в горячей проточной воде.

Очистка в растворе каустической соды (NaOH) эффективна, хотя остатки щелочного раствора могут неблагоприятно влиять на качество пайки. Остатки азотной кислоты могут сделать пайку вообще невозможной. Поэтому после химической обработки – очень важна тщательная промывка чистой водой.

#### 5) Сушка заготовок.

После операций обезжиривания, травления и осветления непременно идут операции промывки в холодной и горячей проточной воде и сушка. Промывка необходима для того, чтобы растворы из одной ванны не попадали в другую. Промывка горячей водой способствует удалению тонких жировых плёнок, образующихся на поверхности деталей при подъеме их из ванн обезжиривания и травления, в случаях, когда на поверхностях раствора

присутствуют жировые загрязнения. При промывках принято рассчитывать расход воды исходя из нормы 25 л холодной воды и 15 л горячей на 1 м<sup>2</sup> поверхности омываемой детали. Сушку производят после промывки заготовок в горячей воде. Сушка нужна для уменьшения количества адсорбируемой влаги на поверхности заготовок. При сушке следует исключить контакт деталей между собой, так как в месте контакта влажных деталей образуется темный налет коричневого цвета, существенно ухудшающий условия пайки и приводящий к непроямам. Наличие воды и высокой температуры (100 – 120 °С) способствует образованию на поверхности заготовок толстый слой тригидрата оксида алюминия Al(OH)<sub>3</sub>. Изменение цвета поверхности заготовок варьируется от светло-коричневого до темно-коричневого. Связано это с примесями различных солей и в частности, железа, которые содержатся в воде.

Учитывая особенности сушки алюминиевых сплавов, сушка заготовок будет производиться в сушильных камерах с температурой атмосферы внутри них не превышающей 60 °С.

#### б) Подготовка припоя.

Как отмечалось ранее, в качестве припоя использовался анодный цинк Zn Ц0 (ГОСТ 3640-94). Припой раскатывается ювелирными вальцами до нужной толщины. Перед этим лист анодного цинка распиливается на бруски, большая сторона поперечного сечения которого не превышает 5 мм. Это необходимо, ведь большая площадь сечения бруска при вальцевании до толщин фольги даст многочисленные расслоения, следовательно, и пустоты. Происходит это из-за того, что ювелирные механические валки приводятся в действие исключительно ручной силой, и это не позволяет ограничиться одним, двумя проходами. Во время пайки использовалась фольга цинка с толщинами: 0,06 мм, 0,08 мм, 0,13 мм, 0,15 мм, 0,17 мм, 0,19 мм, 0,20 мм, 0,25 мм, 0,30 мм, 0,45 мм. Границы раскатанных листов припоя имеют заусенцы и трещины. Листы вальцованного цинка перед нарезкой представлены на рисунке 19. Чтобы их убрать, достаточно отрезать их

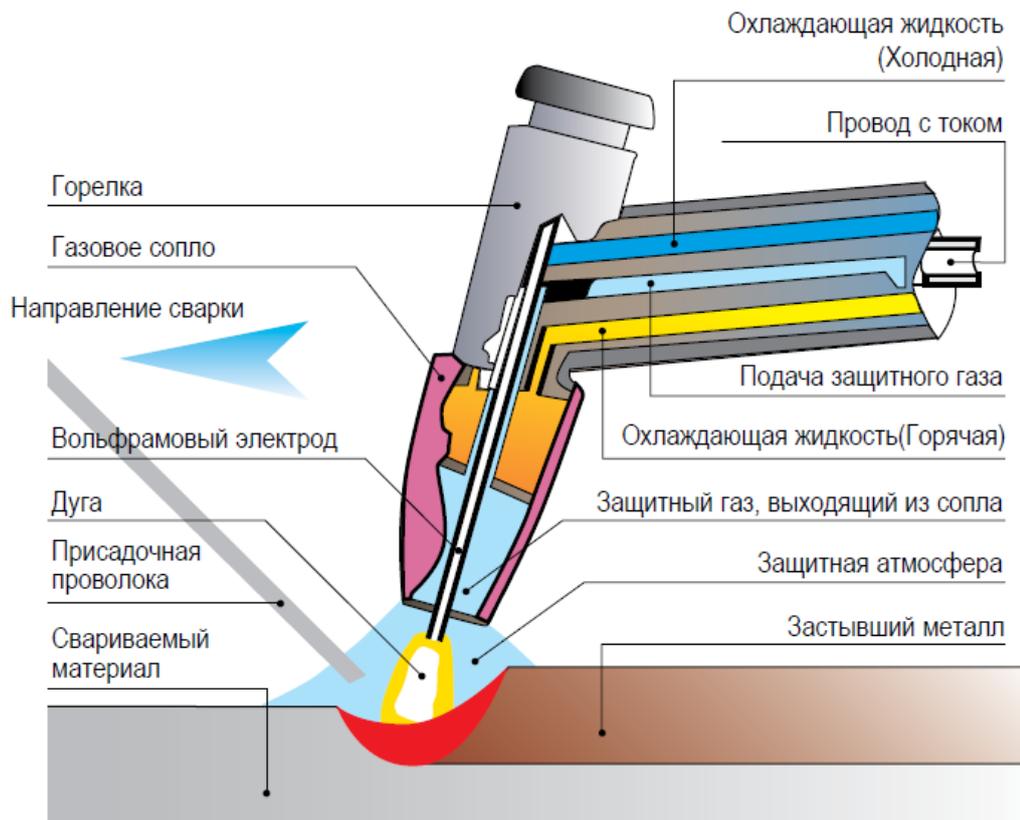
ножницами. Используемые толщины, позволяют легко разрезать ножницами раскатанный припой на листы нужных размеров. Перед пайкой используемые листы припоя необходимо обезжирить этиловым спиртом или техническим ацетоном, с помощью технической ваты.



**Рисунок 19 – Листы вальцованного цинка Zn**

7) Сборка и сварка конструкции перед пайкой.

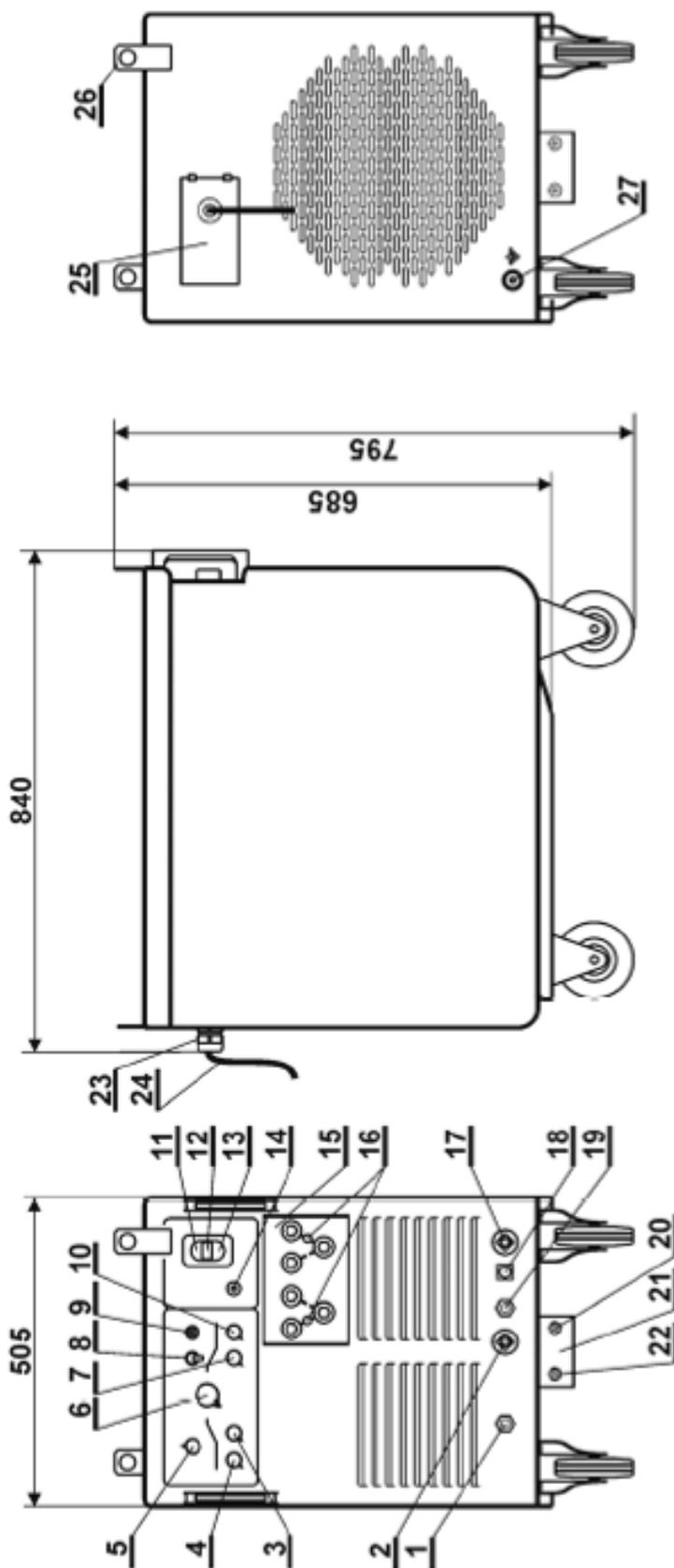
В зависимости от проводимого опыта (с использованием пористого алюминиевого сплава или без) сборку следует проводить согласно сборочным чертежам рисунка 6 или 11. Во время сборки рекомендуется пользоваться тонкой стальной мягкой проволокой для временной фиксации пластин. Закладка припоя производится во время сборки, непосредственно перед сваркой. Герметизация собранных конструкций выполняется аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом (рисунок 20). Во время сварочных операций (рисунок 21) следует обеспечить плотное прилегание паяемых поверхностей и припоя друг к другу, что обеспечивается использованием механических тисков.



**Рисунок 20 Устройство горелки установки аргодуговой сварки [25]**



**Рисунок 21 Процесс аргодуговой сварки образцов**

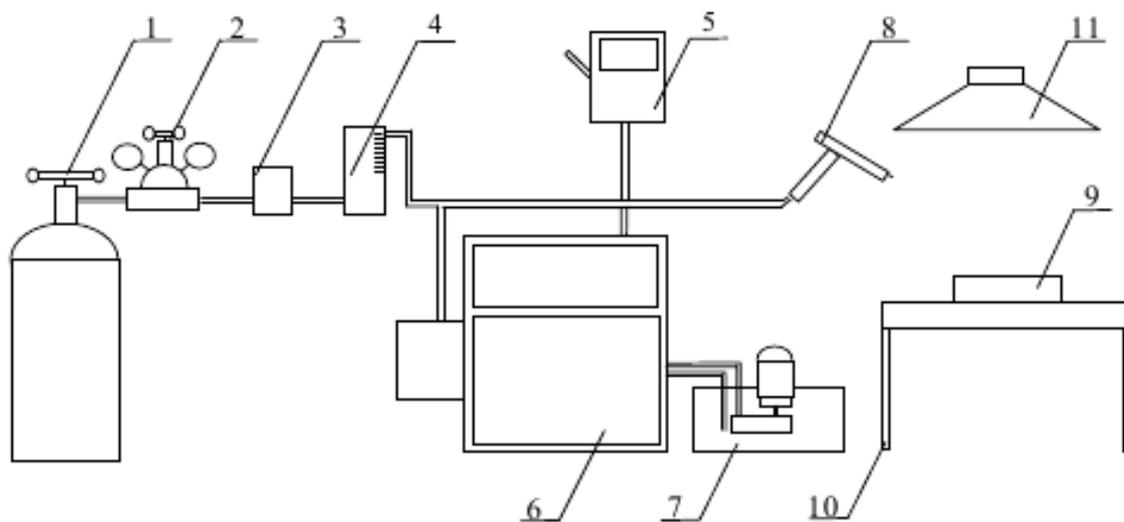


Масса, кг, не более - 148

1. Штуцер подачи газа от газовой арматуры.
2. Выходной разъем "~-/+",
3. Потенциометр регулирования длительности нарастания тока.
4. Потенциометр регулирования длительности продувки газа.
5. Потенциометр регулирования очищающей-проплавляющей способностью.
6. Потенциометр регулирования сварочного тока.
7. Потенциометр регулирования длительности спада тока.
8. Переключатель режимов работы осциллятора.
9. Переключатель вида сварки "ММА/ ТИГ".
10. Потенциометр регулирования длительности продувки после сварки.
11. Кнопка "Пуск".
12. Индикатор "Сеть".
13. Кнопка "Стоп".
14. Индикатор "Перегрев".

15. Переключатели режимов AC/DC.
16. Концевые выключатели блокировки неверной установкой перемишек переключателя режимов AC/DC.
17. Выходной разъем "~-/+",
18. Разъем "Кнопка на горелке".
19. Штуцер подачи газа к горелке.
20. Штуцер для выхода охлаждающей горелку жидкости.
21. Планка.
22. Штуцер для входа охлаждающей горелку жидкости.
23. Устройство ввода сетевого кабеля.
24. Сетевой кабель.
25. Крышка люка для подключения сетевого кабеля.
26. Скобы для подъема грузозахватными устройствами.
27. Устройство заземления.

Рисунок 22 - Общий вид, габаритные размеры и масса установки УДГУ - 351 AC/DC [25]



**Рисунок 23** Схема рабочего поста для аргодуговой сварки

**1 – баллон с аргоном; 2 – газовый редуктор; 3 – электропневмоклапан; 4 – ротаметр; 5 – шкаф электропитания; 6 – установка УДГУ-351 АС/DC; 7 – станция охлаждения; 8 – горелка; 9 – свариваемое изделие; 10 – рабочий стол; 11 – вытяжной зонт [25]**

Сварка проводилась на сварочном посту, оснащенной установкой для аргодуговой сварки УДГУ-351 АС/DC (рисунок 22). Общий вид рабочего поста для сварки алюминия аргодуговой сваркой представлен на рисунке 23.

С техническими характеристиками сварочной установки УДГУ-351 АС/DC можно познакомиться в таблице 15.

Сварочный выпрямитель УДГУ-351АС/DC способен выполнять сварку алюминия и его сплавов на переменном токе в среде аргона дугой неплавящегося электрода (режим TIG), и сварку любых других металлов на постоянном, кроме алюминия. Также сварочный выпрямитель УДГУ-351АС/DC пригоден для ручной дуговой сварки покрытыми электродами (режим MMA) в режиме постоянного или переменного тока. Выпрямитель оснащен переключателем переменного/постоянного тока (АС/DC).

Источник установки УДГУ-351АС/DC обладает тиристорным регулированием, обеспечивающим легкое возбуждение и устойчивое горение

дуги, благодаря встроенному возбудителю — стабилизатору. Большое количество регулировок установки позволяет настроить оптимальный режим сварки [25]. Аппарат позволяет настраивать начальный ток сварки, силу сварочного тока, время продувки газа перед и после сварки, время спада тока при завершении сварки.

*Установка УДГУ-351АС/DC имеет следующие основные технические решения:*

- Обладает широким диапазоном, позволяющий плавно регулировать ток сварки.
- Установка оснащена встроенным газовым трактом.
- Как и ближайшие аналоги, не содержит водоохлаждаемых дросселей.
- Установка оснащена регулятором, позволяющим оптимально соотносить очищающие и проплавляющие способности в режимах переменного тока.
- К установке может подключаться дистанционный пульт пульсирующей сварки ППС-01, с возможностями плавной регулировки тока импульса, тока паузы и периода импульса.
- Позволяет работать в режиме «длинного шва» и «короткого шва».
- Трансформатор оснащен защитой от тепловых перегрузок.
- Токовые разъемы безопасно и быстро снимаются.
- Класс изоляции Н по ГОСТ 8865-70.
- Обладает принудительным охлаждением.

Режимы сварки подбирались, согласно таблице 16. Сварочная проволока подбиралась близкая по составу свариваемому металлу. Сварка должна проводиться не позднее 2 часов после сушки.

**Таблица 15 - Технические характеристики выпрямителя сварочного УДГУ-351АС/DC [25]**

Технические характеристики				
	TIG		MMA	
	DC	AC	DC	AC
Напряжение питающей сети, В	2/380			
Номинальный сварочный ток, А (ПВ, %)	300	315	250	300
Пределы регулирования сварочного тока, А	5-300	20-315	25-250	25-300
Диаметр электрода, мм	0.8-6		2-6	
Напряжение холостого хода, В, не более	100	70	100	70
Потребляемая мощность, кВА, не более	24		22	
Масса, кг, не более	140			
Габаритные размеры, мм, не более	600×550×900			

**Таблица 16 - Режимы аргодуговой сварки алюминиевых сплавов неплавящимся электродом [25]**

Толщина металла в зоне сварки, мм	Сварочный ток, А	Диаметр присадочного материала, мм	Диаметр вольфрамового электрода, мм	Расход аргона, л/мин
2,0-3,0	90-100	3-4	3,0	3-4
3,0-4,0	100-150	4-5	3,0	4-5
4,0-6,0	140-220	5-6	4,0	5-7
6,0-8,0	200-280	5-6	5,0	6-8
8,0-11,0	270-350	6-7	6,0	8-12

Аргонодуговая сварка кардинально отличается от пайки и плазменного напыления. Процесс сварки алюминия сложен, требует высокой квалификации специалиста. Химические особенности алюминиевых сплавов затрудняют их варку. При работе с алюминием сварщик должен учитывать, что при нагреве алюминий не изменяет своего цвета. Незнание этого может привести к прожогам и опасностью для сварщика.

Нагреваясь, алюминиевые сплавы соприкасаются с кислородом воздуха, образуют на поверхности пленки окисла алюминия. Как известно, окислу алюминия присущи свойства диэлектрика, поэтому использование обычной электродуговой сварки невозможно. В целях ограничения взаимодействия нагреваемого алюминиевого сплава с кислородом воздуха применяется один из инертных газов, чаще всего это аргон.

Применяются тугоплавкие вольфрамовые электроды. Электрод окружен керамическим соплом, благодаря которому под высоким давлением к месту сварки нагнетается аргон, вытесняющий собой воздух с места сварки. Низкое содержание кислорода способствует поддержанию электрической дуги между деталью и окончанием неплавящегося электрода. Процесс сварки происходит за счет плавления самой детали и присадочной проволоки.

#### 8) Проверка герметичности конструкции.

Проверка герметичности конструкции важная операция контроля пригодности конструкции к непосредственной пайке. Отсутствие герметичности не позволит создать вакуум в паяемой конструкции.

Сегодня наиболее экономичный способ контроля, применяемый в большинстве отраслях промышленности – это пневматические испытания [8]. Этот способ условно можно разделить на два вида:

- Пневматический способ нагнетания воздуха.
- Пневмогидравлический аквариумный способ.

Подробнее разберем каждый.

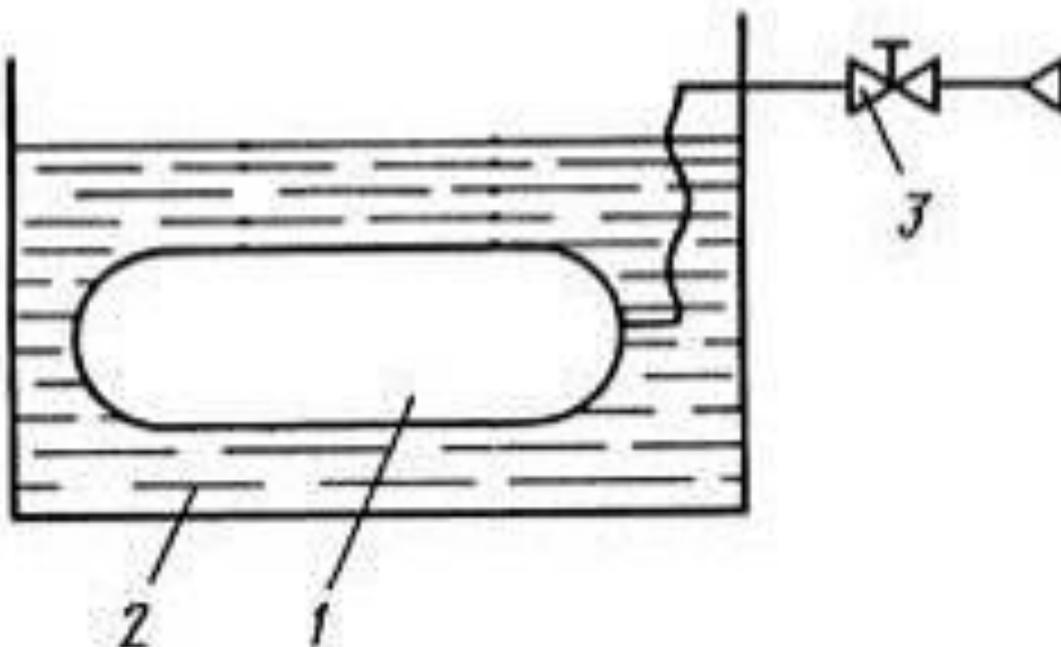
Пневматический способ заключается в том, что контролируемая конструкция или изделие заполняется газом, создающим избыточное

давление. Для этих целей используют различные газы: азот, воздух и другие. На внешние поверхности и швы контролируемого изделия или конструкции наносится пенообразующий состав. Пенообразующим составом может служить мыльная эмульсия или полимерный состав. Газ в местах течей образует мыльные пузыри, мыльные коконы или разрывы полимерной пленки, в зависимости от применяемого пенообразующего состава. Пенообразующий состав наносят мягкой волосяной кистью или краскораспылителем. Время наблюдения для выявления дефектов, при нанесенной мыльной эмульсии не превышает двух, трех минут с момента ее нанесения. При нанесении полимерного состава большие дефекты выявляются сразу, для наблюдения за малыми дефектами требуется не менее 20 минут с момента нанесения состава. Пенные коконы же сохраняются в течение суток. Пневматический способ контроля обычно применяется при малых размерах изделия или в случаях невозможности погружения проверяемого участка в жидкость [8].

Пневмогидравлический аквариумный способ подразумевает погружение в жидкость заполненную газом герметичной конструкции или изделия. При плохой герметичности изделия избыточное давление газа будет способствовать образованию пузырей в жидкости. При таком методе контроля признаками течи являются: периодическое образование на определенном участке поверхности изделия всплывающих пузырьков или строчка пузырьков. При таком способе контроля, как правило, уровень жидкости над контролируемой поверхностью изделия оставляют не менее 100 – 150 мм. Схема процесса аквариумного способа контроля показана на рисунке 24.

Во время проведения наших экспериментов применялся пневмогидравлический аквариумный способ. Избыточное давление в образце создавалось при помощи компрессора. Избыточное давление воздуха во время контроля не превышало 2 атм. Такое давление выбрано не случайно, выбрано из расчета превышения рабочего давления в 1, 25 – 3 раза. Так как

наша сэндвич-панель из вспененного алюминия будет испытывать давление окружающего воздуха в 1 атм., то для контроля было выбрано давление в 2 раза больше.



**Рисунок 24 - Схема пневмогидравлического аквариумного способа контроля**

**1 – объект контроля; 2 – емкость, заполненная жидкостью; 3 – пневматический клапан [8]**

В случае обнаружения течей, места течей помечались. В дальнейшем производилась зачистка места течи и заварка дефекта с последующим контролем на течи.

### ***Процесс пайки***

Низкая температура плавления алюминия (660 °С) и алюминиевых сплавов создает трудности пайки. При температуре 250 – 300 °С прочность алюминиевого сплава паяемого изделия резко снижается, что чревато потере устойчивости всей конструкции. Солидус (температура плавления самого легкоплавкого компонента сплава) используемых алюминиевых сплавов находится в пределах 500 – 640 °С. Это малый интервал температур для

использования высокотемпературной пайки. Высокотемпературная пайка опасна возможностью перегрева и расплавления паяемого конструкцией.

Согласно нормативным документам, пайку нельзя выполнять после истечения шести часов с момента подготовки изделия для пайки.

Пайка проводилась в электрической печи СНОЛ-1,6.2,5.1/11-М1 У.4.2 (рисунок 25). При проектировании размеры образцов учитывались с размерами рабочего пространства камеры печи: ширина – 160 мм, высота 100 мм, длина 250 мм. Данная электрическая камерная лабораторная печь позволяет поддерживать температуру рабочего пространства равную 1100 °С. Питается печь от однофазной сети с напряжением 220 В и частотой 50 Гц. Номинальная мощность печи составляет 1,8 кВт. Двери печей этой модели оснащены смотровым отверстием диаметром 15 мм. Смотровое отверстие не имеет стекла, закрывается металлической задвижкой. Это смотровое отверстие во время опытов использовалось, для вывода алюминиевой трубки образца и концов термопары хромель-алюмель. Процесс загрузки заготовки в печь представлен на рисунке 26.



**Рисунок 25 – Внешний вид печи СНОЛ-1,6.2,5.1/11-М1 У.4.2 (внешний вид)**



**Рисунок 26 – Вывод трубки образца через смотровое отверстие печи**

Перед загрузкой образца в лабораторную печь, к трубке вывода газов из образца подсоединяется шланг вакуумного механического насоса 2НВР-5ДМ (рисунок 27), а контакты, закрепленной термопары на образце, соединяют к электрическому измерителю температуры микропроцессорному ОВЕН 2ТРМО (рисунок 28).



**Рисунок 27 – Внешний вид вакуумного насоса 2НВР-5ДМ (внешний вид)**

2НВР-5ДМ – это герметичный вакуумный пластинчато-роторный насос способный создать остаточное давление в откачиваемом герметичном объеме равное 2,6 Па.



Рисунок 28 – Внешний вид измерителя температуры электрического ОВЕН 2TRMO (внешний вид) [1]

Функциональная схема прибора ОВЕН 2TRMO отражена на рисунке 29.

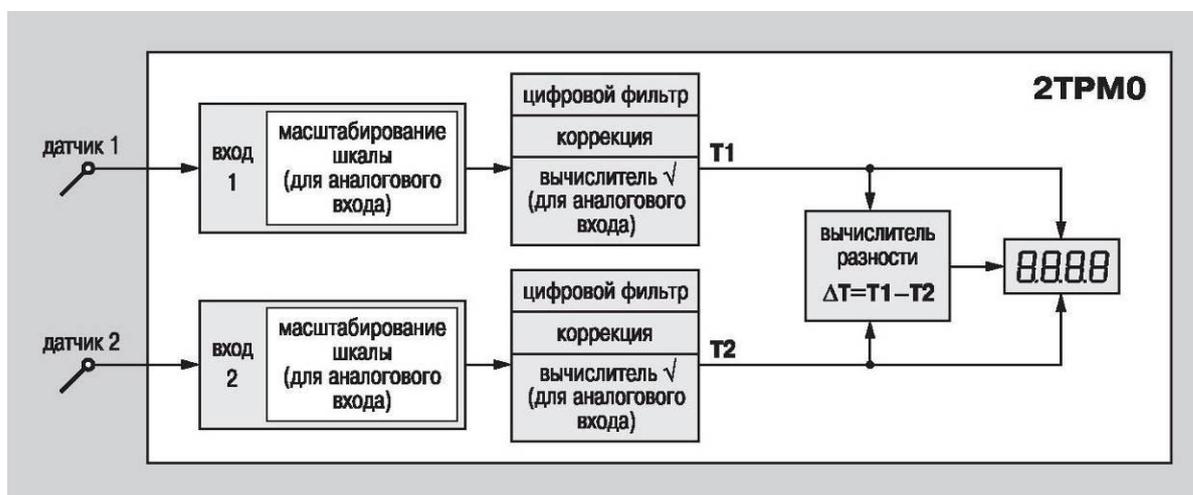


Рисунок 28 – Функциональная схема прибора ОВЕН 2TRMO [1]

Прибор ОВЕН 2ТРМО обладает погрешностью измерений не превышающей 0,15 %.

Подготовленные образцы загружают в печь, предварительно разогретую до температур 480 – 520 °С. Образцы выдерживаются в лабораторной печи 10 - 15 минут при условии достижения ими температуры пайки, требуемой экспериментом. Спаянные образцы следует остужать на воздухе, это уменьшит образование трещин паяемого шва, уменьшит концентрацию напряжения граничных зон спая.

В образцах следует поддерживать вакуум во время всего процесса, а также при охлаждении.

### ***Подготовка образцов к исследованию***

Спаянные и остывшие до комнатной температуры образцы следует разметить для последующей операции распиловки. В зависимости от того, какой конструкции паялся образец, зависит их разметка.

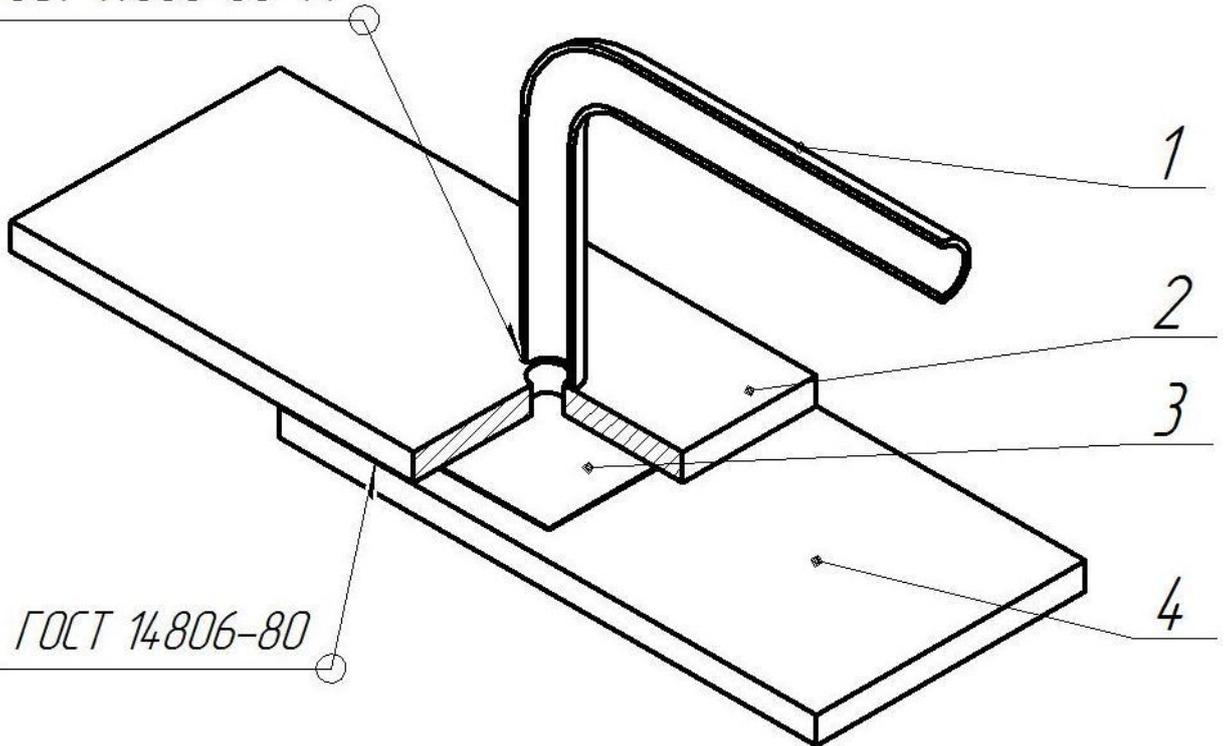
Паяные образцы, конструкция которых представлена на рисунке 29 следует распиливать на полоски шириной 10 мм, согласно разметке, показанной на рисунке 30. Боковые полоски образца, с корнем сварного шва, в дальнейшем уже не используются.

Паяные образцы, конструкция которых представлена на рисунке 31 следует распиливать на полоски шириной 10 - 15 мм. Разметка таких образцов отражена на рисунке 32. Как и в предыдущем случае, боковые полоски образца, с корнем сварного шва не используются. Процесс распиливания наглядно представлен на рисунке 33. Распиленные образцы спая вспененного алюминиевого сплава А7 и листа сплава АД31 представлены на рисунке 34.

В последующем разрезанные образцы шлифуются и отправляются на измерение микротвёрдости и осмотр макроструктуры микроструктуры паяного соединения.

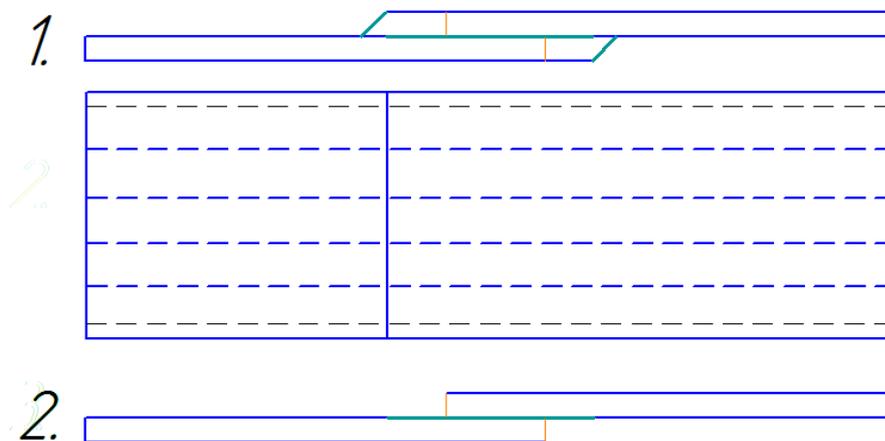
Процесс исследование микроструктуры описан в следующей главе.

ГОСТ 14806-80-T1

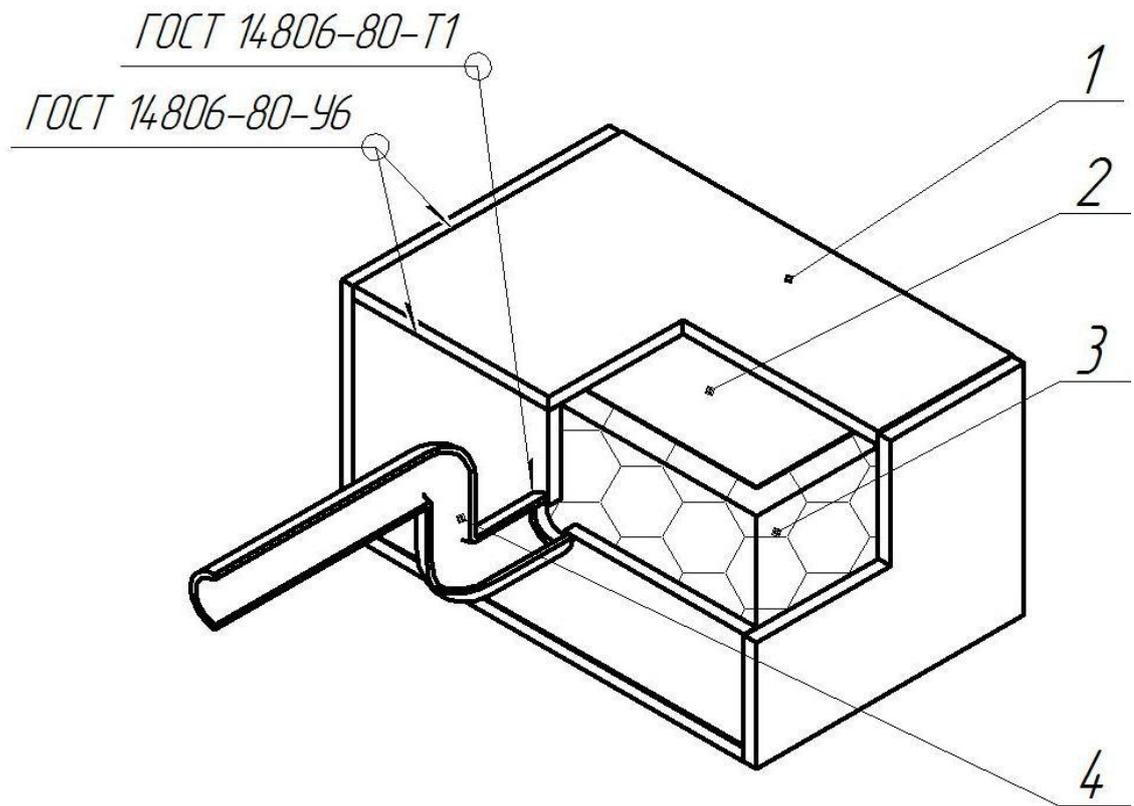


- 1 Труба выхода избыточного давления газов из сплава АД31Т1
- 2 Верхний лист с отверстием из алюминиевого сплавов
- 3 Раскатанный припой Zn толщиной 0,08 – 0,45 мм
- 4 Нижний лист без отверстия из алюминиевого сплава

**Рисунок 29 – Сборочный чертёж образца перед пайкой с трубой  
откачивания газов**

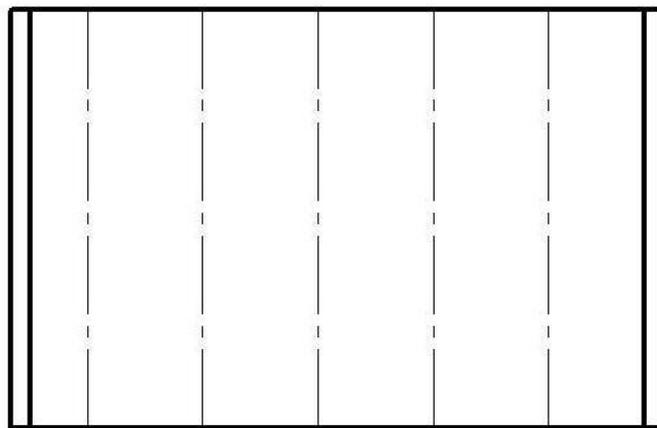


**Рисунок 30 – Схема разметки образцов перед распиливанием**



- 1 Сварной контейнер из алюминиевых сплавов  
 2 Раскатанный припой Zn толщиной 0,08 – 0,45 мм  
 3 Вспененный алюминиевый сплав А7  
 4 Труба откачки воздуха (сплав АД31Т1)

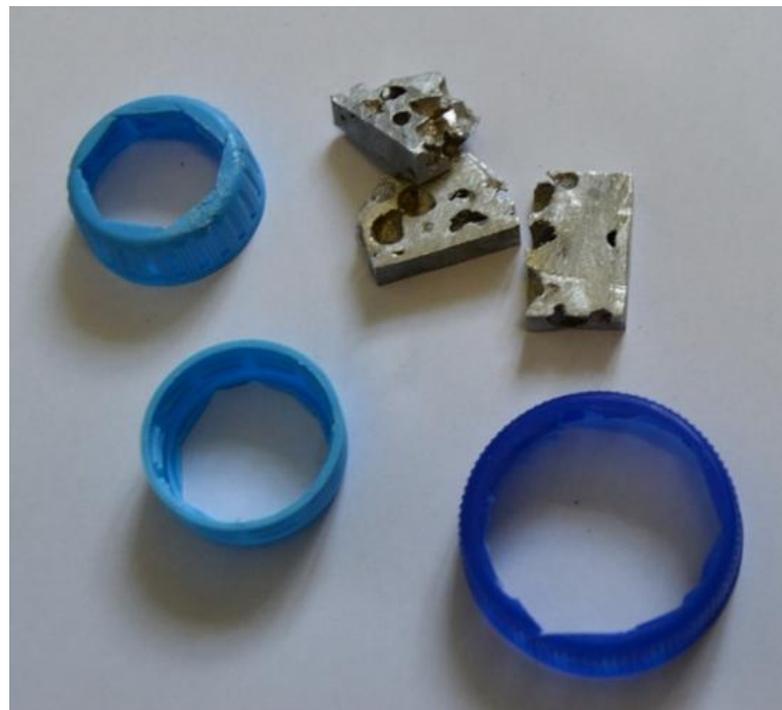
**Рисунок 31 – Сборочный чертёж образца сэндвич-панели перед пайкой**



**Рисунок 32 – Схема разметки образца сэндвич-панели перед распиливанием**



**Рисунок 33 – Распилка образцов**



**Рисунок 34 – Распиленные перед заливкой для изготовления шлифов образцы**

## 2.2. Методика исследований микрошлифов

В основе любого металлографического исследования лежит процесс изготовления образцов (шлифов), используемые для осмотра их микроскопами, с целью определения микросоставляющих. Шлифом именуют образец изучаемого металла или сплава, поверхность которого подверглась специальной обработке (шлифованию, полирование). Образец подготовленного к исследованиям шлифа представлен на рисунке 35.



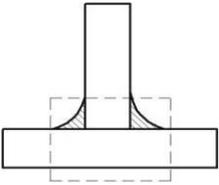
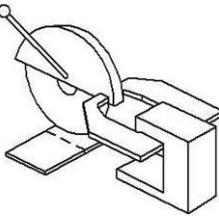
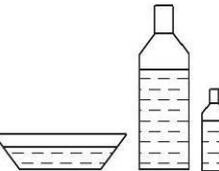
**Рисунок 35 – Образец подготовленного шлифа после операции полировки**

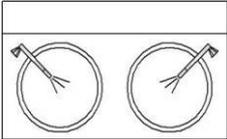
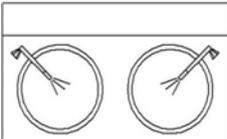
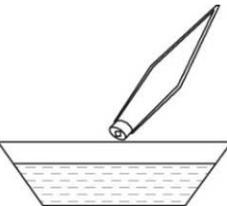
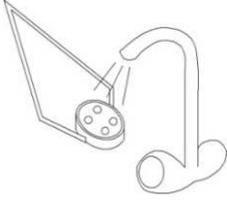
Процесс изготовления шлифов включает операции шлифовки и полировки. Основные принципы шлифовки и полировки до сих пор еще окончательно не изучены. По этой причине подготовка металлографических образцов к исследованию до сих пор требует искусного мастера. Правильная

подготовка шлифов несет чрезвычайно важно. От качества изготовления шлифов зависит правильность толкования микроструктур. В случаях неправильного приготовления шлифов, всегда неизбежны ошибки при толковании микроструктур.

Основным моментом при изготовлении металлографических шлифов является предотвращение повреждения поверхности шлифа, заключающегося в изменении микроструктуры поверхностного слоя материала в результате деформации или нагрева. Технологический процесс приготовления шлифов исследуемых образцов описан в таблице 17.

**Таблица 17 – Технологический процесс приготовления микрошлифов**

Наименование операции	Содержание переходов	Эскиз	Оборудование приспособления и инструменты	Вспомогательные материалы
1	2	3	4	5
1. Разметка	1.1. Разметить исследуемый участок образца		Штангенциркуль, линейка	Мел
2. Резка	2.1. Закрепить образец в зажимное устройство отрезного станка. 2.2. Включить подачу охлаждающей жидкости. 2.3. Произвести вырезку участка.		Отрезной станок ПОЛИЛАБ Р55	Охлаждающая жидкость, диск отрезной абразивный 250x1,8x32 мм
3. Запрессовка	3.1. Развести эпоксидный клей с затвердителем в пропорции 1:10. 3.2. Подготовить форму для заливки образцов. 3.3. Залить образцы эпоксидным клеем 3.4. Выдержать образцы до полного затвердевания клея.		Ванна для смешивания компонентов клея	Эпоксидный универсальный клей марки ЭДП

4. Шлифовка	<p>4.1. Обрабатывать исследуемую поверхность на шкурках, начиная с самых грубых, и сменяя их на более мягкие.</p> <p>4.2. При переходе к следующей шкурке необходимо менять горизонтальное положение шлифа на 90°.</p> <p>4.3. Производить шлифовку до исчезновения рисок от предшествующей шкурки.</p>		Шлифовально-полировальный станок Полилаб П22М	Вода, шкурка Р1000 шкурка Р400, шкурка Р100, шкурка Р40
5. Полировка	<p>5.1. Полировку производить вручную в течении 10-15 минут с применением водного раствора Cr<sub>3</sub>O<sub>6</sub>.</p>		Шлифовально-полировальный станок Полилаб П22М	Шерстяное сукно, водный раствор Cr <sub>3</sub> O <sub>6</sub>
6. Травление	<p>6.1. Травление проводить в специальной ванне с травителем.</p> <p>6.2. Проводить травление образца до исчезновения зеркального блеска поверхности и до визуального выявления структуры.</p>		Вытяжка, пинцет, резиновые перчатки, маска	Ванна с травителем, пинцет
7. Промывка, осушка	<p>7.1. Промыть под струей проточной воды.</p> <p>7.2. Промыть в спирте.</p> <p>7.3. Просушить обработанную поверхность фильтровальной бумагой.</p>		Резиновые перчатки	Технический спирт, фильтровальная бумага

В процессе подготовки образцов вырезка образцов проводилась на отрезном станке ПОЛИЛАБ Р55 (рисунок 36). Этот станок позволяет осуществлять рез на глубину 55 мм.



**Рисунок 36 – станок отрезной ПОЛИЛАБ Р55 (внешний вид)**

Так выглядят образцы после заливки их эпоксидной смолой марки ЭДП – 20(рисунок 37). Затем эти образцы шлифую, полируют до зеркального блеска.



**Рисунок 37 – Образцы шлифов после операции заливки эпоксидной смолой ЭДП - 20**

Операции шлифовки и полировки выполнялись на Шлифовально-полировальном станке Полилаб П22М (рисунок 38). Этот аппарат оснащен двумя шлифовальными дисками с диаметром 250 мм, позволяет плавно регулировать скорость вращения дисков в пределах 50 -600 об/мин.



**Рисунок 38 – станок шлифовально-полировальный ПОЛИЛАБ П22М  
(внешний вид)**

Исследование и фиксирование макроструктуры шлифов осуществлялось при помощи бинокулярного стереоскопического микроскопа МБС-2 (рисунок 39). В нашем случае использовались линзы с восьмикратным увеличением.



**Рисунок 39 – Микроскоп бинокулярный стереоскопический МБС-2  
(внешний вид)**

Визуальное наблюдение и фотографирование микроструктуры металлов шлифов осуществлялось с помощью металлографического горизонтального микроскопа МИМ-8 (рисунок 40).



**Рисунок 40 – Микроскоп горизонтальный металлографический МИМ-8  
(внешний вид)**

Дальнейшее исследование шлифов заключается в измерении микротвердости. Микротвердость измерялась на микротвердомере ПМТ-3 (рисунок 41).



**Рисунок 41 – Микротвердомер ПМТ-3 (внешний вид)**

При пайке образца в процессе контактно-реактивного плавления алюминия с цинком образуется припой системы Al-Zn. Микротвердомер позволит определить прочность получаемого припоя.

Принцип действия прибора ПМТ-3 заключается в процессе вдавливания алмазной пирамидки в исследуемый материал под действием определенной нагрузки последующим измерением значения диагонали полученного отпечатка. Величина твердости (Н) равно отношению прикладываемой нагрузки Р (кг) на пирамидку к боковой поверхности S (d мм<sup>2</sup>), предполагая, что углы отпечатка соответственно равны углам пирамидки [13]. Это можно выразить формулой:

$$H = \frac{P}{S}.$$

Определение твердости вдавливанием пирамидки наиболее простой и часто используемый вид механического испытания материала.

Определение твердости путем введения индентора в отличие от других видов механических испытаний обладает рядом преимуществ:

- Не требует изготовления специальных образцов для испытаний.
- Размеры отпечатка настолько ничтожны, что практически не отражается на качестве поверхности детали – это позволяет проводить замеры непосредственно на рабочих частях деталей, что интереснее.
- Малый размер отпечатка позволяет определять микротвердость отдельных зерен или структур в составе материала, что говорит о важности такого метода испытаний при физико-химическом анализе материалов.

Во время испытания на твердость часть объема материала поддается деформации. Уменьшая прилагаемую нагрузку, уменьшаем деформируемый объем, тем самым, точнее выявляем распределение свойств исследуемого материала.

Определяли микротвердость при нагрузке на индентор 20 г. Между ними находится промежуточная область — твердость при малых нагрузках, которая в настоящее время пользуются очень редко.

При испытании на микротвердость размер отпечатка настолько мал, что появляется возможность определять твёрдость отдельных зёрен или структурных составляющих материала. Поэтому определение микротвердости является важным методом физико-химического анализа материалов.

### 3. Результаты исследований

#### 3.1. Результаты исследования пайки пеноалюминия в вакууме

Первоначально чтобы оценить возможность пайки в предполагаемым нами способом, был проведен опыт контактно-реактивной пайки бруска пористого сплава А7 и листа сплава АД31 через цинковую прослойку. Пайка проводилась в установке для пайки в вакууме (рисунок 42).

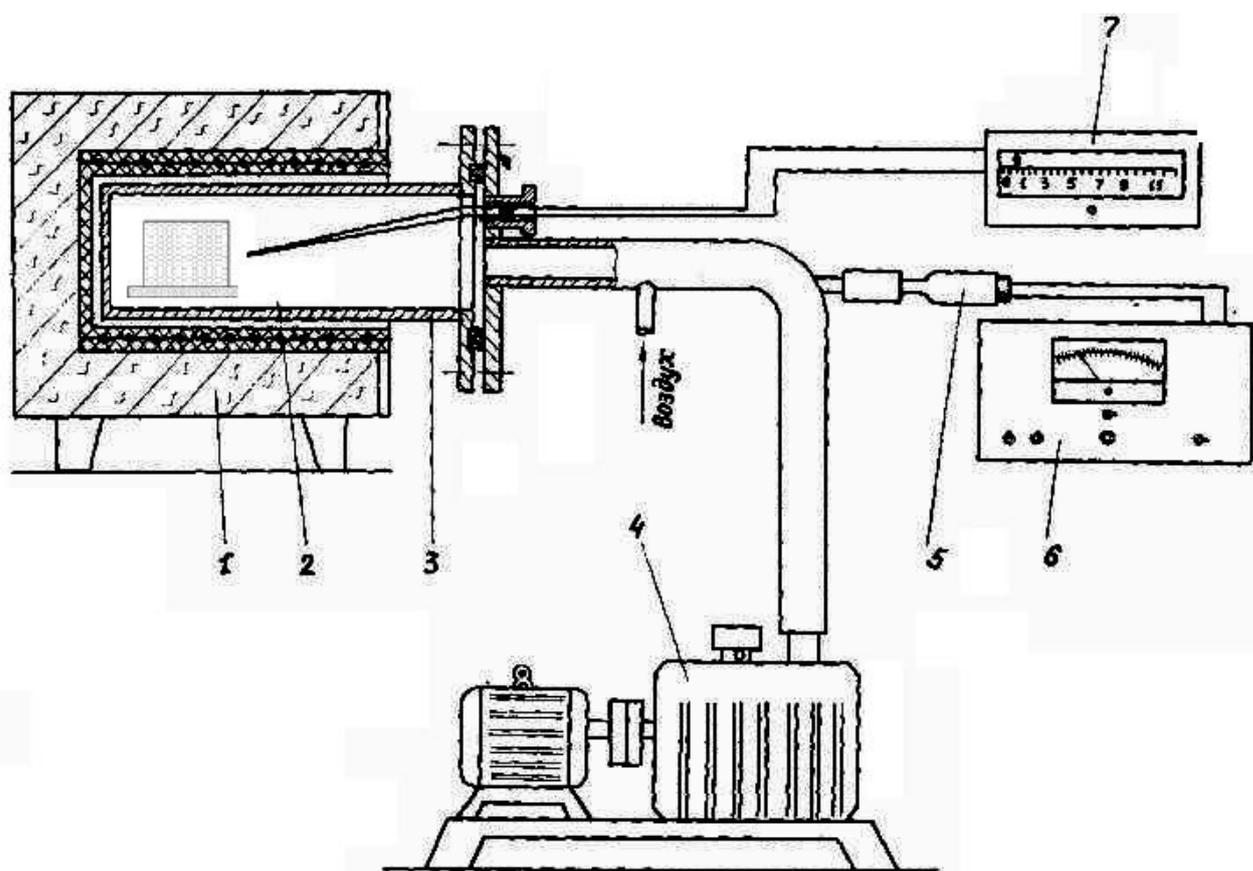


Рисунок 42 - Принципиальные схемы установок для пайки в вакууме  
1-Электрическая лабораторная печь СНОЛ-1,6.2,5.1/11-М1 У.4.2; 2-  
Паяемый образец; 3-Вакуумный контейнер из нержавеющей стали; 4-  
Вакуумный насос 2НВР-5ДМ; 5-Вакуумная термопарная лампа; 6-  
Вакуумметр; 7- Электрический измеритель температуры ОВЕН 2ТРМО

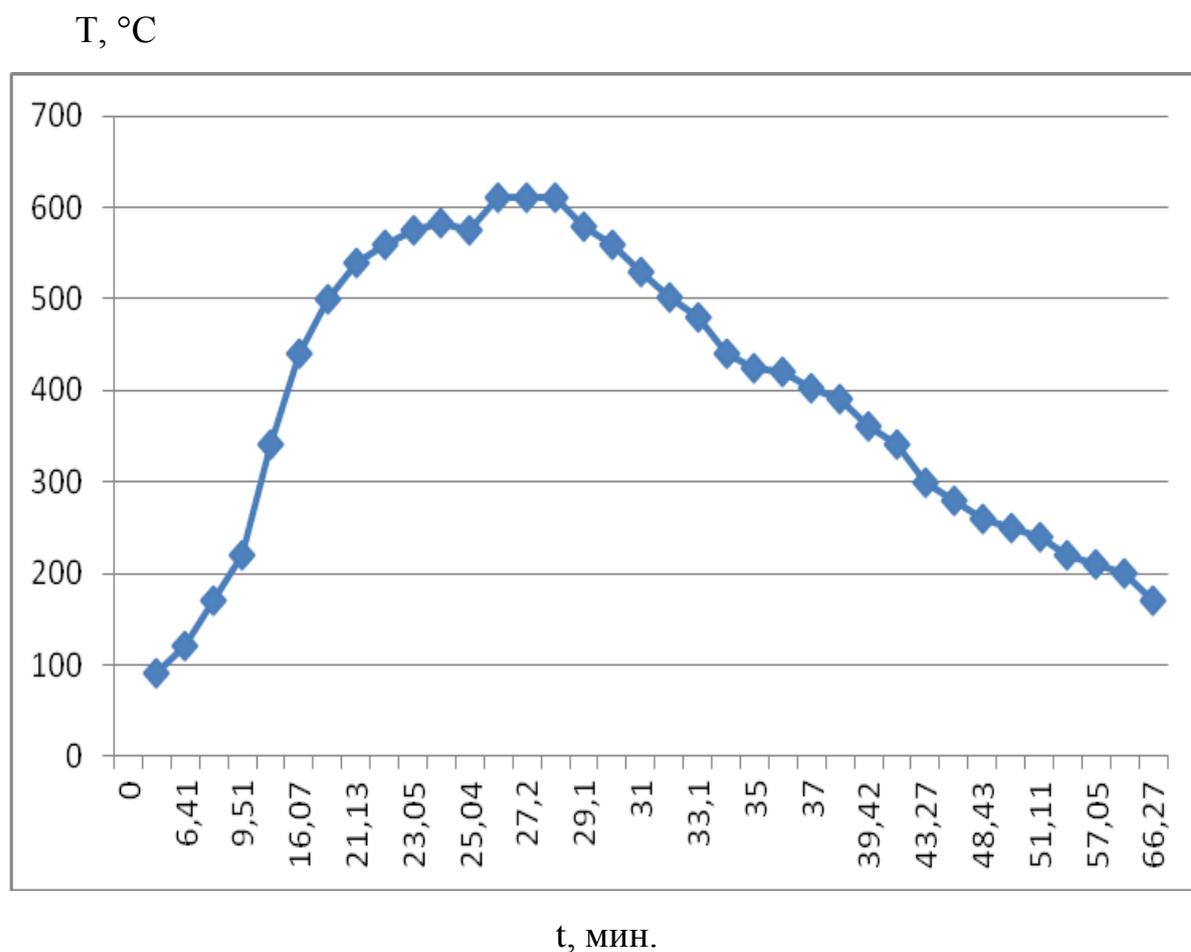
Средняя толщина фольги закладываемого цинка составляла 0,15 мм. Самая большая температура, достигаемая во время пайки, равнялась 620 °С. Эта температура выдерживалась в течении десяти минут.

Полученные образец имеет многочисленные прожоги (рисунок 43), видные не вооруженным глазом. Причиной тому являлась большая температура выдержки и низкая толщина подложки, равная 2 мм. Прожоги подложки появились преимущественно над полостями вспененного бруска. Что очевидно, ведь при контактно-реактивном плавлении происходит взаимная диффузия алюминия и цинка, а так как в пустотах нет алюминия, то цинк полностью реагирует с алюминием подложки и цинка в этом месте оказывается в избытке. Это и есть основная причина прожогов.



**Рисунок 43 – Образец пайки пористого сплава А7 с листом сплава АД31 путем контактно-реактивного плавления в вакууме через прослойку цинка**

Температурные изменения образца при пайке представлены графиком 44.



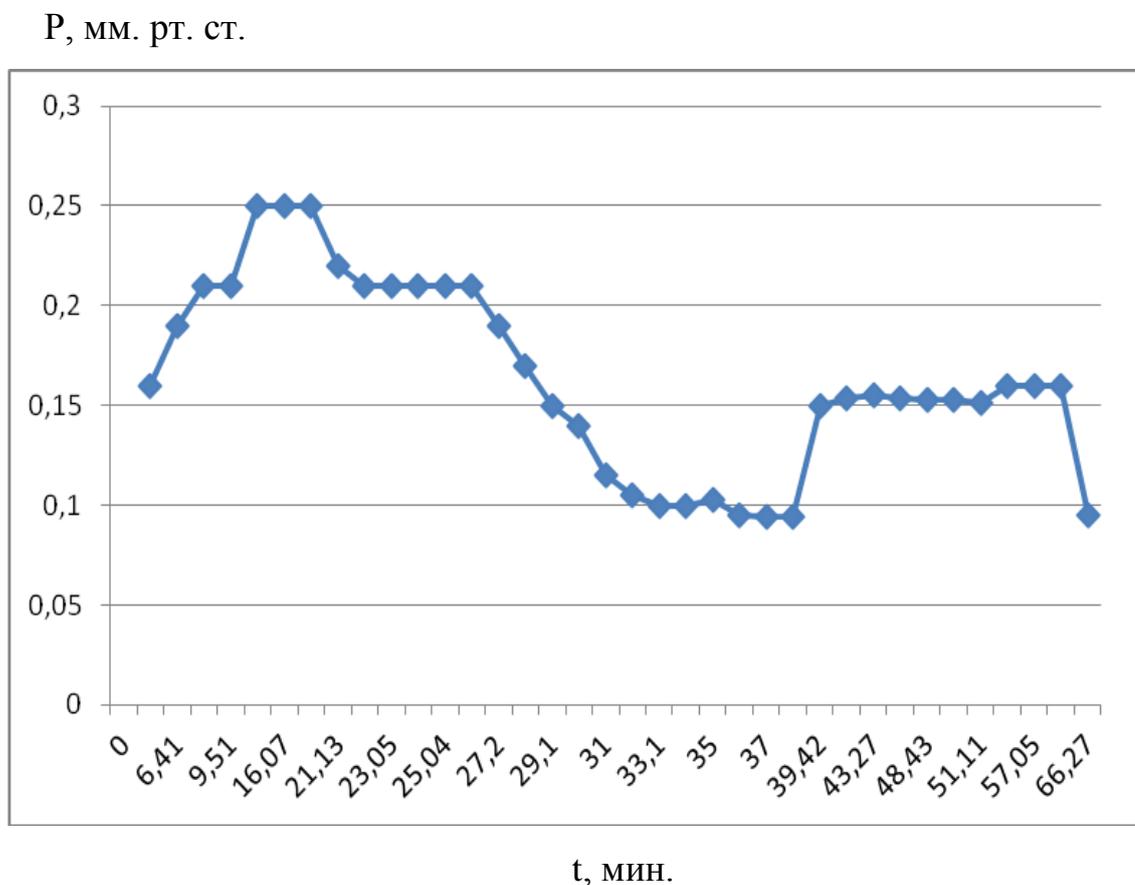
**Рисунок 44 – График изменения температуры образца пайки пористого сплава А7 с листом сплава АД31 путем контактно-реактивного плавления в вакууме через прослойку цинка**

Пайка проходила в среде низкого вакуума. Несмотря на это, спай произошёл.

График изменения давления внутри контейнера во время пайки представлен рисунком 45.

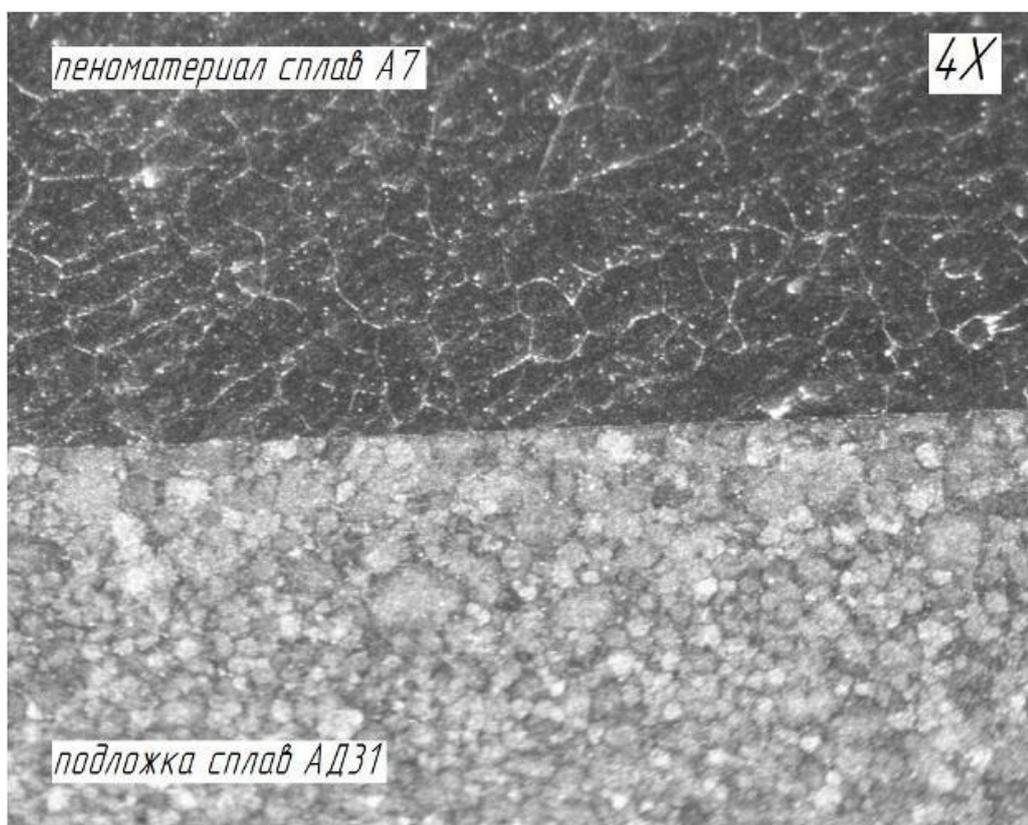
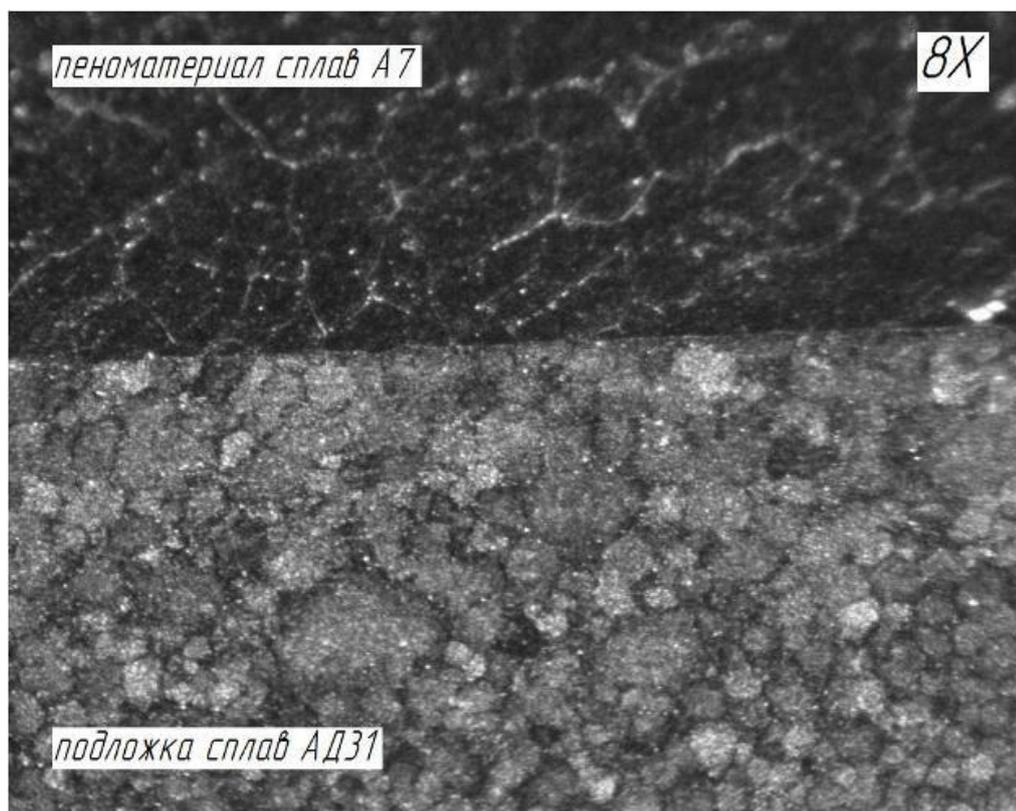
Были сделаны макро и микрошлифы, для более детального изучения места спая. Глядя на макроструктуру (рисунок 46) видна чуть заметная прослойка цинка на границах раздела пористого сплава А7, и подложки сплава АД31. На микрошлифах очень видно, что пеноматериал имеет более

крупную структуру зерна, чем сплошная подложка, а также насыщена порами (рисунок 47).

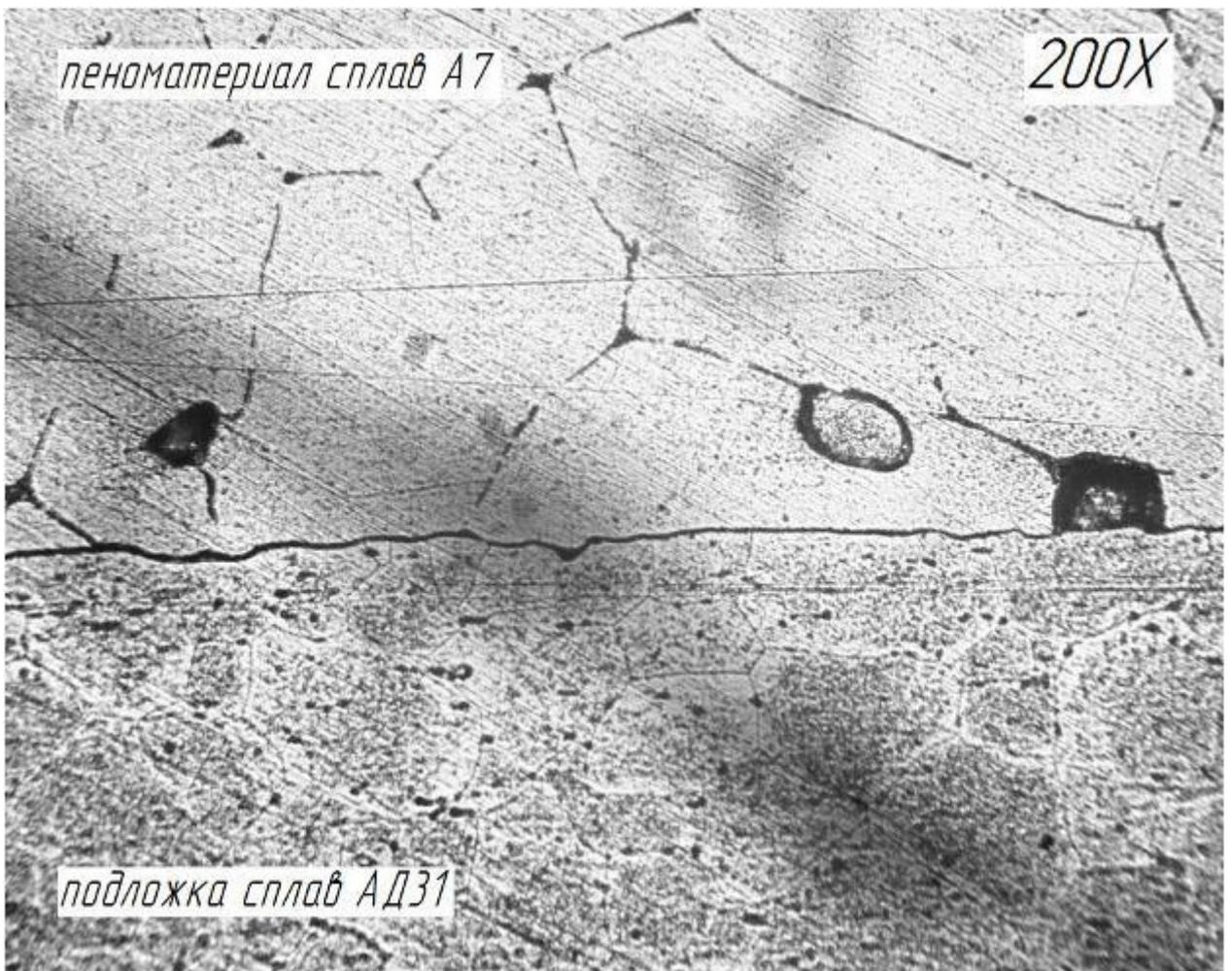


**Рисунок 45 – График изменения давления в контейнере при пайке образца пористого сплава А7 с листом сплава АД31 путем контактно-реактивного плавления в вакууме через прослойку цинка**

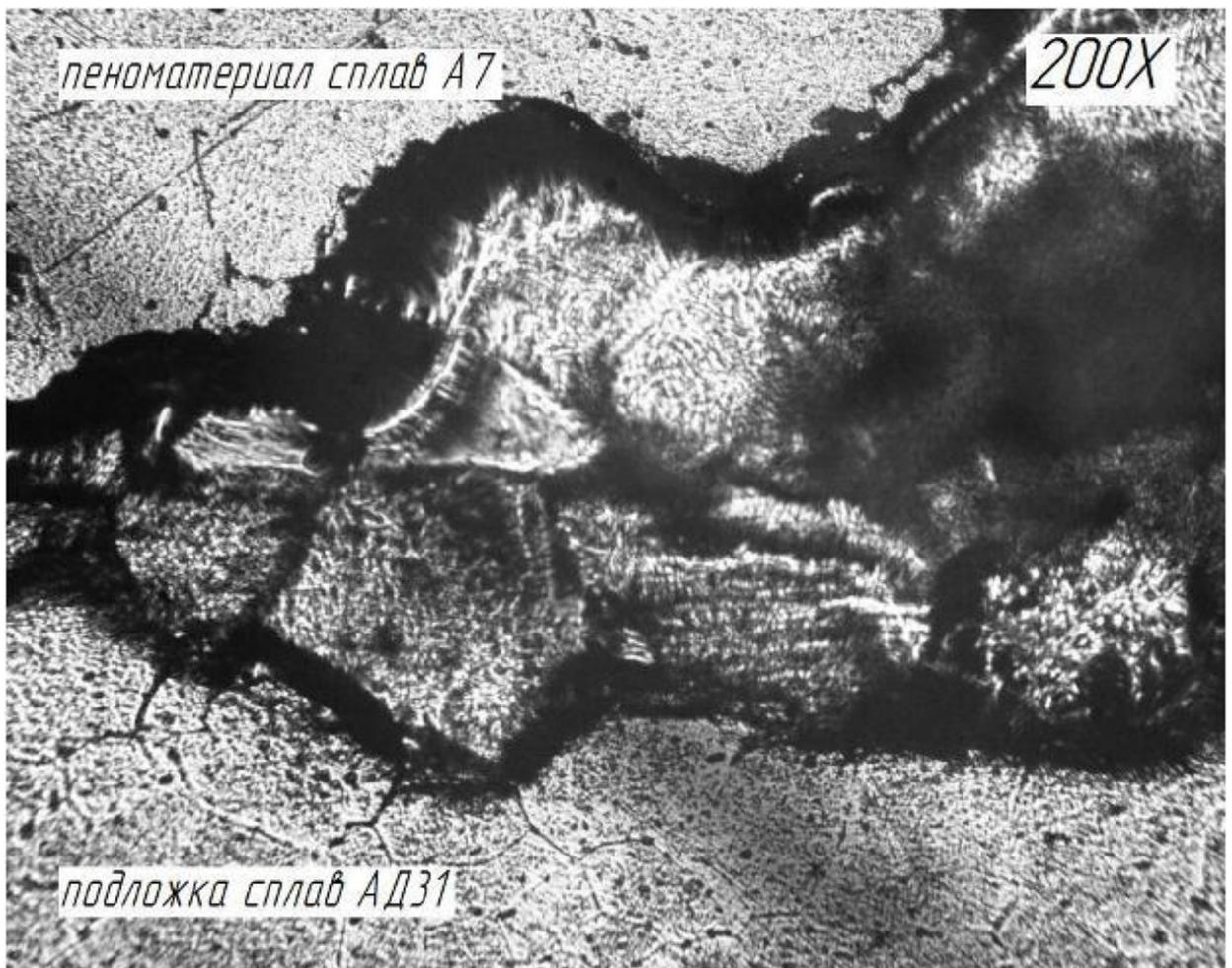
В шве изредка, но наблюдаются отсутствие спая, или же спай припоя только с одной из сторон (рисунок 48 – 50).



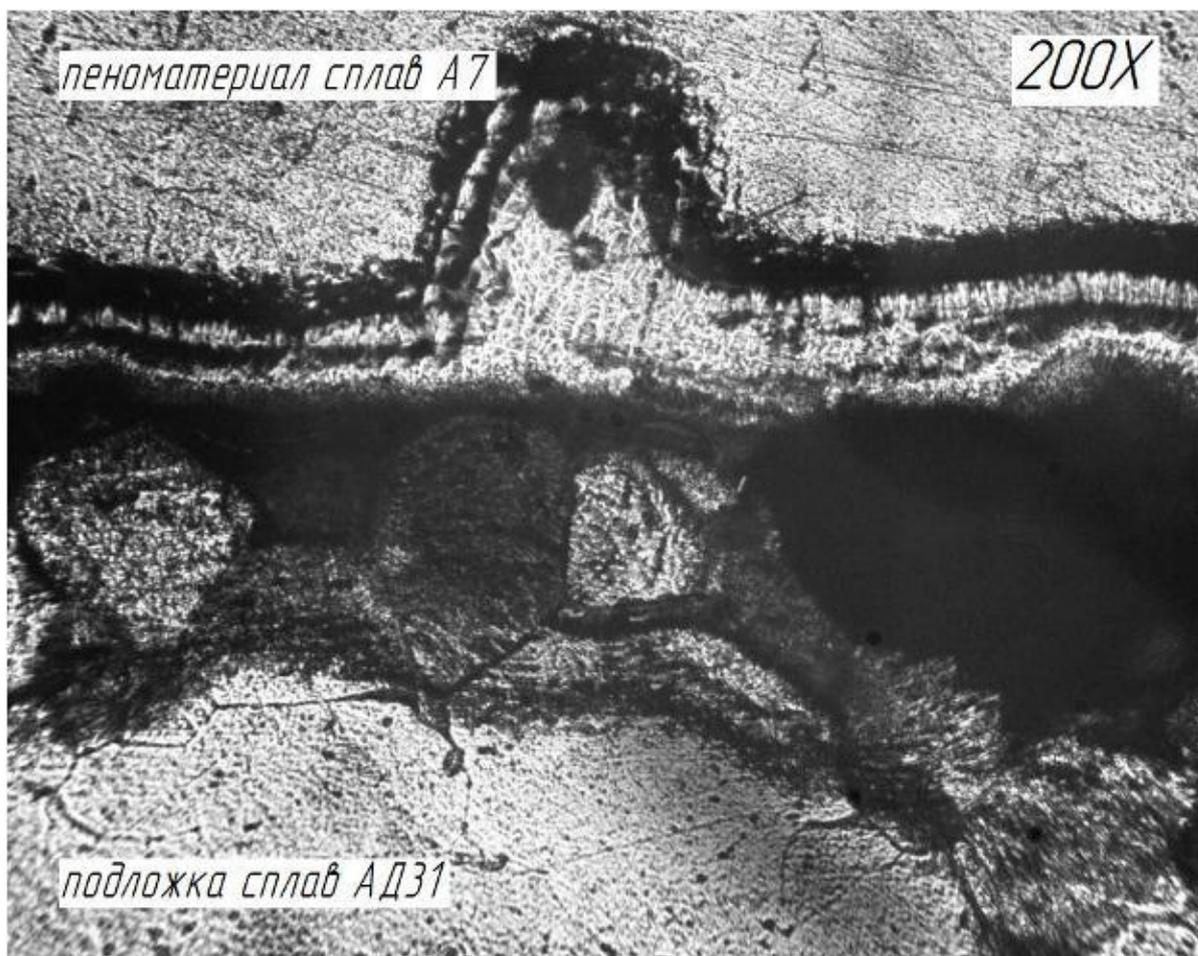
**Рисунок 46 – Макроструктура паяного соединения образца пористого сплава А7 с листом сплава АД31 путем контактно-реактивного плавления в вакууме через прослойку цинка**



**Рисунок 47 – Микроструктура паяного соединения образца пористого сплава А7 с листом сплава АД31 путем контактно-реактивного плавления в вакууме через прослойку цинка**



**Рисунок 48 – Микроструктура паяного соединения образца пористого сплава А7 с листом сплава АД31 путем контактно-реактивного плавления в вакууме через прослойку цинка**



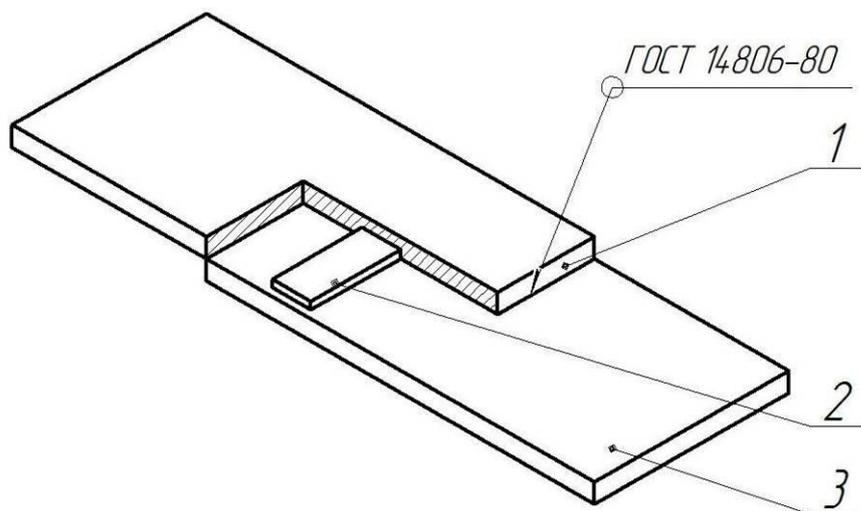
**Рисунок 49 – Микроструктура паяного соединения образца пористого сплава А7 с листом сплава АД31 путем контактно-реактивного плавления в вакууме через прослойку цинка**



**Рисунок 50 – Микроструктура паяного соединения образца пористого сплава А7 с листом сплава АД31 путем контактно-реактивного плавления в вакууме через прослойку цинка**

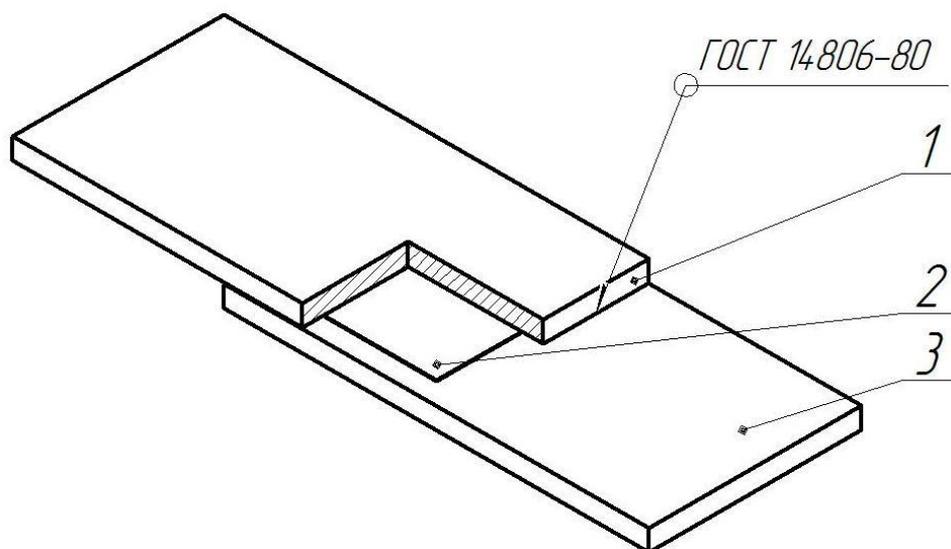
### **3.2. Результаты исследования пайки алюминия путем создания вакуума в паяемом зазоре**

В предыдущей работе исследовалась возможность автовакуумной пайки. В результате этой работы выяснилось, что пайка подобного рода конструкций бесперспективна (рисунки 51 – 53). Причина в невозможность процесса диффузии остаточного кислорода в паяемый металл в этих конструкциях.



- 1 Верхний лист из сплава АМцб
- 2 Брусочек припоя Zn в питателе размером 10х3х45
- 3 Нижний лист из сплава АМцб

**Рисунок 51 – Сборочный чертеж образца для автовакуумной пайки с питателем**



- 1 Верхний лист из сплава АМцб
- 2 Раскатанный припой Zn толщиной 0,08 – 0,19 мм
- 3 Нижний лист из сплава АМцб

**Рисунок 52 – Сборочный чертеж образца для автовакуумной пайкой без питателя**

Как было сказано ранее, в целях экономии ограниченного количества вспененного алюминия опыты и режим пайки подбирались для конструкции, изображенной на рисунке 29. При первых опытах трубка не имела изгиба, следовательно, листы образца располагались в печи вертикально, что привело к прожогу места сварки труб и листа (рисунок 53), разгерметизации конструкции и затеканию алюминиево-цинкового расплава в газоотводящую трубку (рисунок 54).

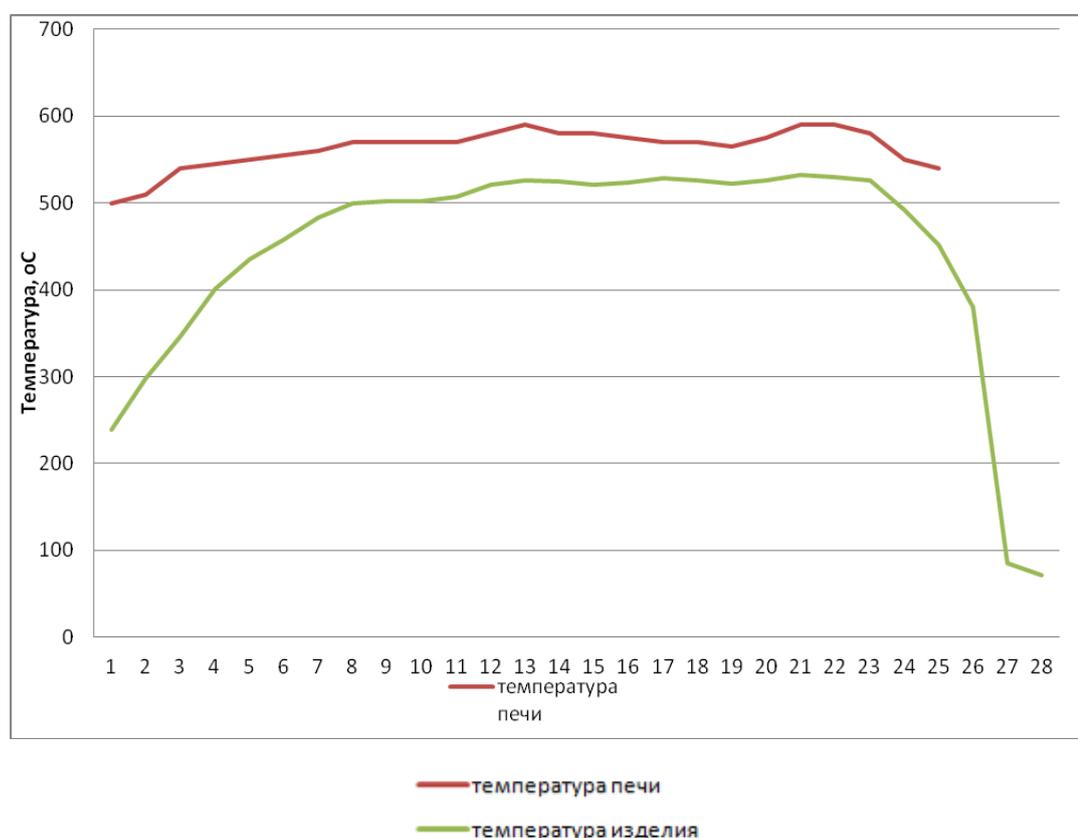


**Рисунок 53 – Прожог образца сплава 1935 ПС толщиной 2,5 мм**



**Рисунок 54 – Застывший алюминиево-цинковый расплав**

Пайка проходила при температуре 520 °С с десятиминутной выдержкой. Средняя толщина цинковой подложки достигала 0,30 мм. Разгерметизация произошла при достижении образцом температуры 506,5 °С. График изменения температуры представлен рисунком 55.

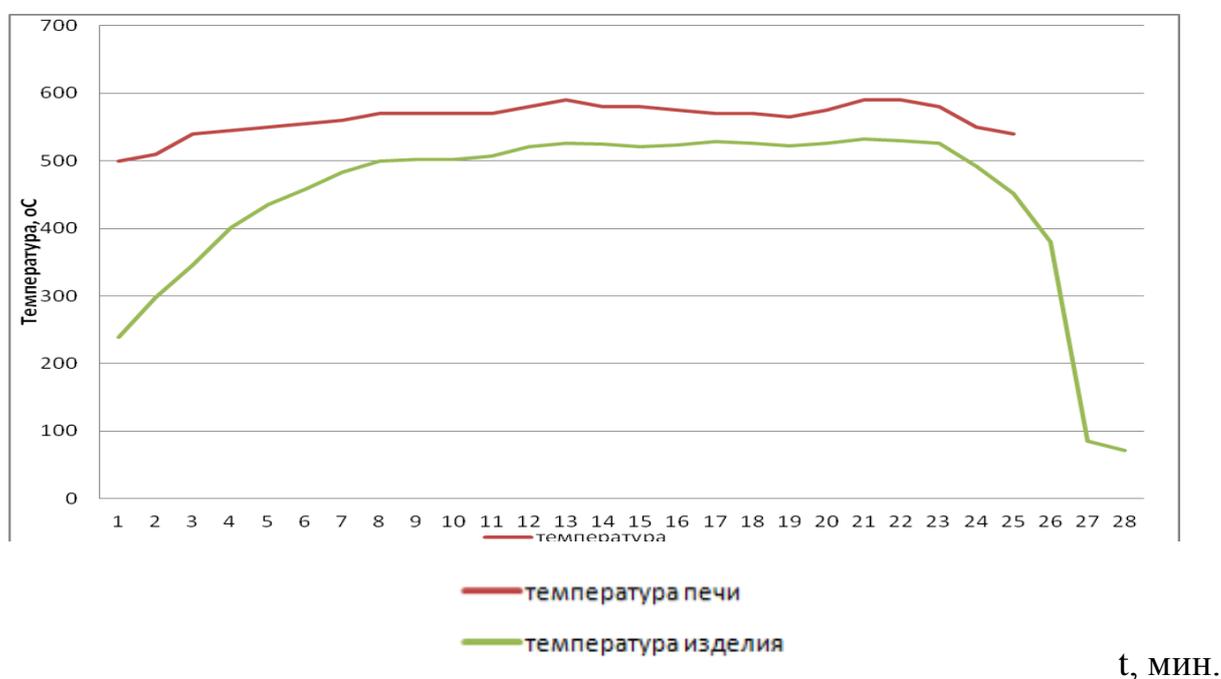


t, мин.

**Рисунок 55 – Графики изменения температур печи и паяемого образца сплава 1935ПС толщиной 2,5 мм**

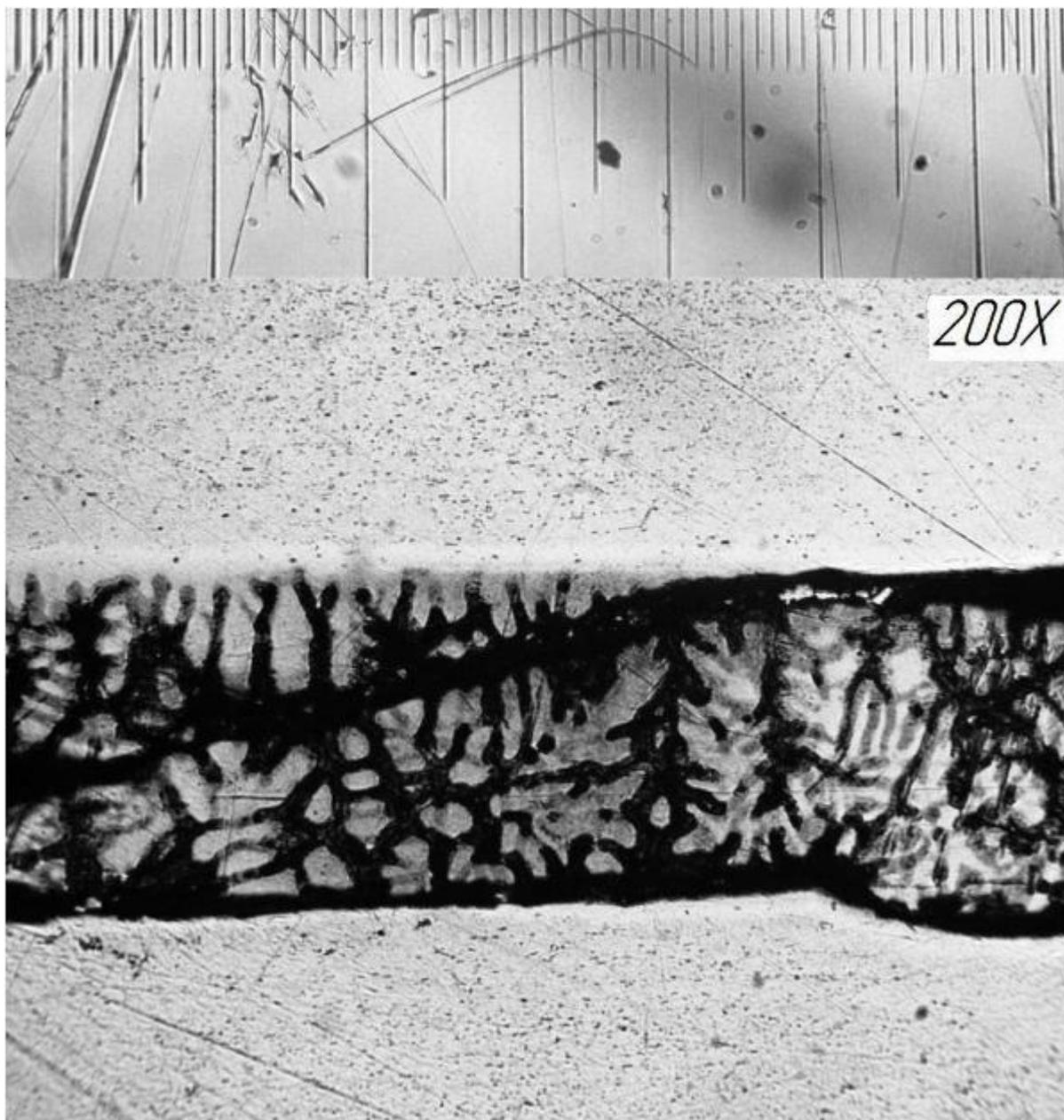
Спая соответственно не произошло. В дальнейших опытах все образцы были с изогнутой трубкой, так что листы образцов располагались горизонтально, что должно было позволить защитить трубку выпуск газов от прожогов и заполнения трубки алюминиево-цинковым расплавом.

Следующий опыт был произведен с участием листов сплава АМцб. Толщина листов была выбрана 8 мм, для детального контроля глубины проплавления листов. Толщина фольги цинка равнялась 0,30 мм, пайка проходила при температуре 504 °С в течении 10 минут. Разгерметизация произошла на 39 минуте при достижении 504,4 °С. В самом начале пайки, несмотря на это, было принято решение провести опыт до конца. Часть алюминиево-цинкового расплава по завершении пайки оказалась в трубе отвода газов, приблизительно в таком же количестве, что и в выше, описанном опыте. Рассматривая график изменения температур (рисунок 56) опыта виден резкий спад температуры по истечении выдержки, причина этому моя расторопность, побудившая меня остудить этот образец водой.

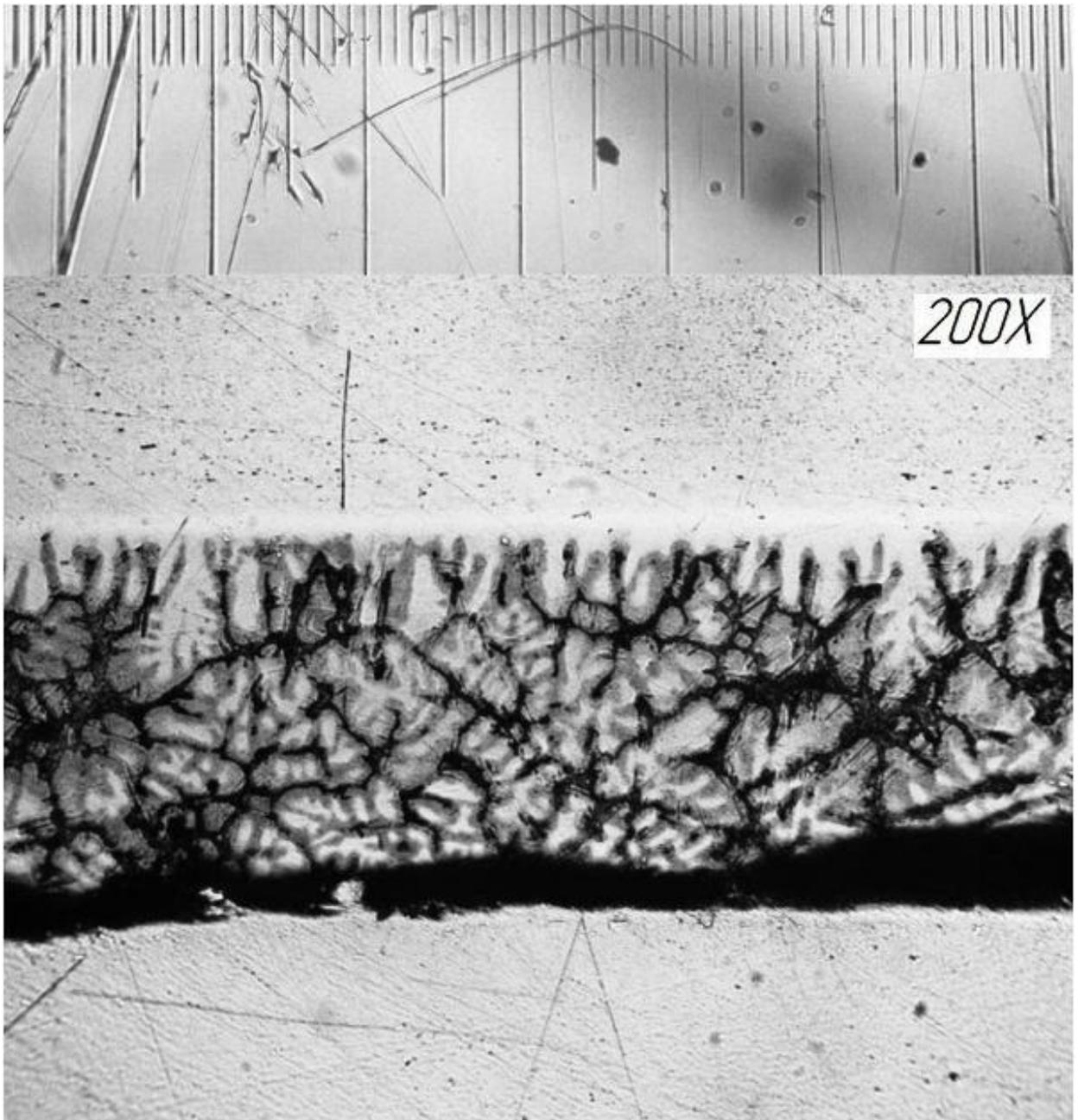


**Рисунок 55 – Графики изменения температур печи и паяемого образца сплава 1935ПС толщиной 2,5 мм**

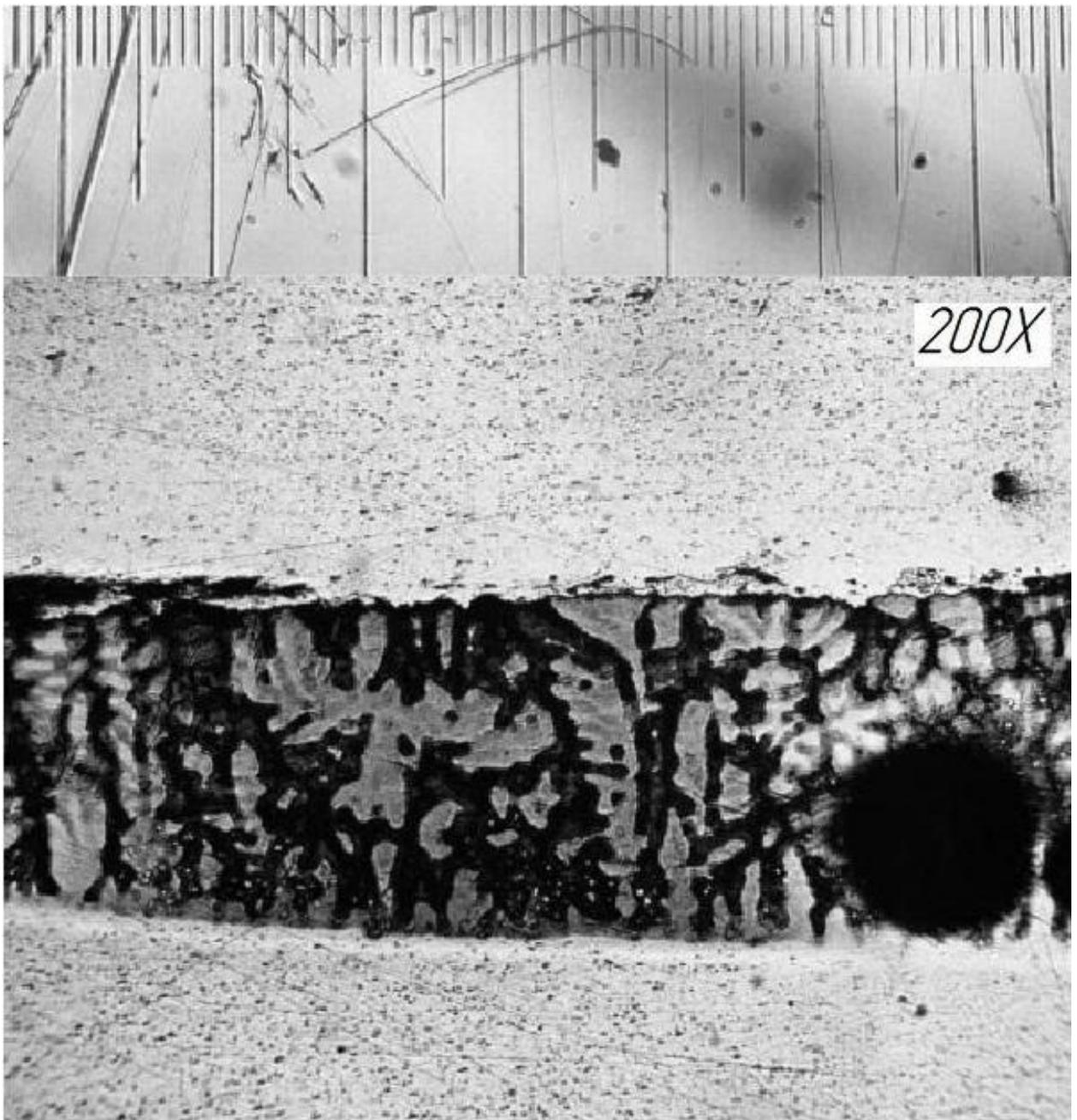
Не смотря это, спай произошел, но не полностью, что видно по микроструктурам (рисунок 56 – 58). Охлаждение водой вызвало резкие напряжения шва, видны диагональные трещины и поры. Спаю способствовал магний, легирующий сплав. Известно, что магний реагирует с кислородом раньше, чем алюминий, тем самым способствуя спаю. Дендритная структура расплава, обусловлена резким охлаждением.



**Рисунок 56 – Микроструктура паяного соединения образца листов сплава АМцб, путем контактно-реактивного плавления в вакууме через прослойку цинка**



**Рисунок 57 – Микроструктура паяного соединения образца листов сплава АМцб, путем контактно-реактивного плавления в вакууме через прослойку цинка**



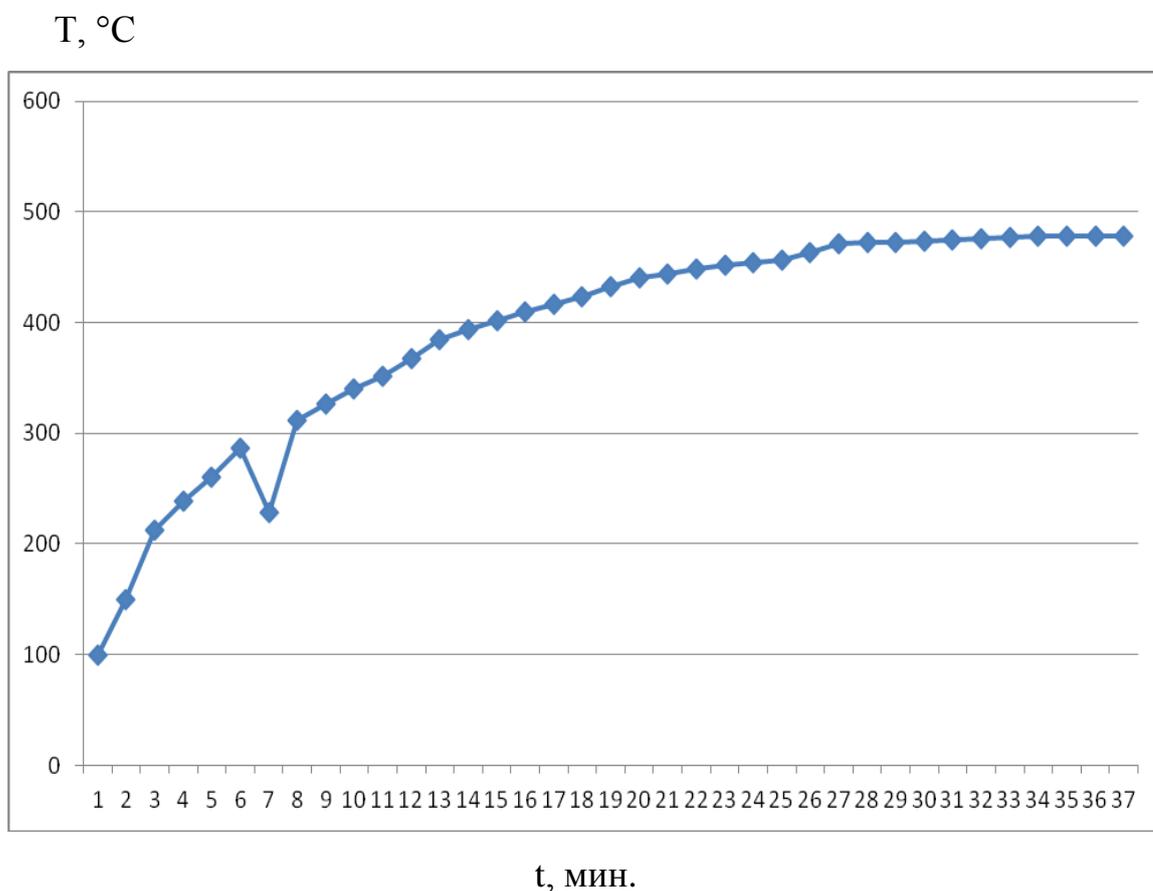
**Рисунок 58 – Микроструктура паяного соединения образца листов сплава АМцб, путем контактно-реактивного плавления в вакууме через прослойку цинка**

### **3.3. Результаты исследования пайки сэндвич-панели пеноалюминия**

Исходя из полученных данных, было принято решение в качестве плакирующих листов использовать сплавы, содержащие магний. Среди них сплав АМцб. Сборочный чертеж паяемого образца конструкции представлен на рисунке 31.

### Опыт №1.

Пайке подвергался образец сэндвич-панели, заполненной пористым сплавом А7 и плакирующих листов АД31 2 мм толщиной. Паялась конструкция в течение 10 минут с температурой нагрева изделия равной 520 °С. Подробное изменение температуры образца во время пайке отражено на графике 59. В процессе пайки использовались цинковые листы толщиной 0,14 мм. График изменения давления (рисунок 60) в паяемом образце явно указывает на разгерметизацию панели, начиная с 27 минуты, вследствие активного контактно-реактивного плавления. Прочного паяного соединения не получилось. Цинков покрылся окислом серого цвета (рисунок 61).



**Рисунок 59 – График изменения температуры образца при пайке в вакууме сплава АД31 и пеноматериал сплава А7**



**Рисунок 60 – График изменения давления в образце при пайке в вакууме сплава АД31 и пеноматериал сплава А7**



**Рисунок 61 – Цинк покрытый налетом на пеноалюминии**

## Опыт №2.

Контактно-реактивной пайке подвергался образец сэндвич-панели из пеноматериала сплава А7, покрытого листами сплава 1935ПС толщиной 2 мм. Толщина фольги припоя была 0,15 мм. В качестве припоя выступал цинк. Образец выдерживался 10 минут при температуре 520 °С. На 55 минуте образец разгерметизировался (рисунок 64). Изменение температуры образца демонстрирует график 63. Прочного паяного соединения по всей поверхности не получилось, но имеются места отличной пайки (рисунок 62).



Рисунок 62 – Распиленный образец после пайки

T, °C

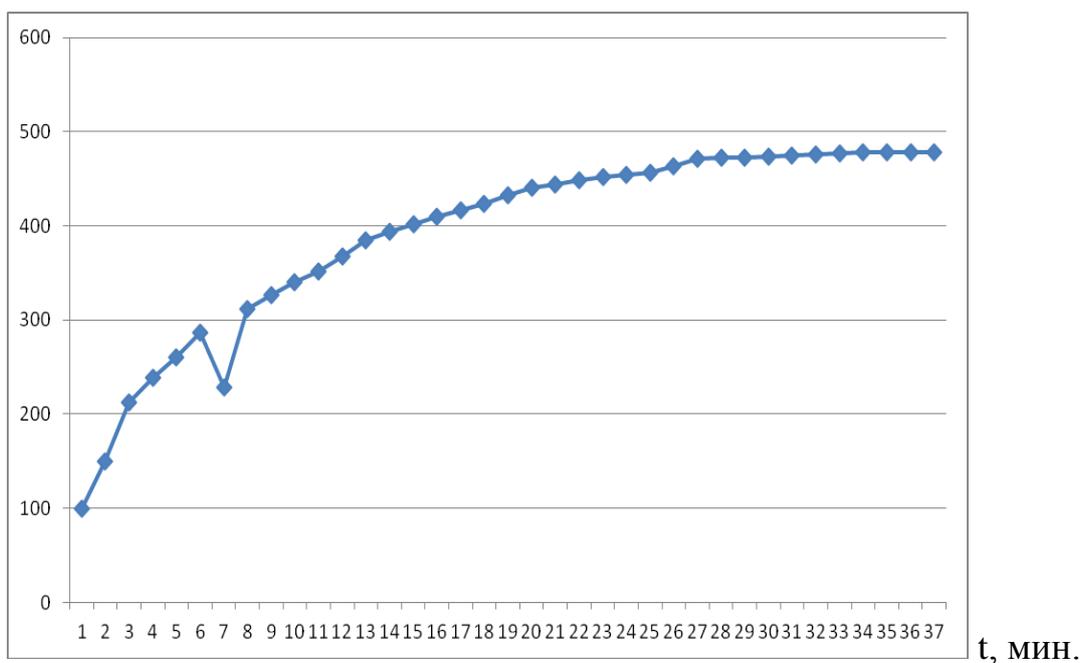


Рисунок 63 – График изменения температуры образца при пайке сплава 1935ПС и пеноматериала сплава А7

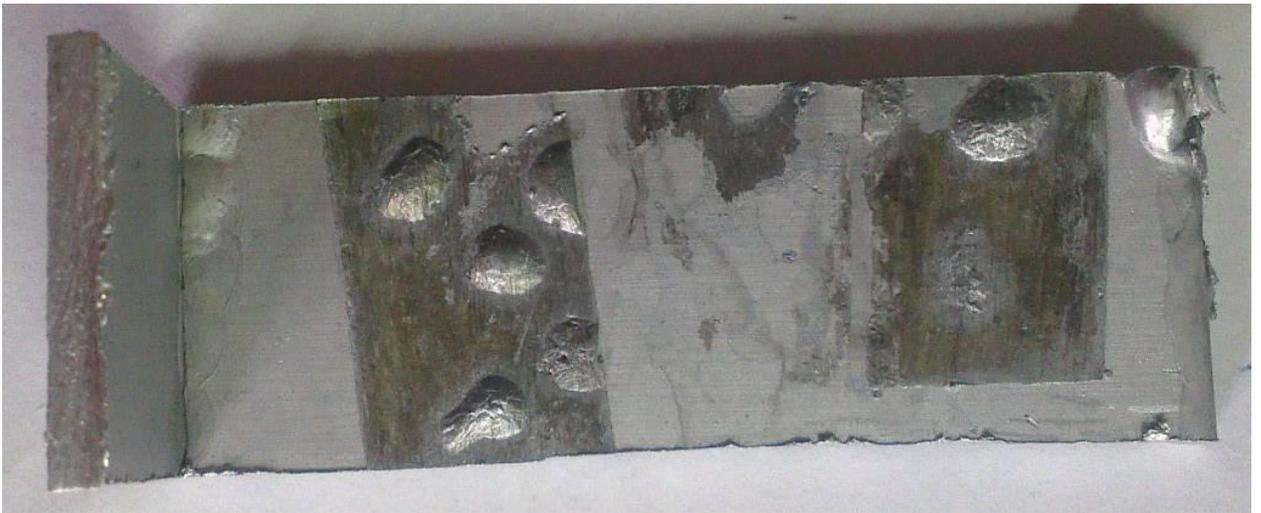


**Рисунок 64 – График изменения давления в образце при пайке сплава 1935ПС и пеноматериала сплава А7**

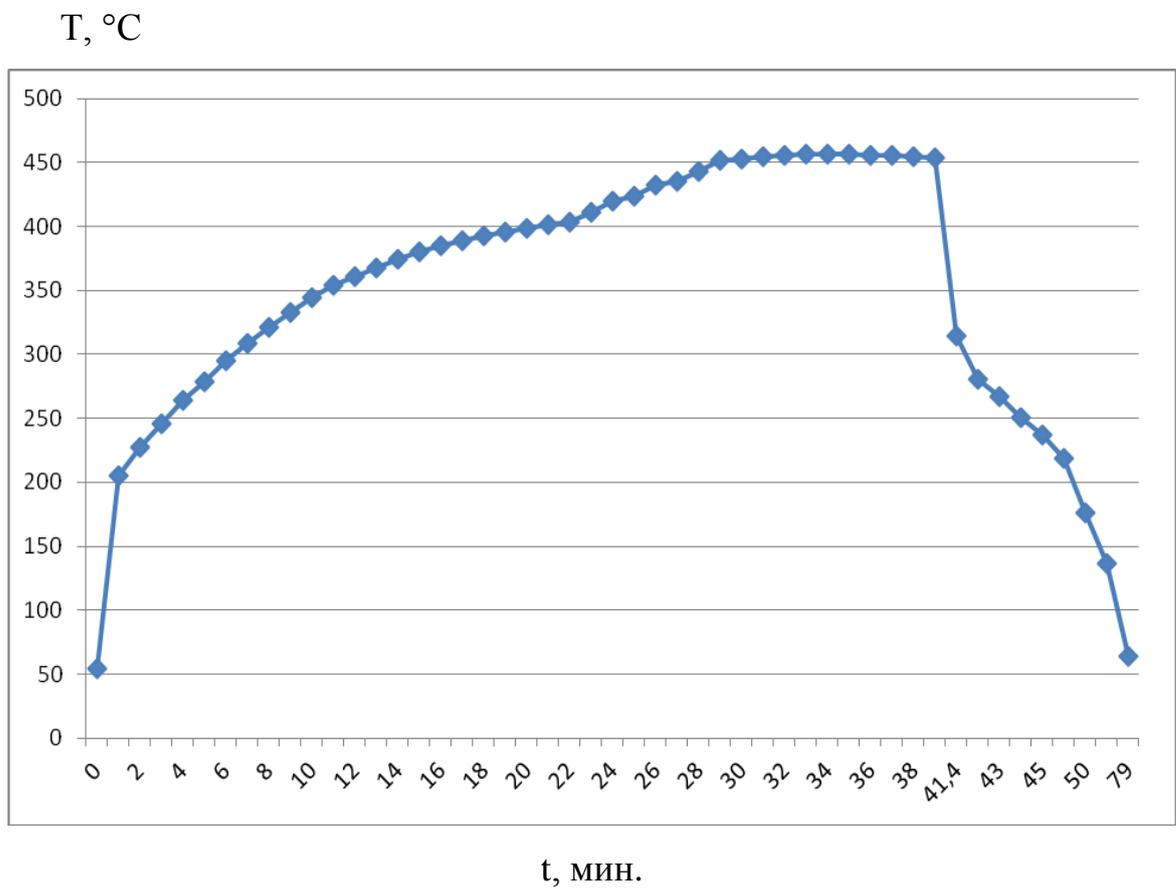
### **Опыт №3.**

Снизили температуру пайки до 450 °С, так как в предыдущих опытах наблюдались прожоги, время выдержки оставили прежним – 10 минут.

Плакирующие листы из сплава 1935ПС. Толщина листа составляет 2,5 мм. Сплав пеноматериала прежний – А7. Фольги цинкового припоя была толщиной 0,19 мм. Судя по графику изменения давления (рисунок 67) разгерметизации, а, следовательно, и прожога конструкции не произошло. Изменение температуры, с течением времени паяемого образца представлено графиком 66. Спая с пеноалюминием не произошло, но со стенками иначе. Припой спаялся с плакирующим листом, на его поверхности образовался желтый налет (рисунок 65). Предположительно, оксид цинка или тригидрата оксида алюминия образовался на поверхности пеноматериала и препятствовал пайке.

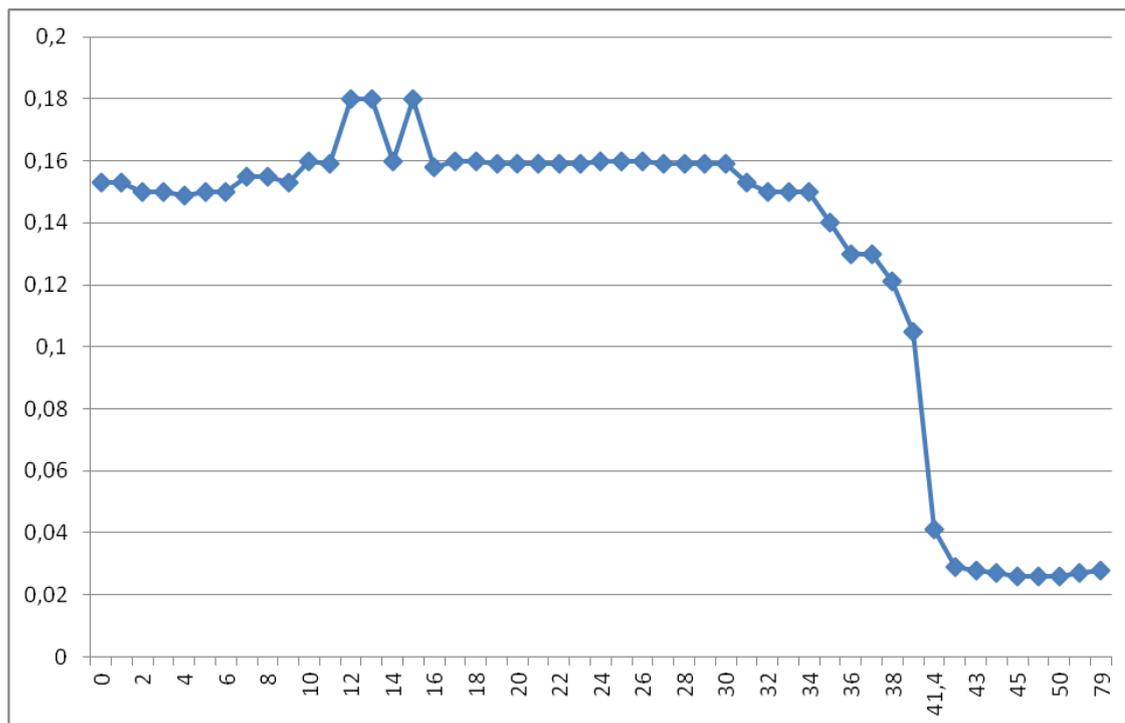


**Рисунок 65– Смачивание стенки панели припоем**



**Рисунок 66 – График изменения температуры образца при пайке сплава 1935ПС и пеноматериала сплава А7**

P, мм. рт. ст.



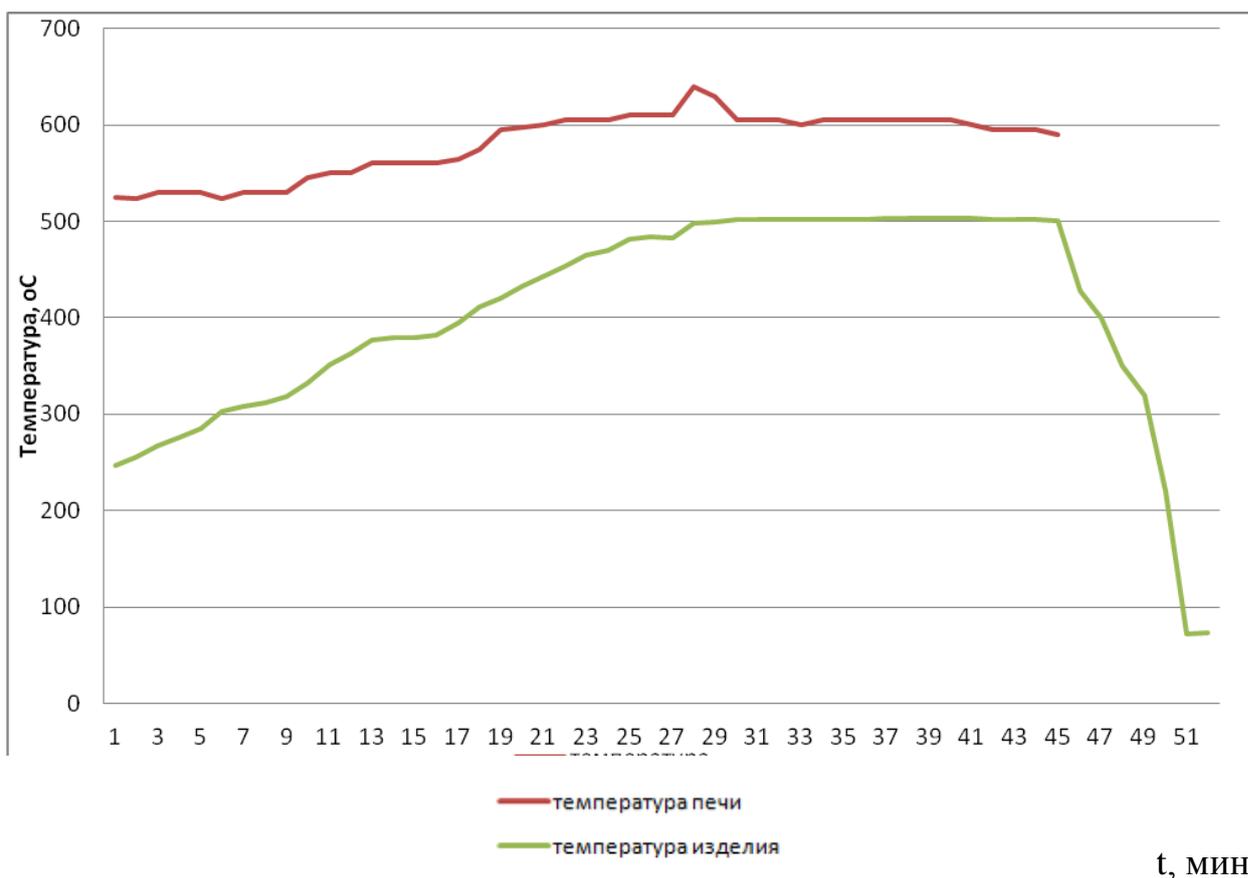
t, мин.

**Рисунок 67 – График изменения давления в образце при пайке сплава 1935ПС и пеноматериала сплава А7**

#### **Опыт №4.**

Повысили температуру пайки до 500 °С, так как в предыдущем опыте не наблюдался четкий спай, время выдержки увеличили до 15 минут.

В качестве сплава плакирующих листов выбрали АМц толщиной 8 мм. Пеноматериал прежний – А7. Фольга цинкового припоя была толщиной 0,25 мм. Разгерметизации не наблюдалось. Изменения температур паяемого образца представлено графиком 68. Спая не произошло, но на нижней стороне панели цинк ступил в реакцию с пеноалюминием и образовал спай (рисунок 69).



**Рисунок 68 – Графики изменения температур печи и паяемого образца сэндвич-панели пористого сплава А7 и листов АМЦ толщиной 8 мм**



**Рисунок 69 – Место контактно-реактивного плавления алюминия цинком**

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определили возможность получения соединения алюминия и пеноалюминия в системе Al-Zn.

Выяснилось, что соединения получаются в тех вариантах технологического процесса, где вакуум создается в месте паяемого зазора при помощи вакуумного насоса. Наличие магния в паяемой зоне способствует пайке. Поэтому применение магнийсодержащих сплавов желательно.

Во время всего процесса пайки необходимо сохранять горизонтальное положение образца, излишки припоя способны приводить к прожогам стенок конструкции.

Исследование не окончательное, требует дополнительных опытов. Еще не опробованы все возможные способы пайки алюминия. К их числу можно отнести пайку в парах магния, высокотемпературная пайка в вакууме и другие способы.

Дальнейшие исследования позволят в дальнейшем ответить, возможно и экономически оправдано ли применение контактно-реактивного плавления цинком при производстве сэндвич-панелей, заполненных пеноалюминием.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. 2ТРМ0 ИЗМЕРИТЕЛЬ МИКРОПРОЦЕССОРНЫЙ ДВУХКАНАЛЬНЫЙ РУКОВОДСТВО ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.owen.ru/uploads/rie\\_2trm0\\_m\\_din\\_\\_1934.pdf](http://www.owen.ru/uploads/rie_2trm0_m_din__1934.pdf). – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 23.10.2015).
2. ГОСТ 11069-74 Алюминий первичный. Марки [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.gosthelp.ru/text/GOST1106974Alyuminijpervi.html>. – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 21.09.2015).
3. ГОСТ 17325-79 Пайка и лужение. Основные термины и определения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.internet-law.ru/gosts/gost/39960/>. – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 21.09.2015).
4. ГОСТ 3242-79. Соединения сварные. Методы контроля качества [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/gost-3242-79>. – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 21.09.2015).
5. ГОСТ 3640-94. Цинк. Технические условия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/gost-3640-94>. – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 20.09.2015).
6. ГОСТ 4784-97 Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.internet-law.ru/gosts/gost/9032/>. – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 14.10.2015).
7. Данков, П.Д. Электронно-графические исследования окисных и гидроокисных пленок на металлах [Текст] / П.Д. Данков, Д.В. Игнатов, Н.А. Шишаков. М.: Изд-во АН СССР, 1953. - 200 с.

8. Запунный, А.И. Контроль герметичности конструкций. [Текст] / А.И. Запунный, Л. С. Фельдман, В.Ф. Рогаль. – Киев : Техника, 1976. - 152 с.
9. Краткий справочник паяльщика [Текст] / И.Е. Петрунин, И.Ю. Маркова, Л.Л. Гржимальский и др.; под ред. И. Е. Петрунина. - М.: Машиностроение, 1991. - 224 с.
10. Кубашевский, О.М. Окисление металлов и сплавов [Текст] / О.М. Кубашевский, Б.Л. Гопкинс. - М.: Металлургия, 1965 - 428 с.
11. Лашко, С.В. Пайка металлов : производственно-практическое издание / С. В. Лашко, Н. Ф. Лашко. - 4-е изд., перераб. и доп. - М. : Машиностроение, 1988. - 376 с.
12. Лашко, С.В., Контактное твердожидкое активирование поверхности алюминиевых сплавов при бесфлюсовой высокотемпературной пайке на воздухе [Текст] / С.В. Лашко, Г.Н. Уполовникова, Н.Ф. Лашко // Автоматическая сварка. – 1975. - №7. - С. 27 - 30.
13. Микротвердомер ПМТ-3 [Текст]: инструкция к пользованию / Ленинградское оптико-механическое объединение ордена Ленина. – Ленинград : Ленинградское оптико-механическое объединение ордена Ленина, 1967. - 26 с.
14. Никитинский А.М. Влияние технологических факторов на качество пайки в солевой ванне алюминиевых теплообменников [Текст] / А.М. Никитинский, В.Б. Челышев, В.М. Шилин и др. // Автоматическая сварка – 1976. - №6. - С. 27-28.
15. Никитинский, А.М. Пайка алюминия и его сплавов [Текст] : научное издание / А.М. Никитинский. – М.: Машиностроение, 1983. – 192 с.

16. ОСТ 1 92014-90 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.pkfmetall.com/content/database/?action=view&id=10481>. – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 22.09.2015).
17. Петрунин, И. Е. Пайка металлов [Текст] : [учеб. пособие для машиностроит. специальностей вузов] / И.Е. Петрунин, С.Н. Лоцманов, Г.А. Николаев. - 2-е изд., испр. и доп. - М. : Metallurgiya, 1973. - 281 с.
18. Петрунин, И.Е. Пайка металлов [Текст] / И.Е. Петрунин, С.Н. Лоцманов, Г.А. Николаев. - 2-е изд. – М.: Metallurgiya, 1973. - 280 с.
19. Петрунин, И.Е. Справочник по пайке [Текст] : научное издание / И.Е. Петрунин, Ю.И. березников, Р.Р. Бунькина ; ред. И.Е. Петрунин. - 3-е изд., перераб. и доп. - М. : Машиностроение, 2003. - 480 с.
20. Самсонов, Г. Ф. Физико-химические свойства окислов [Текст] : справочник / под ред. Г. В. Самсонова. - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Metallurgiya, 1978. - 471 с.
21. Серебряник, И.П. Автовакуумная некапиллярная конструкционная пайка [Текст.] / И.П. Серебряник. – Киев : Альфа Реклама, 2011. – 68 с.
22. Смирнов, Г. Н. Прогрессивные способы пайки алюминия [Текст] / Г. Н. Смирнов. М.: Metallurgiya, 1981. - 240 с.
23. Способ получения пеноалюминия [Текст] // Патент России №2400552. 2010. /Ковтунов А.И., Чермашенцева Т.В., Семистенов Д.А., Сидоров В.П.
24. Сторчай, Е.И. Флюсовая пайка алюминия [Текст] : материал технической информации / Е.И. Сторчай. - М. : Metallurgiya, 1980. - 124 с.
25. УСТАНОВКА ДЛЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ УДГУ-351АС/ДС УЗ.1 (Транс ТИГ 350) Паспорт [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://ets-ural.ru/images/import\\_files/5c/5c283631-1cfc-11e2-a18a-](http://ets-ural.ru/images/import_files/5c/5c283631-1cfc-11e2-a18a-)

- 001e67042737\_18d58bef-f852-11e3-e48c-001e67042737.pdf. – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 23.09.2015).
26. Хансен, М. Структуры двойных сплавов [Текст] : справочник / М. Хансен, К. Андерко ; пер. с англ. П. К. Новика [и др.] ; под ред.: И. И. Новикова, И. Л. Рогельберга. - М.: Металлургиздат, 1962. - 608 с.
27. (1.6) ALUMINUM SOLDERING - A NEW LOOK [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.johnsonmfg.com/temp/Papers/IBSC2003.pdf>. – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 10.02.2016).
28. A study of Mg and Cu additions on the foaming behaviour of Al-Si alloys [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.helmholtz-berlin.de/media/media/spezial/people/banhart/html/A-Journals/open/preprint/a169\\_helwig2011.pdf](https://www.helmholtz-berlin.de/media/media/spezial/people/banhart/html/A-Journals/open/preprint/a169_helwig2011.pdf). – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 18.02.2017).
29. Banhart J. Aluminium foams for lighter vehicles [Текст] / J. Banhart // International Journal of Vehicle Design. – 2005. - № 37. – С. 114 – 125.
30. Fabrication of functionally graded aluminum foam using aluminum alloy die castings by friction stir processing [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.lm-foundation.or.jp/english/abstract-vol45/abstract/09.html>. – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 14.04.2016).
31. Recent Trends in Aluminium Foam Sandwich Technology [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.helmholtz-berlin.de/media/media/spezial/people/banhart/html/A-Journals/open/preprint/a210\\_banhart2011.pdf](https://www.helmholtz-berlin.de/media/media/spezial/people/banhart/html/A-Journals/open/preprint/a210_banhart2011.pdf). – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 20.02.2017).