



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

ФАКУЛЬТЕТ _____ Специальное машиностроение _____

КАФЕДРА _____ Ракетно- космические композитные конструкции _____

РАСЧЕТНО-ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ
РАБОТЕ
НА ТЕМУ:

**«Разработка технологии формования композитов
методом вакуумной инфузии с использованием
неорганических связующих»**

Студент СМ13-42М _____ Бурченкова Т.Д. _____
(Группа) (Подпись, дата)
(И.О.Фамилия)

Руководитель ВКР _____ к.х.н. Полежаев А.В. _____
(Подпись, дата) (И.О.Фамилия)

Консультант _____ к.т.н. Нелюб В.А. _____
(Подпись, дата) (И.О.Фамилия)

Нормоконтролер _____ к.т.н. Денисова Л.В. _____
(Подпись, дата) (И.О.Фамилия)

Аннотация

Расчетно – пояснительная записка включает 98 листов, 61 рисунок, 16 таблиц, 1 приложение.

В работе исследованы свойства неорганических связующих на основе алюмоборфосфатных связующих. Разработана технология формования композитов с использованием методов сварки. Экспериментально установлено, что термостойкость созданных композитов превышает 1000 °С.

Современная конструкция самолета оснащена медной сеткой, основное назначение которой – защищать от удара молнии, однако, крепление таких сеток приводит к высокой себестоимости, увеличению массы и увеличению трудозатрат. Так же имеется ряд изделий, которые не защищаются от воздействия молнии, хотя такая необходимость существует. В настоящей работе исследована возможность изготавливать на основе углеродных лент углепластики с медным покрытием.

В работе доказана эффективность применения медного покрытия для повышения теплопроводности углепластиков. Такие материалы обеспечат повышение долговечности, снижение себестоимости и повышение эффективности использования углепластиков. В настоящей работе, для нанесения на поверхность углеродной ленты медного покрытия использована технология магнетронного распыления, суть которой состоит в том, что напыляемый металл первоначально переводят в газообразное состояние, а потом переносят его на поверхность углеродной ленты, где он превращается в твердый материал, образуя тонкое металлическое покрытие.

Содержание

Основные сокращения и условные обозначения.....	8
Введение.....	9
Глава 1. Литературный обзор.....	13
1.1. Современные технологии создания изделий из полимерных композиционных материалов с использованием армирующих наполнителей....	13
1.2. Связующие для изготовления ПКМ.....	19
1.3. Технологии сварки.....	25
Выводы по первой главе.....	37
Глава 2. Объекты и методы исследования.....	38
2.1. Объекты исследования.....	38
2.2. Методы исследования.....	43
Глава 3. Экспериментальная часть.....	50
3.1. Структурные исследования.....	50
3.2. Изготовление образцов с применением новых сварочных технологий.....	56
3.3. Анализ структур после сварки.....	62
Вывод по третьей главе.....	77
Глава 4. Теоретическая оценка свойств элементарных нитей с медным покрытием.....	78
4.1. Тепловой расчёт элементарной углеродной нити с металлическим покрытием.....	78
4.2. Результаты моделирования.....	90
Глава 5. Экспериментальная оценка свойств композитов на основе углеродной ленты с металлическим покрытием на основе неорганических связующих.....	91
5.1. Термогравиметрический анализ.....	91
5.2. Механические испытания.....	92
Заключение.....	93
Список использованных источников.....	95

Основные сокращения и условные обозначения

RTM – resin transfer molding

VARTM – vacuum assisted resin transfer molding

КМ – композиционный материал

ПКМ – полимерный композиционный материал

МФС - межфазный слой

АБФС – алюмоборфосфатное связующее

Введение

При создании конструкционных полимерных композиционных материалов с использованием таких армирующих материалов, как ткани, ленты, волокна и др. [1], в качестве связующих традиционно использовались олигомерные материалы на основе эпоксидных, полиэфирных и фенольных смол [2]. Основным недостатком этих и других типов олигомерных связующих является их низкая тепло- и термостойкость [3], повышенная горючесть и большое количество летучих продуктов деструкции при термических воздействиях. Этих недостатков лишены композиты на основе неорганических связующих.

Среди большой группы неорганических связующих, по своим технологическим свойствам, фосфаты наиболее близки к органическим, так как твердеют при температурах до 300 °С. Традиционные полимерные композитные материалы представляют собой органические полимеры, армированные волокнами. Рабочая температура этих композитных материалов определяется температурой стеклования полимерной матрицы, величина которой не превышает 200-300 °С [3]. Установлено, что прочность таких материалов не велика, для увеличения прочности на межслоевой сдвиг в подобных случаях используют технологию прошивки, однако при использовании данного метода имеет место повреждение структуры. Данных недостатков лишены технологии с использованием сварочного оборудования, однако в технической литературе отсутствует информация, связанная с их применением при изготовлении изделий из ПКМ.

Углепластики широко используются в различных отраслях, наиболее известное- ракетно-космические конструкции [4], их преимущества хорошо известны, однако, длительный опыт применения этих материалов показал, что они обладают рядом недостатков. Одним из них является низкая стойкость к воздействию молнии [5].

Одним из современных методов придания углепластикам новых свойств является использованием углеродных тканей (лент) с предварительно

нанесенным на них металлическим покрытием. Основной целью металлизации является изменение физико-химических свойств поверхности углеродных тканей, что позволяет регулировать их теплофизические свойства. Создание углепластиков с новым комплексом функциональных свойств позволит существенно повысить конкурентоспособность изделий.

Нанесение на поверхность углеродных лент медного покрытия позволяет использовать сварочные технологии, для соединения армирующих тканей между собой. Использование сварки для соединения между собой армирующих материалов в перспективе позволит использовать вместе органических связующих – неорганические, основным преимуществом которых являются существенно большие значения рабочих температур, которые достигают 1000°C , тогда как теплостойкость углепластиков на органических связующих, как правило, не превышает 250°C .

Однако, для проведения сварки необходимо знать тепловые нагрузки, при которых, с одной стороны не будет происходить расплавление медного покрытия на поверхности углеродной ленты, а с другой стороны, будут обеспечиваться условия возникновения сварного шва (или сварной точки).

Целью является улучшение комплекса эксплуатационных свойств композитов на основе углеродных лент за счет применения сварочных технологий.

Задачи:

- Разработка технологии получения композитов с использованием методов сварки;
- Изучение структур и свойств углеродных лент;
- Моделирование свойств армирующих наполнителей;
- Изучение структур и свойств полученных композитов.

Практическая значимость заключается в разработке принципиально новой технологии создания изделий из углепластиков, отличающихся повышенной теплостойкостью и устойчивостью к воздействию ударов молнии.

Материалы магистерской диссертации были доложены на:

- Всероссийской студенческой конференция «Студенческая научная весна», 22 марта 2017г., МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия, г. Москва;
- XIII Молодежной научно-инженерной выставке «Политехника», ноябрь 2018 г., МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия, г. Москва, (1 место);
- Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспектива 2018г.», 27-30 апреля 2018г. ЭУНК КБГУ, п. Эльбрус (1 место);
- XII Молодежной научно-инженерной выставке «Политехника», 21-24 ноября 2017 г., МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия, г. Москва, (2 место);
- Международной научно-технической конференции «Современные направления и перспективы развития технологии обработки и оборудования в машиностроении 2018г.», 10-14 сентября 2018г., г. Севастополь;
- Всероссийская студенческая конференция «Студенческая научная весна», 17 апреля 2019г., МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия, г. Москва.
- Так же данная участвовала в конкурсе инновационных проектов «УМНИК», 20 ноября 2018г.
По материалам данных исследований написаны статьи:
- Burchenkova T., Slavkina V., Nelub.V. Modern technologies for the production of composites based on inorganic binders // Materials Today: proceedings. 2018. V.11, part 1. pp. 112-117.;
- Нелюб А.В., Славкина В.Э., Бурченкова Т.Д. Технология вакуумной инфузии формования композитов на основе неорганического связующего //Материалы международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. 2018. Том 2. 259-261 с.;
- Нелюб А.В., Бурченкова Т.Д., Петрова Т.В. Идентификация элементного состава композитов на основе неорганического связующего //Материалы международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. 2018. Том 2. 262-266 с.

Глава 1. Литературный обзор

1.1. Современные технологии создания изделий из полимерных композиционных материалов с использованием армирующих наполнителей

Широкое распространение получили методы изготовления ПКМ с использованием тканей. Методы классифицируются в зависимости от технологии нанесения связующего.

Препреговая технология

Традиционно для нанесения связующего на волокнистый наполнитель используют следующие способы [6, 7]:

- пропитка протягиванием наполнителя через ванну с пропитывающим составом (рис.1.1.);
- пропитка контактным роликом (рис.1.2.);
- рулонная пропитка;
- пропитка способом нагнетания;
- пропитка способом пульверизации (рис.1.3.);
- центробежный способ пропитки.

Технология формования изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ) с использованием препрега имеет свои преимущества и недостатки (табл. 1.1) [7].

Таблица 1.1.

Преимущества и недостатки использования препрегов при формировании изделий из ПКМ

Преимущества	Недостатки
обеспечение заданных весовых характеристик (точных соотношений матрица-наполнитель)	увеличивается трудоемкость технологического процесса производства деталей из ПКМ
снижается разброс физико-механических свойств (в несколько раз и иногда и на порядок уменьшается дисперсия)	увеличивается энергоемкость технологического процесса производства деталей из ПКМ
повышается культура труда на участке формирования изделий из ПКМ	готовый препрег имеет ограниченную жизнеспособность

Для нанесения связующего данным методом часто используется технологическая схема пропитки тканого наполнителя **протягиванием через ванну со связующим** (рис.1.1.). В этом случае пропитка наполнителя осуществляется за счет капиллярного течения пропитывающего состава в волокнистой структуре наполнителя.

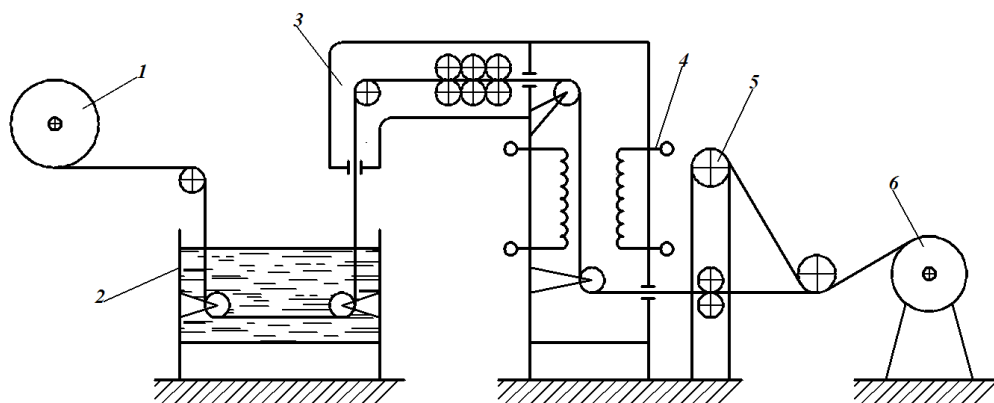


Рис. 1.1. Схема пропиточной установки для получения препрега [6]

1–рулон наполнителя (например, стеклоткани); 2–обогреваемая пропиточная ванна со связующим; 3 – сушильная камера; 4 – нагреватель; 5 – рулон разделительной пленки; 6 – рулон готового препрега [6].

Способ **пропитки контактным роликом** (рис. 1.2.) заключается в контакте вращающегося ролика, поверхность которого покрыта пропитывающим составом (связующим) с волокнистым наполнителем в пропитывающем устройстве. И наносимое связующее проникает в глубь волокнистой структуры за счет контакта ролика с поверхностью волокнистой структуры.

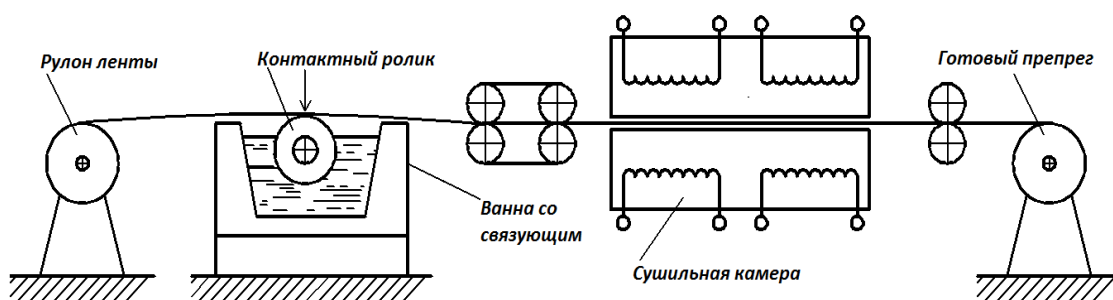


Рис. 1.2. Схема пропитки контактным роликом [6]

Способ **рулонной пропитки** заключается в погружении рулона просушенного тканого наполнителя в резервуар с пропитывающим составом, где происходит его пропитка под действием капиллярных токов радиального и коаксиального направления

Способ **пропитки нагнетанием** заключается в непрерывном протягивании ткани через пропиточный агрегат, имеющий вертикальную или горизонтальную термостатируемую камеру.

Пропитка способом **пульверизации** (рис. 1.3.), часто используется на крупных производствах, на связующее направляется струя сжатого воздуха, с помощью которой связующее разбивается в мелкие капли, которые отбрасываются на поверхность пропитываемого материала и проникают внутрь волокнистой структуры.

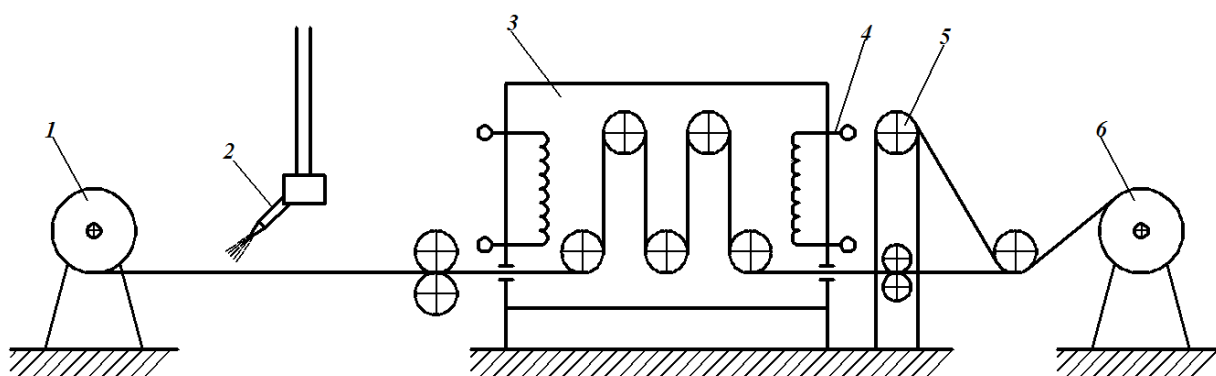


Рис.1.3. Схема пропитки с использованием пульверизации:

1– рулон ленты; 2 – пульверизатор; 3 – сушильная камера; 4 – нагреватель 5 – рулон разделительной пленки; 6 – рулон готового препрега [6]

Прямые методы формования

Суть метода заключается в том, что предварительно не проводится приготовление препрега и процесс пропитки и формования объединен в единую операции. Это уменьшает изготовления детали, энерго- и трудозатрат, а следовательно – удешевлению технологии, а также к существенному улучшению условий труда.

На данный момент существует несколько основных технологий получения деталей из ПКМ по технологии прямого формования:

- пропитка под давлением – технология RTM (Resin Transfer Molding);

-инфузионная пропитка под вакуумом – технология VARTM (Vacuum Infusion);

- пропитка пленочным связующим – технология RFI (Resin Film Infusion);

- прессование из препрега – технология SMC (Sheet Molding Compound)

- прессование или переработка литьем под давлением – технология BMC (Bulk Molding Compound).

Однако, технологии прессование из препрега и прессование или переработка литьем под давлением требуют предварительного получения препрега, но несмотря на это их все равно относят к этой группе. Несмотря на широкое применение прямых методов формования в России, за ними сохранилось их первоначальное название на английском языке, которое в настоящее время является общепринятым в нашей стране.

Технология RTM (Resin Transfer Molding) заключается в пропитке сухого армирующего материала (предварительно раскроенного и уложенного в форму) термореактивным связующим под давлением. Изделия, изготовленные по методу RTM, имеют финишную обработку со всех сторон и обладают высокими механическими характеристиками. По этой технологии возможно изготовление ответственных, высоконагруженных композитных деталей с высокими допусками (например, деталей авиационного двигателя).

Для производства деталей по методу RTM используют штампы, состоящие из двух полуформ (матрицы и пуансона). Необходимость инвестирования в относительно дорогие штампы и ограниченная производительность метода сказывается на себестоимости композитных деталей. Тем не менее, метод пропитки под давлением широко распространен в композитной промышленности из-за ряда преимуществ перед другими технологиями:

- возможность производства сложных, интегрированных деталей;
- высокая точность деталей;

- возможность изготовления толстостенных, массивных деталей сложной геометрии за минимальное количество операций (что зачастую невозможно достичь другими методами);
- высокие механические характеристики получаемых композитов, минимальное количество пор (большой ресурс изделий);
- легко окрашиваемые поверхности (до класса А);
- быстрое изготовление (можно использовать для массового производства).

Для метода вакуумной инфузии (Vacuum Infusion) суть заключается в пропитке связующим сухой ткани, которая осуществляется за счет разницы давлений внутри и снаружи вакуумного мешка. Первоначально производят подготовку поверхности оснастки и затем на нее выкладывают сухую ткань заданной толщины по заданной схеме армирования. Последовательность действий и схема создания деталей из ПКМ методом вакуумной инфузии приведены на рисунке (рис. 1.4.).

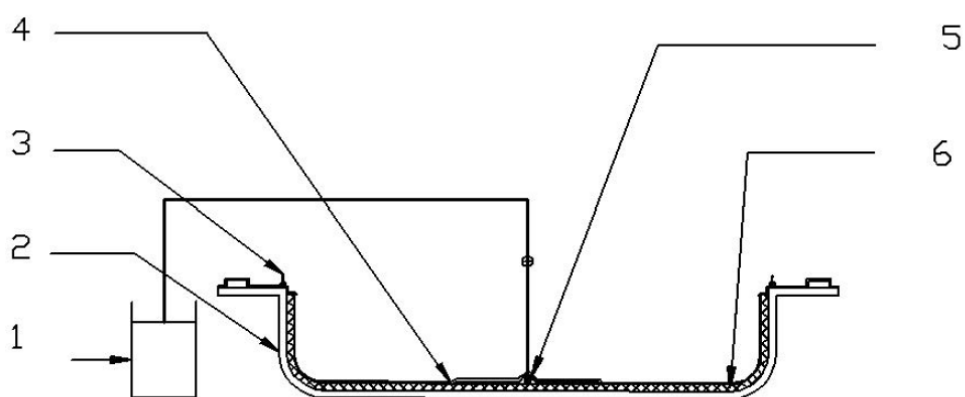


Рис. 1.4. Схема установки процесса пропитывания методом вакуумной инфузии: 1 – емкость со связующим; 2 – оснастка; 3 – насос; 4 – вакуумный мешок; 5 – армирующий наполнитель; 6 – канал подачи связующего [6]

Технологическими факторами, влияющими на качество конечного изделия являются:

- Герметичность пакета:

При наличии дырок или неплотного прилегания жгута композит будет пористым, иметь плохую поверхность, а также процесс инфузии может не пройти до конца

- Уровень вакуума:

При недостаточном вакууме (более 100 мм рт. Ст.) [7] армирующий материал сжимается недостаточно плотно и содержание связующего в изделии может быть завышенным, также может возрасти пористость.

- Вязкость связующего:

Высоковязкая смола (с вязкостью выше 500-600 мПа*с) [7] пропитывает материал слишком медленно, и может образовывать незаполненные пустоты (поры), как внутри композита так и на его поверхности.

- Время жизнеспособности связующего:

Быстрое загустение связующего может привести к тому, что инфузия не успеет дойти до конца.

1.2. Связующие для изготовления ПКМ

Органические связующие

Традиционные полимерные композитные материалы представляют собой органические полимеры, армированные неорганическими волокнами. Например, полиэфирное связующее, армированное стекловолокном, или эпоксидное связующее, армированное базальтовым волокном. Рабочая температура этих композитных материалов определяется температурой стеклования полимерной матрицы, величина которой не превышает 200-300°C. Еще одним недостатком полимерных матриц является их горючесть и высокая токсичность.

Композиционные полимерные материалы обычно классифицируются по виду армированного наполнителя или связующего. Наиболее распространены следующие связующие: эпоксидные, полиэфирные, феноловые, силиконовые и т.д. Связующие делятся на термопласты (способные размягчаться и затвердевать при изменении температуры) и реактопласты или терморезистивные смолы (связующие, в которых при нагревании происходят необратимые структурные и химические превращения) [8].

Эпоксидные смолы являются одним из лучших типов олигомеров, используемых для изготовления связующих для большого числа композиционных материалов. Основными преимуществами их являются: высокая прочность клеевого соединения, минимальная усадка, незначительная влагопроницаемость в отвержденном виде, высокая устойчивость к абразивному износу, что объясняется следующими причинами: эпоксидные смолы – это широчайший класс материалов с заданными свойствами и характеристиками; обладают хорошей адгезией к большинству наполнителей, армирующих компонентов и подложке. Разнообразие доступных эпоксидных смол и отверждающих агентов позволяет получить после отверждения материалы с широким сочетанием свойств. В ходе химической реакции между эпоксидными смолами и отверждающими агентами не выделяются вода и вредные летучие вещества, а усадка при отверждении ниже, чем для фенольных или полиэфирных смол. Отвержденные эпоксидные смолы обладают хорошей химической стойкостью к бензину, маслам, специальным жидкостям.

Многие свойства полимерной композиции в значительной степени определяются свойствами матрицы. Для ремонтных целей наиболее подходят матрицы из эпоксидных олигомеров, которые являются основой многих композиционных материалов, как отечественных, так и зарубежных. В технической и научной литературе эпоксидными олигомерами называют эпоксидные смолы в неотвержденном состоянии. Для композиционных

материалов, применяемых при ремонте автомобилей, наиболее подходят эпоксидно-диановые смолы марок ЭД-16, ЭД-20, ЭД-22. Наибольшей вязкостью обладает смола ЭД-16, которую перед употреблением необходимо нагреть до температуры 60 – 80 град. С, смолы ЭД-20 и ЭД-22 пригодны для работы при комнатной температуре. Неотверждённые эпоксидные смолы легко растворяются во многих органических растворителях [9].

Эпоксидные смолы проявляют ценные физико-механические свойства в результате превращения под действием отвердителей в сетчатый полимер. Эпоксидные композиции обладают уникальным набором технологических свойств, а полимерные материалы на их основе отличаются таким сочетанием высоких прочностных, теплофизических, диэлектрических, адгезионных, влагозащитных и других показателей, какого не имеет ни одна группа высокомолекулярных соединений.

На основе матрицы из эпоксидных смол могут быть созданы универсальные материалы. Эпоксидные смолы в неотверждённом состоянии относятся к высокомолекулярным соединениям, которые могут вступать в реакции полимеризации. Они содержат функциональные группы, обуславливающие возможность образования полимеров с пространственной сетчатой структурой (реакция отверждения) [10].

Свойства отверждённого полимера во многом определяются характеристиками эпоксидной смолы, модификаторов, отвердителя, условиями и режимами протекания процесса отверждения. Отверждение происходит в результате взаимодействия функциональных разнотипных групп или ненасыщенных связей с низкомолекулярными веществами, называемыми отвердителями. Химическая природа и строение молекул отвердителя во многом определяют структуру сетки и оказывают влияние не только на технологические свойства исходных композиций, но и на эксплуатационные характеристики полимеров. Самым распространённым отвердителем эпоксидных смол является полиэтиленполиамин (ПЭПА). Полиэтиленполиамин – универсальный отвердитель. В то же время, если

нужно получить уникальные полимеры следует применять специально разработанные отвердители.

Существующие отвердители можно разбить на группы:

- аминные отвердители;
- полиамидные отвердители;
- ангидриды ди- и поликарбоновых кислот;
- олигомерные отвердители (аддукты);
- катализаторы и ускорители отверждения эпоксидных смол.

Создание оптимальных для конкретных применений полимерных матриц ограничено не столько возможностями синтетической полимерной химии, сколько необходимостью строго количественно формулировать широкий комплекс весьма противоречивых требований к связующему. Например, достичь максимальной прочности композитов и определить соответствующие требования к механическим характеристикам матрицы сложно из-за разнообразия механизмов разрушения ПКМ и связано с необходимостью адекватно описывать процесс разрушения и испытывать образцы в условиях, отражающих реальную работу материала в изделии.

Неорганические связующие

Неорганические связующие лишены всех недостатков органических связующих, при этом имеют ряд преимуществ перед ними. Благодаря пропитки неорганическими связующими у композитов наблюдается высокие показатели теплостойкости и низкая стоимость за счет использования дешевого сырья, так же большим плюсом является низкая токсичность любых неорганических связующих, однако в этой области на данный момент имеется очень скудный ассортимент связующих и малое количество информации в технической литературе, что сильно усложняет работу с ними.

Сравнительные характеристики органических и неорганических связующих приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2.

Сравнительные характеристики органических и неорганических связующих

	Преимущества	Недостатки
Органические связующие	большой ассортимент связующих; высокая адгезионная прочность; технологичность [11];	низкая теплостойкость; токсичность; высокая стоимость; исходное сырье газ;
Неорганические связующие	низкая стоимость; низкая токсичность; высокая термостойкость (до 1500° С); дешевое исходное сырье;	маленький ассортимент связующих; низкая прочность [12];

Вероятно, такие КМ могут представлять особый интерес для создания скоростных летательных аппаратов [13].

Частым представителем неорганических связующих являются металлофосфатные связующие, они являются кислыми фосфатами различных металлов (алюминия, железа, магния и хрома) [14]. Их вяжущие свойства зависят от строения атома фосфора, способного образовывать полимерные структуры типа $Me_nO_m-P_2O_5-H_2O$ и те же структуры без кристаллизационной воды. При растворении Al_2O_3 в P_2O_5 , образуется очень вязкий раствор, который при высушивании образует аморфное вещество, которое хорошо диспергирует в воде с образованием клейкого раствора. (рис.1.7).

1.3. Технологии сварки

Для сваривания слоев углеродной ткани, необходимо предварительное нанесение на поверхность углеродной ленты медного покрытия. Для этого была использована технология магнетронного распыления, суть которой состоит в том, что напыляемый металл первоначально переводят в газообразное состояние, а потом переносят его на поверхность углеродной ленты, где он превращается в твердый материал, образуя тонкое металлическое покрытие. Нанесение на поверхность углеродных лент медного покрытия позволяет использовать сварочные технологии, для соединения армирующих тканей между собой и проводится промышленным способом на магнитных установках, например, на установке ММР-1800М (рис.1.8.) с установленным рулоном углеродной ленты, для нанесения медного покрытия.



Рис.1.8. Промышленная установка ММР-1800М

Сварка плавлением – пайка

Одним из методов сварки плавлением является пайка. Данный метод заключается в расплавлении лишь присадочного металла (припоя), а основной свариваемый металл остается нерасплавленным.

Пайкой называется технологический процесс соединения заготовок без их расплавления посредством введения между ними расплавленного промежуточного металла припоя. Припой имеет температуру плавления более низкую, чем температура соединяемых металлов, и заполняет зазор между соединяемыми поверхностями за счет действия капиллярных сил. При охлаждении припой кристаллизуется и образует прочную связь между заготовками. В процессе пайки наряду с нагревом необходимо удаление окисных пленок с поверхности паяемых металлов.

Образование соединения без расплавления кромок обеспечивает возможность распая, т. е. разъединения паяемых заготовок без нарушения исходных размеров и формы элементов конструкции.

Припой

Припои для пайки должны соответствовать следующим требованиям:

- температура их плавления должна быть ниже температуры плавления паяемых материалов;
- они должны хорошо смачивать паяемый материал и легко растекаться по его поверхности;
- должны быть достаточно прочными и герметичными;
- коэффициенты термического расширения припоя и паяемого материала не должны резко различаться;
- иметь высокую электропроводность при паянии радиоэлектронных и токопроводящих изделий.

Паяльные флюсы

Эти флюсы применяют для очистки поверхности паяемого металла, а также для снижения поверхностного натяжения и улучшения растекания и смачиваемости жидкого припоя.

Флюс не должен химически взаимодействовать с припоем. Температура плавления флюса должна быть ниже температуры плавления припоя. Флюс в расплавленном и газообразном состояниях должен способствовать смачиванию поверхности основного металла расплавленным припоем. Флюсы могут быть твердые, пастообразные, жидкие и газообразные.

Паяльник

Пайка происходит при помощи паяльника. Принцип действия электрической схемы довольно прост. Нагревательной частью паяльника является спираль нихромовой проволоки, при прохождении по которой тока происходит нагрев обмотки. По специальному проводящему элементу проходит передача тепла жалу паяльника.

Современные варианты реализации паяльника могут несколько отличаться. Однако, их основные элементы практически идентичны. Устройство паяльника можно охарактеризовать следующим образом:

1. Основным элементом конструкции считается нагревательный стержень, на которой есть обмотка трансформатора;
2. Для сохранения тепла и повышения значение КПД стержень вставляется в специальную изоляционную трубку. При ее изготовлении используется теплостойкая стеклоткань;
3. В зависимости от значения мощности может использоваться несколько слоев изоляционного материала.

Стержень вставляется в специальную изолирующую оболочку, а для безопасного использования устройства есть диэлектрическая рукоятка. Как правило, рукоятка изготавливается из теплостойкого пластика или древесины, применение металла не допускается (рис.1.9.) [15].

Мощность паяльника также может варьировать в достаточно большом диапазоне. Этот показатель считается одним из наиболее важных, учитывается при подборе более подходящей модели [16]. От подобного

показателя зависит также температуры нагрева и некоторые другие характеристики [17].

Ультразвуковая сварка (вибрационная)

Сварка давлением происходит при температурах ниже точки плавления свариваемых металлов (без использования припоев) с приложением давления, достаточного для создания необходимой пластической деформации соединяемых частей (ГОСТ 2601-74). Неразъемное соединение образуется вследствие возникновения сил связи между атомами свариваемых поверхностей в результате сближения последних до расстояния действия межатомных сил связи. Для объединения твердого вещества в одно целое приходится затрачивать значительные количества энергии и применять сложные технические приемы для сближения соединяемых атомов. Процесс сходен с ротационной фрикционной сваркой, за исключением того, что движение здесь не вращательное, а возвратно-поступательное. Именно это обеспечивает высокую стабильность, технология позволяет создавать крупные, герметичные и механически прочные сварные швы за временной цикл, равный всего нескольким секундам. Вибрационная сварка применяется, главным образом, в тех случаях, когда необходимы короткие временные циклы, а деталь слишком крупна для того, чтобы использовать ультразвуковую сварку [18-20]. Однако поскольку процесс требует относительно плоских поверхностей соединения, для некоторых практических случаев вибрационная сварка не подходит.

Установки для ультразвуковой сварки тонких слоев относятся к вибрационно – сварочным типу аппаратов. Они передают производимое системой привода колебательное движение постоянной или переменной частоты (амплитуды) на одну или на обе детали, которые предстоит соединить сваркой. Вибрация производится системой привода, которая обычно располагается в верхней части установки и работает на резонансной частоте. В то же время, на свариваемые детали прилагается необходимое для

соединения усилие давления. В нашей работе была использована линейная сварка. В случае линейной вибрационной сварки, линейное фрикционное движение осуществляется приводом и соответствующими направляющими (рис. 1.9.). Это движение может происходить с различными частотами. В настоящее время используются механизмы с рабочей частотой с 100-300 Гц и неограниченно регулируемой амплитудой.



Рис.1.9 Установка для ультразвуковой сварки [19]

Такая сварка подходит для поверхностей, которые могут линейно смещаться в одной плоскости. Однако в результате того, что стенки расположены поперечно направлению вибрации, существует риск того, что могут получаться относительно слабые сварочные швы. На протяжении последних нескольких лет было осуществлено несколько новых разработок в области сварочного оборудования. Одна из них позволила изменять давление во время цикла сварки. Это делает возможным оставления на поверхности соединения большего количество расплавленного полимера, что создает

более широкую зону сварочного шва. Как правило, это уменьшает выплески и увеличивает прочность сварки.

Технология сварки

Процесс сварки осуществляется за счет соединения двух свариваемых деталей вместе под заданным давлением (1-4 Мпа). Затем соединяемые поверхности подвергаются воздействию вибрации с частотой 100-300 Гц, создаваемой либо приводом, либо электромагнитом и передаваемой на соединяемые поверхности. Таким образом, создается возвратно-поступательное движение между свариваемыми поверхностями двух деталей, обычно со смещением порядка 0,5-1,5 мм. В результате нагревания от трения, температура резко повышается, достигая точки плавления полимера. По истечении заданного времени, электрический пульт управления останавливает вибрации, и одновременно детали приводятся в точное положение относительно друг друга при сохранении давления в месте соединения. Величина давления поддерживается неизменной в течение нескольких секунд, необходимых для затвердевания расплава [20].

Для сварки сверхтонких слоев, к которым относится углеродная металлизированная ткань, процесс сварки проходит четыре хронологически последовательные фазы (рис.1.10.):

- Фаза I: Трение твердых тел;
- Фаза II: Переходная фаза;
- Фаза III: Устойчивое плавление;
- Фаза IV: Охлаждение.



Рис. 1.10. Схематическое изображение хода процесса вибрационной сварки [21]

Значения амплитуды, прочности сварки, значения усилия давления, времени сварки и времени приложения усилия давления зависят от механизма вибрации, вида пластмассы и конфигурации детали. Амплитуда вибрации представляет собой половину амплитуды движения вибрирующей сварочной головки. Обычно увеличение частоты колебаний приводит к снижению амплитуды вибрации, и наоборот. Обычно для линейных сварочных вибрационных машин частота колебаний 200 Гц соответствует амплитуде колебания 0,5-0,9 мм, а частота 100 Гц – амплитуде 1,5-2,5 мм. Более низкая частота/ более высокая амплитуда используется для изделий с гибкими опорными стенами и большими площадями соединения, например, детали корпуса автомобиля, такие как бампер [21]. Более низкая амплитуда/ более высокая частота используется для сварки изделий с меньшими соединяемыми поверхностями, например, впускной коллектор автомобиля.

Оптимальное значение давления при сварке для каждого отдельного случая должно быть определено экспериментально. Однако увеличение давления сварки может привести к ослаблению прочности соединения, а в случае управления временем сварки – привести к большей глубине взаимопроникновения и увеличению наплавленного валика сварного шва.

Авторы работ установили, что при давлении выше определенного значения прочность соединения демонстрирует тенденцию к снижению.

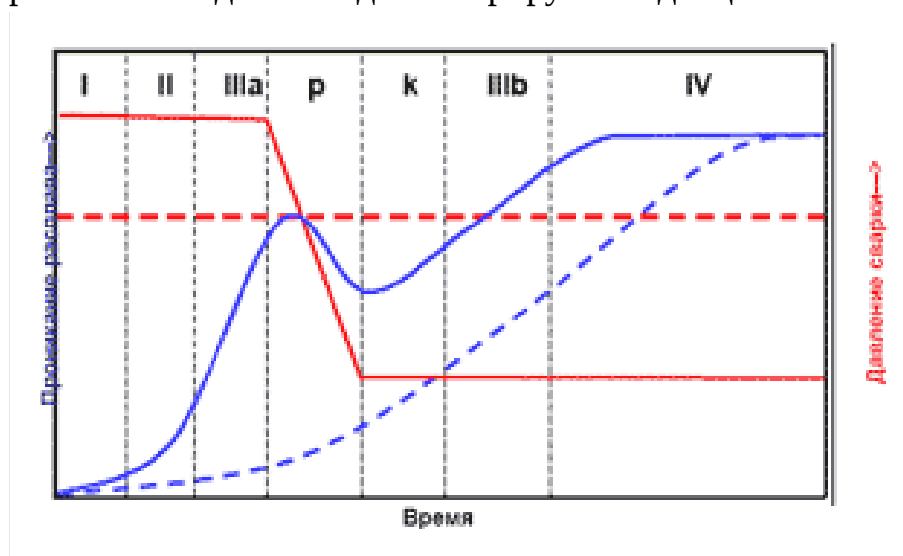


Рис. 1.11. Прочность сварки в зависимости от давления сварки [21]

Если аппарат дает возможность выбора давления во время вибрации, давление уменьшается после того, как переходная фаза может уменьшить смешанный поток расплавленного материала в зону сварного валика. В этом случае, во время начальной стадии цикла сварки используется относительно высокая прижимающая сила, чтобы уменьшилось время цикла, и в конце цикла снизилось давление, что способствует образованию более прочного сварного шва.

Диффузионная сварка

Диффузионная сварка- разновидность сварки давлением, происходит за счет взаимной диффузии атомов контактирующих частей при относительно длительном воздействии повышенной температуры и незначительной пластической деформации; сварное соединение образуется в результате диффузии атомов соединяемых частей через поверхность стыка как в твердом, так иногда и в жидком состоянии (при применении расплавляющегося промежуточного слоя) [22]. Соединяемые поверхности с помощью приложения сжимающего давления сближаются на расстояния действия межатомных сил. Если процесс соединения протекает при наличии жидкой фазы, то потребность в давлении отпадает, поскольку происходит

предварительное смачивание соединяемых поверхностей жидкой пленкой [23].

Сварку проводят в специальных сварочных установках. Установки для диффузионной сварки не сложны по своей конструкции (рис. 1.12.). Две части детали помещают в вакуумную камеру – 1; в процессе сварки камера охлаждается проточной водой – 2; для защиты деталей от интенсивного окисления в процессе разогрева и сварки стыкующихся поверхностей в рабочей камере обеспечивается разрежение – 3; источником нагрева свариваемых деталей служит индуктор высокочастотного генератора – 4; сжимающее усилие передается от гидросистемы – 5 [24].

После сварки детали охлаждаются в вакуумной камере до соответствующей температуры. При данном способе образование соединения обусловлено действием трех основных параметров, за которыми необходим тщательный контроль. Это – температура, давление и время выдержки (сварки) при заданных температуре и давлении.

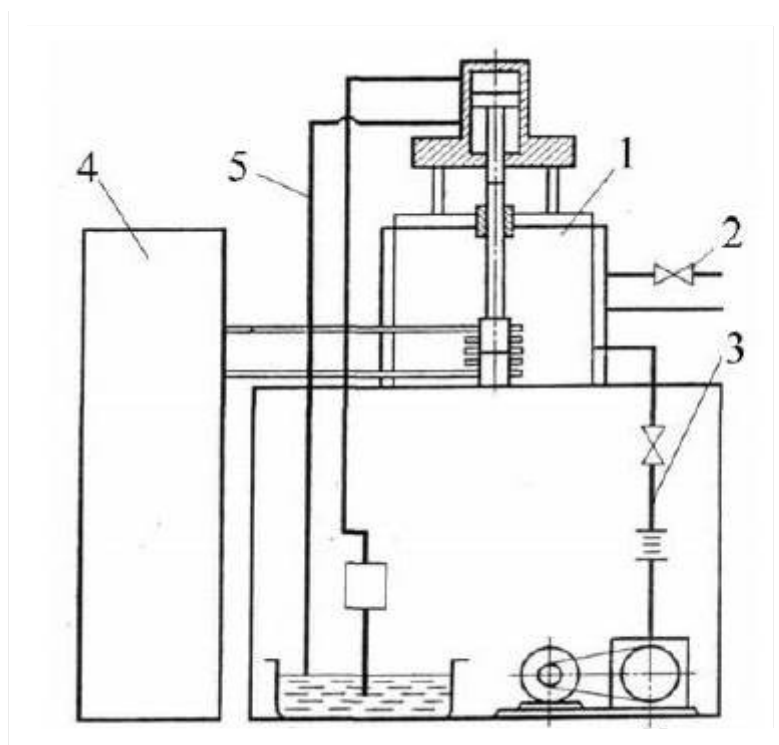


Рис. 1.12. Принципиальная схема установки для диффузионной сварки [24]

В процессе диффузионной сварки могут быть выделены две последовательные стадии:

- Первая стадия процесса диффузионной сварки основана на образовании металлических связей на свариваемых поверхностях металла при нагревании их в вакууме с применением сдавливающего усилия.

- Вторая стадия связана с процессами взаимной диффузии атомов свариваемых металлов. Это приводит к образованию промежуточных слоев, увеличивающих прочность сварного соединения [25].

Основные параметры процесса ДСВ:

- температура;
- давление (усилие);
- время.

Их величины зависят от физико-химических и механических свойств материала, состояния соединяемых поверхностей, конструкции свариваемого соединения.

Температура сварки должна обеспечивать большую скорость пластического деформирования и развитие диффузионных процессов. Температуру сварки определяют из соотношения: $T_{св}=0,7 T_{пл}$ (для жаропрочных сплавов и сталей тугоплавких металлов может быть несколько выше) [26].

Оптимальное значение вакуума выбирают с учетом свойств свариваемых материалов и результатов исследований. При недостаточном вакууме усиливается окисление свариваемых материалов. Высокий вакуум существенно снижает производительность процесса, приводит к его удорожанию (рис.1.13.).

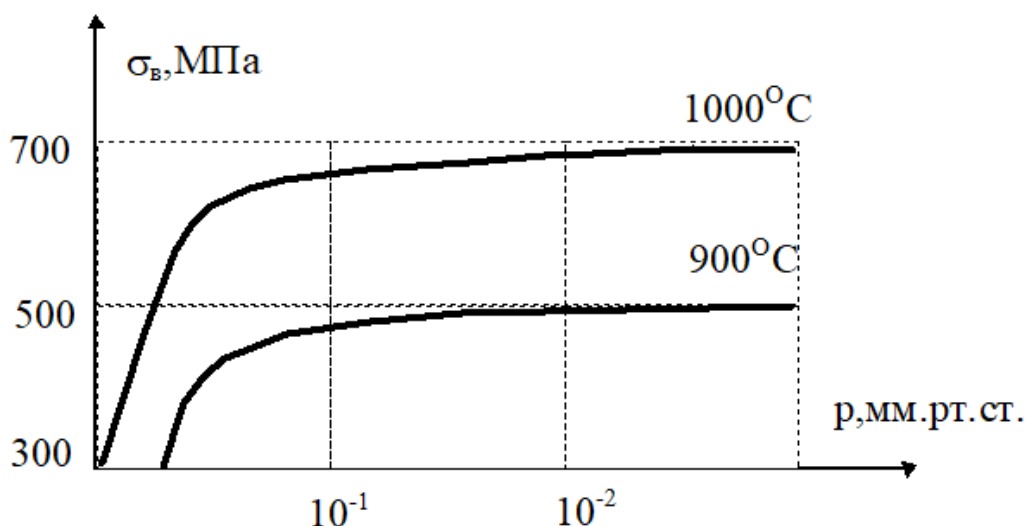


Рис. 1.13. Зависимости прочности соединения от условий сварки в камере [26]

Установлено, что степень разряжения в вакуумной камере $10^{-2} \div 10^{-5}$ мм.рт.столба вполне обеспечивает чистоту соединяемых поверхностей и получение равнопрочного соединения.

Для получения качественного соединения необходимо обеспечить равномерный нагрев свариваемого изделия по всему сечению. Усилие сжатия прикладывается после выравнивания температуры и поддерживается постоянным в течение всего процесса. Продолжительность выдержки под давлением зависит от свойств свариваемого материала, величины давления, нагрева и может достигать десятков минут. Давление также зависит от свойств металла, температуры сварки и изменяется в пределах $0,3 \div 10$ кгс/мм² ($3 \div 100$ Мпа) для различных материалов. Повышение температуры при постоянной продолжительности сварки и прочих равных условиях увеличивает прочность соединения.

С увеличением продолжительности сварки прочность сварного соединения растет до некоторого оптимального значения, а дальнейшее увеличение практически не влияет на прочность сварного соединения (рис.1.14.). Влияние температуры на прочность сварного соединения из стали 50 при различных давлениях можно представить следующим образом:

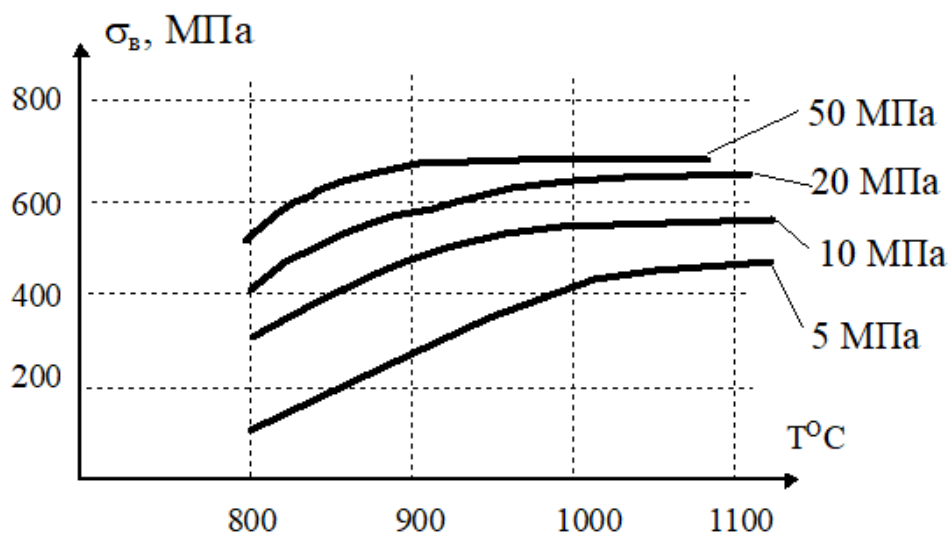


Рис. 1.14. Зависимость прочности соединения от температуры [26]

Способы подготовки и обработки поверхностей свариваемых деталей оказывают большое влияние на прочность соединения при диффузионной сварке в вакууме. Чем выше класс чистоты поверхности, тем может быть получено более прочное соединение (рис. 1.15.) [27].

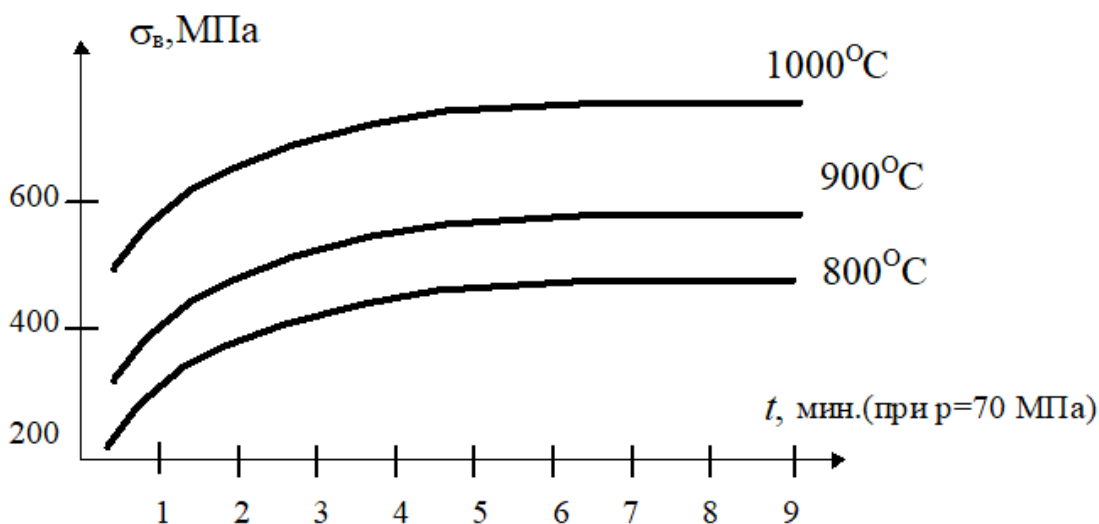


Рисунок 1.15. Зависимость прочности соединения от времени [27]

Выводы по первой главе

В результате проведенного обзора литературы было установлено, что для соединения между собой углеродной ленты с металлическим покрытием могут быть использованы технологии сварки. Данная технология обладает рядом преимуществ: отсутствие необходимости иметь сложное оборудование, простота процесса, высокое качество и механические характеристики получаемых изделий и относительно невысокая стоимость процесса.

Из проведенного обзора, представленных на рынке связующих, которые могут быть применены для пропитки углеродной ткани по тематике работы, с учетом необходимых особенностей и возможностей итоговых образцов, для разработки и проведения теоретических исследований в данной работе использовано неорганическое алюмоборфосфатное связующее. Оно обладает следующими преимуществами: низкая стоимость, низкая токсичность, высокая термостойкость (до 1500 °С), дешевое исходное сырье.

Глава 2. Объекты и методы исследования

2.1. Объекты исследования

В качестве объекта исследования в данной работе использовалась углеродная лента FibArm Tape-230/300, ее свойства указаны в таблице 2.1.

Таблица 2.1.

Свойства углеродной ленты FibArm Tape-230/300

Нормативная документация	ТУ 1916-018-61664530-2013
Поверхностная плотность, г/м ²	230
Толщина, мм	0,21
Модуль упругости, Гпа	230
Коэффициент Пуассона	0,3

На углеродную ленту FibArm Tape-230/300 напылялась медь для дальнейшего скрепления слоев методом сварки (рис. 2.1.).



Рис. 2.1. Углеродная лента FibArm Tape-230/300 с напылением меди

Связующее

В работе используется неорганическое связующее [28] – алюмоборфосфатное, которое состоит из двух компонентов: жидкости,

которую мы условно назвали смолой (рис.2.2.) и порошка, используемого в качестве отвердителя (рис.2.3.).



Рис. 2.2. Связующее АБФС марка Б



Рис. 2.3. Отвердитель для АБФС «Рускон», магнезит [29]

В результате проведенной сравнительной оценки эффективности современных тенденций развития технологических процессов получения изделий из углепластиков было выявлено, что технология вакуумной инфузии (Vacuum Infusion – II) в последнее десятилетие является одним из самых распространенных методов производства изделий из углеродной ткани [30]. Так же она подходит под наши условия работы, поэтому образцы будут пропитываться данным методом [31].

При использовании этой технологии был применен целый ряд вспомогательных материалов:

- Вакуумная пленка Airtech Econolon (рис.2.4.);

- Проводящий сетка CCVM-FM-KnitW-100-1,25 (рис.2.5.);
- Полиэфирная жертвенная ткань Peel Ply (рис.2.6.);
- Герметизирующий жгут Airtech Airseal 2 (рис.2.7.);
- 2 вида проводящих трубок: CCVM-PT-PE 8x10 мм., CCVM-SWT10-PT-10x12 мм.

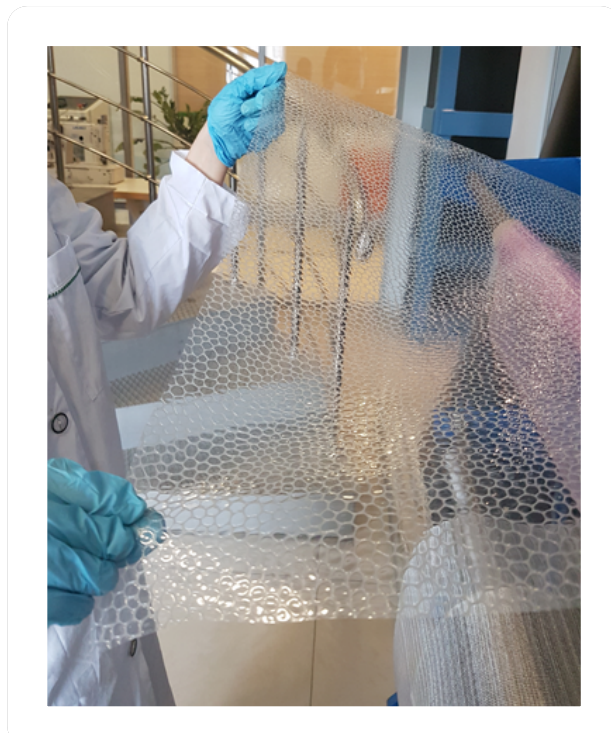


Рис. 2.4. Вакуумная пленка Алтесп Есополон

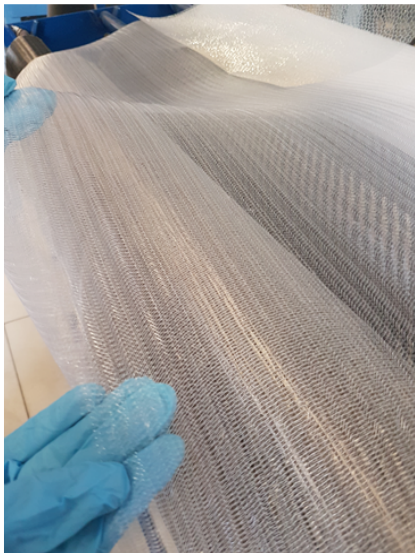


Рис. 2.5. Проводящий слой
CCVM-FM-KnitW-100-1,25



Рис. 2.6. Полиэфирная
жертвенная ткань Peel Ply



Рис.2.7. Герметизирующий жгут Airseal 2

Кроме этого в качестве вспомогательных материалов использовали антиадгезив Loctite 700-NC для подготовки оснастки, технологический клей Airtac 2B. Для обеспечения вакуума мы использовали вакуумной насос KNF LABOPORT Vacuum systems (рис.2.8.) с ловушкой для излишка связующего. Технические характеристики вакуумного насоса марки «KNF LABOPORT Vacuum systems» занесены в таблицу 2.2.

Таблица 2.2.

Технические характеристики вакуумного насоса марки «KNF
LABOPORT Vacuum systems»

Показатели	Значения
производительность	10 л/мин
максимальный вакуум	8 мбар
вакуумный уровень	1 бар
вакуумные порты (2 шт.)	для инфузии и для вакуумного мешка
вакуумный насос	N 810.3 FT.18
вес	13,6 кг
электропотребление	115 Вт/ 60 Гц



Рис. 2.8. – Вакуумный насос KNF LABOPORT vacuum systems

Материалы для пайки

Наиболее распространенными паяльными флюсами являются бура ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) и борная кислота (H_3BO_3), хлористый цинк (ZnCl_2), фтористый калий (KF) и другие галлоидные соли щелочных металлов [32].

Для пайки в нашей работе использовалась флюс-паста – 135 на основе технического вазелина и канифоли, активированной органической кислотой. Остатки классифицируются как IPC ANSI-J-STD-004 (ROH1) и полностью

смываются изопропиловым спиртом, она не содержит хлорид цинка и хлорид аммония. Рекомендуемая температура пайки: 93 – 315°C. Так же использовался оловянистый припой в виде: прутка оловянного диаметром от 8 до 10 мм. По химическому составу сплава выделяют сурьмянистые припои, припои с малым количеством сурьмы (малосурьмянистые), сплавы без сурьмы (бессурьмянистые). Данный вид припоя производят по ГОСТ 21931-76 (в изделиях), ГОСТ 21930-76 (чушки).

2.2. Методы исследования

Микроскоп PHENOM proX

Углеродная лента исследовалась с помощью электронно-растрового микроскопа PHENOM proX (рис.2.9.) с интегрированной системой энергодисперсионного анализа (ЭДС), на котором оценивали микроструктуру и проводили элементный анализ. Для закрепления образца в микроскопе используется оснастка (рис.2.10.). Электронный микроскоп и ЭДС имеют единую платформу Phenom proX, благодаря которой все процессы могут быть автоматизированы с помощью пакета Pro Suite. Он состоит из специальных прикладных программ, позволяющих выделить максимум информации из изображения. Таким образом, с его помощью могут быть изучены все свойства образцов.

Стандартные приложения Pro Suite:

- Measure IT — проведение измерений;
- Automated Image Mapping — получение панорамных изображений;

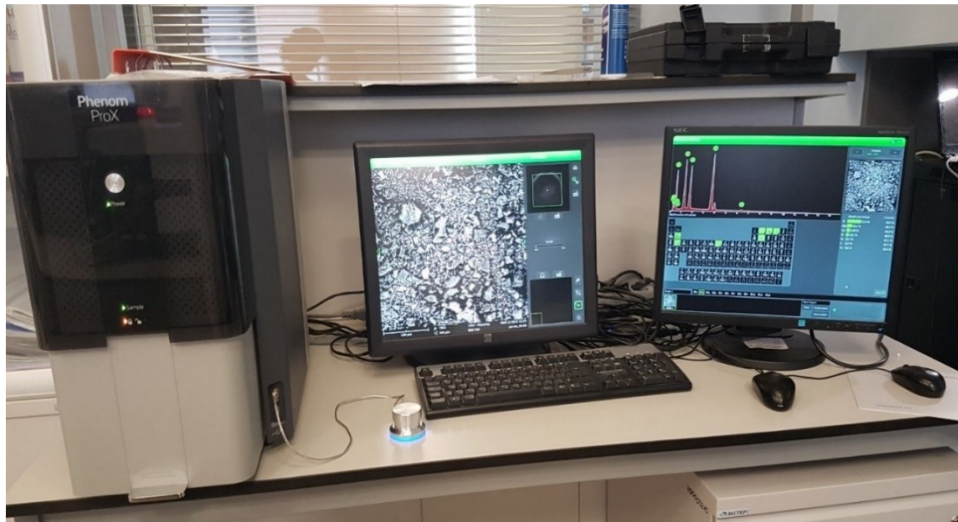


Рис. 2.9. PHENOM PROX — настольный сканирующий электронный микроскоп с интегрированной системой ЭДС

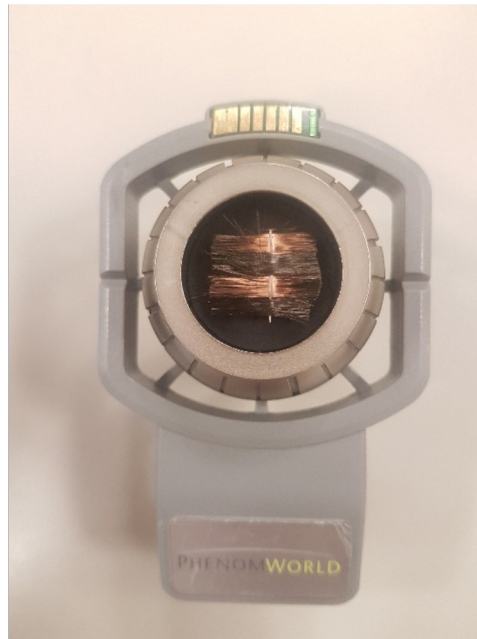


Рис. 2.10. Образец металлизированной ткани на оснастке микроскопа

Установка для ультразвуковой сварки

В работе использовалась самодельная установка вибрационно – сварочного типа, расположенная на кафедре МТ-7 «Технологии сварки и диагностики» МГТУ им. Н. Э. Баумана (рис.2.11.) Машина имеет пневматический механизм сжатия. Машины с пневматическим механизмом сжатия применяются в массовом производстве для сварки однотипных

изделий из малоуглеродистых сталей. Однако они могут успешно применяться и в индивидуальном производстве для сварки тонких образцов.

Машины снабжаются электронным регулятором времени, управляющим последовательностью работы машины [33]. Управление ходом верхнего электрода, а также создание давления осуществляются, пневматическим цилиндром, установленном на верхнем, изолированном от корпуса машины, кронштейне 2, цилиндр имеет два поршня [34]. Шток нижнего поршня, связанного с ползуном верхнего электрода, осуществляется подъем и опускание электрода, а также создание давления. С помощью верхнего поршня осуществляется регулирование рабочего хода электрода [35].

Регулирование рабочего хода осуществляется подъемом или опусканием верхнего поршня с помощью гаек 3. Давление регулируется редуктором давления 4. Управление подачей воздуха в среднюю и нижнюю камеру пневматического цилиндра производится электропневматическим клапаном 5. Дополнительный ход осуществляется ручным клапаном 6 путем подачи или выпуска сжатого воздуха из верхней камеры цилиндра. Для смягчения удара верхнего электрода при его соприкосновении с изделием предусматривается дросселирующий клапан 7. Все токоведущие детали вторичного контура, так же, как и вторичный виток сварочного трансформатора, охлаждаются проточной водой. Машины управляются переносной педальной кнопкой 8. При нажатии на педальную кнопку включается электронный регулятор времени, управляющий циклом работы машины, заключающемся в опускании верхнего электрода и сжатии свариваемых деталей, в прохождении тока через детали, выключении тока по окончании установленного промежутка времени, и выдержки деталей под давлением без тока и возвращении электрода в исходное положение. При удержании кнопки в нажатом положении рабочий цикл повторяется, и машина продолжает работать автоматически. Для получения одной сварочной точки педальная кнопка отпускается сразу же после нажатия.

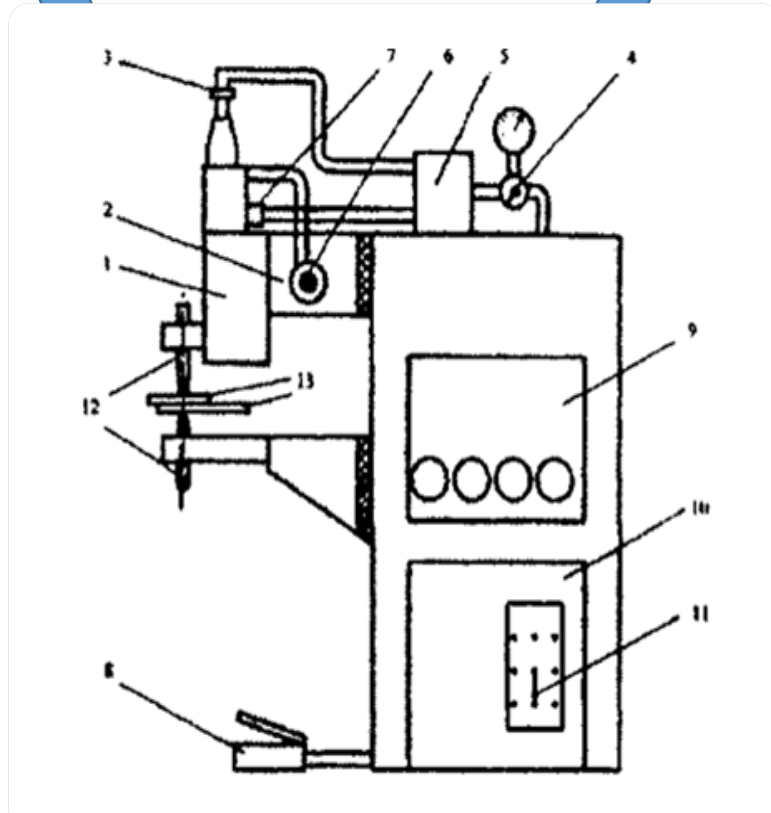
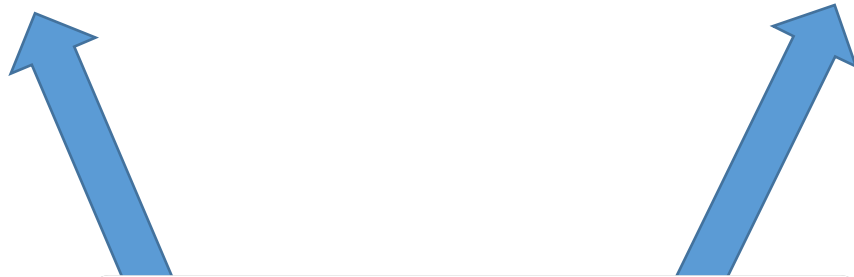


Рис. 2.11. установка для ультразвуковой сварки [33]

1 – пневматический цилиндр; 2 – изолированный от корпуса кронштейн; 3 – гайка для регулирования хода верхнего поршня; 4 – регулятор давления;

5 – электропневматический клапан; 6 – ручной клапан; 7 – дросселирующий клапан; 8 – pedalная кнопка; 9 – пульт управления; 10 – трансформатор;

11 – регулятор ступени трансформатора; 12 – электроды; 13 – свариваемые детали.

Паяльник

Для метода пайки использовался паяльник Goot PX-201 70W с регулируемой температурой, диапазон температур 200-450 °С (рис. 2.12).



РИС. 2.12. ПАЯЛЬНИК GOOT PX-201 70W

COMSOL Multiphysics 4.3. COMSOL Multiphysics

COMSOL Multiphysics 4.3. COMSOL Multiphysics® — это универсальная среда численного моделирования систем, устройств и процессов во всех областях проектирования, производства и научных исследований. Базовое программное обеспечение может использоваться отдельно или в любой комбинации с дополняющими его функционал модулями расширения для моделирования электромагнитных полей, напряженно-деформированного состояния твердых тел, акустических полей, гидродинамических, теплообменных и химических процессов [36]. Для расчета использовался модуль AC/DC, который содержит в себе набор физических интерфейсов для анализа явлений, относящихся к различным

областям электротехники: электростатика, электрические токи и поля, магнитостатика и переменные электромагнитные поля с учетом индукционных эффектов (рис.2.13) [37]. COMSOL Multiphysics дает возможность исследовать связанные междисциплинарные эффекты, таким образом мы можем провести расчет напряженно – деформируемого состояния и рассчитать нагрев от электрического тока в тонких слоистых структурах (рис.2.14) [37].

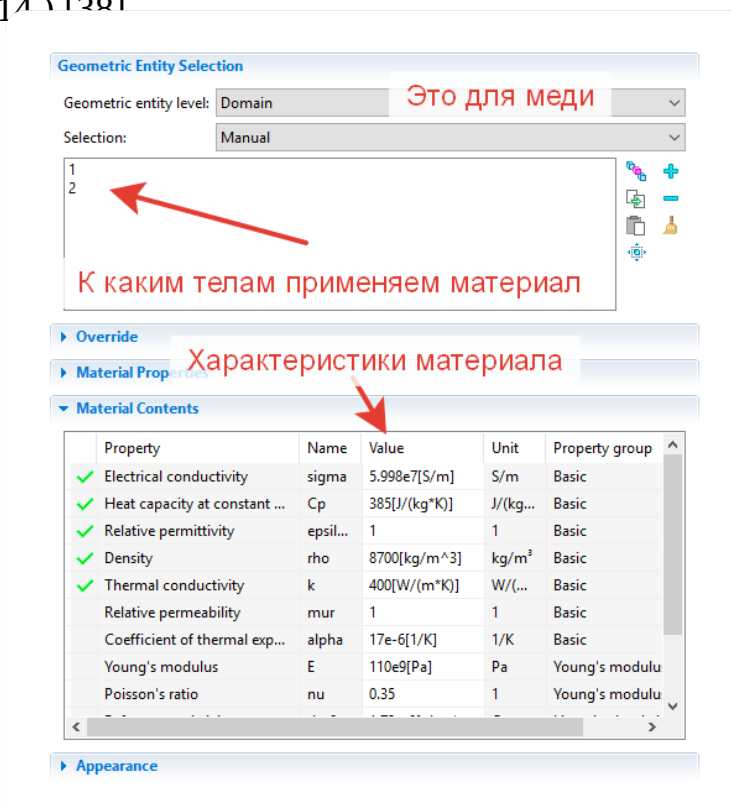


Рис. 2.13. интерфейс программы, характеристики материала

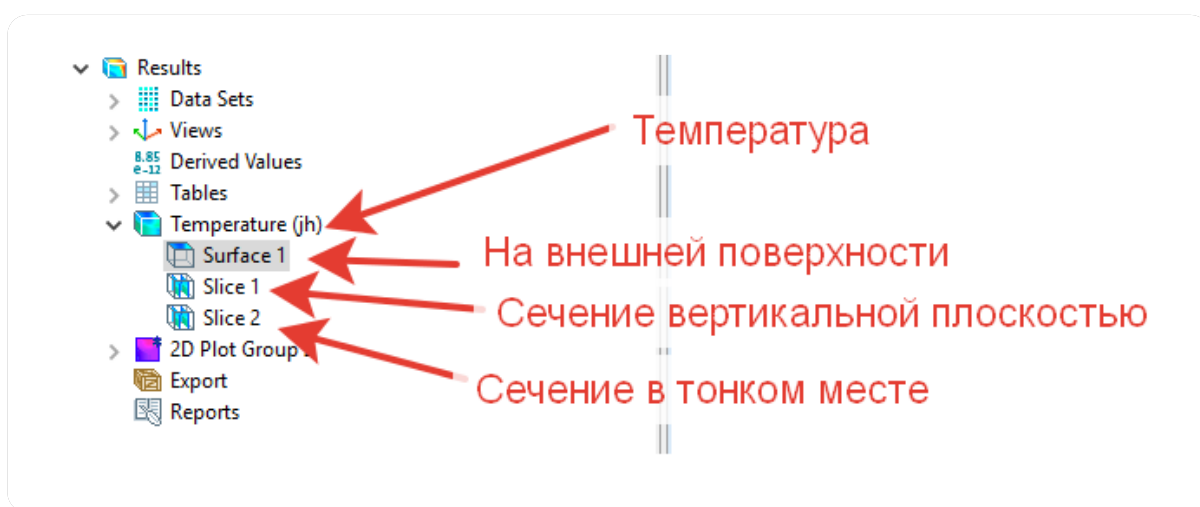


Рис. 2.14. интерфейс программы, характеристики нагрева

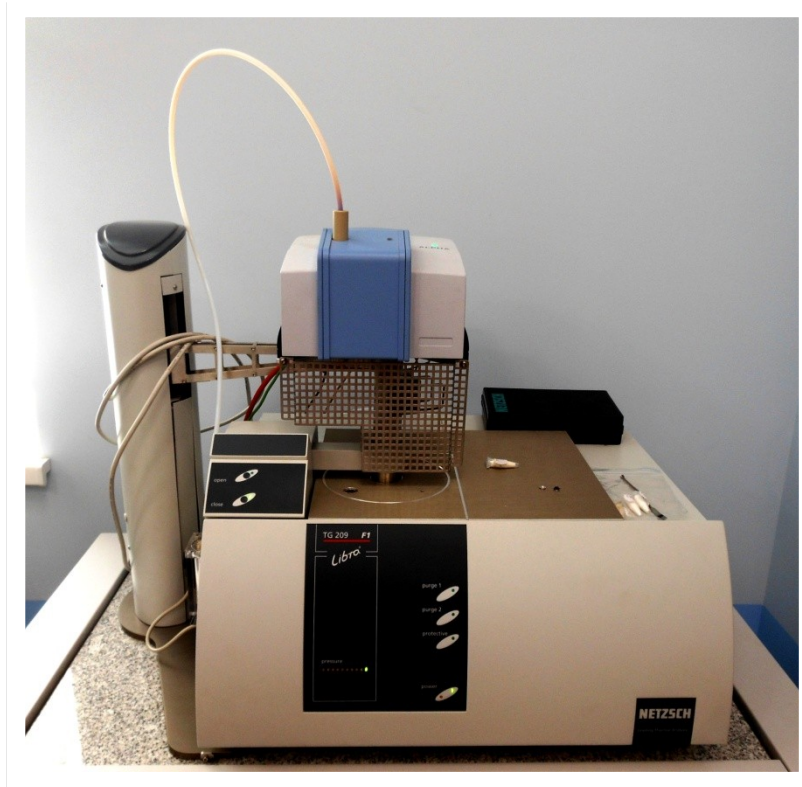


Рис. 2.15. Термогравиметрический анализатор TG 209 F1 Perseus

Термогравиметрический анализатор предназначен для работы в различных газовых атмосферах, в вакууме со встроенным Фурье-ИК спектрометром для качественного анализа компонентов газа в режиме реального времени, что позволяет анализировать термическую устойчивость органических соединений, полимерных композиций, материалов на их основе (рис.2.15.) [39].

Глава 3. Экспериментальная часть

3.1. Структурные исследования

После напыления меди на углеродную ленту FibArm Tape-230/300 были проведены структурные исследования, они показали, что у волокон ткани прослеживается различный диаметр (рис.3.1.).

Затем для понимания количества ненужных включений был проведен элементный анализ углеродной металлизированной ткани. Были выделены 6 точек (рис.3.2.), с помощью специальной программы изучен элементный состав каждой отдельно (рис.3.3.), определен процент нежелательных примесей на волокнах. Данные по элементному анализу шести точек сведены в общую таблицу 3.1.

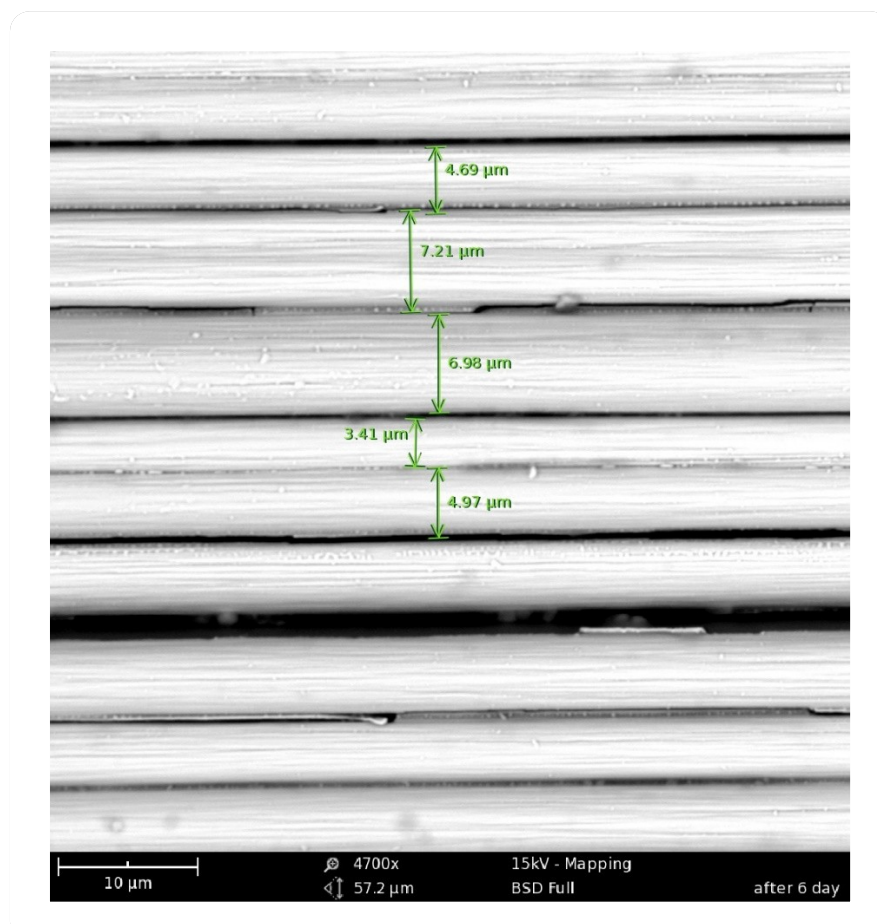


Рис.3.1. Фото структуры углеродной металлизированной ткани

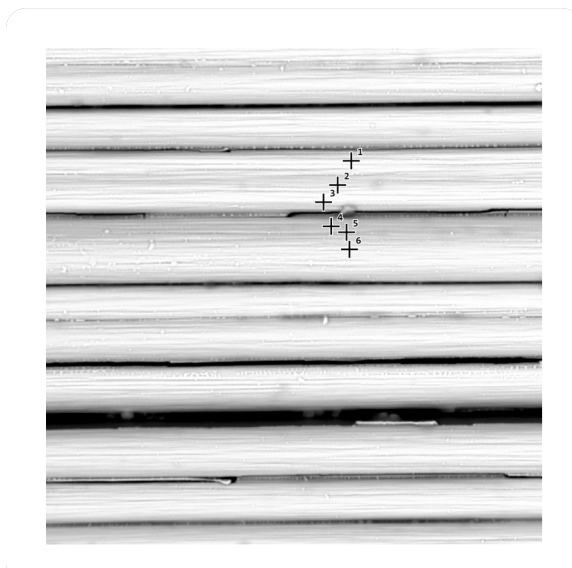
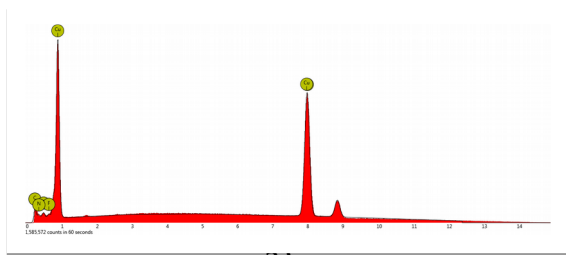


Рис. 3.2. Элементный анализ металлизированной ткани по 6 точкам до чистки камеры

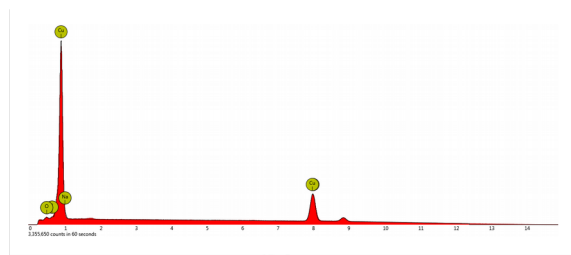
Таблица 3.1.

Элементный анализ углеродной металлизированной ткани по 6 точкам до очистки камеры

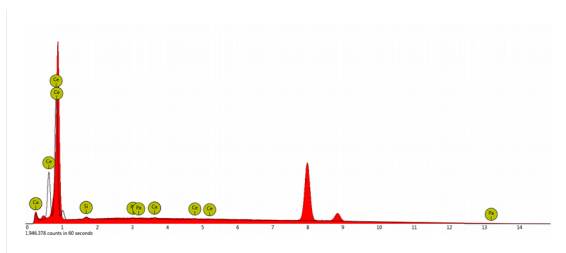
Номер точки	Cu, %	C, %	O, %	N, %
1	93,0	1,4	2,8	1,4
2	76,0	1,4	2,3	-
3	96,9	0,4	2,0	-
4	88,2	-	2,7	0,9
5	96,1	-	2,9	-
6	86,1	1,1	2,1	0,7



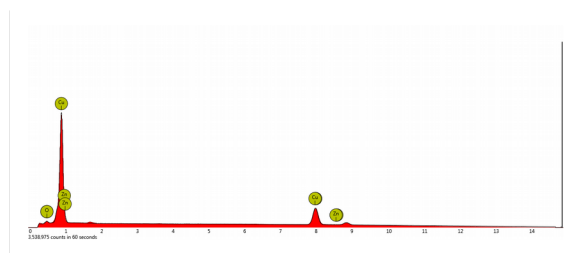
а)



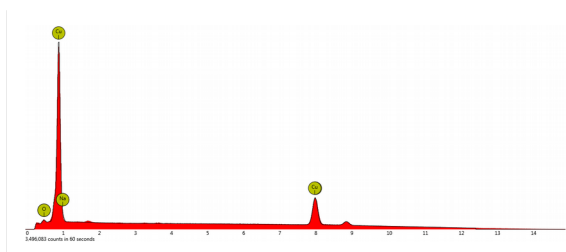
б)



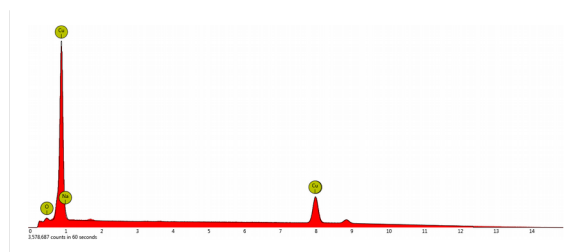
в)



г)



д)



е)

Рис. 3.3. Структурный анализ шести точек последовательно (а-е)

В результате установлено что разброс данных в большом промежутке и наличие примесей (от 7% до 24%). Для улучшения результата камера промышленной установки ММР-1800М, в которой происходит напыление, была очищена и эксперимент с напылением меди на углеродную ленту FibArm Tare-230/300 был проведен повторно в очередной раз были проведены структурные исследования, они показали, что у волокон ткани все так же прослеживается разный диаметр (рис.3.4.)

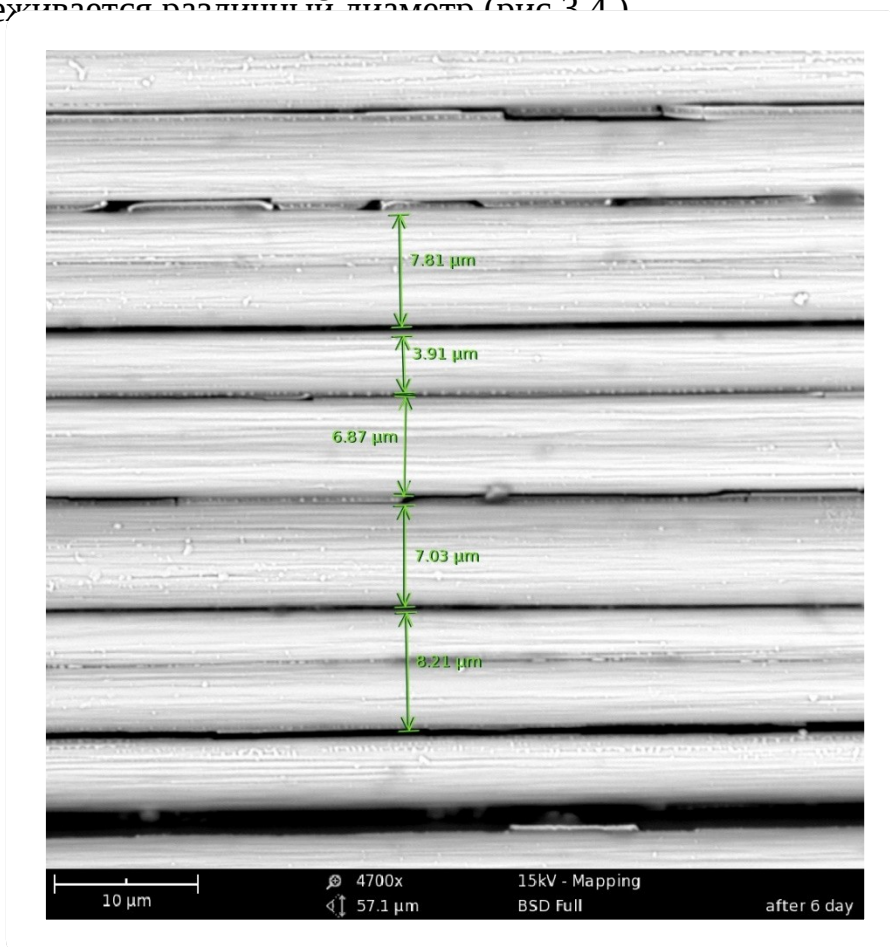


Рис.3.4. Фото структуры углеродной металлизированной ткани после очистки камеры напыления

На данной структуре были выделены 5 точек (рис.3.5.), с помощью специальной программы изучен элементный состав каждой отдельно (рис.3.6.), определен процент нежелательных примесей на волокнах. Данные по элементному анализу шести точек сведены в общую таблицу 3.2.

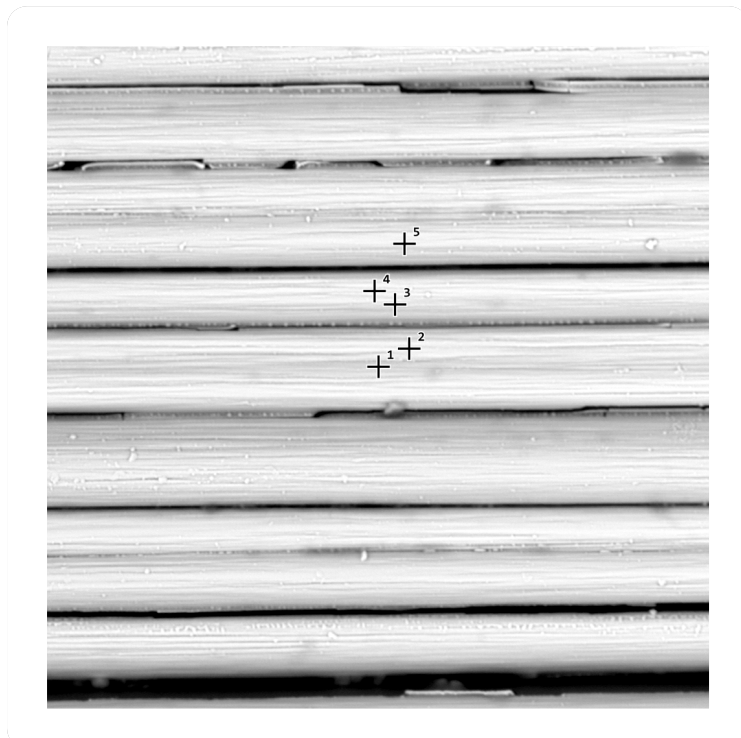


Рис.3.5. Элементный анализ металлизированной ткани по 5 точкам
после чистки камеры

Таблица 3.2.

Элементный анализ углеродной металлизированной ткани по 5 точкам
после очистки камеры

Номер точки	Cu, %	O, %	N, %	C, %
1	95,8	4,1	0,1	-
2	94,4	1,5	2,8	1,3
3	94,1	4,0	-	1,5
4	96,5	2,5	2,2	5,6
5	93,4	5,4	-	1,2

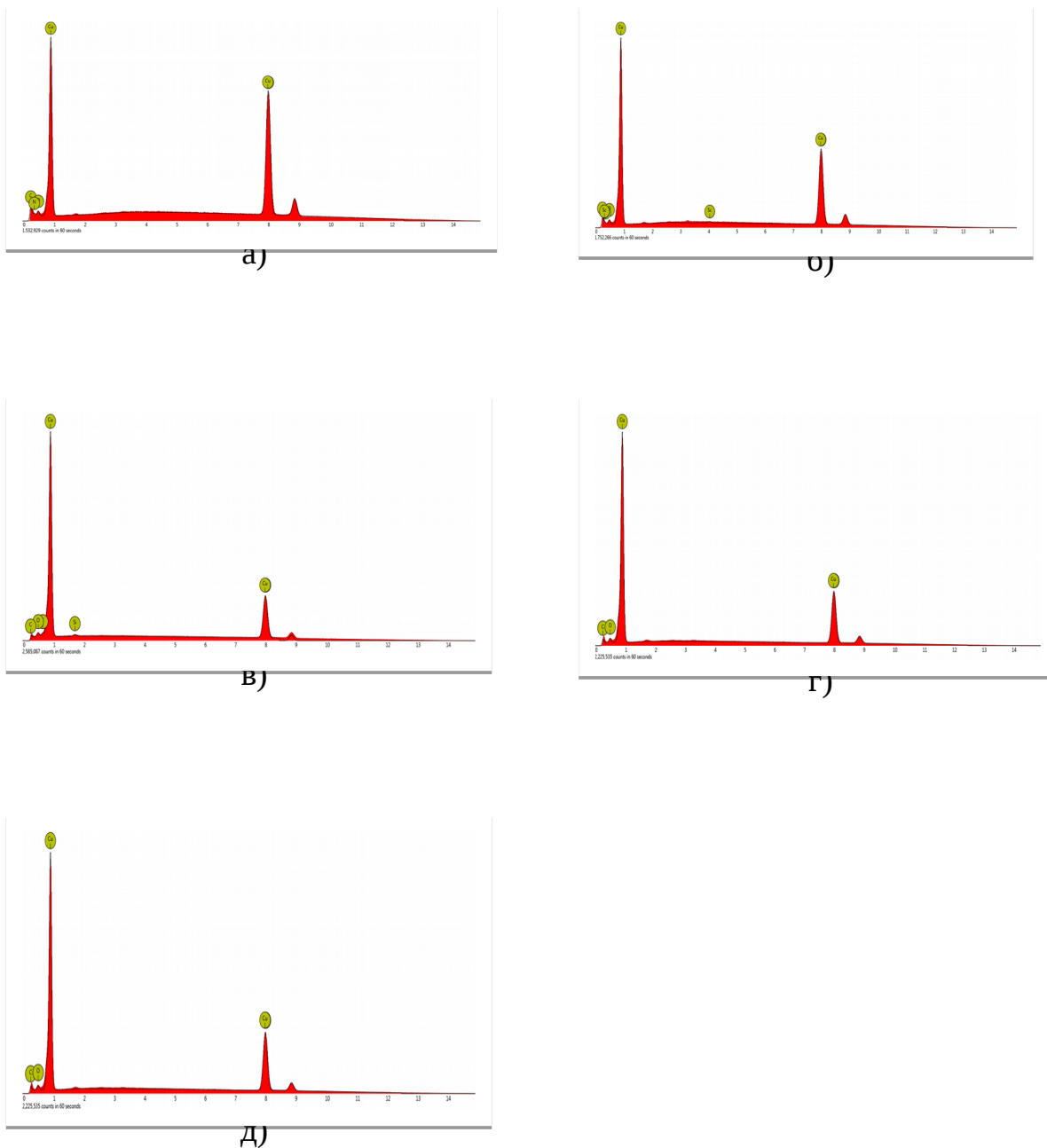


Рис.3.6. Структурный анализ пяти точек (а-д)

В результате исследований после очистки камеры данные элементного анализа имеет небольшой разброс и не имеют нежелательных включений (менее

5%), поэтому в дальнейшей работе напыление будет производиться исключительно после очистки камеры.

3.2. Изготовление образцов с применением новых сварочных технологий

В ходе работы использовались две технологии сварки для соединения между собой слоев ткани.

Ультразвуковая (вибрационная) сварка

Первый метод скрепления слоев металлизированной ткани, который мы использовали – метод ультразвуковой сварки.

Материалы для выполнения работы: тканевые образцы углеродной ленты FibArm Tape-230/300, толщиной 2,1 мм; медное напыление на поверхность ткани толщиной 100 Нм. Технологический процесс получения сварного соединения состоит из следующих этапов:

1. Ознакомится с машиной для сварки.
2. Подготовить под сварку образцы тканевого образца из углеродной ленты FibArm Tape-230/300 толщиной 2,1 мм с нанесенным заранее медным покрытием толщиной 100 Нм (эксперимент проводили на образцах толщиной 2 – 5 слоев).

3. Выбрать диаметр электрода $d_{эл.}$ Мм для сварки углеродных металлизированных лент.

4. Рассчитать параметры режимов сварки. Диаметр ядра d мм при конической заправке электрода определяется из соотношения

$d = (2\delta + 3)$ мм, следовательно, 7 мм., где δ -толщина более тонкой из свариваемых деталей, мм.

Сила сварочного тока $I_{св.}$ подсчитывается как произведение площади контактной поверхности F_M на плотность тока j ;

$$I_{св.} = F_{эл.} \cdot j = 100 \text{ мм}^2 \cdot 90 \text{ А/мм}^2 = 9000 \text{ А} = 9 \text{ кА}$$

Плотность тока при сварке углеродных лент принимали: $j = 90 \text{ А/мм}^2$. Сила сварочного тока $I_{\text{св.}}$ принимаем равны 9 кА. Необходимое усилие сжатия $P_{\text{сж.}}$ Растет с увеличением толщины деталей S , для углеродных металлизированных лент усилие принимается минимальное $P \sim (20) S$, кг. Отношение P/S ниже при мягких режимах и малых толщинах. Удельное давление $p \sim P/F3 \text{ кг/мм}^2$. (На жестких режимах $p = 5-12 \text{ кг/мм}^2$, на мягких режимах $p = 3 — 6 \text{ кг/мм}^2$.) Время сварки t (с) для углеродных металлизированных лент определяется по соотношениям: $t = (3,15...4,3)\delta$ — при жестких режимах, $t = (2,8... 4,1)\delta$ — при мягких режимах. Время сварки $t_{\text{св.}}$ принимаем 4 с. Провести сварку образцов при различных силах тока $I_{\text{св.}}$ кА, времени $t_{\text{св.}}$, с и давлении $P_{\text{св.}}$, кг.

Ход работы:

- Подключить генератор ультразвука;
- Ультразвук, проходя через конвертер, преобразуется в продольные механические колебания волновода;
- Волновод подсоединяется перпендикулярно плоскости шва и передает заготовкам колебательную энергию;
- Механическая энергия преобразуется в волновую, что обуславливает интенсивный нагрев области соприкосновения волновода и заготовки;
- В нагретом поверхностном слое возрастает текучесть;
- Динамическое усилие, прикладываемое со стороны излучателя, способствует нагреву зоны контакта;
- Статическое усилие, приложенное в том же направлении — перпендикулярно поверхности контакта, принуждает к образованию прочные связи.

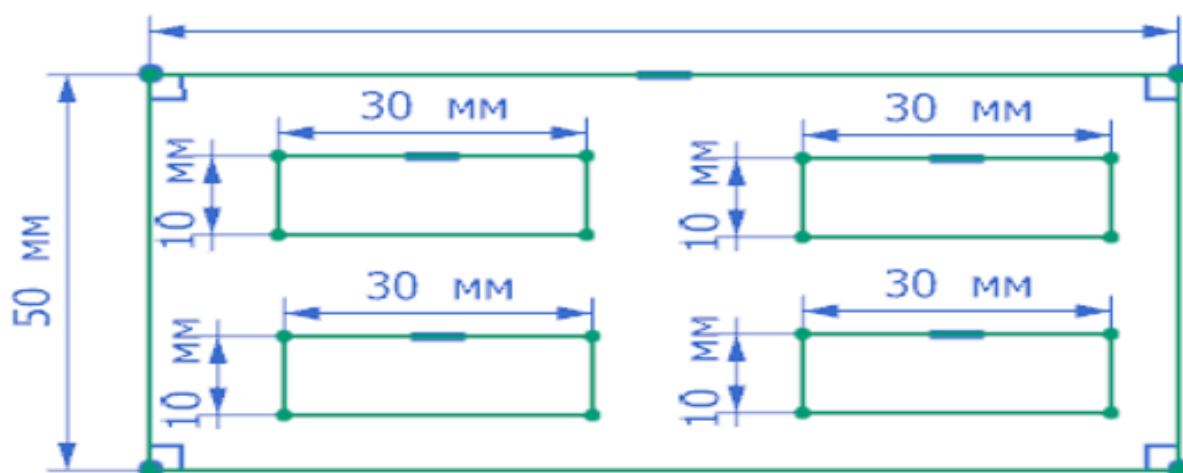
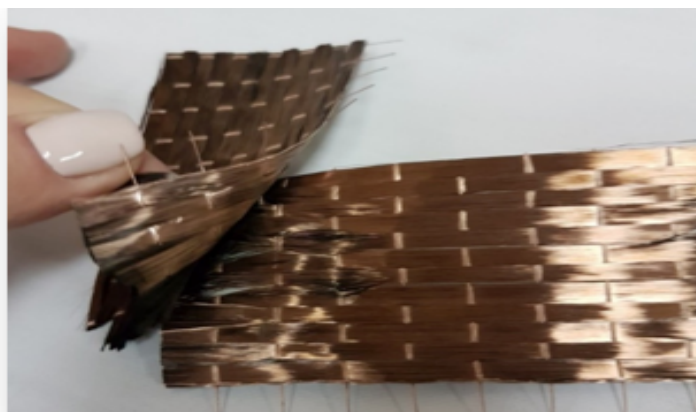


Рис. 3.7. Схема расположения точек скрепления ультразвуковой сваркой

На каждом образце (размеры всех образцов были одинаковы и имели размер 100 x 50 мм) были сделаны 4 точки сварки (площадь точек сварки была одинакова 30 x 10 мм) (Рис.3.7.). Наилучшие показатели на прочность дали образцы, полученные при режиме с амплитудой 20 КГц, поэтому все дальнейшие образцы создавались при данном режиме.

Пайка

Следующий метод, использованный для скрепления слоев –пайка. В ходе работы меняли температуру жала от 250 °С до 420 °С.

Ход работы:

- Паяльник нагреть до необходимой температуры;
- На ткань (размеры образцов были одинаковы 100 x 50 мм) нанести флюс в места будущей сварки (количество точек сварки в нашем случае менялось от 2 до 9) (рис.3.8);
- С помощью паяльника расплавить припой и нансти на те же точки (рис.3.8. а.);
- Сверху выложить следующий слой ткани (рис.3.8.);
- На верхний слой положить фольгу для равномерного распределения температуры и во избежание прогорания поверхности ткани;
- Прогреть паяльником те же точки (рис.3.8.).

В нашем случае были получены образцы из 2ух и 3ех слоев ткани, на каждом было сделано по 9 точек скрепления каждого слоя. Ниже приведены полученные образцы с различнм количеством точек (места спайки) и при различном количестве припоя (рис.3.9.а,б.).

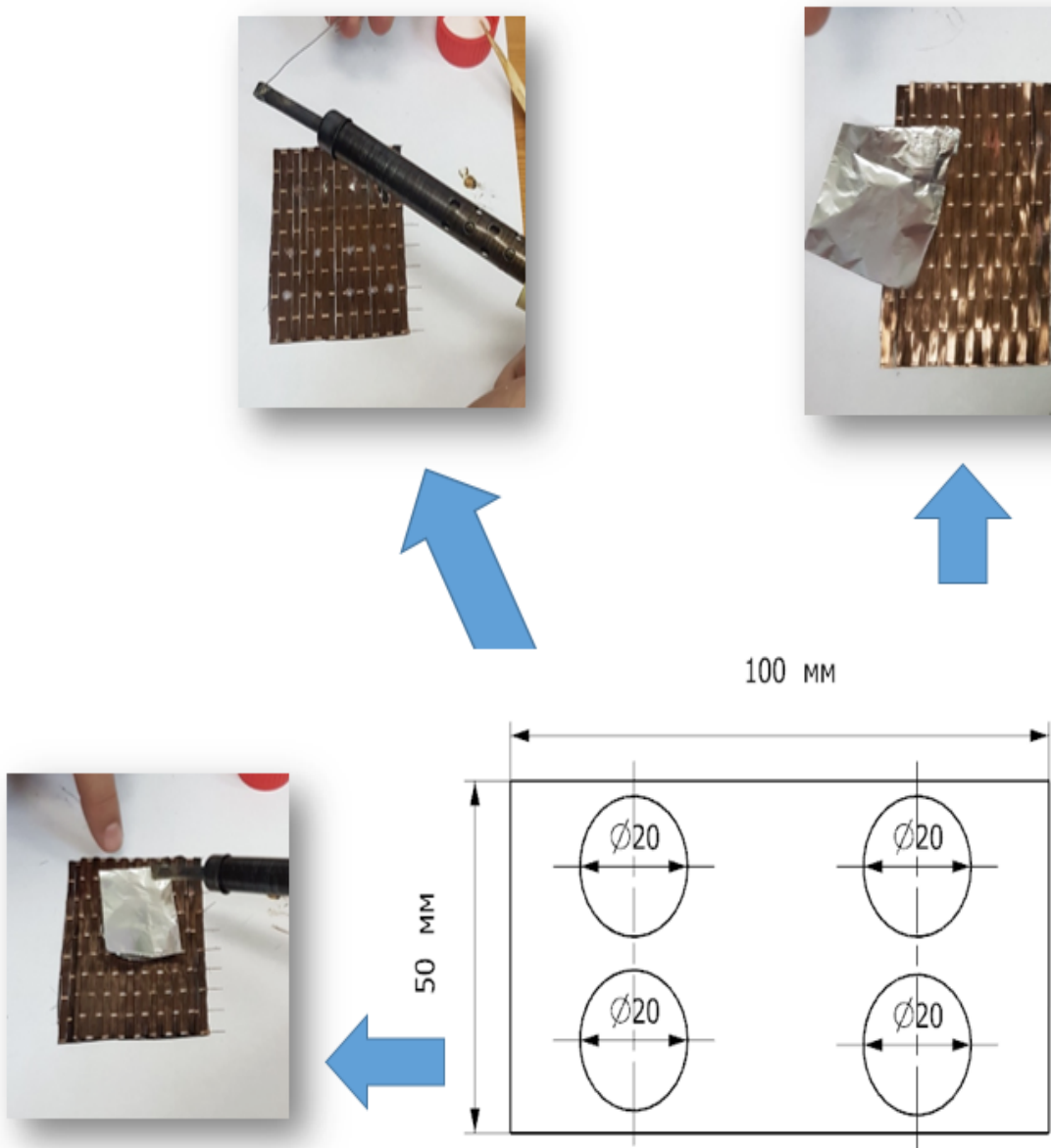


Рис.3.8. Схема расположения точек пайки на образце

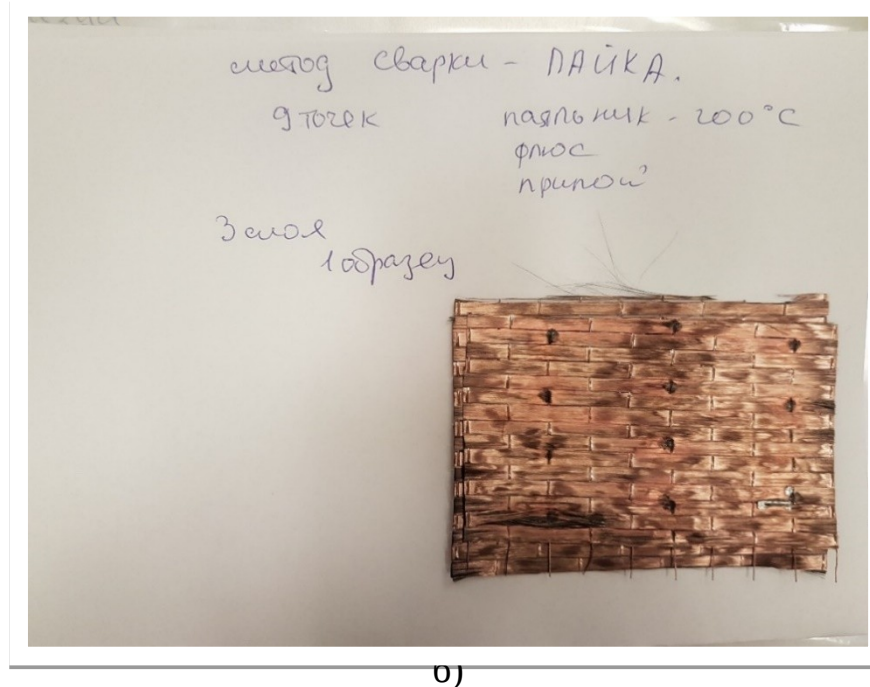
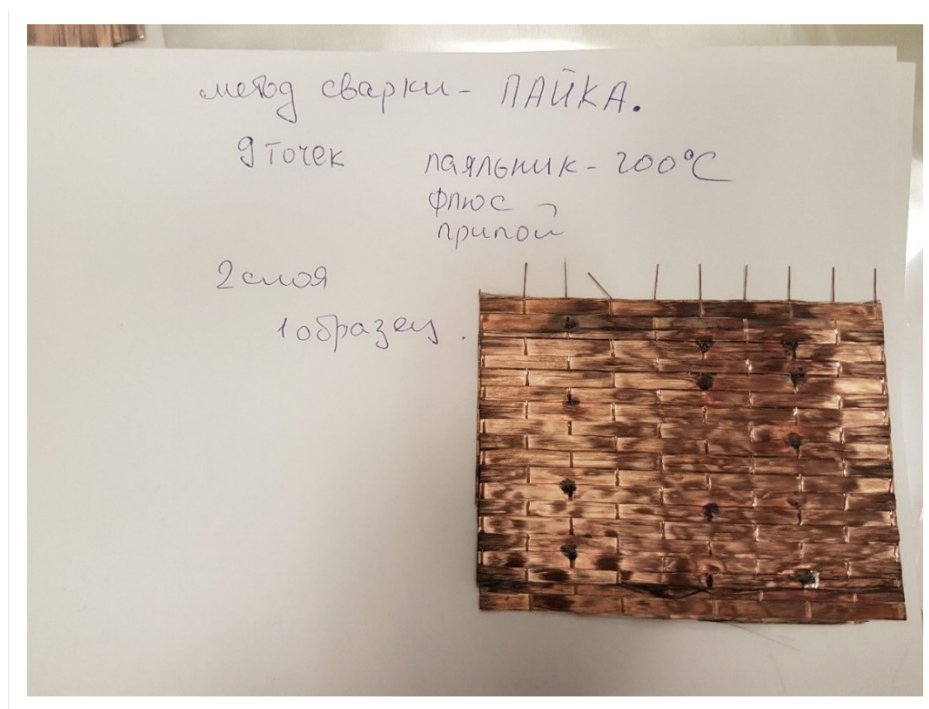


Рис.3.9. Образцы, состоящие из двух (а) и трех (б) слоев, полученные методом пайки

По результатам полученных данных можно сделать следующие вывод, что сваривать металлизированную углеродную ткань при помощи пайки возможно, так же данный метод показал результаты на прочность выше чем метод ультразвуковой сварки. Поверхность ткани после пайки практически не

повреждается и данный процесс автоматизировать легче чем метод ультразвуковой сварки.

3.3. Анализ структур после сварки

Ультразвуковая (вибрационная) сварка

С помощью электронно-растрового микроскопа PHENOM proX были проведены исследования по изучению структуры и элементный анализ в местах скрепления слоев ультразвуковой сваркой. Были выделены 5 точек (рис.3.10.), с помощью специальной программы изучен элементный состав каждой отдельно, общие данные по элементному анализу пяти точек сведены в общую таблицу.3.3.

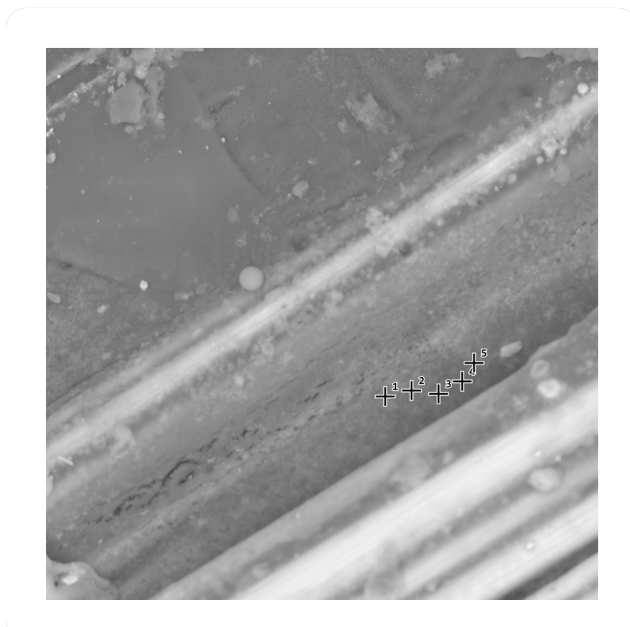


Рис.3.10. Элементный анализ в местах скрепления слоев ультразвуковой сваркой (по 5 точкам)

Таблица 3.3.

Элементный анализ в местах скрепления слоев ультразвуковой сваркой (по 5 точкам)

Номер точки	Zn, %	Cl, %	Cu, %	Si, %
1	48.5	13.3	4.3	1.7
2	50.3	17.6	4.5	1.9
3	48.3	13.5	4.3	1.4
4	48.7	15.1	5.0	1.8
5	52.6	18.6	4.4	2.0

Из полученных данных можно сделать вывод, что сварка металлизированной углеродной ткани ультразвуковой сваркой возможна, однако возможно «подгорание» поверхности и практически невозможность использовать данный метод для скрепления слоев ткани более 5 без повреждения поверхности.

Пайка

С помощью электронно-растрового микроскопа PHENOM proX были проведены исследования по изучению структуры и элементный анализ в местах скрепления слоев пайкой (рис.3.11). Были выделены 5 точек (рис.3.12.), с помощью специальной программы изучен элементный состав каждой отдельно, общие данные по элементному анализу пяти точек сведены в общую таблицу 3.4.

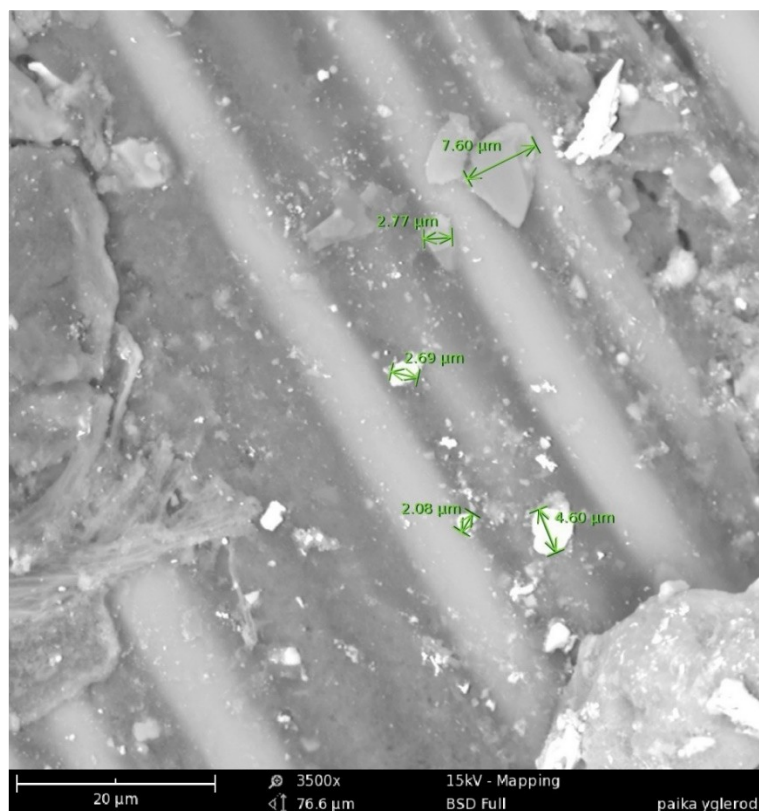


Рис.3.11. Фото структуры металлизированной ткани в местах спайки

Анализ полученных результатов (см. рис. 3.11) показал, что в местах пайки наблюдаются остаточные куски флюса различного диаметра.

Был проведен анализ зависимости температуры нагрева жала паяльника от количества оставшейся меди на поверхности углеродной металлизированной ткани. Были сделаны несколько точек спайки при различных температурах (250 °С (Рис.3.13.), 300 °С (Рис.3.14.), 350 °С (Рис.3.15.), 420 °С (Рис.3.16.)), а затем проведен элементный анализ в каждой точке.

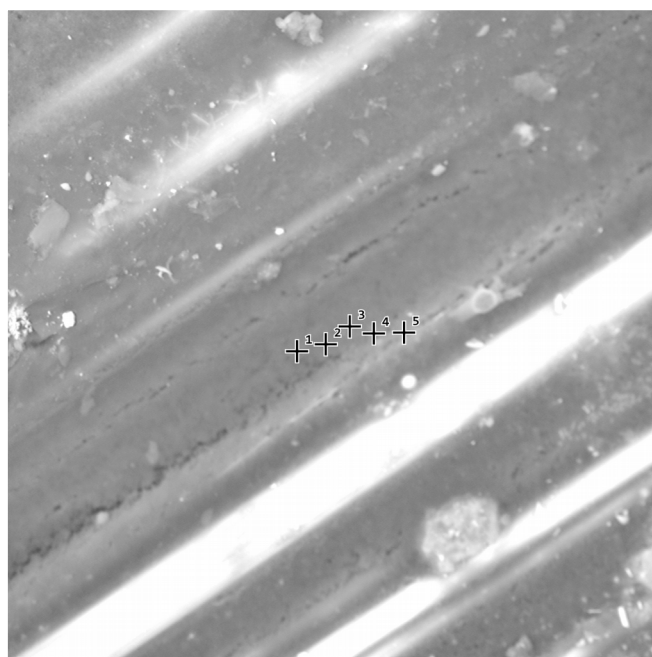


Рис.3.12. Элементный анализ в местах спайки ткани (по 5 точкам)

Таблица 3.4.

Элементный анализ в местах спайки ткани (по 5 точкам)

Номер точки	Zn, %	Cl, %	Cu, %	Si, %
1	46.5	15.9	22.3	8.6
2	46.8	18.9	20.4	12.8
3	46.5	17.8	20.6	10.8
4	33.8	11.7	15.5	11.7
5	41.4	7.6	15.0	8.4

Анализ проведен по 3 точкам. Выявлены 4 основные элемента, данные занесены в таблицу 3.5.

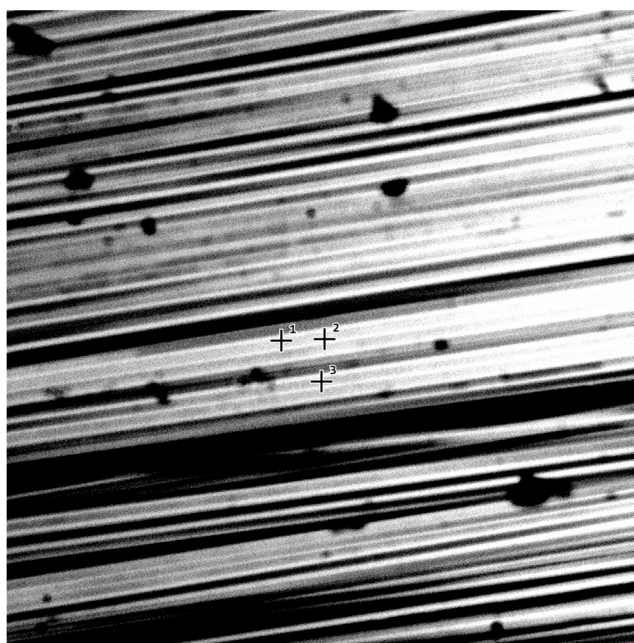


Рис.3.13. Элементный анализ по трем точкам после пайки при $T=250\text{ }^{\circ}\text{C}$

Таблица 3.5.

Элементный анализ трех точек после пайки при $T=250\text{ }^{\circ}\text{C}$

Номер точки	Элемент	Количество, %
1	Cu	84.4
	O	7.9
	F	5.9
	C	1.8
2	Cu	82.5
	F	6.7
	O	8.6
	C	2.1
3	Cu	85.1
	C	2.0
	O	7.6
	F	5.2

Таблица 3.6.

Количество меди в Зех точках

Номер точки	Температура, $^{\circ}\text{C}$	Количество меди, %
1	300	82.5
2	300	84.4
3	300	85.1
Среднее значение	300	84

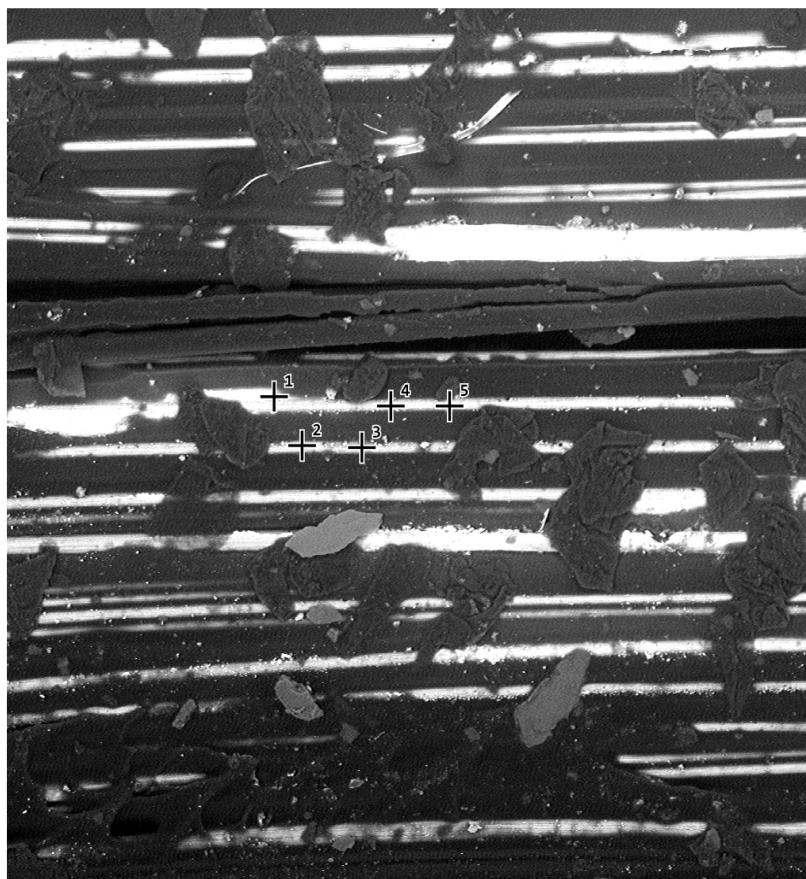


Рис.3.14. Элементный анализ по трем точкам после пайки при $T=300\text{ }^{\circ}\text{C}$

Таблица 3.7.

Элементный анализ пяти точек после пайки при $T=300\text{ }^{\circ}\text{C}$

Номер точки	C, %	O, %	N, %	Cu, %
1	8.9	34.4	11.2	25.4
2	20.1	33.2	11.6	25.2
3	21.1	33.4	15.33	30.2
4	23.6	30.3	16.1	30
5	22.5	41.9	15.6	21

После проведенного элементного анализа было выявлено что разброс содержания меди небольшой, найдено средние значение меди в различных точках при температуре пайки 250 °С – 26,36 %. Следующий эксперимент проводился при температуре пайки 350 °С (рис.3.15.), полученные данные по элементному анализу занесены в Таблицу 3.9

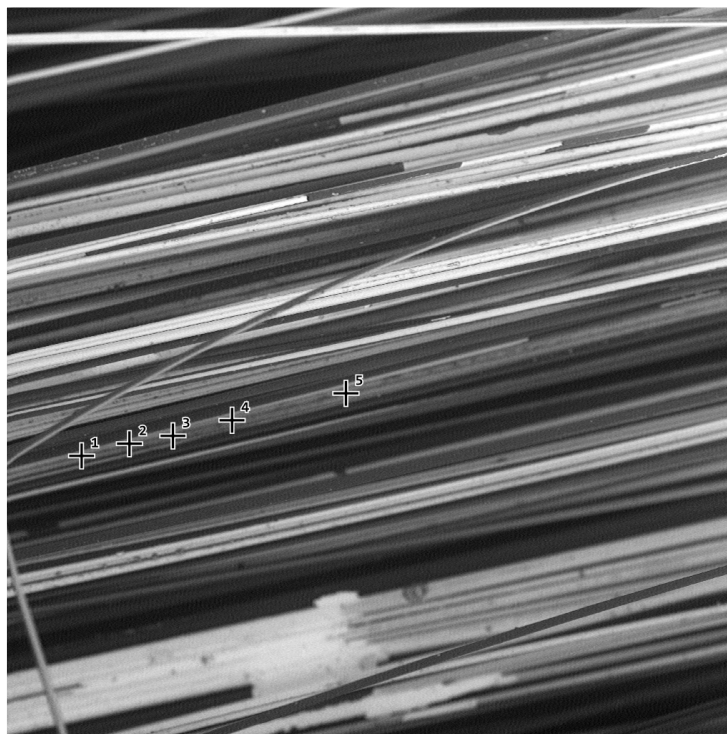


Рис.3.15. Элементный анализ по трем точкам после пайки при T=350 °С

Таблица 3.9.

Элементный анализ пяти точек после пайки при T=350 °С

Номер точки	C, %	O, %	N, %	Cu, %
1	13.0	52.3	19.6	15.1
2	26.7	53.3	-	20
3	25.7	62.1	-	12.2

После проведенного элементного анализа было выявлено что разброс содержания меди небольшой, найдено средние значение меди в различных точках при температуре пайки 350 °С – 15.7 %. Следующий эксперимент проводился при температуре пайки 420 °С (рис.3.16.).

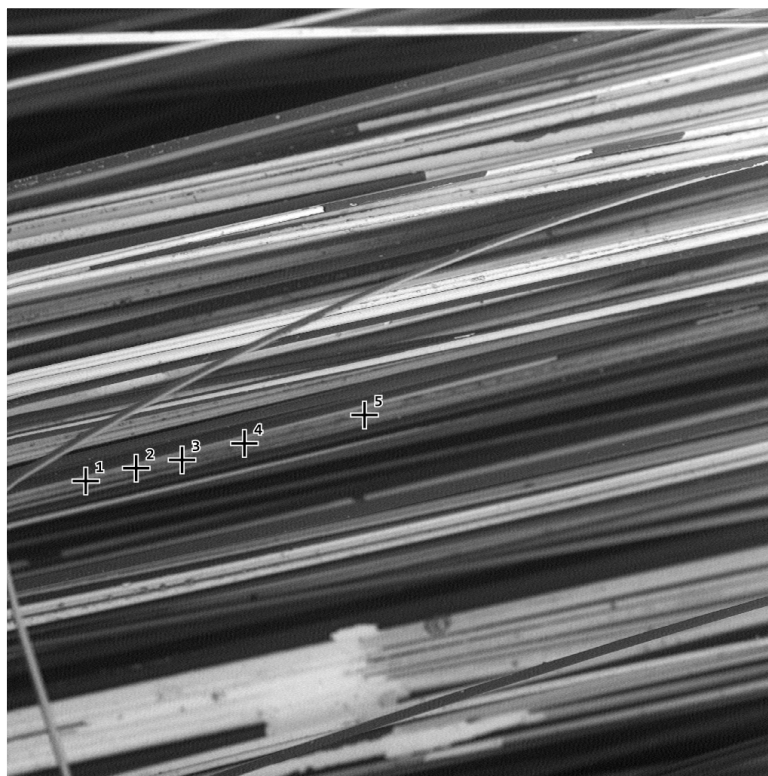


Рис.3.16. Элементный анализ по трем точкам после пайки при $T=420\text{ }^{\circ}\text{C}$

Однако, было установлено, что при температуре $420\text{ }^{\circ}\text{C}$ медь на поверхности образца отсутствует и ее среднее значение по всем точкам составляет 0%. Средние значения количества меди (%) после пайки при различных температурах занесены в общую таблицу 3.10.

Таблица 3.10.

Средние значения количества меди

Номер точки	Температура, $^{\circ}\text{C}$	Количество меди, %
1	250	84
2	300	26.36
3	350	15.7
4	420	0

На основе полученных данных построена зависимость количества меди на образцах от температуры пайки. (рис.3.17.).

Изменение количества меди при различных температурах



Рис.3.17. Изменение количества меди при различных температурах

Таким образом в результате проведенных исследований установлено, что:

1. Очистка камеры перед напылением существенно меняет количество примесей на поверхности ленты, поэтому все исследования будут проводиться после очистки камеры;
2. Наблюдается зависимость количества меди на поверхности от температуры до которой поверхность нагревается, установлено что после 420 °C медь на поверхности полностью выжигается.

Исследование зависимости количества олово от расстояния от центра точки спайки

Изменение количества олово в зависимости от выбранной зоны. При $T=300^{\circ}\text{C}$ с использованием канифоли. Структура была условно разбита на 2 зоны (центр и край точки спайки). Исследовались 2 зоны (1- в центре капли олова, 2- с краю капли олова). В каждой зоне были выбраны 5-6 точек и по ним проведен элементный анализ.

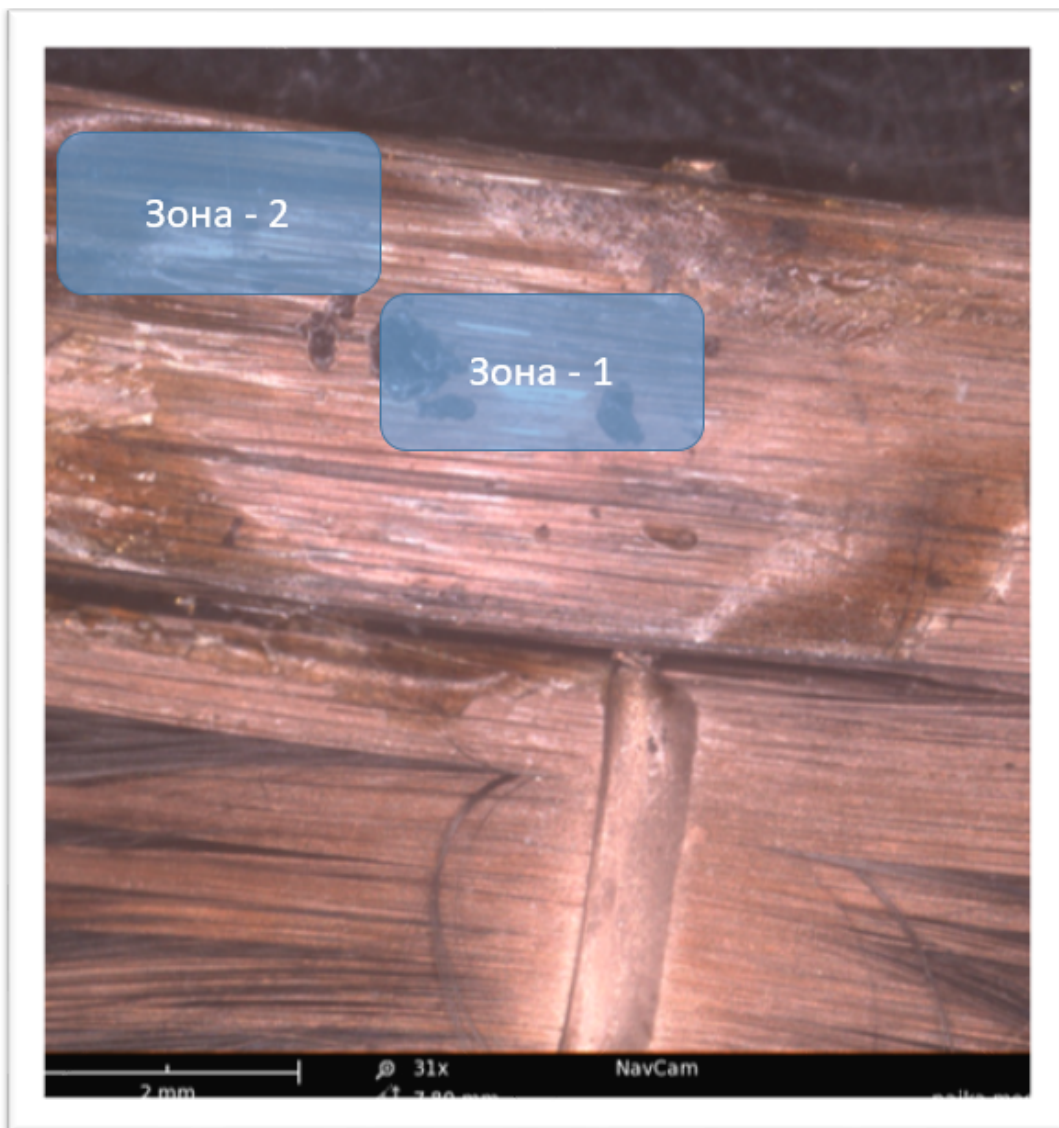


Рис.3.18. Фото структуры после пайки при $T=300^{\circ}\text{C}$ с использованием олова

ЗОНА - 1.

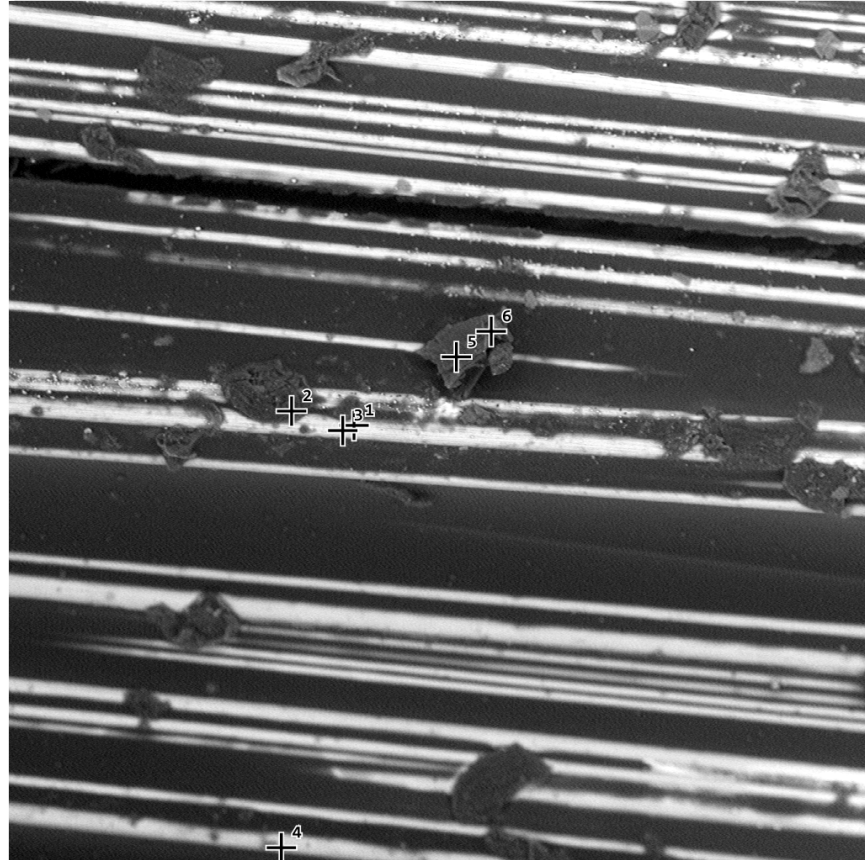


Рис.3.18. Элементный анализ по шести точкам после пайки при $T=300\text{ }^{\circ}\text{C}$ в ЗОНЕ-1

Полученные данные по элементному анализу 6 точек после пайки при $T=300\text{ }^{\circ}\text{C}$ занесены в табл. 3.11. Затем по полученным данным построен график зависимости содержания олова от удаленности от середины капли после пайки при $T=300\text{ }^{\circ}\text{C}$ в ЗОНЕ-1 (рис.3.19.).

Таблица 3.11

Элементный анализ пяти точек после пайки при $T=300\text{ }^{\circ}\text{C}$, с использованием олова в ЗОНЕ-1

Номер точки	C, %	O, %	N, %	Sn, %
1	16.4	65.1	18.5	-
2	18.3	43.7	-	38.0
3	28.9	71.1	-	-
4	29.9	70.1	-	-
5	18.9	60.8	-	20.3
6	21.0	57.8	-	21.3

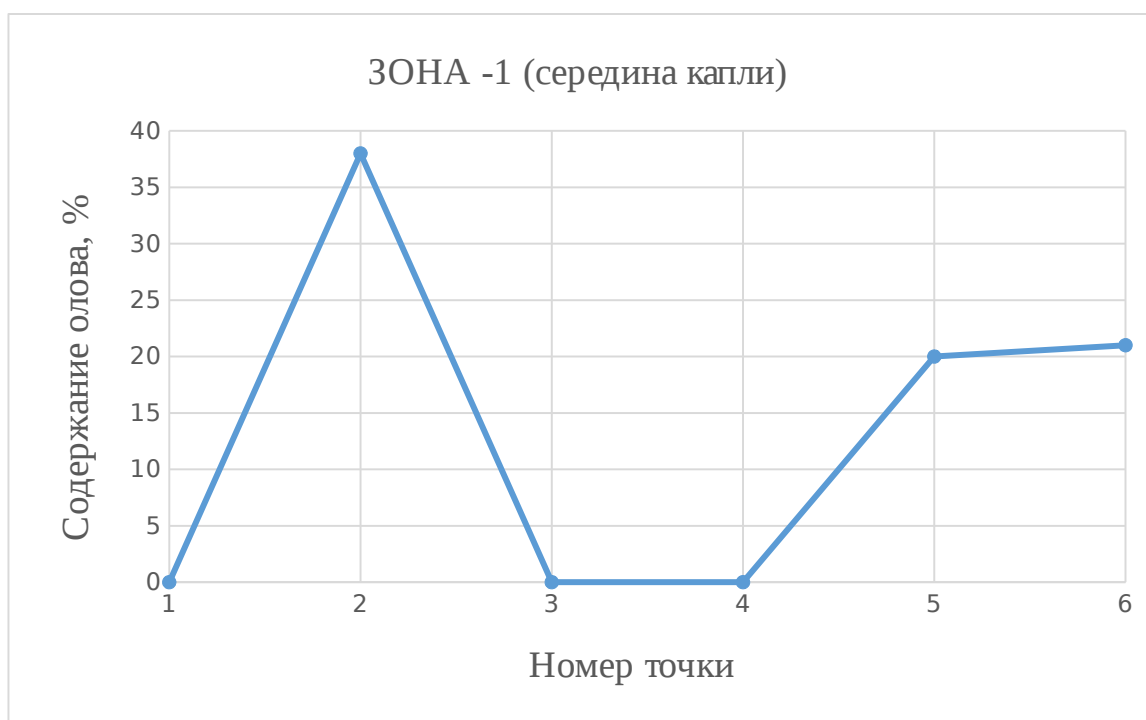


Рис.3.19. Зависимость содержания олова от удаленности от середины капли после пайки при $T=300\text{ }^{\circ}\text{C}$ в ЗОНЕ-1

Установлена зависимость содержания олова от удаленности от середины капли после пайки при $T=300\text{ }^{\circ}\text{C}$, очевидно, что при удалении от центра капли количество олова увеличивается (рис.3.19.).

ЗОНА -2.

Полученные данные по элементному анализу 5 точек после пайки при $T=300\text{ }^{\circ}\text{C}$ в ЗОНЕ-2 занесены в Таблицу 3.12. Затем по полученным данным построен график зависимости содержания олова от удаленности от середины капли после пайки при $T=300\text{ }^{\circ}\text{C}$ в ЗОНЕ-2 (рис.3.21.).

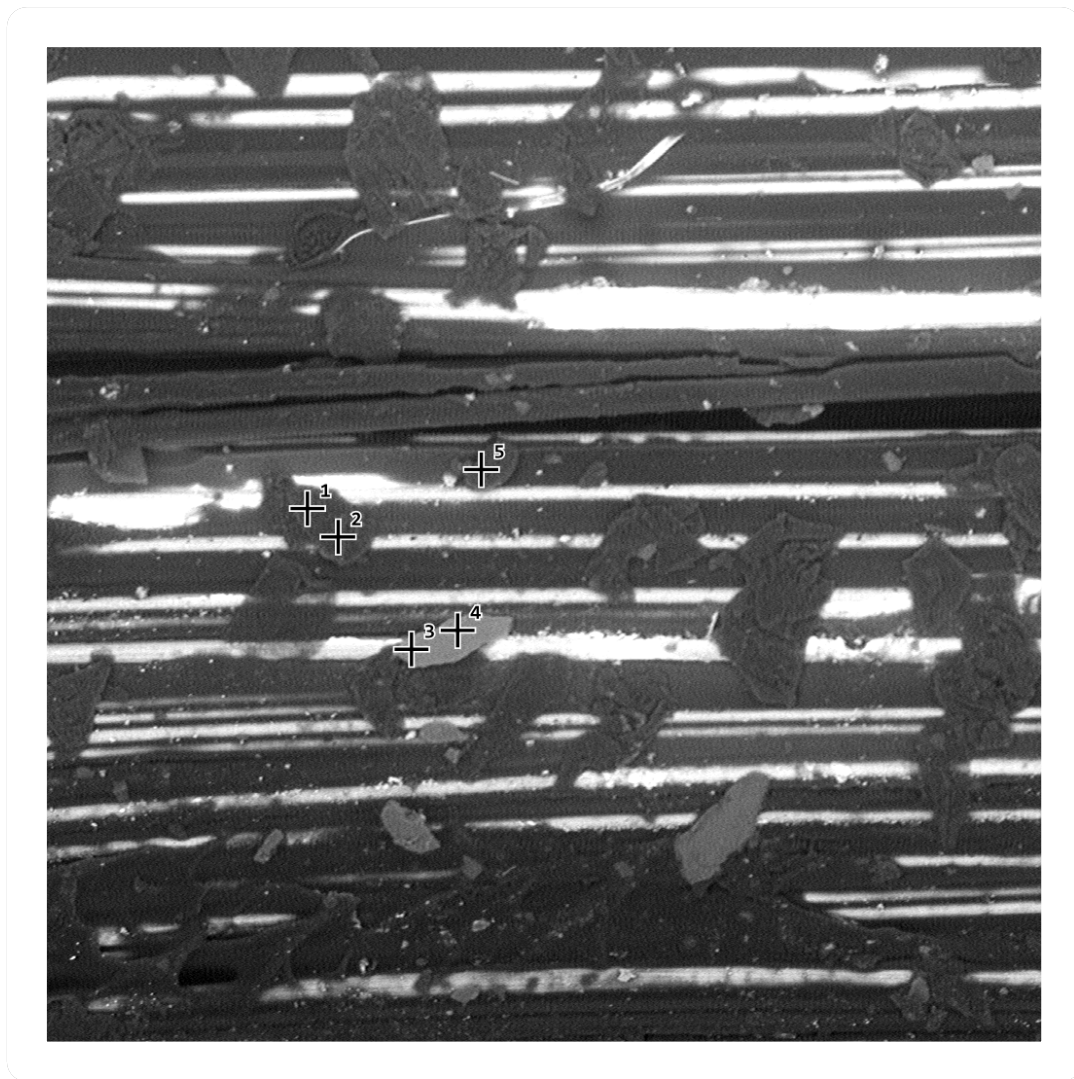


Рис.3.20. Элементный анализ по пяти точкам после пайки при $T=300\text{ }^{\circ}\text{C}$ в ЗОНЕ-2

Таблица 3.12

Элементный анализ пяти точек после пайки при $T=300\text{ }^{\circ}\text{C}$, с использованием олова в ЗОНЕ-2

Номер точки	Cl, %	Zn, %	Cu, %	Sn, %
1	15.9	8.6	22.3	46.5

2	18.9	12.8	20.4	46.8
3	7.6	8.4	15.0	41.4
4	17.8	10.8	20.6	46.5
5	11.7	11.7	10.5	33.8

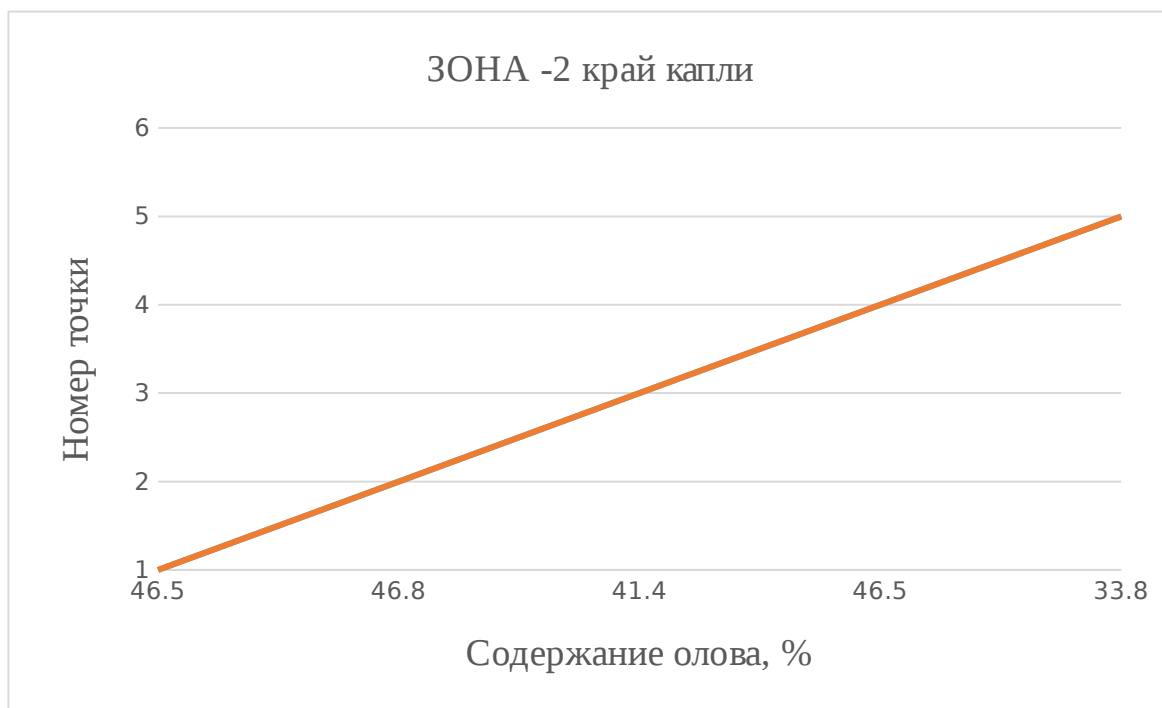


Рис.3.21. Зависимость содержания олова от удаленности от середины капли после пайки при $T=300\text{ }^{\circ}\text{C}$ в ЗОНЕ-2

Вывод по третьей главе

В результате проведенной экспериментальной части установлено, что сваривать металлизированную углеродную ткань при помощи пайки и ультразвуковой сварки – возможно. Определен более выигрышный метод соединения слоев - метод пайки. Полученные по данному методу образцы показали результаты на прочность выше чем образцы полученные методом ультразвуковой сварки, так же поверхность ткани после пайки практически не повреждается и данный процесс автоматизировать легче чем метод ультразвуковой сварки.

Так же сделаны выводы, что очистка камеры перед напылением существенно меняет количество примесей на поверхности ленты, поэтому все исследования будут проводиться после очистки камеры. Наблюдается зависимость количества меди на поверхности от температуры до которой поверхность нагревается, установлено что после 420 °С медь на поверхности полностью выжигается.

Глава 4. Теоретическая оценка свойств элементарных нитей с медным покрытием

4.1. Тепловой расчёт элементарной углеродной нити с металлическим покрытием

Расчетная часть работы посвящена той части проблем физики, которые обусловлены термически активируемыми физическими процессами, протекающими в макроскопических телах и нанобъектах. Целью расчета является определение температуры плавления напыленного на углеродные ленты медного покрытия толщиной 100 Нм.

Для проведения сварки необходимо знать тепловые нагрузки, при которых, с одной стороны не будет происходить расплавление медного покрытия на поверхности углеродной ленты, а с другой стороны, будут обеспечиваться условия возникновения сварного шва (или сварной точки). Для этого была создана математическая модель, в данном случае нам необходимо было исследовать влияния электромагнитных полей на углеродные ленты диаметром 5 – 7 мкм с медным покрытием толщиной 100Нм.

При моделировании углеродного волокна были использованы геометрические характеристики элементарных нитей углеродной ленты FibArm Tape-230/300 (табл. 4.1.).

Таблица 4.1.

Теплофизические свойства углерода при различных температурах

1 - Температура, °С 2 - Коэффициент теплового линейного расширения, $\alpha_{ } \cdot 10^6$, 1/°К 3 - Удельная массовая теплоемкость, Дж/кг·°К 4 – Коэффициент теплопроводности, $\lambda_{ }$, Вт/м·°К 5 - Температура плавления, °С 6 - Удельная массовая теплоемкость, Дж/кг·°К 7 - Электросопротивление, Ом·м						
1	2	3	4	5	6	7
100	-1,07	139	414	3550	-	16
120	-1,19	185	-	-	0,42	13
150	-1,3	268	-	-	0,72	-
200	-1,33	417	375	-	1,00	-
250	-1,3	567	-	-	1,23	-
300	-1,22	714	335	-	1,39	-
400	-0,91	1000	296	-	1,51	11
500	-0,53	1230	237	-	1,63	-
600	-0,18	1390	217	-	1,71	10
700	0,13	1510	197	-		-
800	0,39	1630	158	-		-
900	0,59	-	-	-		9

Геометрия волокна указывается в микрометровых размерах. В качестве исходного волокна использовалась осесимметричная модель, состоящая из двух усеченных конусов, диаметр которых меняется от 7 мкм до 6 мкм на длине 100 мкм, а затем снова расширяется до 7 мкм, за счет уменьшения площади поперечного сечения на этом участке будет возрастать плотность тока, что и приведет к возрастанию температур. В качестве основного критерия использовались не абсолютные значения температур, а их относительная величина, т.е. разница, между температурой на участке наименьшей площади и торцами [40].

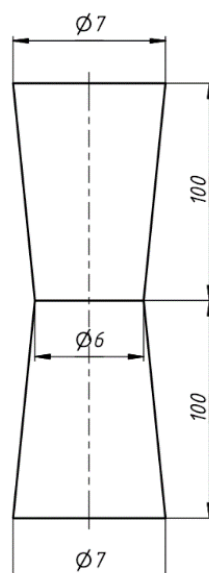


Рис. 4.1. Модель углеродного волокна

Такое заужение в центре условного цилиндра сделано для создания концентратора нагрева от электрического тока по аналогии плавкой вставки в предохранителях. Таким образом за счет уменьшения площади поперечного сечения сопротивление в этой точке возрастает, плотность тока в этом месте будет максимальна, соответственно Джоулев нагрев будет наибольшим, это следует из закона Джоуля-Ленца:

$$\omega = j \cdot E \quad , \quad (1)$$

где ω — количество тепла, выделяемого в единице объема, j — плотность электрического тока, E — напряженность электрического поля.

Главным образом, необходимо выяснить, как поведет себя пленка на поверхности волокна при ударе током, будет ли отличаться нагрев меди от углеродной нити. Используя сужение в центре модели, можно определить не только разницу температур у разных материалов, но и выяснить, зависит ли нагрев от диаметра волокна (при его изменении от 6 до 7 мкм).

Из-за малого времени воздействия только лишь небольшая часть тепла, выделяемого током, рассеивается в окружающую среду, а большая часть тепла остается в проводнике и расходуется на его нагрев.

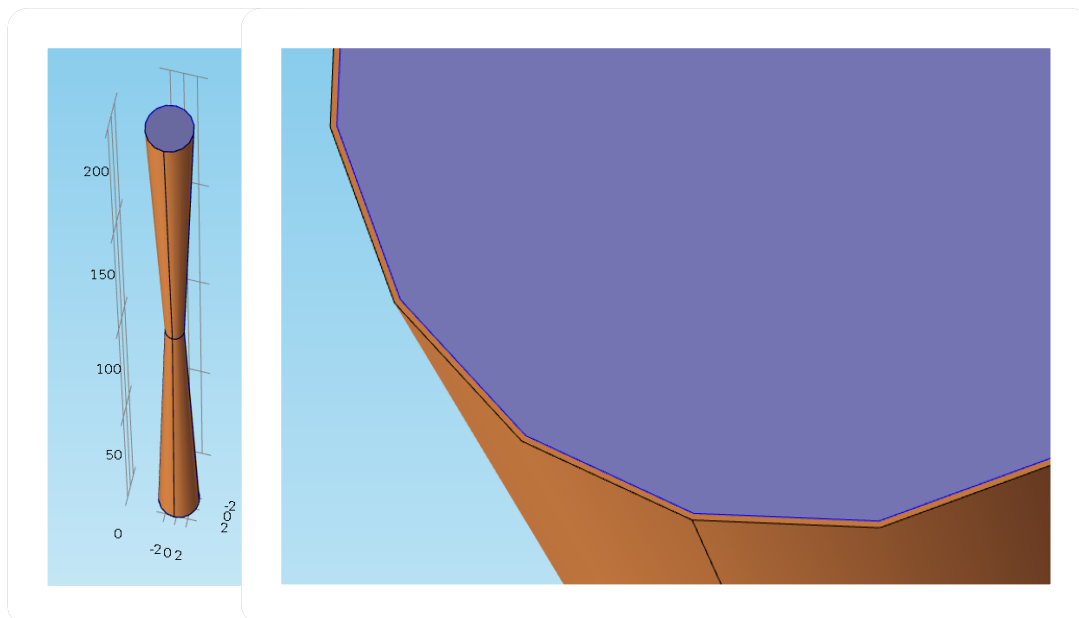


рис. 4.2. 3D модель исследуемого волокна

Для создания модели были сформированы электрические и тепловые контакты между исследуемым волокном и тонкой пленкой. Таким образом мы обозначаем полное прилегание медной пленки к углеродному волокну. Электрический потенциал прикладывался между торцами полученной модели волокна, поскольку модель симметрична, и Джоулев нагрев не зависит от направления тока. Далее для расчета методом конечных элементов была выбрана неструктурированная расчетная сетка с тетраэдрическими элементами – базовыми типами элементов для большинства физических задач в среде COMSOL. Размер оптимизированной сетки для углеродного волокна от 60 до 500 Нм (сторона тетраэдра) (рис.4.3.).

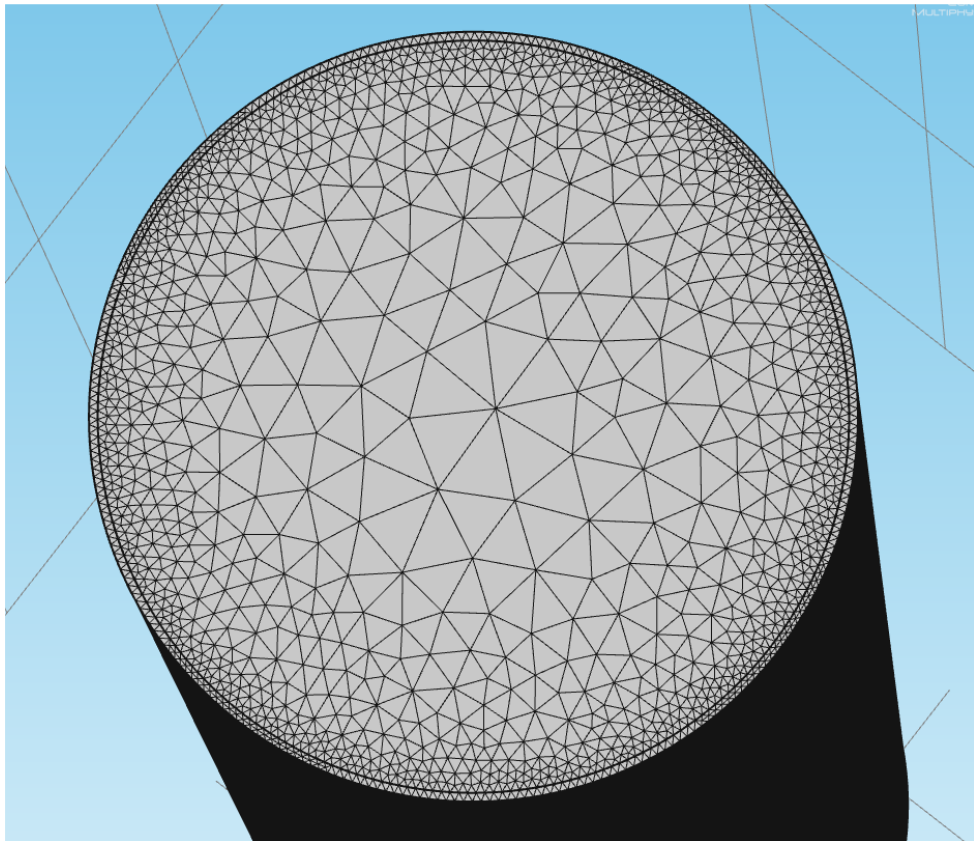


Рис.4.3. Расчетная сетка углеродного волокна

Для расчета тонкой медной пленки (до 100 Нм), напыленную на углеродное волокно необходим переход на нано-уровень. Свойства наноматериалов, как правило, отличаются от аналогичных материалов в массивном состоянии (табл. 4.2.). Например, у наноматериалов можно наблюдать изменение магнитных, тепло- и электропроводных свойств. Поэтому появляются «размерные» эффекты: появляется зависимость «макроскопических» физических свойств от характерного размера, формы и состояния поверхности нанобъектов, наблюдается появление новых физических свойств (например, обратный закон Холла-Петча, понижение температуры плавления с уменьшением характерного размера нанобъекта).

Таблица 4.2.

Теплофизические свойства меди на макроуровне

1 - Температура, °С

2 - Коэффициент теплового линейного расширения, $\alpha_{ } \cdot 10^6, 1/^\circ\text{K}$						
3 - Удельная массовая теплоемкость, Дж/кг $\cdot^\circ\text{K}$						
4 - Коэффициент теплопроводности, $\lambda_{ }, \text{Вт/м}\cdot^\circ\text{K}$						
5 - Температура плавления, $^\circ\text{C}$						
6 - Удельная массовая теплоемкость, Дж/кг $\cdot^\circ\text{K}$						
7 - Электросопротивление, Ом $\cdot\text{м}$						
1	2	3	4	5	6	7
100	15,2	16,8	500	1085	0,259	3,88
120	15,6	-	435	-	-	-
150	15,9	-	414	-	-	-
200	16,2	-	403	-	0,381	-
250	16,5	-	398	-	-	-
300	16,7	17,7	393	-	-	-
400	17,3	-	391	-	0,399	-
500	17,9	18,6	387	-	-	-
600	18,7	-	382	-	0,422	-
700	19,4	-	376	-	-	-
800	20,1	-	370	-	-	-
900	20,9	-	364	-	0,456	-

Для тонкой пленки была также выбрана тетраэдрическая сетка, так как призматическая не привела к значимым результатам. Размер оптимизированной сетки от 30 до 100 Нм. По сравнению с обычной медью, nano-медь обладает более низкой температурой плавления, высокой пластичностью. При комнатной температуре может растягиваться 50 раз больше чем исходный без трещин. Ещё обладает удивительными механическими свойствами и более активными химическими активностями. Прочность nano-меди в 3 раз больше чем обычный, и nano-медь вступает в реакцию с кислородом легче, чем обычный медь.

Обычно зависимость температуры плавления тонких пленок представляют в виде:

$$T_m(L) = T_m(\infty) - \frac{A}{L},$$

(2)

где A – некоторая константа, m – параметр, величина которого определяется характером роста частиц новой фазы, $T_m(\infty)$ – температура плавления макроскопического тела, L – толщина пленки.

Однако, экспериментальные данные, подтверждающие наличие подобной зависимости температуры плавления тонких пленок отсутствуют, доказано, что данная зависимость определяла не температуру плавления тонкой пленки, а температуру плавления наночастиц, составлявших пленку. Поскольку в данной работе напыление происходило равномерно (толщина напыления изменяется не более 2 %), данная зависимость может быть использована.

Минимальный слой медного покрытия на углеродную ленту – 30 Нм, максимальный – 100 Нм. В результате исследования установлено, что у явления плавления-диспергирования тонких пленок есть два аспекта: термодинамический и кинетический. Показано, что, несмотря на то, что данный процесс является неравновесным, к его описанию можно применить подходы равновесной термодинамики. Пренебрегая изменением объема и энтропии при плавлении, но принимая во внимание изменение площади во время плавления диспергирования, можно получить выражение, позволяющее определить температуру плавления тонких пленок (3):

$$T_{\text{melt}}(r) = T_{\text{melt}} \left(\frac{\Delta H(T_{\text{melt}})}{\Delta H_0} + \frac{\sigma_L A_L - \sigma_S A_S}{V \Delta H_0} \right) \quad (3)$$

На основании этого уравнения предложен итерационный метод расчета зависимости температуры плавления от толщины пленки (рис.4.4.). Результаты расчета представлены на рис. 4.4. Кривая 1 демонстрирует результат расчета по формуле (1). Кривая 2 получена методом итераций, которая адекватно описывает экспериментальные результаты.

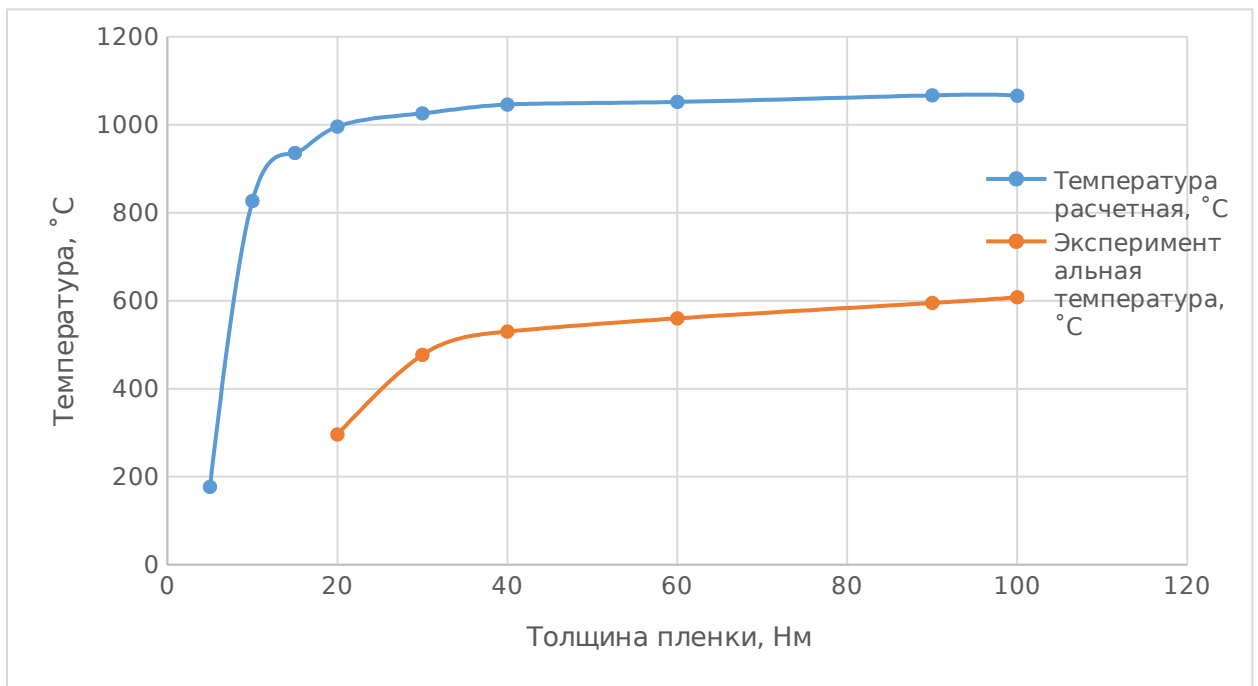


Рис.4.4. Расчетная и экспериментальная зависимость температуры плавления от толщины медной пленки

Выявлено, что, хотя имеется хорошее согласование вышеуказанных теоретических и экспериментальных данных, температура плавления тонкой пленки не является фиксированной величиной, поскольку данный процесс является неравновесным.

При создании конечно-элементной модели были использованы следующие допущения:

- между элементарной нитью и медным покрытием имеет место полное прилегание;
- медное покрытие по всему периметру элементарной нити имеет одну толщину;
- элементный состав медного покрытия не содержит примесей и является единым для всех элементарных нитей;
- подводимое тепло полностью расходуется на нагрев и не рассеивается в окружающую среду.

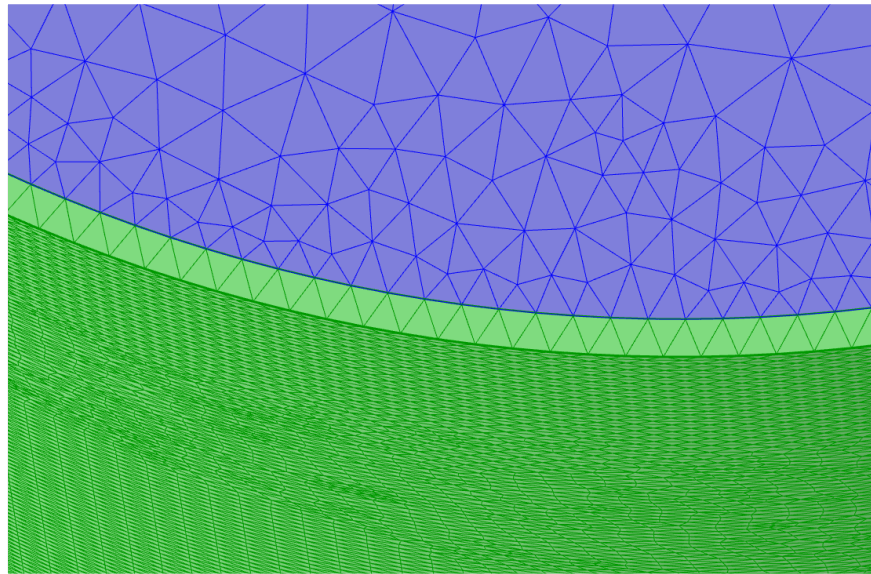


Рис. 4.5. Расчетная сетка тонкой пленки меди 100 нм

После расчета получаем следующую картину распределения температуры по модели (рис.4.6.). Температура пленки в тонком месте волокна достигает максимума и отличается в 5 раз между от приторцевой зоны.

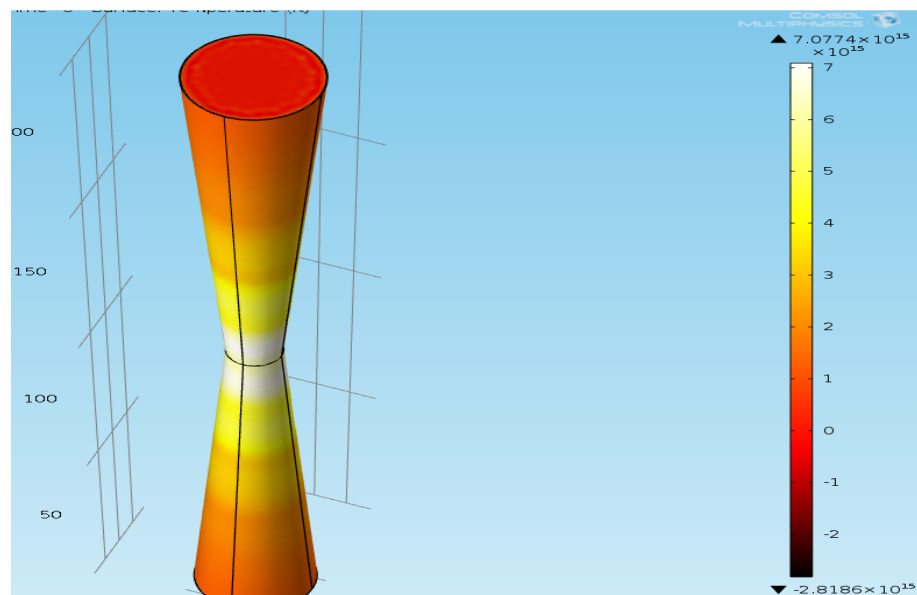


Рис. 4.6. Распределение температуры по поверхности пленки и на торцах волокна

Но главным результатом в данном расчете является исследование нагрева самого волокна, находящегося под тонкой пленкой. Оказалось, что само волокно нагревается в 7–9 раз меньше, чем пленка меди на нем

(рис.4.7.). Это можно выяснить, сделав два поперечных сечения вдоль волокна и поперек в месте его сужения.

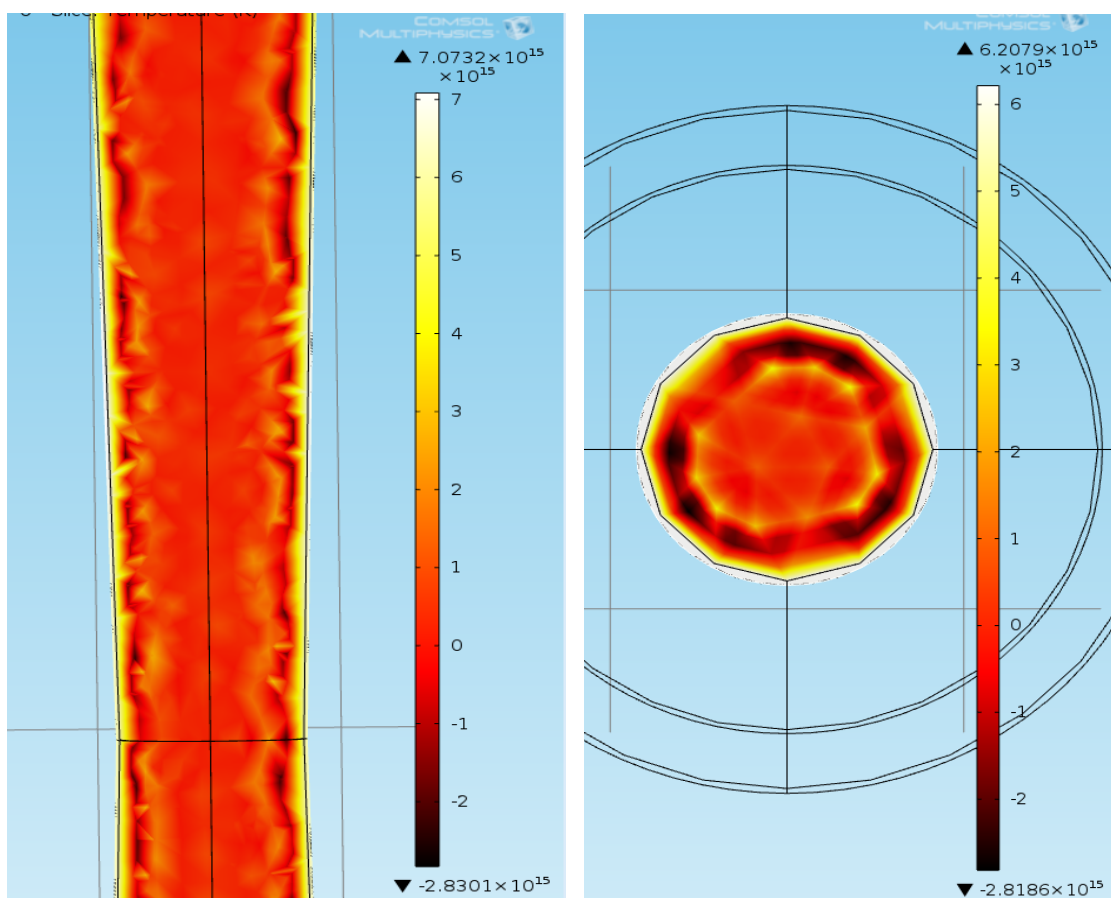


Рис. 4.7. Сечение волокна вдоль (слева) и поперек оси (справа)

Таким образом, выясняется, что в совокупности углеродное волокно с тонкой пленкой меди работают в паре и нагрев между ними распределяется неравномерно. Внешняя тонкая пленка меди в реальных условиях, очевидно, испаряется, предохраняя углеродное волокно от разрушения.

Вторая серия расчетов связана с переменной толщиной углеродного волокна, на котором расположена тонкая пленка меди переменной толщины. В отличие от предыдущего расчета, где менялся диаметр волокна, а толщина пленки оставалась неизменной, в данном случае диаметр волокна остается неизменным по всей длине модели и составляет 6 мкм, меняется толщина медной пленки. Толщина медного покрытия смоделирована, как оболочка углеродного цилиндра толщиной 100 Нм (рис. 4. 8.).

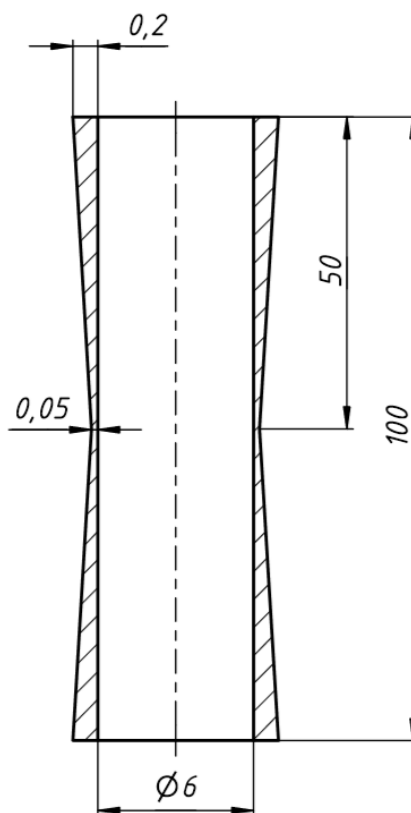


Рис. 4.8. Модель углеродного волокна, размеры в мкм

Таким образом изменение толщины медного покрытия к центру модели позволит выяснить зависимость температуры нагрева при ударе молнией при разных толщинах, а также создать концентратор нагрева, для упрощения сходимости решения Comsol. Материалы и их свойства остались неизменными. Размер оптимизированной тетраэдрической сетки составил от 50 до 300 Нм для углеродного волокна и от 25 до 100 Нм для тонкой пленки меди (рис. 4.9.).

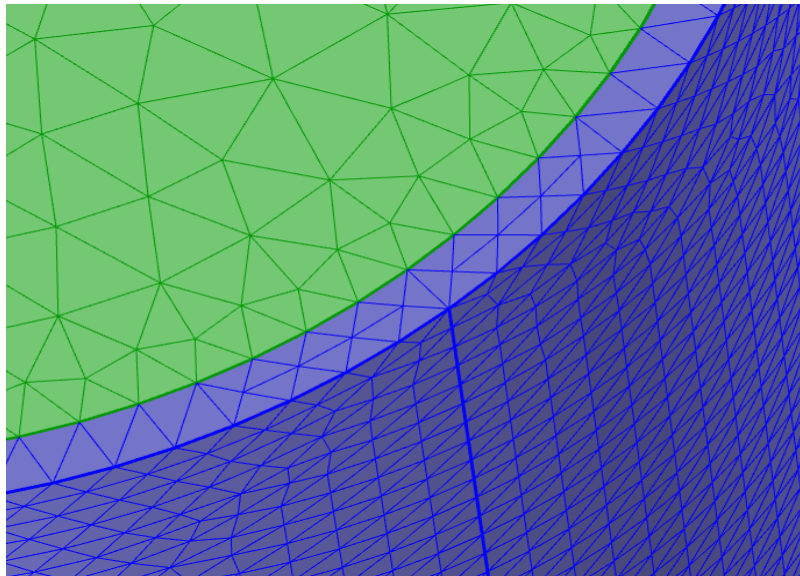


Рис.4.9. Расчетная сетка тонкой пленки меди

После расчета был получен следующий результат: распределение температуры по поверхности модели практически одинаково, есть лишь едва заметный нагрев пленки с уменьшением ее толщины на поверхности углеволокна (рис. 4.10.).

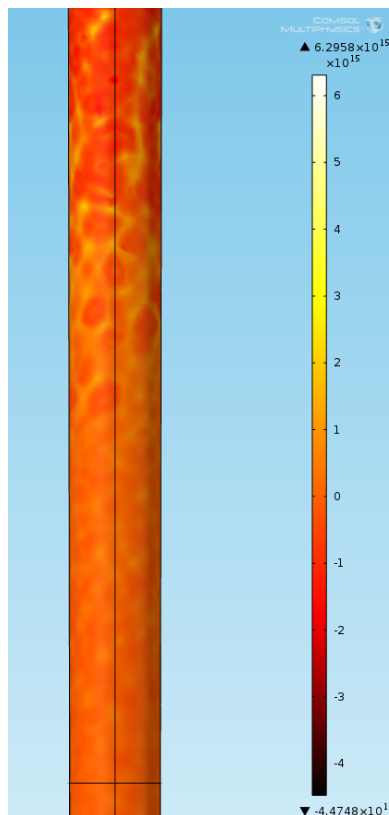


Рис.4.10. Распределение температуры по поверхности пленки

По аналогии с прошлым расчетом в продольном и поперечном сечении модели мы получаем знакомую картину: нагрев распределяется

неравномерно между пленкой и углеволокном, температура пленки превышает температуру волокна примерно в 7 раз (рис. 4.11.).

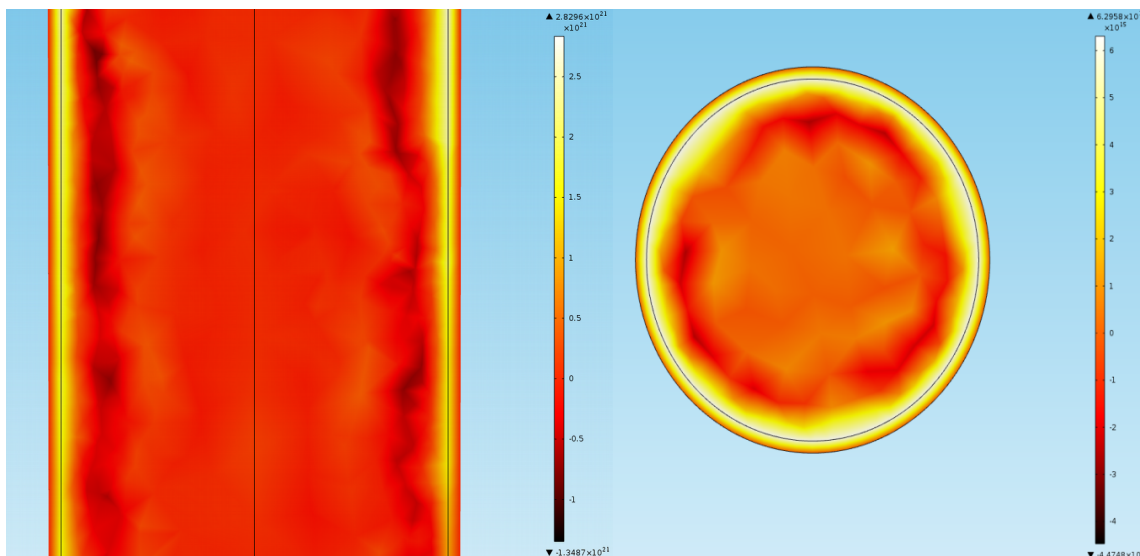


Рис. 4.11. Сечение волокна вдоль (слева) и поперек оси (справа)

4.2. Результаты моделирования

Анализ полученных результатов показывает нелинейный рост температур волокна и тонкой пленки меди в зависимости от приложенной к торцам разности потенциалов.

В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что величина нагрева углеродных тканей напрямую зависит от типа и толщины металлического покрытия. Температура плавления медного покрытия на углеродной ленте не превышает 600°C . Разработана модель, которая позволила оценить нагрев волокна от приложенной разности потенциалов. Имеется хорошее согласование теоретических и экспериментальных данных, однако температура плавления тонкой пленки не является фиксированной величиной, поскольку данный процесс является неравновесным.

Глава 5. Экспериментальная оценка свойств композитов на основе углеродной ленты с металлическим покрытием на основе неорганических связующих

5.1. Термогравиметрический анализ

С помощью термогравиметрического анализатора TG 209 F1 Perseus была проанализирована термическая устойчивость композитов, полученных на основе углеродных лент с использованием неорганических связующих, было принято решение провести анализ образцов с различным количеством слоев углеродной ткани, температура варьировалась от 100 до 1000 °С, данные занесены в таблицу 5.1. Очевидно, что потери массы минимальна даже при максимальных температурах (при 1000° С) потеря массы не превысила 20 %. Что доказывает необходимость применения неорганических связующих в композитах при использовании их при высоких температурах.

Таблица 5.1.
Термогравиметрический анализ

№	Состав	Потеря массы, % при температурах, ° С						
		100	200	300	400	500	900	1000
1	АБФС 5:1	7	18	24	27	28	29	30
2	АБФС, 2 слоя углеродной ткани	1	5	7	8	8,5	9	9,5
3	АБФС, 4 слоя углеродной ткани	2	10	12	13,5	14,5	17	19
4	АБФС, 6 слоев углеродной ткани	3	9	11,5	13,5	14	18	19,3

5.2. Механические испытания

Нами были проведены испытания на прочность на разрывной машине с полученными образцами на основе углеродных лент с использованием технологии сварки (образцы имели 6 слоев ткани, были пропитаны алюмоборфосфатным связующим, при использовании различных видов сварки). Для оценки прочности сварных и паяных соединений двух углеродных лент между собой были проведены испытания на расслаивание.

Установлено, что при соединении двух слоев углеродной ленты FibArm Tape-230|300 с медным покрытием по технологии ультразвуковой сварки величина прочности при расслаивании составляет 1,5 Н/м, а при соединении по технологии пайки – 3,2 Н/м.

Заключение

В данной работе разработана технология формования композитов методом вакуумной инфузии с использованием неорганических связующих. Полученные по данной технологии образцы увеличили показатели теплостойкости, прочности и доказали возможность применения сварки для скрепления слое углеродной металлизированной ткани.

В обзорно - аналитической части работы рассмотрены современные технологии создания изделий из полимерных композиционных материалов с использованием армирующих наполнителей, проведена их сравнительная характеристика. Так же проведен анализ литературы по связующим для изготовления ПКМ. Исследованы различные методы сварки, в результате проведенного обзора литературы были определены наиболее подходящие методы сварки и подобраны связующие под задачу НИР.

При расчете осесимметричной модели элементарной нити для исследования влияния электромагнитных полей на углеродные ленты установлены:

- Зависимость величины нагрева углеродных тканей от типа и толщины металлического покрытия;
- Температура плавления медного покрытия на углеродной ленте не превышает 500°C;
- Зависимость температуры поверхности от потенциала, приложенного к торцам нити.

В результате проведенной экспериментальной части установлено, что сваривать металлизированную углеродную ткань при помощи пайки и ультразвуковой сварки возможно. Определен более выигрышный метод соединения слоев - метод пайки - полученные по данному методу образцы показали выше результаты на прочность и однородность структуры, чем образцы, полученные методом ультразвуковой сварки, так же поверхность ткани после пайки практически не повреждается и данный процесс автоматизировать легче чем метод ультразвуковой сварки.

Так же сделаны выводы, что очистка камеры перед напылением существенно меняет количество примесей на поверхности ленты, поэтому все исследования будут проводиться после очистки камеры. Найдена зависимость количества меди на поверхности от температуры до которой поверхность нагревается, установлено что после 420 °С медь на поверхности полностью выжигается.

Оценка полученных композитов на основе углеродной ленты с металлическим покрытием, с применением неорганических связующих проводилась в последней главе. Установлено, что даже при максимальных температурах (1000 °С) потери массы минимальна и не превысила 20 %. Что доказывает необходимость применения неорганических связующих в композитах при использовании их при высоких температурах. А показатели на межслоевой сдвиг гораздо выше у образцов с металлизующим покрытием.

Список использованных источников

1. Баженов, С.Л. Полимерные композиционные материалы / С.Л. Баженов, А.А.Берлин, А.А. Кульков, В.Г. Ошмян. – Долгопрудный: Изд. Дом Интеллект, 2010. – 352 с.
2. Комков, М.А. Технология намотки композитных конструкций ракет и средств поражения / М.А. Комков, В.А. Тарасов. – М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 431 с.
3. Михайлин, Ю.А. Тепло-, термо- и огнестойкость полимерных материалов. – СПб: Издательство Научные основы и технологии, 2011. – 416 с.
4. Резник С.В. Актуальные проблемы проектирования, производства и испытания ракетно-космических композитных конструкций // Инженерный журнал: Наука и инновации, 2013, вып. №3(15). – 16 с.
5. Резник С.В., Денисов О.В. Тимошенко В.П. Особенности техники тепловых испытаний элементов натуральных стержневых космических конструкций // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2012. – №3. – С. 28-31.
6. Нелюб В.А. Технология получения препрегов // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2013. – №3. – С.12-17.
7. Нелюб В.А., Грашенков Д.В., Коган Д.И. Применение прямых методов формования при производстве крупногабаритных деталей из стелопластиков //Химическая технология. – 2013. – №12. – С. 17.
8. Бобович, Б.Б. Полимерные композиционные материалы / Б.Б. Бобович. – М.: ФОРУМ ИНФРА-М, 2014. – 400 с.
9. Кербер, М.Л. Физические и химические процессы при переработке полимеров // Научные основы и технологии. – 2013 – вып.№11. – с. 23.
10. Свиридов, Е.Б. Книга о полимерах. Свойства и применение / Е.Б.Свиридов, В.К.Дубовой. – Архангельск: Изд. Дом САФУ, 2016. – 364 с.
11. Буланов, И.М. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов: учебник для вузов / И.М.Буланов, В.В.Воробей. – М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. – 513 с.
12. Баурова, Н.И. Технологическая наследственность при производстве деталей машин из полимерных композиционных материалов: монография / Н.И.Баурова. – М.: МАДИ, 2018. – 220 с.

13. Мэттьюз Ф., Композитные материалы. Механика и технология / Ф.Мэттьюз. – М.: Техносфера, 2004. – 152 с.
14. Ставров, В. П. Формообразование изделий из композиционных материалов: учеб. пособие / В.П.Ставров. - Минск: БГТУ, 2006. 54 с.
15. Петрунин, И.Е. Справочник по пайке / И.Е.Петрунин. – М.: Изд. Машиностроение, 2003. – 123 с.
16. Алов, А. А. Основы теории процессов сварки и пайки / А.А.Алов. – М.: Изд. Москва, 1964. – 234 с.
17. Джюд М., Бриндли К. Пайка при сборке электронных модулей / М.Джюд, К.Бриндли. – М.: Изд. Дом Технологии, 2012. – 416 с.
18. Полухина, П.И. Технология металлов и сварка / П.И.Полухина. – М.: Высшая школа, 1977. – 250 с.
19. Холопов, Ю.В. Ультразвуковая сварка / Ю.В. Холопов. – М.: Машиностроение., 1972. – 231 с.
20. Силин Л.Л. Ультразвуковая сварка / Л.Л. Силин., Г.Ф.Баландин. – М.: Машгиз, 1982. – 132 с.
21. Васильев, В.В. Композиционные материалы: Справочник / В.В.Васильев, В.Д.Протасов, В.В.Болотин и др. – М.: Машиностроение, 1990. – 345 с.
22. Антонов, В.П. Диффузионная сварка материалов / В.П.Антонов, В.А.Бачин, Г.В.Загорин, и др. – М.: Машиностроение, 1981. – 271 с.
23. Виноградов, В.С. Оборудование и технология дуговой автоматической и механизированной сварки / В.С. Виноградов. – М.: Академия, 2001. – 319 с.
24. Казаков, Н.Ф. Диффузионная сварка материалов / Н.Ф.Казаков. – М.: Машиностроение, 1981. – 272 с.
25. Ванаг, В.К. Диссипативные структуры в реакционно-диффузионных системах (+ CD-ROM) / В.К.Ванаг. – М.: Регулярная и хаотическая динамика, Институт компьютерных исследований, 2008. – 300 с.
26. Горбач, В. Д. Автоматическая дуговая сварка с ЧПУ судовых конструкций / В.Д. Горбач, В.С. Головченко. – М.: Судостроение, 2004. – 344 с.
27. Гузева, Т.А. Методы оценки свойств связующих, применяемых при производстве изделий из полимерных композиционных материалов // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2014. – № 5. – С. 24.

28. Меркулова, Ю.И. Связующие для получения полимерных композиционных материалов способом вакуумной инфузии / И.Ю. Меркулова – М.: Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, 2016. – 25 с.
29. Резник, С.В., Разработка высокотеплопроводных полимерных композиционных материалов для космических конструкций // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Спец. выпуск Прогрессивные материалы, конструкции и технологии ракетно-космического машиностроения. – 2012. – С. 98 -106.
30. Григорьев, М.М. Изготовление стеклопластиковых обшивок методов вакуумной инфузии с использованием эпоксигидридного связующего и полупроницаемой мембраны // Труды ВИАМ. – 2014. – №2. – С. 18-23.
31. Ивочкин, И. И. Сварка под флюсом с дополнительной присадкой / И.И.Ивочкин, Б.Д. Малышев. – М.: Стройиздат, 1981. – 127 с.
32. Аксельрод, Ф. А. Оборудование для сварки давлением / Ф.А. Аксельрод, А.М. Маркин. — М.: Высшая школа, 1975. – 240 с.
33. Алексеев, Б. С. Новая серия контактных машин для рельефной сварки // Сварочное производство. – 1972. – № 2. – С. 47-48.
34. Белянин, П. Н. Промышленные роботы / П.Н. Белянин — М.: Машиностроение, 1975. – 400 с.
35. Бочаров, Ю.Н. Электроэнергетика моделирования параметров и процессов высоковольтного электрооборудования / Ю.Н.Бочаров, С.И.Кривошеев, А.П. Ненашев – СПб.: Федеральное агентство по образованию Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2012. – 111 с.
36. Артемьев Д.М., Ивукин И.Н., Романов А.Е. Физическое материаловедение светодиодных наноматериалов. Лабораторный практикум. Учебно-методическое пособие / СПб.: НИУ ИТМО, 2013. – 49 с.
37. Красников, Г.Е. Моделирование физических процессов с использованием пакета Comsol Multiphysics / Г.Е.Красников, О.В. Нагорнов, Н.В. Старостин. – М.: НИЯУ МИФИ, 2012. – 184 с.
38. Огородников, А.С. Моделирование в среде MatLab - COMSOL 3.5a. Часть 1. Учебное пособие. / А.С. Огородников – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 104 с.

39. «ВВС-инжиниринг» [Электронный ресурс] / Официальный сайт «ВВС - Инжиниринг» – Режим доступа: <https://www.vvsengineering.ru/index.php?page> (15.04.19 г.)
40. Учебное пособие (Лабораторные работы № 3-5) [Электронный ресурс] / Официальный сайт - Режим доступа: <https://lektsii.com/3-94709.html> (27.05.19 г.).

ПРИЛОЖЕНИЕ А

В табл. 5.2. приведены результаты механических испытаний элементарных нитей до и после нанесения на них медного покрытия.

Таблица 5.2.

Свойства элементарных нитей до и после нанесения медного покрытия

Характеристики	Тип металлического покрытия	Значение показателя	Дисперсия
Разрушающее напряжение, МПа	Без покрытия	3110	870
Относительное удлинение, %		2,05	0,62
Диаметр, нм		8610	260
Разрушающее напряжение, МПа	Медное покрытие	4490	140
Относительное удлинение, %		1,9	0,5
Диаметр, нм		8710	120

В результате проведенных механических испытаний установлено, что величина разрушающего напряжения элементарной нити, при нанесении на углеродную ленту медного покрытия, увеличилась на 44 %. Величина диаметра элементарной нити, при нанесении на углеродную ленту медного покрытия, увеличилась всего на 1,2 %. Очень существенно изменилась величина среднеквадратического отклонения при испытании элементарных нитей с медным покрытием. Дисперсия разрушающего напряжения снизилась в 6,2 раза, а дисперсия диаметра в 2,16 раз. Таким образом, нанесение медного покрытия приводит не только к повышению механической прочности элементарной нити более чем на 40 %, но и снижает более чем в 6 раз характеристики дисперсии.