

На правах рукописи

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Факультет
машиностроения и транспорта
(наименование)

Кафедра
Сварочное, литейное производство
и материаловедение
(наименование)

Направление подготовки

22.04.01 «Материаловедение и
технологии материалов»
(код и наименование)

Профиль

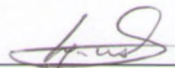
«Материаловедение и технологии новых
материалов»
(наименование)

МАГИСТЕРСКАЯ ДИСЕРТАЦИЯ

на тему:

«Разработка технологических основ получения высокопрочных
композиционных материалов с интерметаллическим упрочнением и
исследование их структуры и свойств»

Студент

 31.05.18 Гуськов Дмитрий Олегович
(подпись, дата) (фио полностью)

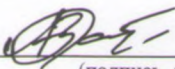
Научный руководитель
к.т.н., доцент

 31.05.18 Крюков Д.Б.
(подпись, дата) (фамилия, инициалы)

Рецензент
к.т.н, инженер-технолог
АО ФНПЦ «ПО «Старт» им.
М.В. Проценко»

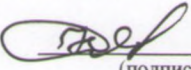
 14.06.18 Чижова Е.В.
(подпись, дата) (фамилия, инициалы)

Нормоконтролёр
к.т.н., доцент

 19.06.18 Хорин А.В.
(подпись, дата) (фамилия, инициалы)

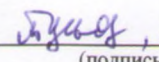
Работа допущена к защите (протокол заседания кафедры от 04.06.18 № 11)

Заведующий кафедрой

 14.06.18 Логинов О.Н.
(подпись, дата) (фамилия, инициалы)

Работа защищена с отметкой хорошо (протокол заседания ГЭК от 20.06.2018 № 2)

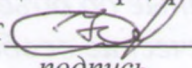
Секретарь ГЭК
к.т.н., доцент

 20.06.2018 Гуськов М.С.
(подпись, дата) (фамилия, инициалы)

Пенза 2018

ФГБОУ ВО «ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ФАКУЛЬТЕТ МАШИНОСТРОЕНИЯ И ТРАНСПОРТА
КАФЕДРА «СВАРОЧНОЕ, ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО И
МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ»

«Утверждаю»

Заведующий кафедрой СЛПиМ
к.т.н., доцент  О.Н. Логинов
подпись

«01» 09 2017 г.

ЗАДАНИЕ
на магистерскую диссертацию

Магистранту гр. 16МТм1 Факультета машиностроения и транспорта Политехнического института ПГУ, очной формы обучения по направлению подготовки 22.04.01 «Материаловедение и технология материалов»

Гуськову Дмитрию Олеговичу.

Научный руководитель работы: к.т.н., доцент Крюков Д.Б.

Время выполнения ВКР: с 01.09.2017 г. по 18.06.2018 г.

Место преддипломной практики: кафедра «Сварочное литейное производство и материаловедение» ПГУ.

Тема работы: Разработка технологических основ получения высокопрочных композиционных материалов с интерметаллическим упрочнением и исследование их структуры и свойств.

Тема утверждена приказом ректора ПГУ № 920 а/о от 14 сентября 2016 г.

Техническое задание на работу (назначение устройства, условия применения, внешние воздействия, специальные требования и т.п.): выполнить разработку технологических основ получения высокопрочных композиционных материалов с интерметаллическим упрочнением и изучить их структуру и свойства.

Объём и содержание основной части работы

Пояснительная записка (перечень вопросов, подлежащих разработке, расчетов, обоснований, описаний):

- введение с обоснованием актуальности темы исследования, установления объекта и предмета, постановкой цели и задач исследования;
- теоретический анализ проблемы, касающейся разработки технологических основ получения высокопрочных композиционных материалов с интерметаллическим упрочнением;
- исследовательский раздел – обоснование применяемых методов исследования, оборудование и методика планируемых экспериментов;
- экспериментальный раздел – описание результатов исследования и выявленных зависимостей;

- заключение – выводы и обоснования по теме работы и полученным результатам.

Презентация магистерской диссертации (перечень и содержание плакатов)

- тема магистерской диссертации 1л А4;
- научная новизна и актуальность работы 1л А4;
- цели и задачи магистерской диссертации 1л А4;
- общие данные об объекте исследования 1л А4;
- технологические особенности получения высокопрочных армированных композиционных металлических материалов сваркой взрывом 1л А4;
- режимы и результаты расчета основных параметров процесса сварки образцов композиционного материала на основе сплава АМг5М армированного медной проволокой марки М1 1л А4;
- режимы и результаты расчета основных параметров процесса сварки образцов композиционного материала на основе сплава ВТ1-0 армированного стальной проволокой марки Ст3 1л А4;
- расположение армирующих элементов на матрице 1л А4;
- внешний вид образцов после сварки взрывом 1л А4;
- рентгенографические снимки армированного композиционного материала, полученные с помощью импульсного рентгеновского аппарата «САРМА» (В&G) модель 500. 1л А4;
- внешний вид армированного композиционного металлического материала до и после испытаний 1л А4;
- микроструктура армирующих волокон после сварки взрывом на различных режимах 1л А4;
- параметры режимов термической обработки композиционных материалов на основе алюминиевого сплава марки АМг5М армированных медной проволокой марки М1 2л А4;
- параметры режимов термической обработки композиционных материалов на основе алюминиевого сплава марки АМг5М армированных медной проволокой марки М1 2л А4;
- микроструктура армирующего волокна меди после термообработки 1л А4;
- микроструктура армирующего волокна стали после термообработки 1л А4;
- схема измерения микротвердости на образцов композиционных материалов на основе алюминиевого сплава марки АМг5М армированных медной проволокой марки М1 в зоне контакта армирующего медного волокна с металлом матрицы 1л А4;
- основные выводы 1л А4;
- Публикации по теме магистерской диссертации 1л А4

Рекомендуемая литература:

1. Арзамасов, Б. Н. Материаловедение : учеб. для вузов [Текст] / Б. Н. Арзамасов, В. И. Макарова, Г. Г. Мухин. – 5-е изд. стер. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. – 648 с.
2. Ильин, А. А. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства : справочник [Текст] / А. А. Ильин, Б. А. Колачев, И. С. Полькин. – М. : ВИЛС – МАТИ, 2009. – 520 с.

3. Крюков, Д.Б. Исследование влияния конфигурации упрочняющих элементов на прочностные свойства моделей композиционных материалов системы титан-алюминий / Д.Б. Крюков, А.В. Прыщак, М.С. Гуськов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. - №4 (32). – С. 112-119

Дата выдачи задания: 01.09.2017 г.

Руководитель ВКР:

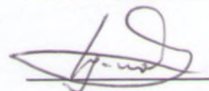
к.т.н, доцент

Задание к исполнению принял магистрант

гр. 16МТм1

01 сентября 2017 г.

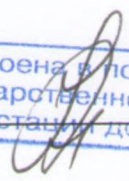
 Д.Б. Крюков

 Д.О. Гуськов

Магистерскую диссертацию к защите допустить

Декан факультета машиностроения и транспорта

Политехнического института ПГУ


Одобрено освоено в полном объеме.
К государственной итоговой
аттестации допустить
С.Ю. Киреев

Оглавление

Введение.....	4
1 Выбор направления исследований. Теоретическое обоснование и разработка способов создания высокопрочных композиционных материалов с интерметаллическим упрочнением.....	7
1.1 Анализ и обоснование принятого направления исследований и способов реализации. Выполнение аналитического обзора в области разработки высокопрочных композиционных материалов.....	7
1.1.1 Аналитический обзор в области разработки к высокопрочных композиционных материалов.....	7
1.1.1.1 Алюминиевые сплавы.....	7
1.1.1.2 Магниеые сплавы.....	8
1.1.1.3 Титановые конструкционные сплавы.....	9
1.1.1.4 Термостабильные, жаропрочные титановые и никелевые сплавы.....	9
1.1.1.5 Слоистые металлокомпозиты.....	10
1.1.1.6 Слоистые интерметаллидные композиты.....	10
1.1.1.7 Порошковые сплавы.....	11
1.1.1.8 Полимерные композиционные материалы.....	11
1.1.2 Классификация композиционных материалов.....	12
1.1.3 Способы получения волокнистых композиционных материалов...	18
1.2 Проведение патентных исследований.....	20
1.3 Общие данные об объекте исследования.....	23
1.4 Технический уровень и тенденции развития.....	24
1.5 Технологические особенности способа получения высокопрочных армированных композиционных металлических материалов сваркой взрывом.....	26
1.6 Технологические схемы получения армированных композиционных материалов сваркой взрывом.....	28
1.7 Выбор взрывчатого вещества для сварки взрывом.....	30
1.8 Методики испытаний свойств композиционных материалов.....	32

2 Экспериментальные исследования композиционных металлических материалов. Обобщение и оценка результатов исследования.....	38
2.1 Выполнение экспериментальных работ по созданию образцов композиционных металлических материалов повышенной механической прочности с применением сварки взрывом.....	38
2.1.1 Расчет технологических параметров сварки взрывом армированного композиционного материала и выбор состава взрывчатого вещества.....	38
2.1.2 Разработка плоских схем сварки взрывом композиционного материала систем «титан-сталь» и «алюминий-медь».....	39
3 Исследование влияния технологических режимов процесса ударно-волнового нагружения на формирование заданной структуры и свойств композиционных металлических материалов.....	49
3.1 Изучение влияния технологических режимов процесса ударно-волнового нагружения на формирование заданной структуры и свойств композиционных материалов.....	49
3.1.1 Выбор рациональных параметров сварки взрывом при армировании композиционных материалов.....	49
3.1.2 Исследование влияния параметров сварки взрывом на микроструктуру композиционных материалов.....	57
3.1.3 Изучение влияния параметров сварки взрывом на степень упрочнения композиционных материалов.....	64
3.1.4 Изучение влияния параметров термической обработки композиционных материалов на формирование заданного комплекса механических свойств	66
3.1.5 Исследование состава и свойств интерметаллидных фаз образующихся при термической обработке в композиционном армированном материале....	74
Заключение.....	84
Библиографический список.....	88

Введение

В настоящее время все больше отраслей промышленности связываются с разработкой и широким применением композиционных материалов (далее КМ). Разрабатываются новые материалы с улучшенными свойствами и характеристиками, материалы с привлекательными свойствами. Композиционные материалы открывают возможности для реализации новых технологических процессов и конструктивных решений. Они обладают комплексом свойств и особенностей, отличающихся от традиционных конструктивных материалов и в совокупности открывающих широкие возможности, как для улучшения существующих конструкций самого разнообразного назначения, так и для разработки новых технологических процессов и конструкций. В последние годы проявляется повышенный интерес к пористым материалам на основе алюминия, обладающим многими привлекательными свойствами. Современное и потенциальное будущее применение композиционных материалов на основе алюминиевых и титановых композитов сосредоточены на трех конкретных областях: автомобильной промышленности, авиакосмической промышленности, и строительная отрасль [1]. Тем не менее, интерес также растет в области механических оборудования, в основном для износостойких или высокоточных установок и также в электрической и электронной отрасли. В настоящее время повышенное внимание получили такие методы улучшения технических свойств, как упрочнение или уплотнение различными сплавами. Они существенно улучшают износостойкость материала. Но самое сложное и экономически затратной областью является разработка единичных материалов с требуемыми свойствами: композиты могут быть получены в комбинации физических, механических и химических свойств, которые идеально подходит для данного оборудования. Типичными примером может являться экземпляр с хорошей теплопроводностью, и с определенным коэффициентом теплового расширения, также хорошие свойства износостойкости [2].

КМ изучаются во многих научных лабораториях с целью внедрения и использования их в производстве. Такое широкое применение и изучение композиционных материалов обусловлено набором уникальных химических, физико-механических, и

эксплуатационных свойств, которые тяжело или в ряде случаев практически невозможно получить для обычных металлов, а также их сплавов. К таким композиционным материалам можно отнести системы «алюминий-титан». Основные методы их получения заключаются в использовании высоких температур и затрата большого количества энергии и применении сложного дорогостоящего оборудования. При этом композиционные материалы получают однородными по фазовому и элементному составу [3]. В ряде случаев неоднородность композиционного материала не является существенным препятствием для последующего его применения в промышленности.

В данной работе представлены общие сведения о титано-алюминиевых композитах, приведены области их применения, описаны методы получения данных композитов, представлены данные о подготовке образцов и последующем исследовании их микроструктуры, проведен патентный поиск по улучшению свойств композиционных материалов на основе титана и алюминия.

Научная новизна: разработка технологии получения слоистого композиционного материала сваркой взрывом и последующей термической обработкой, обеспечивающей высокий модуль упругости и предел прочности композита при растяжении с высокой прочностью сварного соединения.

Объект исследования: армированный высокопрочный композиционный материал алюминий-титан с интерметаллическим слоем.

Предмет исследования: взаимосвязь структуры, состава, механических, теплофизических и технологических свойств армированного высокопрочного композиционного материала алюминий-титан с интерметаллическим упрочнением.

Цель магистерской диссертации: Разработка технологических основ получения высокопрочных композиционных материалов с интерметаллическим упрочнением.

Для решения поставленной цели, требуется решить следующие задачи:

- провести аналитический обзор в области получения и изучения высокопрочных композиционных материалов;
- провести патентный обзор в исследуемой области;

- изучить способы получения армирования высокопрочных композиционных материалов;
- выбрать рациональные параметры сварки взрывом при армировании композиционных материалов и исследовать влияние параметров сварки взрывом на микроструктуру и степень упрочнения композиционных материалов;
- изучить методику проведения механических испытаний высокопрочных композиционных материалов
- изучить влияние параметров термической обработки композиционных материалов на формирование заданного комплекса механических свойств;
- изучить и исследовать состав и свойства интерметаллидных фаз, образующихся при термической обработке в композиционном армированном материале.

1 Выбор направления исследований. Теоретическое обоснование и разработка способов создания высокопрочных композиционных материалов с интерметаллическим упрочнением

1.1 Анализ и обоснование принятого направления исследований и способов реализации. Выполнение аналитического обзора в области разработки высокопрочных композиционных материалов

1.1.1 Аналитический обзор в области разработки к высокопрочных композиционных материалов

1.1.1.1 Алюминиевые сплавы

В качестве конструкционных материалов получили наибольшее распространение сплавы на основе легких металлов с плотностью до 4500 кг/м^3 (алюминий, магний, бериллий, титан), а также медные сплавы.

Алюминий имеет температуру плавления 660°C , кристаллизуется с образованием гранцентрированной кристаллической решетки и при нагревании не испытывает полиморфных превращений. Алюминий обладает малой плотностью (2699 кг/м^3) и характеризуется высокой химической активностью, но образование на поверхности плотной пленки Al_2O_3 защищает металл от коррозии.

В зависимости от содержания примесей первичный алюминий подразделяют на три класса: особой чистоты А999 (99,999% Al, остальное – примеси); высокой чистоты А995, А99, А97, А95 (примесей, соответственно, 0,005, 0,01; 0,03, 0,05 %) и технической чистоты А85, А8, А7, А6, А5, А0 (примесей, соответственно, 0,15, 0,2, 0,3, 0,4, 0,5, 1 %). Технический алюминий, выпускаемый в виде деформируемого полуфабриката (листы, профили, прутки и др.), маркируют АД0 и АД1.

Алюминий хорошо обрабатывается давлением, сваривается газовой и контактной сваркой, но плохо обрабатывается резанием. Ввиду низкой прочности алюминий применяют для ненагруженных деталей и элементов конструкций, когда от материала требуется малый вес, свариваемость, пластичность. Из алюминия изго-

тавливают рамы, двери, трубопроводы, цистерны для перевозки нефти и нефтепродуктов, посуду и др. Высокая пластичность позволяет производить из алюминия прокатку до малых толщин и получать алюминиевую фольгу для упаковки конфет.

Благодаря высокой теплопроводности его используют для различных теплообменников в промышленных и бытовых холодильниках. Следует также отметить высокую отражательную способность алюминия, чем объясняется его применение в прожекторах и рефлекторах.

Алюминий используется в электротехнической промышленности для изготовления кабелей и проводов. Электропроводность алюминия составляет 65% от электропроводности меди, но провод из алюминия равной электропроводности легче медного.

Алюминиевые сплавы характеризуются высокой удельной прочностью, способностью сопротивляться инерционным и динамическим нагрузкам. Временное сопротивление алюминиевых сплавов находится в диапазоне от 500 до 700 МПа при плотности не более $2,850 \text{ г/см}^3$ [2,16].

1.1.1.2 Магниевые сплавы

Вследствие высокой химической активности магния выбор металлов, пригодных для легирования магниевых сплавов, сравнительно невелик. Магниевые сплавы разделяются на 2 основные группы: литейные, для производства фасонных отливок и деформируемые, для производства полуфабрикатов прессованием, прокаткой, ковкой и штамповкой.

Сплавы на основе магния обладают пониженной стойкостью к коррозии из-за высокого электроотрицательного потенциала и недостаточных защитных свойств естественной окисной плёнки. Защита сплавов на основе магния от коррозии осуществляется искусственно создаваемыми электрохимическими неорганическими плёнками или химическими в сочетании с лакокрасочными покрытиями [2].

1.1.1.3 Титановые конструкционные сплавы

Титановые сплавы стали одними из важнейших конструкционных материалов. Они широко используются в различных областях техники и промышленности, где необходимо сочетание удельной прочности и высокой коррозионной стойкости: авиации, химической промышленности, судостроении и т.д. Специфика применения титановых сплавов в последнее время состоит во все более широком использовании их в различных конструкциях, в том числе упругих элементов, что приводит к увеличению как объемов производства, так и сортамента полуфабрикатов и изделий. Изученные к настоящему времени фазовые превращения в сплавах титана бесспорно лежат в основе технологии их механической и термической обработки, но приходится признать, что производство конкретных полуфабрикатов и изделий постоянно требует и будет требовать исследования и детализации закономерностей превращений [4]. Структура и свойства сплава, а также различные виды термомеханической обработки могут оказать решающее влияние на возможности, например, окончательной упрочняющей обработки. Ответственные сферы применения этих сплавов требуют дальнейшего повышения их эксплуатационных свойств за счет разработки новых режимов термической и термомеханической обработок, позволяющих получить уровень прочности в изделиях до 1400 МПа при удовлетворительных пластических и вязкостных характеристиках. К одним из наиболее перспективных титановых сплавов для данных целей следует отнести высокопрочный сплав - ($\alpha+\beta$) класса - ВТ23М [5,11].

1.1.1.4 Термостабильные, жаропрочные титановые и никелевые сплавы

Основные перспективы в освоении и разработке нового поколения конструкционных жаропрочных титановых сплавов с пониженной окисляемостью, повышенной плотностью и горючестью связаны с развитием интерметаллидных сплавов на основе TiAl и Ti_3Al для работы при температурах от 550 до 830 °С. Использование этих сплавов связано с разработкой в направлении многокомпонентного

легирования базовых композиций активными элементами, с освоением новых методов плавки, технологий производства листов, поковок и плит [6,12,13].

В отношении жаропрочных литейных сплавов поставленные задачи решаются как разработкой классических жаропрочных никелевых сплавов путем поиска оптимальных композиций с повышенным содержанием тугоплавких элементов (Re, Ta, W), так и созданием сплавов на основе интерметаллидов, главным образом, алюминидов никеля. В качестве сверхжаропрочных материалов применяются так называемые естественные композиты, направлено закристаллизованных эвтектических сплавов, упрочненных нитевидными карбида ниобия и тантала [7].

1.1.1.5 Слоистые металлокомпозиты

Перспективным направлением в промышленности является совершенствование слоистых металлокомпозитов типа СИАЛ и АЛОП. АЛОП представляет собой сочетание чередующихся, адгезионно соединенных слоев органопластика и сплава на основе алюминия. В качестве компонента-полимера выбираются высокомодульные высокопрочные органопластики на основе арамидных и других органических волокон, обладающие высокой удельной прочностью и жесткостью при растяжении в сочетании с большой вязкостью разрушения и специфическим взаимодействием между полимерной матрицей и ОВ. Равнопрочный АЛОП имеет механические свойства на уровне алюминиевого сплава, однако за счет более низкой плотности достигается выигрыш по массе. Кроме того, скорость роста усталостной трещины в АЛОРе, по сравнению с алюминиевым сплавом, значительно ниже. Прочность АЛОРа возрастает с увеличением содержания в нем органопластика [10].

1.1.1.6 Слоистые интерметаллидные композиты

Принципиально новый класс конструкционных материалов представляют слоистые интерметаллидные композиты, обладающих особым сочетанием механических (удельной прочности, жаропрочных и др.), физических (тепловых, элект-

трических, магнитных и др.) свойств. Их реализация оказалась возможной благодаря оптимальному конструированию структуры в виде чередующихся по толщине сплошных основных и интерметаллидных слоев путем применения комплексной технологии. В качестве основных слоев используются разнородные металлы из сочетаний Ti-Fe, Mg-Al, Cu-Al, Ni-Al и др., способные за счет реактивной диффузии при нагревах образовывать интерметаллидные прослойки заданной толщины. От их объемной доли и состава зависят физические и механические свойства композитов. Изучена кинетика диффузионных процессов на межслойных границах трехслойных композитов «алюминий АД1 + никель НП1 + алюминий АД1», полученных сваркой взрывом с последующей холодной прокаткой. Установлен фазовый состав диффузионной зоны [10].

1.1.1.7 Порошковые сплавы

Порошковые твердые сплавы – это спеченная смесь оптимально подобранных химических элементов. В ее состав входят прочные тугоплавкие компоненты, имеющие низкую эксплуатационную термостойкость (карбиды и карбонитриды вольфрама, титана, тантала), сочетающиеся с пластичным цементирующим (связующим) компонентом: кобальт (Co), никель (Ni, реже молибден (Mo). Уникальные свойства по износостойкости, прочности, пластичности, адгезии и размерной стабильности инструмента обеспечиваются несколькими характеристиками сплавов [1].

Порошковые материалы на основе алюминиевых сплавов представляют собой композиты, обладающие повышенными характеристиками жаропрочности и жаростойкости.

1.1.1.8 Полимерные композиционные материалы

Полимерными композиционными материалами (далее ПКМ), или пластиками, называют системы, состоящие из полимерной матрицы (связующего) и упрочняющего наполнителя в виде волокон или порошкообразных веществ.

ПКМ отличаются высокими показателями удельной прочности и жесткости, исключительным сочетанием конструкционных, теплофизических и специальных свойств. Существует устойчивая тенденция увеличения доли ПКМ в общей массе летательных аппаратов, планируется доведение этого показателя до 25% в пассажирских аэробусах типа А3ХХ.

Применение ПКМ на основе углеволокна – одно из эффективных средств снижения массы конструкции. Совершенствование прочностных, деформационных, теплофизических характеристик углепластиков и повышение их теплостойкости может создать возможности для использования их не только в слабо- и средненагруженных конструкциях пассажирских самолетов, но и в перспективе, по аналогии с военными самолетами, в высоконагруженных деталях типа крыльев и вертикальных рулей [15].

1.1.2 Классификация композиционных материалов

К композиционным материалам относят не встречающиеся в природе материалы, которые обладают следующей совокупностью признаков: состоят из двух или более компонентов, различающихся по своему химическому составу или структуре и разделенных выраженной границей; имеют новые свойства, отличающиеся от свойств составляющих их компонентов, при этом свойства определяются каждым из компонентов; однородны в макромасштабе и неоднородны в микромасштабе; форма, состав и распределение компонентов «заложены» на этапе разработки.

Исходя из вышесказанного ясно, что композиционными материалами являются синтетическими материалами, разрабатываемые с целью реализации заданных свойств, применительно к функциональному назначению детали либо конструкции. В основном, материал формируется в процессе изготовления детали.

По топологическому признаку «связности» один из компонентов, образующих сложный массив, называют «матрицей». Другие же компоненты, упрочняющие или армирующие матрицу, могут быть либо в виде «несвязных», изолированных друг от

друга частиц, нитей, волокон, пластин, либо в виде связной конструкции, подобной «сетке» арматуры в железобетонной конструкции [4].

Композиционные армированные материалы можно классифицировать по следующим признакам:

- типу арматуры и ее ориентации;
- по назначению.
- способу получения композиции и изделий из них;
- материалу компонентов;

В зависимости от материала матрицы все композиционные материалы можно разбить на три группы:

- композиции с полимерной матрицей;
- композиции с керамической;
- композиции с металлической матрицей (металлические композиционные материалы;

Полимерные композиционные материалы обычно называют по материалу армирующих волокон. ПКМ, армированные стеклянными волокнами называют стеклопластиковыми, металлическими – металлопластиковыми, органическими – органическими, борными – боропластиковыми, углеродными – углепластиковыми, асбестовыми – асбопластиковыми и т.д.

В отношении металлических и керамических КМ пока нет четко установленных правил присвоения названий. Чаще других вначале пишут материал матрицы, затем материал волокна.

По ориентации и типу арматуры (конструкционный принцип) все КМ можно разбить на две группы – изотропные и анизотропные.

Изотропными называют материалы, имеющие одинаковые свойства во всех направлениях. Среди КМ, к числу изотропных относятся дисперсионноупрочненные и хаотичноармированные материалы. В первом случае упрочняющие элементы имеют примерно равноосную форму, во втором упрочнения осуществляется короткими (дискретными) частицами игольчатой формы, хаотично ориентированными в пространстве.

Анизотропными называют материалы, свойства которых зависят от направления. К таким КМ относят материалы, волокна которых ориентированы в определенных направлениях - однонаправленные, слоистые и трехмерно армированные. По форме армирующие волокна разделяют на три основные группы:

- одномерные наполнители, имеющие малые размеры в двух направлениях и значительно превосходящий их размер в третьем измерении (волокна);
- нульмерные, наполнители, имеющие в трех направлениях одинаково малые размеры одного порядка;
- двумерные, наполнители, имеющие два размера, соизмеримые с размером композиционного материала, значительно превосходящий третий (ткань, пластины).

В технике обычно используют анизотропные конструкционные материалы с определенной симметрией свойств. При изучении их физико-механических характеристик реальный, как правило, весьма неоднородный, материал представляют как некоторую идеализированную сплошную однородную среду с симметрией строения и свойств.

К анизотропным относятся материалы со следующими типами укладки волокон:

Продольно-поперечная укладка представлена на рисунке 1. При этом используют нуль- одномерные и двухмерные наполнители. Нульмерные и одномерные наполнители располагают в плоскостях, параллельных друг другу. Одномерные наполнители расположены также в параллельных плоскостях. При этом в пределах каждой плоскости они расположены параллельно, а по отношению к другим плоскостям под разными углами. Двухмерные наполнители расположены параллельно друг другу.

Однонаправленные композиционные материалы, представлены на рисунок 2. При этом типе армирования используют нуль- и одномерно армированные наполнители. Нульмерные располагаются так, что расстояние между ними по одной оси значительно меньше чем по двум другим. Одномерные наполнители располагаются параллельно друг другу.

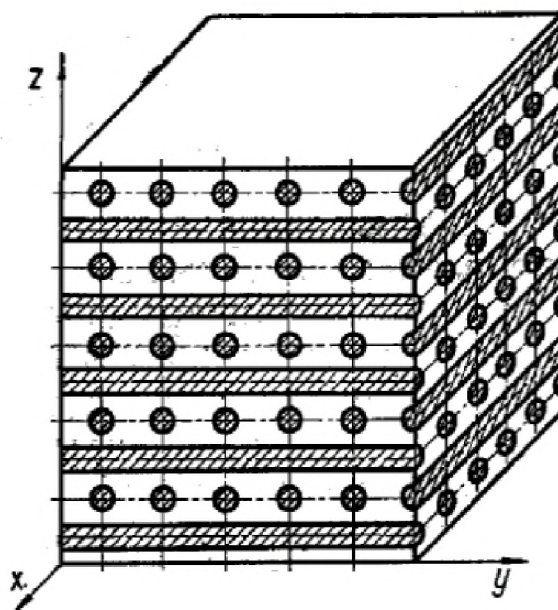


Рисунок 1 – Схематическое изображение структуры КМ с продольно-поперечной укладкой волокон

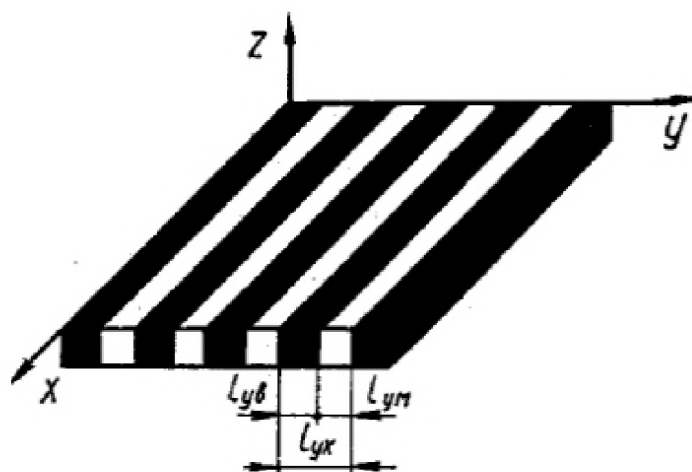


Рисунок 2 – Схематическое изображение структуры одно-направленного КМ (черные области волокна, белые – матрица)

Слоистые композиционные материалы, армированные в двух неортогональных направлениях под углом 2γ представлены на рисунке 3 [4].

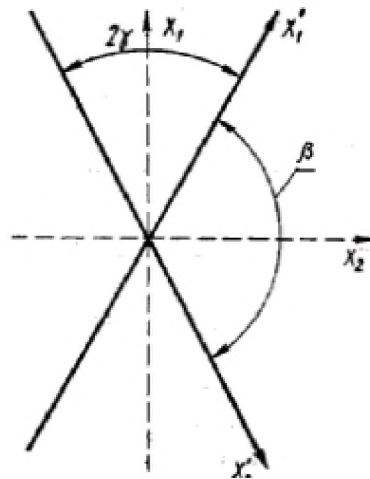


Рисунок 3 – Направления осей армирования в КМ с неортогональной укладкой волокон

Слоистые материалы со звездной укладкой волокон в смежных слоях представлены на рисунке 4.

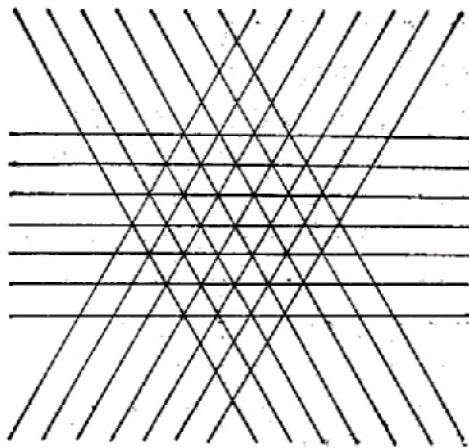


Рисунок 4 – Схема ориентации арматуры в слоистых КМ со звездной укладкой волокон в смежных слоях

Для расширения комплекса свойств или усиления какого-либо свойства возможно одновременное использование наполнителей различной формы. Например, для усиления прочности связи между одномерными наполнителями (стеклянными или углеродными волокнами) и полимерной матрицей в нее вводят нульмерный наполнитель (частицы асбеста, карбида кремния и др.). С этой же целью применяют армирование наполнителями одной формы, но разного состава. Так, для повышения

модуля упругости композиционных материалов с полимерной матрицей, армированной стеклянным волокном, дополнительно вводят волокна бора.

Для армирования КМ материалов 3 и 4 способом используют нуль- и одномерные наполнители [4].

Армирующие наполнители могут располагаться в матрице отдельно, не находясь друг с другом в связанном состоянии, а могут образовывать различные сплетения.

Композиционные материалы, которые содержат два и более различных наполнителя, называют полиармированными.

По способу получения (технологический принцип) полимерные конструкционные материалы можно разделить на:

- литейные;
- прессованные;
- намоточные.

ПКМ с хаотичной структурой обычно получают литьем и прессованием, а с ориентированной - намоткой и прессованием.

Металлические КМ по этому способу делят на:

- литейные;
- деформируемые.

Литейные получают, пропитывая арматуру расплавленным матричным сплавом, либо применяя направленную кристаллизацию сплавов эвтектического состава с выделением упрочняющей армирующей фазы непосредственно из расплава (так называемый метод «*in situ*» - в себе, на месте пребывания). Для получения деформируемых МКМ применяют спекание, горячее прессование, диффузионную сварку, горячую штамповку и ковку на молотах, взрывное прессование, электролитическое, химическое напыление и др.

Большинство из этих твердофазных методов, исключая динамические, применяют и для получения керамических композиционных материалов.

По назначению (эксплуатационный принцип) КМ можно разбить на материалы:

- общеконструкционного назначения (для различного рода несущих конструкций самолетов, ракет, судов, автомобилей, двигателей, сосудов высокого давления, предметов широкого потребления и др.);
- жаропрочные (для лопаток турбин, камер сгорания и других изделий, работающих при повышенных температурах);
- термостойкие (для изделий, работающих в условиях резких теплосмен, например для облицовки каналов МГД-генераторов);
- фрикционные и антифрикционные (подшипники скольжения, шестерни и др.);
- ударопрочные (броня самолетов, танков и т.п.);
- теплозащитные и КМ со специальными свойствами (электрическими, магнитными, ядерными и др.) [4].

1.1.3 Способы получения волокнистых композиционных материалов

Существует две технологические схемы изготовления композиционных материалов, отличающиеся способом соединения волокон и матрицы: твердо- и жидкофазные.

Твердофазный способ состоит в механическом соединении волокна и матрицы в виде порошка или фольги с последующим прессованием методом горячего прессования, диффузионной сварки, экструзии или прокатки. После деформации материал может подвергаться спеканию для повышения прочностных свойств. Недостатки способа – возможность повреждения волокон и их взаимодействие с матрицей при спекании.

Жидкофазный способ предусматривает расплавление материала матрицы. Широко применяют пропитку, поскольку проникновение расплава в пучки волокон или маты из дисперсных неориентированных волокон не приводит к значительным разрывам армирующих волокон и изменению формы армирующих компонентов. Пропитку успешно применяют при изготовлении композиционных материалов на

основе легкоплавких металлов Al, Cu, Ni, Ag и волокон, которые хорошо ими смачиваются. Для улучшения качества материала пропитку проводят в вакууме.

Более тугоплавкие металлы подвергают горячему прессованию при наличии жидкой фазы. Полученные заготовки прокатывают или выдавливают в горячем состоянии. Трудности возникают при обработке композиций с неориентированными волокнами, которые могут разрушаться. Если волокна ориентированы, то экструзию и прокатку можно проводить вдоль волокон, не разрушая их.

Иногда применяют и третий способ изготовления композиционных материалов - способ осаждения и напыления. Процесс осаждения состоит в химическом или электролитическом осаждении материала матрицы на упрочнитель из пара или раствора. После нанесения покрытия большой толщины композицию подвергают уплотнению. В процессе осаждения в материале всегда остаются пустоты, что вызывает необходимость дальнейшего уплотнения композиции.

Среди твердофазных способов для получения композиционных материалов, армированных непрерывными и дискретными волокнами, матами, сетками и т. п., широко применяются способы порошковой металлургии, позволяющие получать композиционные материалы с заданной пористостью путем изменения в широком диапазоне концентрации волокна. Обычно применяют традиционную технологическую схему [14].

Смешивание – ответственная операция, которая в основном определяет свойства композиционного материала, может осуществляться механическим и химическим способами.

Равномерное распределение компонентов в композиционных материалах достигается при смешивании в конусных, Y-образных смесителях и смесителях со смещенной осью. Применение для смешивания шаровых мельниц и барабанных смесителей вызывает комкование волокон. Более равномерное распределение компонентов достигается при мокром смешивании в спирте, бензине или воде.

Химический способ смешивания, состоящий в осаждении матричного материала на поверхность волокон из растворов химических соединений, позволяет равномерно распределить компоненты, но имеет низкую производительность.

После мокрого или химического смешивания смесь сушат при температуре от 100 до 120 °С. Если компоненты отличаются по плотности, сушку исключают из технологического процесса с целью предотвращения разделения компонентов при засыпке и формовании заготовок.

1.2 Проведение патентных исследований

Патентные исследования это исследования технического уровня и тенденций развития объектов техники, их патентоспособности и патентной чистоты, а также уровня компетентности фирмы или частного лица в данной области.

Цель исследований – определение технического уровня и тенденций развития в области разработок высокопрочных композиционных материалов пары титан-алюминий с интерметаллическим упрочнением, поиск патентной и научно-технической информации.

Регламент патентного поиска это план поиска. Он состоит из определения вида исследований, вида поиска, его глубины или ретроспективности (количества лет) и его широты: перечня стран, которыми ограничивают объём поиска. В регламент входит выбор источников информации, по которым будет вестись поиск аналогов объекта, а также индекс МПК. Источники информации выбирают исходя из установленных глубины и широты поиска, учитывая при этом реальную доступность этих источников.

Выбранные элементы регламента приведены в таблице 1. В ней записаны также индексы МПК. В заголовке таблицы регламента указано общее название исследуемого объекта. Результаты поиска приведены в таблице 2.

Регламент поиска.

Исследуемый объект: композиционный материал на основе титана и алюминия с интерметаллическим упрочнением.

Предмет поиска: технологические основы получения высокопрочных композиционных материалов на основе титан-алюминий.

Вид исследований и вид поиска: патентные исследования, тематический поиск.

Наименование информационной базы (фонда): патентные фонды: ФИПС.

Таблица 1 - Регламент поиска

Предмет поиска	Индекс МПК	Широта поиска	Глубина поиска	Источники информации
Композиционный материал	<i>B23B7/02</i>	Россия, США, Швеция	10 лет	Реестр изобретений Российской Федерации ФИПС
Способ получения композиционных материалов сваркой взрывом	<i>B32B7/04</i>	Россия, США, Швеция	10 лет	Реестр изобретений Российской Федерации ФИПС

Таблица 2 - Результаты поиска

Предмет поиска (объект исследования, его составные части)	Страна выдачи, вид и номер охранного документа. Классификационный индекс МПК	Заявитель (патентообладатель) номер заявки, страна, дата публикации	Название изобретения (полной модели, образца)
1	2	3	4
Композиционный материал	Россия, <i>RU 2647963 C2</i> , <i>B32B 7/02</i>	Общество с ограниченной ответственностью "ТБ Композит" Россия, 2016131959 03.08.2016	«Композиционный материал на основе титанового сплава и способ его получения» [18]
	Россия, <i>RU 2030293 C1</i> , <i>B22F 7/04</i>	Научно-производственное объединение "Композит" Россия, № 4871501/02, 05.07.1990	«Многослойный композиционный материал и способ его изготовления» [19]

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4
Способ получения композиционных материалов сваркой взрывом	Россия, <i>RU 2522505 C1</i> <i>B23K 20/08</i>	Общество с ограниченной ответственностью Инженерно-Технологический Центр "Сварка" Россия № 2013119389/02, 26.04.2013	«Способ получения композиционного материала» [17]
	Россия <i>RU 2221682 C1</i> <i>B32B 15/01</i>	Волгоградский государственный технический университет Россия № 2002111280/02, 25.04.2002	«Способ получения композиционного материала» [20]
	Россия <i>RU 2463141 C1</i> <i>B32K 15/01</i>	Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ) Россия № 2011114535/02, 13.04.2011	«Способ получения композиционного материала титан-сталь» [21]
	Россия <i>RU 94015428 A1</i> <i>B23K 20/08</i>	Алексеев Ю.Л., Алексеев А.Ю. 94015428/02 26.04.1994	«Способ сварки металлов взрывом» [22]

Проанализировав найденную информацию и сравнив ее, сделаем вывод применительно к композиционным материалам на основе титана и алюминия с интерметаллическим упрочнением:

– современный технический уровень в области сварки взрывом композиционных материалов идет в сторону усовершенствования уже имеющихся способов и схем сварки взрывом и разработку новых, что способствует увеличению качества получаемых изделий из композиционных материалов и расширения области их применения ;

– совершенствуется состав взрывчатых веществ, что сказывается на качестве получаемого композиционного материала, а так же в большей степени используется энергия взрыва.

После проведения патентных исследований цель достигнута, определен технический уровень в области разработки технологических основ получения высокопрочных композиционных материалов с интерметаллическим упрочнением.

1.3 Общие данные об объекте исследования

Согласно техническому заданию магистерской диссертации для получения листовых полуфабрикатов высокопрочного композиционного материала в качестве материала матрицы выбраны алюминиевый сплав АМг5М и титановый сплав ВТ1-0 толщиной 2 мм, размером 150 × 250 мм. В качестве армирующих волокон использовали медную проволоку марки М1 и стальную проволоку марки Ст3 диаметром 1,0 мм.

На рисунке 6 представлена параллельная схема армирования титана и алюминия проволокой. В схеме армирования титана стальной проволокой для увеличения скорости соударения использовалась стальная фальш-пластина толщиной 2 мм, которая устанавливалась без зазора на метаемую пластину 2 (рисунок 5).

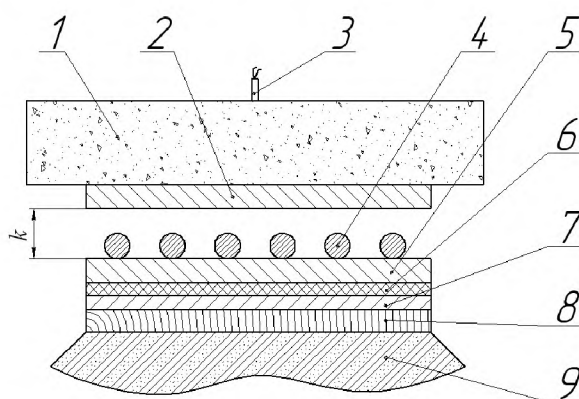


Рисунок 5 – Параллельная схема армирования проволокой: 1 – заряд ВВ; 2 – метаемая пластина матрицы; 3 – электродетонатор; 4 – проволока; 5 – неподвижная пластина матрицы; 6 – изоляционный слой; 7 – стальное основание; 8 – дополнительное основание; 9 – грунт; k – зазор между матричными пластинами

1.4 Технический уровень и тенденции развития

В настоящее время, продолжается дальнейшее всестороннее развитие данной отрасли и, несмотря на то, что уже существует несколько десятков схем получения композиционных материалов, возникает необходимость в разработке новых схем, позволяющих регулировать комплексом свойств композиционного материала. В частности, малоизученным остаётся вопрос по исследованию влияния различных конструктивных элементов в промежуточном слое на конечные механические и прочностные свойства композиционного материала в целом [23].

Часто детали и узлы, изготовленные из слоистых композиционных материалов на основе титана, работают при повышенных температурах. Столь экстремальные условия эксплуатации могут привести к структурным превращениям на границе внутренних слоев композиционного материала, что может негативно повлиять на работоспособность и долговечность всего материала. Поэтому, возникает потребность в формировании на композиционном материале покрытий, обладающих необходимым набором теплофизических свойств.

Титан и сплавы на его основе широко используются в различных отраслях промышленного производства. Это обусловлено уникальными физико-механическими свойствами данных материалов. Титан превосходит алюминиевые сплавы и стали по удельно-прочностным характеристикам и хладостойкости, медно-никелевые сплавы и нержавеющие стали - по коррозионной стойкости. Замена конструкционных сталей на титановые сплавы обеспечивает сочетание высокой прочности и высокой пластичности с относительно низкой плотностью. Благодаря данным преимуществам титановые сплавы получили широкое распространение в общем машиностроении, авиа- и ракетостроении, судостроении, автомобилестроении, химической и пищевой промышленности, нефтегазовой отрасли, медицине и многих других отраслях [23].

Одной из наиболее перспективных отраслей для применения титановых сплавов с интерметаллическим упрочнением является машиностроение. Для повышения мощности автомобильных двигателей необходимо уменьшить массу деталей воз-

вратно-поступательных систем без потери прочности, что достигается применением жаропрочных и высокопрочных титановых сплавов. В автомобилестроении из данных материалов могут быть изготовлены: несущие конструкции; наиболее ответственные детали двигателя (клапаны, шатуны, кулачковые валы, гильзы ДВС, болты, кривошипные валы); компоненты ходовой части, такие как элементы трансмиссий (шестерни, валы, сателлиты, болты) и элементы сцепления (корпусы, диски сцепления); теплообменники, системы выхлопных газов, радиаторы, пружины клапанов и шасси и ряд других деталей. Изготовление шатунов из упрочненных титановых сплавов позволит на 30 % снизить нагрузки на шатунные подшипники, что значительно повышает их надежность и долговечность.

В судостроении из среднепрочных титановых сплавов могут быть изготовлены гребные валы, детали насосов, обшивка, винты. Титан с высокой степенью легирования применяют при изготовлении тонкостенных труб для конденсаторов и теплообменников, глушителей дизельных двигателей подводных лодок, дисков измерительных приборов. Использование титановых сплавов позволяет существенно уменьшить общую массу корабля и, тем самым, увеличить объем перевозимых грузов и повысить скорость судов [23].

К материалам, используемым в авиастроении, предъявляют ряд требований; они должны обладать высокими удельнопрочностными показателями, жаропрочностью, сопротивлению усталостным нагрузкам, и коррозионно- и трещиностойкостью. Высоколегированные титановые сплавы, относящиеся к жаропрочным материалам, могут длительное время работать при температурах свыше 610 °С. Данные материалы получили широкое распространение в конструкциях сверхзвуковых самолетов, из них изготавливают лопатки компрессоров, диски турбин реактивных двигателей, воздухозаборники и корпусные детали вентиляторов и компрессоров двигателей и многие другие штампованные детали. Из нелегированного титана производят кожухи, закрылки, защитные оболочки для кабелей и направляющие для снарядов. Для изготовления каркаса фюзеляжа, шпангоутов, лонжеронов, балок, деталей шасси, трубопроводов и противопожарных перегородок применяют легиро-

ванный титан [23]. Использование титановых сплавов взамен легированных сталей при изготовлении узлов в самолето- и вертолетостроении способствует снижению массы летательных аппаратов на 40 %, при сохранении надежности, долговечности и экономичности изделий.

1.5 Технологические особенности способа получения высокопрочных армированных композиционных металлических материалов сваркой взрывом

Сварка взрывом осуществлялась в условиях открытого полигона. Для уменьшения деформации прогиба полуфабрикатов использованы стальные основания толщиной 5 мм. Для увеличения высоты обрубki метаемой пластины использовали дополнительное основание из дерева. На рисунке 6 показана схема расположения армирующих элементов между матричными листами.



Рисунок 6 – Схематичное расположение волокон (вид сверху):
 D – направление распространения фронта детонационной волны показано стрелкой

При выполнении экспериментов установлено, что использование схемы, представленной на рисунке 6, не представляется возможным из-за нарушения предварительного расположения армирующих элементов в процессе сварки - происходит

смещение волокон относительно первоначального расположения. В местах скопления армирующих элементов возникает непровар. Для обеспечения заданного шага армирования предложен механизм закрепления армирующих компонентов относительно матрицы, представленный на рисунке 7.

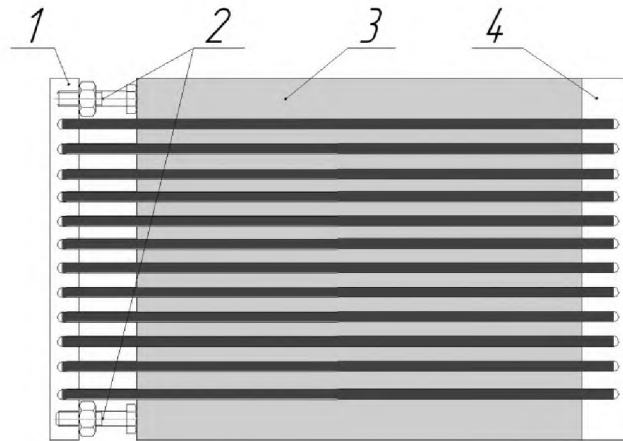


Рисунок 7 – Механизм закрепления и ориентация армирующих волокон: 1 – уголок, 2 – регулирующее болтовое соединение, 3 – неподвижная пластина матрицы, 4 – металлическая дополнительная пластина

Механизм закрепления и ориентация армирующих волокон представляет собой расположение в местах крепления волокон дополнительных стальных элементов 1 и 4. Длину пластины 4 и уголка 1 выбирали равной ширине неподвижной матричной пластины. Толщину пластины 4 выбирали равной от 1,5 до 2 мм и ширину от 30 до 40 мм. Использовали уголок 1 с шириной полок 20 мм и толщиной 2 мм. На пластине и уголке по длине просверливали технологические отверстия на расстоянии 15 мм от края. Диаметр отверстий выбирали на 0,2 мм больше диаметра волокна. Расстояние между технологическими отверстиями соответствовало выбранному шагу армирования композита. Пластину 4 жестко закрепляли на основании 3 для фиксирования положения армирующих волокон перед взрывом. Уголок 1 закрепляли с помощью болтового соединения 2 к стальному основанию 3. Разработанный механизм позволяет не только четко ориентировать армирующие волокна в заданном направлении, выдерживать заданный шаг армирования, а также предотвращать их выброс из сварочного зазора при плакировании.

1.6 Технологические схемы получения армированных композиционных материалов сваркой взрывом

Не смотря на почти мгновенное протекания сварки взрывом (продолжительность порядка 10^{-6} с) в области соударения успевают произойти процессы, необходимые для образования новых атомных связей и прочного соединения металлов. Эти процессы можно регулировать путем изменения параметров соударения пластин и подбором соответствующих ВВ.

Существуют две основные технологические схемы сварки взрывом (далее СВ): с расположением пластин под некоторым углом, представлена на рисунке 8а, и с параллельным их расположением, представленное на рисунке 8б. При детонации слоя ВВ, под действием высокого давления расширяющихся продуктов взрыва, участки метаемой пластины последовательно приобретают скорость V_c порядка нескольких сотен метров в секунду, поворачиваются относительно своего первоначального положения и соударяются с неподвижной пластиной под определенным углом γ . При этом точка контакта K перемещается вдоль поверхности неподвижной пластины со скоростью V_k . Вследствие высоких скоростей соударения в зоне контакта развивается высокое давление, происходит очистка соединяемых поверхностей, их активация и образование соединения. Граница раздела между соединенными пластинами имеет типичную для СВ волнообразную форму, однако встречаются соединения без волнообразования [24].

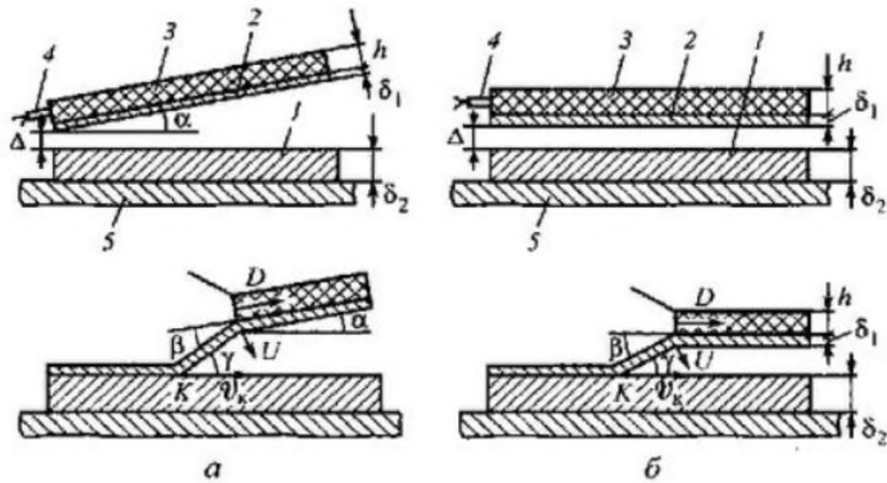


Рисунок 8 – Принципиальные (а- угловая, б – параллельная) схемы СВ (1 – неподвижная пластина; 2 – метаемая пластина; 3 – заряд ВВ; 4 – детонатор ; 5 - основание)

Физические явления, происходящие при СВ, структура и свойства соединений зависят от свойств свариваемых материалов и параметров процесса, которые можно разделить на кинематические и физические (динамические) параметры. К кинематическим параметрам принадлежат: V_0 – скорость метаемой пластины, β – угол поворота метаемой пластины, γ – угол соударения, V_k – скорость движения точки контакта. К физическим (динамическим) параметрам относят: p – давление соударения, t – длительность соударения, T – температура в зоне соударения. Эти параметры, в свою очередь, определяются конструктивными характеристиками взрывного устройства, физико-механическими, теплофизическими и энергетическими свойствами используемых материалов и начальными (технологическими) параметрами процесса:

- характеристики заряда ВВ: скорость детонации D , плотность заряда ρ_0 , показатель политропы продуктов детонации k , масса заряда ВВ m_0 , толщина слоя ВВ δ_0 , его плотность ρ_0 ;

- свойства свариваемых металлов: физико-механические характеристики свариваемых материалов (плотность, твердость, вязкость), теплофизические (теплоемкость, теплопроводность, температура плавления) микрорельеф

свариваемых поверхностей, начальная температура, ударная адиабаты свариваемых материалов и др.

- коэффициент нагрузки r (безразмерный параметр);
- сварочный зазор h (начальное расстояние между пластинами), начальный угол между пластинами α .

С увеличением зазора скорость соударения пластин возрастает, поэтому прочность сварного соединения металлов сначала повышается до определенного предела, а затем начинает снижаться при появлении дефектов в сварном шве вследствие избыточной энергии соударения. Чтобы обеспечить высокую и стабильную прочность соединения, необходимо выдержать равномерную по всей поверхности свариваемых листов плотность заряда ВВ и оптимальный для данного сочетания металлов размер начального зазора [24].

1.7 Выбор взрывчатого вещества для сварки взрывом

Сварка взрывом выдвигает ряд специфических требований к ВВ:

- скорость детонации должна быть меньше скорости звука c_0 в соединяемых металлах и находиться в диапазоне от 1500 м/с до c_0 ;
- в плоских зарядах ВВ большой площади и малой толщины должна быть обеспечена необходима стабильность детонации;
- ВВ должны быть максимально безопасными в обращении, недорогими и сохранять стабильность свойств в течение определенного времени, установленного для промышленных ВВ.

Этим требованиям соответствуют смесевые порошкообразные ВВ на основе тротила (далее ТНТ) и аммиачной селитры NH_4NO_3 , а также ВВ на основе порошкообразных ТНТ, NH_4NO_3 и поваренной соли NaCl . Скорость детонации этих ВВ также существенно зависит от высоты и формы зарядов, насыпного веса, химического и гранулометрического состава смеси [25].

Имеющиеся в литературе данные относятся, как правило, к исследованию детонации сосредоточенных или цилиндрических зарядов ВВ стандартного состава

и ограниченно применимы к зарядам, реализуемым при СВ. Проведенными исследованиями установлено, что в идеализированном случае, когда можно пренебречь потерями энергии в зоне химической реакции за счет теплоотдачи или частичного разлета еще полностью непрореагированных компонентов, теория детонации позволяет рассчитать скорость детонации в зависимости от теплоты взрыва Q_v и начальной плотности p_0 . Указанный случай реализуется при детонации зарядов ВВ, размеры которых превышают ширину зоны химической реакции b . Если размер заряда меньше значения b , то волна разрежения проникает в зону реакции и расширение ПД начнется раньше, чем завершится реакция, а из-за потери энергии произойдет понижение давления и скорости детонации. При дальнейшем уменьшении размера заряда потери энергии возрастают, а скорость детонации понижается, пока при некотором критическом размере заряда d_k не произойдет полное затухание детонации.

Однородные ВВ (гексоген, ТНТ, ТЭН) имеют небольшие критические (от 0,5 до 3,0 мм) и предельные размеры заряда d_k . С повышением степени дисперсности частиц однородных ВВ и увеличением начальной плотности d_k становятся еще меньше. Например, у гексогена при $p_0 = 0,95 \text{ г/см}^3 \leq 1,2 \text{ мм}$, а при $p_0 = 1,6 \text{ г/см}^3 \text{ } d_k = 0,5 \text{ мм}$.

Более сложный характер изменения d_k наблюдается у смесевых ВВ. Смесей тротила с аммиачной селитрой имеют большие значения d_k которые в зависимости от процентного содержания селитры изменяются в больших пределах.

Для одного и того же состава ВВ продолжительность химической реакции, ее ширина, предельные размеры заряда значительно изменяются в зависимости от плотности и формы заряда, оболочки и степени измельчения ВВ.

При СВ широко применяются плоские заряды смесей аммонита № 6 с аммиачной селитрой разного химического и гранулометрического состава высотой от 10 до 200 мм. Скорость детонации этих зарядов зависит от их высоты, состава и степени измельчения компонентов.

В случае большой высоты заряда ВВ необходимо учитывать краевые эффекты, так как волны разгрузки со стороны боковых граней заряда могут изменить па-

раметры детонации. Кроме того, боковой разлет продуктов взрыва существенно зависит от угла подхода детонационного фронта к боковой грани заряда. В силу указанных причин может существенно измениться режим полета краев метаемой пластины, в результате чего могут образоваться краевые непровары [25].

1.8 Методики испытаний свойств композиционных материалов

Выбор комплекса испытаний для исследования физико-механических свойств КМ и оборудования, на котором будут в дальнейшем исследовать образцы армированных композиционных материалов, является одним из важных этапов в получении опытных образцов и дальнейшем их исследовании.

Важно определиться каким именно испытаниям и исследованиям следует подвергать образцы армированных композиционных материалов. Исходя из литературного обзора, требуется провести испытания на прочность, угол изгиба, а так же исследование микроструктуры армированных композиционных материалов и измерение твердости полученных образцов [26,27,30,37,38].

Исходя из вышесказанного требуется подобрать оборудование, на котором будут производиться исследования и испытания образцов армированных композиционных материалов, наиболее подходящее по техническим требованиям.

Оценка механических свойств соединений будет производиться при испытании образцов на одноосное растяжение на разрывной машине модели ИР 5145-500-11 по ГОСТ 1497-84 [28]

Технические характеристики разрывной машины ИР 5145-500-11 представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Технические характеристики разрывной машины ИР 5145-500-11:

Параметр	Значение
1	2
Максимальная нагрузка (P_{max}), кН	300,0
Жесткость силовой рамы, кН/мм	600,0
Диапазон нагружения, %	0,4...100,0

Продолжение таблицы 3

1	2
Погрешность нагрузки, %	$<\pm 1$
Погрешность деформации, %	$<\pm 1$
Шаг траверсы, мм	0,001
Диапазон измерения деформации, %	2,0...100,0
Точность измерения деформации в пределах, %	$\pm 0,5$
Скорость испытания, мм/мин	0,005...500,0
Погрешность скорости испытания, %	1,0
Размеры зоны испытания (L, H), мм	600,0 × 575,0
Возможная длина образца, мм	10,0...600,0
Электрическое питание, В	380,0
Габаритные размеры силовой рамы, мм	1110,0×785,0×2525,0
Масса силовой рамы, кг	2000,0

Заготовки для подготовки образцов для проведения механических испытаний изготавливают механическим способом с помощью угловой шлифовальной машинки модели *Makita GA 9020 SF* в соответствии с параметрами, приведенные в ГОСТ 1497-84.

Для определения возможности металла выдерживать заданную степень пластической деформации, характеризуемую углом изгиба, так же готовят образцы армированных композиционных материалов в соответствии с ГОСТ 14019-03. Испытания проводятся на разрывной машине модели *WDW-300E*

Исследование микроструктуры армированных композиционных материалов

Исследования проводятся на металлографическом микроскопе Альтами MET 1MT.

Технические характеристики металлографический микроскоп Альтами MET 1MT представлены в таблице 4.

Таблица 4 - Технические характеристики Металлографический микроскоп Альтами МЕТ 1МТ

Параметры/оборудование	Технические параметры
1	2
Методы исследований в отраженном свете:	<ul style="list-style-type: none"> - светлое поле; - темное поле; - поляризация.
Увеличение:	50X-2000X
Насадка:	<ul style="list-style-type: none"> - бинокулярная с наклоном 30°; - диоптрийная подстройка ± 5 диоптрий; - изменяемое межзрачковое расстояние 53-75 мм.
Окуляры:	<ul style="list-style-type: none"> - WF10X/22 мм; - WF10X/22 мм с перекрестием и шкалой (100 делений); - WF20X/15 мм
Объективы:	<p>Планахроматические объективы для светлого и темного поля на бесконечность (Infinity Color Corrected System):</p> <ul style="list-style-type: none"> - PL L 5X/0.12 BD (рабочее расстояние 9.7 мм); - PL L 10X/0.25 BD (р. р. 9.3 мм); - PL L 20X/0.40 BD (р. р. 7.2 мм); - PL L 50X/0.70 BD (р. р. 2.5 мм) (подпружиненный); - PL L 100X/0.85 BD (р. р. 0.2 мм) (подпружиненный); <p>Дополнительно:</p> <ul style="list-style-type: none"> - PL L 40X/0.60 BD (р. р. 3.0 мм) (подпружиненный)*; - PL L 60X/0.70 BD (р. р. 1.9 мм) (подпружиненный)*; - PL L 80X/0.80 BD (р. р. 1.2 мм) (подпружиненный)*.
Штатив:	<ul style="list-style-type: none"> - из отлитого под давлением алюминия; - окрашен огнеупорной эмалью; - с резиновыми ножками.
Револьверное устройство:	пятипозиционный, с точной фиксацией объективов относительно оптической оси.

Продолжение таблицы 4

1	2
Предметный столик:	<ul style="list-style-type: none"> - прямоугольный 242,0×200,0 мм; - двухкоординатный, с коаксиально расположенными ручками управления перемещением стола; - диапазон перемещений 30,0×30,0 мм; - максимальный вес образца 2 кг; - 3 круглые вращаемые вставки с диаметрами 10, 20 и 30 мм.
Фокусировка:	<ul style="list-style-type: none"> - коаксиальные винты грубой и точной фокусировки; - встроенный механизм для защиты препарата при быстрой смене; - регулировка жесткости хода; - шаг точной фокусировки 0.002 мм.
Отраженный свет:	<ul style="list-style-type: none"> - система освещения с регулируемой полевой и апертурной диафрагмами и плавной регулировкой яркости освещения; - источник освещения галогенная лампа, 12 В/50 Вт.

Для исследования микроструктуры армированных композиционных материалов требуется подготовить шлифы.

Подготовка и травление шлифов. Механическим способом вырезают образцы композиционного материала на основе титана и алюминия требуемых геометрических параметров и зажимают в оправке и заливают в обоймах сплавом Вуда или эпоксидной смолой. Поверхность образца, предназначенная для исследования, обрабатывается напильником. После зачистки производится последовательная шлифовка образцов. Шлифовальную бумагу всех применяемых номеров предварительно покрывают слоем парафина или смесью парафина с керосином.

Для выявления макроструктуры алюминия следует использовать реактив следующего состава: 1 часть воды, 3 части концентрированной азотной и 2 части концентрированной соляной кислот. А для выявления макроструктуры титана и зоны сварного соединения следует использовать реактив, состоящий из 5 %-го водного раствора азотной кислоты и 5 %-го водного раствора плавиковой кислоты.

После операции химического травления с помощью микроскопа Альтами МЕТ 1МТ на подготовленных микрошлифах производят оценку состояния зоны сварного соединения титана с алюминием.

Испытания на определение твердости образцов армированных композиционных материалов.

Испытания на определение твердости образцов армированных композиционных материалов проводят на твердомере ИТ 5010-01. Технические характеристики твердомера ИТ 5010-01 приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Технические характеристики твердомера ИТ 5010-01

Параметры	Значения
Диапазон измерения твердости	8~2000 <i>HV</i> 5,6~450 <i>HB</i>
Испытательные нагрузки, Н	49,03; 98,1; 153,2; 196,1; 245,2; 294,2; 490,3; 612,9; 980,7; 1226; 1839; 2452 .
Пределы допускаемой погрешности твердомера от числа твердости образцовой меры твердости 2-разряда МТВ-1 МТБ-1 НВ 100 $\pm$ 25 при нагрузке 9807 ННВ 200 $\pm$ 50 при нагрузке 29420 Н НВ 400 $\pm$ 50 при нагрузке 29420 Н	$\pm$ 3% $\pm$ 5% $\pm$ 4% $\pm$ 4%
Предел допускаемой погрешности нагрузок в диапазонах основном/дополнительном, не более	$\pm$ 1 %
Выдержка образца под нагрузкой, с	1~180 .
Используемые индентора	Алмазная пирамидка квадратного сечения, твердосплавный шаровый наконечник Ø1* мм., Ø2 мм., Ø2,5 мм., Ø5 мм., Ø10 мм.
Расстояние от индентора до опорного столика, мм	0~150,0.
Расстояние от центра отпечатка до станины, мм	150,0.
Габаритные размеры, мм. (ДхШхВ)	635,0×35×810,0
Масса, кг	140,0 .
Электропитание	~220V/50Hz.
Мощность, кВт	0,06.

Твердость армированного композиционного материала на основе титана и алюминия определяют вдоль линии шва на расстоянии от 0,015 до 2,0 мм от линии соединения и поверхности армирующих волокон с шагом 0,015 мм. Твердость армирующих волокон измеряют на расстоянии от 0,015 до 0,2 мм от поверхности с шагом 0,015 мм.

Выводы по первой главе:

- изучены основные области разработки высокопрочных армированных композиционных материалов и способы их получения, показана актуальность работ, связанных с получением композиционных материалов сваркой взрывом;
- проведен патентный поиск и определены основные тенденции развития высокопрочных армированных композиционных материалов;
- проведен анализ основные схемы армирования композиционных материалов, раскрыты основные технологические особенности схем армирования, дана их краткая характеристика;
- обоснован выбор взрывчатых веществ для проведения сварки взрывом армированных композиционных материалов;
- определены основные методы испытаний для оценки механических свойств армированных композиционных материалов.

2 Экспериментальные исследования композиционных металлических материалов. Обобщение и оценка результатов исследования

2.1 Выполнение экспериментальных работ по созданию образцов композиционных металлических материалов повышенной механической прочности с применением сварки взрывом

В основу разработки технологических схем сварки взрывом композиционных материалов системы «титан-сталь» и «алюминий-медь» заложено получение качественного соединения материала матрицы и армирующих волокон. Необходимость качественного соединения обусловлена не только сохранением прочности композита в целом, но и возможностью дальнейшего взаимодействия исходных компонентов в процессе термической обработки. После сварки взрывом проводят визуальный осмотр и микроструктурный анализ. При визуальном осмотре выявляют такие не допустимые дефекты как трещины, сколы и расслоения материала матрицы и армирующих компонентов, а также оценивают поверхность композиционного материала на сплошность и отсутствие раковин, свищей. При микроструктурном анализе основными контролирующими параметрами является отсутствие или минимальное количество непроваров, оплавленных участков и промежуточных фаз на границе матрица – волокно, так как они отрицательно влияют на дальнейшие технологические свойства полуфабриката [8].

Решение поставленной задачи сводится к подбору рациональных технологических параметров сварки: высоты и состава взрывчатого вещества (ВВ), зазора между матричными слоями и армирующими компонентами.

С помощью сварки взрывом получали образцы композиционного материала на основе алюминиевого сплава марки АМг5М армированного медной проволокой марки М1 и на основе титанового сплава марки ВТ1-0 армированного стальной проволокой марки Ст3.

2.1.1 Расчет технологических параметров сварки взрывом армированного композиционного материала и выбор состава взрывчатого вещества

Основными технологическими параметрами сварки взрывом являются скорость детонации D (характеризующаяся высотой и составом ВВ), величина зазора между метаемым и неподвижным элементами k , а также безразмерный параметр r , определяемый как отношение массы заряда взрывчатого вещества к массе метаемого элемента по [24] формуле 1.69.

Расчет параметров сварки взрывом выполнялся по известным эмпирическим зависимостям. Скорость соударения V рассчитывали путем совместного решения уравнений 1.4 - 1.7 по [24].

Угол соударения γ метаемых пластин определяли при различных значениях скорости детонации, что бы он гарантировано попадал в площадку свариваемости по формуле [24]:

$$\gamma = 2 \arcsin \frac{V}{2D}, \quad (1)$$

где γ – угол соударения, градусах;

V – скорость соударения, м/с;

D – скорость детонации, м/с.

Вычисляемые значения сопоставляли с площадкой свариваемости, для гарантирования получения сваркой неразъемного соединения. На рисунке 10 представлена схема нагружения волокна при сварке взрывом композиционных армированных материалов.

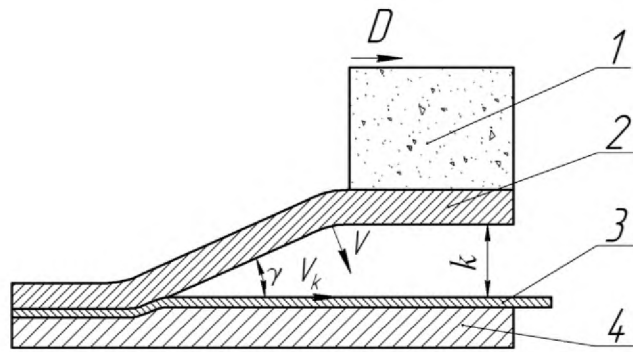


Рисунок 10 – Схема нагружения волокна при сварке взрывом композита: 1 – ВВ; 2, 4 – матричные пластины; 3 – армирующее волокно; γ – угол соударения, V_k – скорость точки контакта

Для проведения исследований по влиянию параметров сварки взрывом на получение качественного сварного соединения матрицы и волокна композита использовали два типа ВВ – смесь аммонита 6ЖВ и селитры в пропорции 50/50 (далее АТ-1) и игданит.

В таблице 5 и 6 представлены режимы и результаты расчета основных параметров ударно-волновой обработки образцов композиционного материала на основе сплава АМг5М армированного медной проволокой марки М1 и на основе сплава ВТ1-0 армированного стальной проволокой марки Ст3.

Таблица 6– Режимы и результаты расчета основных параметров процесса сварки образцов композиционного материала на основе сплава АМг5М армированного медной проволокой марки М1

Режим сварки	Тип взрывчатого вещества	Исходные параметры сварки				Результаты расчета		
		Взрывчатое вещество			Величина зазора между пластинами k , мм	V_K , м/с	V_C , м/с	γ , град
		$D_{ВВ}$, м/с	$H_{ВВ}$, мм	$\rho_{ВВ}$, г/см ³				
1	АТ-1	2000,0	15,0	0,9	2,0	2000,0	535,0	15° 22'
2	АТ-1	2000,0	15,0	0,9	3,0	2000,0	570,0	16° 23'
3	АТ-1	2240,0	20,0	0,9	2,0	2240,0	650,0	16° 41'
4	АТ-1	2240,0	20,0	0,9	3,0	2240,0	670,0	17° 12'
5	АТ-1	2400,0	25,0	0,9	2,0	2400,0	730,0	17° 30'
6	АТ-1	2400,0	25,0	0,9	3,0	2400,0	800,0	19° 11'
7	Игданит	1780,0	25,0	0,84	2,0	1780,0	515,0	16° 38'
8	Игданит	1780,0	25,0	0,84	3,0	1780,0	555,0	17° 56'
9	Игданит	1900,0	30,0	0,84	2,0	1900,0	595,0	18° 1'
10	Игданит	1900,0	30,0	0,84	3,0	1900,0	650,0	19° 41'
11	Игданит	2040,0	35,0	0,84	2,0	2040,0	615,0	17° 20'
12	Игданит	2040,0	35,0	0,84	3,0	2040,0	665,0	18° 46'

Таблица 7 – Режимы и результаты расчета основных параметров процесса сварки образцов композиционного материала на основе сплава ВТ1-0 армированного стальной проволокой марки Ст3

Режим сварки	Тип взрывчатого вещества	Исходные параметры сварки				Результаты расчета		
		Взрывчатое вещество			Величина зазора между пластинами k , мм	V_K , м/с	V_C , м/с	γ , град
		$D_{ВВ}$, м/с	$H_{ВВ}$, мм	$\rho_{ВВ}$, г/см ³				
1	АТ-1	2329,0	20,0	0,9	3,0	2330,	320,0	7°9'
2	АТ-1	2329,0	20,0	0,9	4,0	2330,	330,0	8°1'
3	АТ-1	2689,0	40,0	0,9	3,0	2690,	500,0	10°6'
4	АТ-1	2689,0	40,0	0,9	4,0	2690,	530,0	11° 3'
5	АТ-1	2986,0	60,0	0,9	3,0	2985,	620,0	11°9'
6	АТ-1	2986,0	60,0	0,9	4,0	2985,	665,0	12°8'
7	Игданит	1900,0	30,0	0,84	3,0	1900,	305,0	9°2'
8	Игданит	1900,0	30,0	0,84	4,0	1900,	320,0	9°7'
9	Игданит	2040,0	35,0	0,84	3,0	2040,	350,0	9°8'
10	Игданит	2040,0	35,0	0,84	4,0	2040,	370,0	10°4'
11	Игданит	2200,0	40,0	0,84	3,0	2200,	395,0	10°3'
12	Игданит	2200,0	40,0	0,84	4,0	2200,	420,0	10°9'

2.1.2 Разработка плоских схем сварки взрывом композиционного материала систем «титан-сталь» и «алюминий-медь»

Согласно техническому заданию работы для получения листовых полуфабрикатов высокопрочного композиционного материала в качестве материала матрицы выбраны алюминиевый сплав АМг5М и титановый сплав ВТ1-0 толщиной 2 мм, размером 250×150 мм. В качестве армирующих волокон использовали медную проволоку марки М1 и стальную проволоку марки Ст3 диаметром 1,0 мм.

При сварке взрывом на поверхности материалов матрицы и волокна недопустимо наличие окислов, оксидных пленок, влаги и металлических включений, поэтому поверхности были тщательно зачищены и обезжирены. На рисунке 5 представлена параллельная схема армирования титана и алюминия проволокой. В схеме армирования титана стальной проволокой для увеличения скорости соударения использовалась стальная фальш-пластина толщиной 2 мм, которая устанавливалась без зазора на метаемую пластину 2.

Сварка взрывом осуществлялась в условиях открытого полигона. Для уменьшения деформации прогиба полуфабрикатов использованы стальные основания толщиной 5 мм. Для увеличения высоты обрубки метаемой пластины использовали дополнительное основание из дерева. На рисунке 6 показана схема расположения армирующих элементов между матричными листами.

При выполнении экспериментов установлено, что использование схемы, представленной на рисунке 5, не представляется возможным из-за нарушения предварительного расположения армирующих элементов в процессе сварки - происходит смещение волокон относительно первоначального расположения. В местах скопления армирующих элементов возникает непровар. Для обеспечения заданного шага армирования предложен механизм закрепления армирующих компонентов относительно матрицы, представленный на рисунке 7.

На рисунке 11 и 12 показано расположение волокон при армировании сплава алюминия медной проволокой и титанового сплава стальной проволокой соответственно.

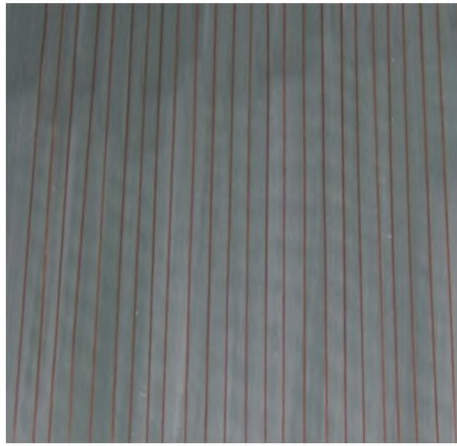


Рисунок 11 – Расположение волокон при армировании сплава АМг5М медной проволокой марки М1

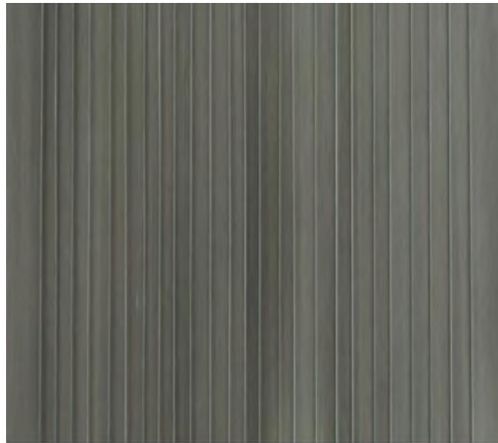


Рисунок 12 – Расположение волокон при армировании сплава ВТ1-0 стальной проволокой марки Ст3

Получены образцы композиционного материала на основе алюминиевого сплава АМг5М и на основе титанового сплава ВТ1-0. При визуальном осмотре образцов композита с алюминиевой матрицей после сварки взрывом установлено, что ВВ типа АТ-1 разбивает поверхность матричной пластины композита – образуются раковины и свищи, вследствие чего теряется ее товарный вид. Применение дополнительного изоляционного материала между пластиной и ВВ улучшает товарный вид композита, но ведет к снижению скорости соударения в зоне контакта слоев и армирующих элементов, что приводит к непровару. Использование больших

толщин заряда ВВ является нецелесообразным в виду увеличения стоимости получения композита с использованием также дополнительной изоляции. Установлено, что рациональным ВВ, при сварке взрывом армированного композита на основе алюминиевого сплава, является игданит, потому что, во-первых, поверхность композита имеет наилучший товарный вид среди используемых ВВ и не требует применения дополнительного изоляционного слоя. Во-вторых, игданит характеризуется стабильностью параметров детонации, т.е. при небольшом изменении толщины заряда скорость детонации изменяется незначительно и имеет практически постоянную насыпную плотность по сравнению с материалом типа АТ-1, что существенно сказывается на стационарности режимов сварки.

Установлено, что при использовании форсированного режима сварки, вследствие повреждения материала матрицы и нарушения целостности волокон, прочность композиционного материала также уменьшается, что ведет к разрушению матричных слоев, которое представлено на рисунке 13.



Рисунок 13 – Разрушение образца при сварке взрывом на форсированных режимах

На рисунке 14 показан внешний вид армированного композиционного материала с матрицей из сплава АМг5М, полученного на рациональных режимах.



Рисунок 14 – Листовой полуфабрикат армированного композиционного материала на основе АМг5М

При визуальном осмотре поверхности композита на основе сплава ВТ1-0 появление поверхностных дефектов не выявлено. На рисунке 15 представлен внешний вид композиционного материала на основе титанового сплава после сварки взрывом полученного на рациональных режимах.



Рисунок 15 – Листовой полуфабрикат армированного композиционного материала на основе ВТ1-0

Установлено, что сварка взрывом позволяет получать листовые армированные композиционные материалы с армирующими элементами. Объемная доля армирующих компонентов композиционного материала составила от 4,5 до 5,6%.

Исследовали целостность волокон их направленность и расположение в волокнистом композиционном материале. Для исследования выбран неразрушающий рентгенографический метод контроля. На рисунке 16 и 17 представлены характерные рентгенографические снимки армированного композиционного материала, полученные с помощью импульсного рентгеновского аппарата «САРМА» (B&G) модель 500.

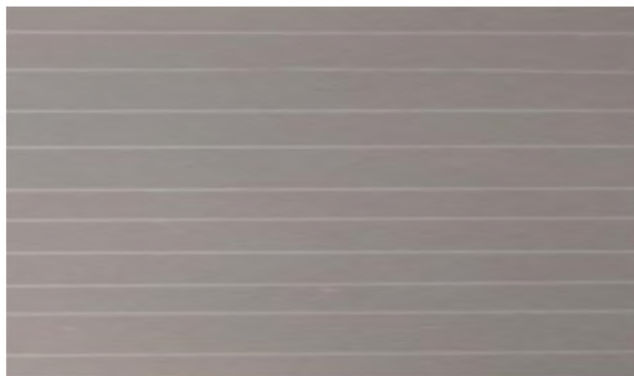
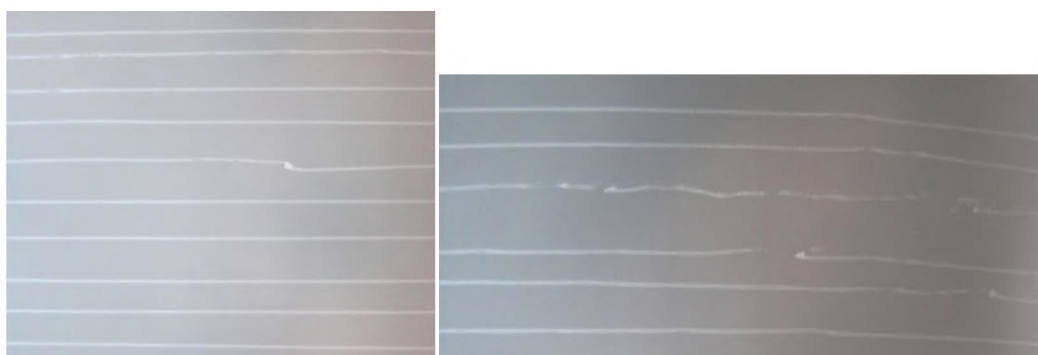


Рисунок 16 – Рентгенографический снимок образца армированного композиционного материала



а

б

Рисунок 17 – Рентгенографический снимок образца армированного композиционного материала: а – локальное заземление армирующего элемента; б – потеря устойчивости, разрыв армирующих элементов

По результатам неразрушающего контроля армированных композиционных материалов на снимках установлены места разрывов и локальных зацементирований армирующих элементов, которые влияют на целостность в образовании интерметаллической фазы в композите и физико-механические свойства композита в целом. Места локальных зацементирований в армированном композиционном материале являются концентраторами напряжений и снижают его прочность. Показано, что причиной разрушения армирующих элементов является форсированные технологические режимы (скорость детонации, величина зазора).

Выводы по второй главе

- рассчитаны технологические параметры сварки взрывом армированного композиционного материала. Произведен выбор взрывчатых веществ и корректировка параметров ударно-волнового нагружения в условиях открытого полигона.
- с помощью сварки взрывом получены образцы композиционного материала на основе алюминиевого сплава марки АМг5М армированного медной проволокой марки М1 и на основе титанового сплава марки ВТ1-0 армированного стальной проволокой марки Ст3.
- исследовано влияние состава взрывчатого вещества на образование поверхностных дефектов композиционного материала с матрицей из сплавов АМг5М и ВТ1-0. Установлено, что наилучшее качество поверхности при сварке взрывом композитов на основе сплава АМг5М обеспечивает ВВ – игданит, а на основе сплава ВТ1-0 - АТ-1.

3 Исследование влияния технологических режимов процесса ударно-волнового нагружения на формирование заданной структуры и свойств композиционных металлических материалов

3.1 Изучение влияния технологических режимов процесса ударно-волнового нагружения на формирование заданной структуры и свойств композиционных материалов

3.1.1 Выбор рациональных параметров сварки взрывом при армировании композиционных материалов

Достижение рационального сочетания физико-механических и эксплуатационных свойств в готовом изделии и их воспроизводимость представляет собой важную материаловедческую задачу, успешное решение которой заключается в установлении связей между структурой и свойствами композиционных материалов с основными параметрами ударно-волнового нагружения.

При сварке взрывом сплавов алюминия и меди, а также титана и стали, имеется ряд существенных ограничений, связанных с тем, что получение качественного соединения возможно на режимах сварки, при которых обеспечивается минимальное энерговложение в зону соединения.

С целью определения рационального диапазона скорости соударения и скорости точки контакта и изучению их влияния на прочность соединений были проведены серии экспериментов по сварке исследуемых материалов.

Армирование алюминиевого сплава марки АМг5М производилось медной проволокой марки М1, а титанового сплава марки ВТ1-0 стальной проволокой марки Ст3 с помощью сварки взрывом по схеме, представленной на рисунке 5.

Взрывчатым веществом, использовавшимся при сварке взрывом, являлись смесь аммонита 6ЖВ с аммиачной селитрой в соотношении 50/50 и игданит, характерной особенностью которых является постоянство и устойчивость скоростных характеристик в процессе инициирования.

Сварку производили в широком диапазоне скоростей, как скорости соударения V_c так и скорости точки контакта V_k . Так при армировании алюминиевого сплава медной проволокой скорость точки контакта изменяли в пределах от 1780 м/с до 2400 м/с, а скорость соударения в пределах от 535 м/с до 800 м/с, при армировании титанового сплава стальной проволокой скорость точки контакта изменяли в пределах от 1900 м/с до 2985 м/с, а скорость соударения в пределах от 300 м/с до 660 м/с.

Расчет параметров взрывного нагружения производили по формулам (1.4-1.7) и (1.10-1.13) [24]. Результаты расчета, а также исходные параметры схем ударно-волнового нагружения приведены в таблицах 6 и 7.

Целью этих экспериментов являлось установление таких параметров ударно-волнового нагружения, при которых обеспечивалась бы высокая прочность соединения при условии отсутствия в зоне сварного шва, а также на границах между основным металлом и армирующими волокнами участков расплава и зон перемешивания металлов.

В зависимости от условий эксплуатации композиционных металлических материалов повышенной механической прочности армированных медной и стальной проволокой и их функционального назначения к ним предъявляется ряд требований и назначается комплекс испытаний для оценки качества сварки. Методы испытаний по воздействию на материал подразделяются на качественные и количественные. Помимо этого они делятся на два класса разрушающего и неразрушающего контроля [28,29]. К качественным относятся методы неразрушающего контроля - ультразвуковая, магнитная, электромагнитная дефектоскопия и др. Данные методы позволяют определять сплошность соединения, осуществить контроль топографии, кристаллической структуры и химического состава. При помощи данных методов производится металлографический анализ структуры соединения и прилегающих к ней металлов. К количественным методам контроля относят испытания прочности материала, испытания на ударную вязкость, изгиб и др., позволяющие оценить прочностные характеристики соединений.

В данной работе оценка механических свойств полученных по режимам, указанным в таблицах 5 и 6 соединений производилась при испытании образцов на одноосное растяжение на разрывной машине модели ИР 5145-500-11 по ГОСТ 1497-84

Испытание образцов на одноосное растяжение показано на рисунке 18.

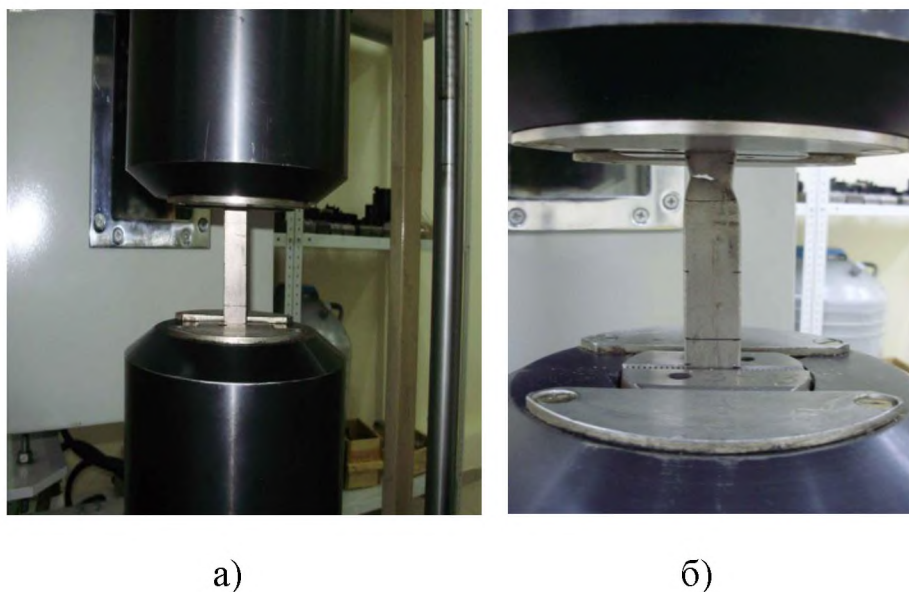


Рисунок 18 – Испытание образцов композиционного материала на одноосное растяжение на разрывной машине модели ИР 5145-500-11: а - вид образца до испытания; б - вид образца после испытания

Образцы изготавливали в соответствии с эскизом, приведенным на рисунке 19. Изготовление, а также площади образцов до и после испытания контролировали на микроскопе Альтами МЕТ 1МТ с точностью 0,01 мм.

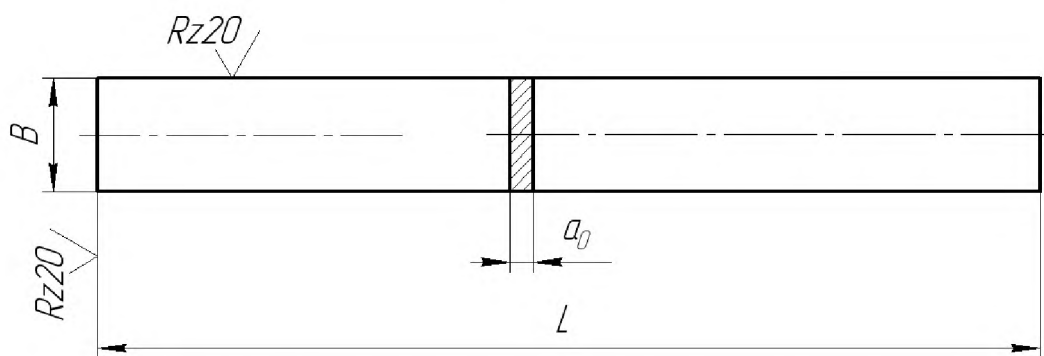


Рисунок 19 – Эскиз образцов армированного композиционного металлического материала: B - ширина образца; L - длина образца; a_0 - толщина образца

Внешний вид образцов до и после испытаний представлен на рисунке 20.

Результаты проведенных исследований механических свойств показали, что для образцов композиционных материалов на основе алюминиевого сплава марки АМг5М армированных медной проволокой марки М1 сваренных на режимах 9 и 10 (см. таблицу 6) прочность составляет от 360 до 380 МПа, что удовлетворяет требованиям, предъявляемым к композиционному материалу и превышает исходную прочность неармированного алюминиевого сплава марки АМг5М аналогичной толщины более чем на 35 %.

Для режимов 1, 2, а также 7 и 8 характерны более низкие значения прочности, находящиеся в пределах от 310 до 340 МПа, при этом большее ее значение соответствует режимам 1 и 2.

Минимальные значения прочности (от 275 до 290 МПа) показали образцы, полученные на завышенных скоростных режимах 3, 4, 5, 6 и 11, 12 (скорость соударения и скорость точки контакта).

Следует заметить, что в диапазоне скоростей $V_c < 520$ м/с схватывание металлов либо полностью отсутствовало, либо наблюдалась частичная сварка металлов.



а



б

Рисунок 20 – Внешний вид образцов до и после испытаний: а – вид образца до испытания; б – вид образца после испытания

Анализ данных по прочности сварных соединений, полученных на различных параметрах показал, что для образцов композиционных материалов на основе алюминиевого сплава марки АМг5М армированных медной проволокой марки М1 сваренных в диапазонах скоростей $V_k = 1900$ м/с, и скорость соударения V_c находится в диапазоне от 595 до 650 м/с, характерны наилучшие прочностные показатели.

Для образцов композиционных материалов на основе титанового сплава марки ВТ1-0 армированных стальной проволокой марки Ст3 сваренных на режимах 3 и 4

(см. таблицу 6) прочность составляет примерно 530 МПа, что удовлетворяет требованиям, предъявляемым к композиционному материалу и превышает исходную прочность неармированного основе титанового сплава марки ВТ1-0 более чем на 40 %.

Для режимов 1 и 2, а также 7 - 12 характерны более низкие значения прочности, находящиеся в пределах от 430 до 480 МПа, при этом большее ее значение соответствует режимам 11 и 12.

Минимальные значения прочности (от 375 до 420 МПа) показали образцы, полученные на завышенных скоростных режимах 5 и 6 (скорость соударения и скорость точки контакта).

Следует заметить, что в диапазоне скоростей $V_c < 320$ м/с схватывание металлов либо полностью отсутствовало, либо наблюдалась частичная сварка металлов.

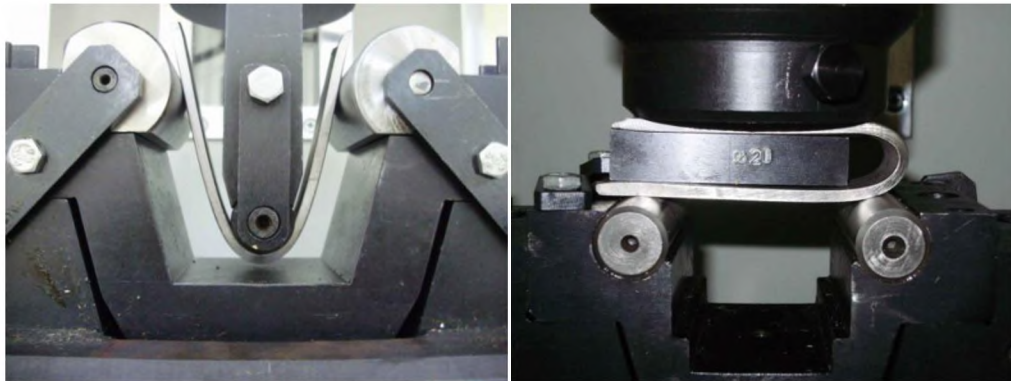
Анализ данных по прочности сварных соединений, полученных на различных параметрах показал, что для образцов композиционных материалов на основе титанового сплава марки ВТ1-0 армированных стальной проволокой марки Ст3 сваренных в диапазонах скоростей $V_k = 2690$ м/с, и скорость соударения V_c находясь в диапазоне от 500 до 530 м/с характерны наилучшие прочностные показатели.

Оценку технологических свойств после сварки взрывом армированных композиционных материалов производили на образцах, показавших на стадии оценки прочностных свойств наилучшие показатели в соответствии с ГОСТ 14019–2003 на разрывной машине модели ИР 5145-500-11.

Внешний вид образцов до и после испытаний технологических свойств на изгиб представлен на рисунке 22.

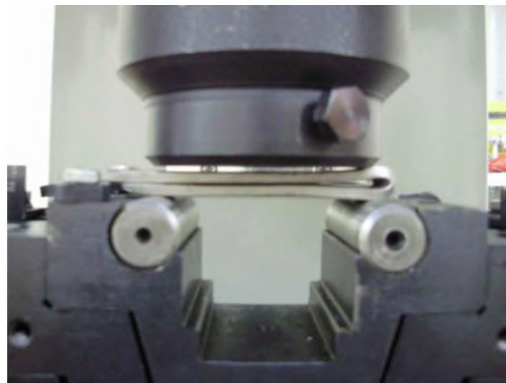
Установлено, что при испытании технологических свойств на изгиб образцы композиционных материалов на основе алюминиевого сплава марки АМг5М армированные медной проволокой марки М1 сваренных на режимах 9 и 10 (таблица 6) и образцы композиционных материалов на основе титанового сплава марки ВТ1-0 армированные стальной проволокой марки Ст3 сваренные на режимах 3 и 4 (таблица 7) сохранили свою целостность до соприкосновения сторон, что свидетельствует

о высоких технологических свойствах и о возможности применения к ним дальнейших операций формообразования.



а)

б)

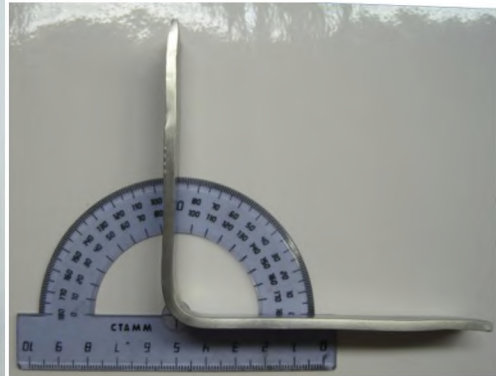


в)

Рисунок 21 – Испытание образцов композиционного материала на изгиб на разрывной машине модели ИР 5145-500-11: а – испытание до заданного угла; б – испытание до параллельности сторон; в – испытание до соприкосновения сторон



а)



б)



в)



г)



д)

Рисунок 22 – Внешний вид армированного композиционного металлического материала: а – до испытаний; б – угол 90° ; в – угол 120° ; г – до параллельности сторон; д – до соприкосновения сторон

Целью дальнейшего исследования являлось более детальное изучение микроструктуры зоны соединения, а также исследование влияния режимов сварки на структурные преобразования в зоне сварного шва.

3.1.2 Исследование влияния параметров сварки взрывом на микроструктуру композиционных материалов

С целью качественной оценки влияния исходных параметров сварки взрывом были проведены исследования микроструктуры полученных композиционных армированных материалов.

В литературе почти отсутствуют данные по изготовлению и травлению шлифов разнородных соединений указанного сочетания. Так в частности, трудности приготовления и исследования шлифов композиционных материалов на основе алюминиевого сплава марки АМг5М армированных медной проволокой марки М1 заключались в том, что соединяемые металлы обладают разными физико-химическими свойствами. Из-за различной твердости алюминия и меди алюминиевая составляющая сошлифовывается в большей степени, чем медь, в результате чего образуется ступенька на границе перехода двух металлов. Изучение микроструктуры таких шлифов затруднительно. Травление шлифов разнородных металлов из-за различия электрохимических потенциалов растворения также довольно сложно. По-видимому, этим можно объяснить тот факт, что до настоящего времени отсутствуют травители для различных сочетаний металлов. Поэтому одной из важных задач в данном разделе явилась разработка способа приготовления и травления шлифов разнородных металлов.

Для изучения макро - и микроструктуры сварных соединений композиционных материалов на основе алюминиевого сплава марки АМг5М армированных медной проволокой марки М1, а также образцов композиционных материалов на основе титанового сплава марки ВТ1-0 армированных стальной проволокой марки Ст3 образцы зажимали в оправки и заливали в обоймах сплавом Вуда или эпоксидной смолой. Поверхность образца, предназначенная для исследования, обрабатывалась напильником. После зачистки производили последовательную шлифовку образцов. Шлифовальную бумагу всех применяемых номеров предварительно покрывали слоем парафина или смесью парафина с керосином.

Для выявления макроструктуры сварных соединений алюминиевого сплава с медью использовали реактивы: 10 %-ный раствор едкого натрия; 10 %-ный раствор надсернистого аммония. Для выявления макроструктуры сварных соединений титанового сплава со сталью использовали реактив: раствор азотной 25% и плавиковой 3% кислоты.

Для изготовления микрошлифов образцы подвергали механической полировке на сукне, начиная с грубого и кончая более мелким. Полировали на сукне, смоченном окисью хрома. Последняя стадия обработки проводилась на мягком сукне. Скорость вращения диска при этом не превышала 1200 об/мин.

На подготовительном таким образом нетравленном шлифе легко выявляются поры, трещины, неметаллические включения и при наличии интерметаллидного слоя можно довольно точно измерить его толщину.

После операции химического травления с помощью микроскопа Альтами МЕТ 1МТ на подготовленных микрошлифах была произведена оценка состояния зоны соединения основного металла композиционного материала с металлом армирующих волокон.

Установлено, что при распространении фронта детонации перпендикулярно направлению укладки волокон, между волокнами на всех режимах сварки образуются участки расплавленного металла, как показано на рисунке 23. С увеличением скорости детонации площадь оплавленных участков увеличивается.

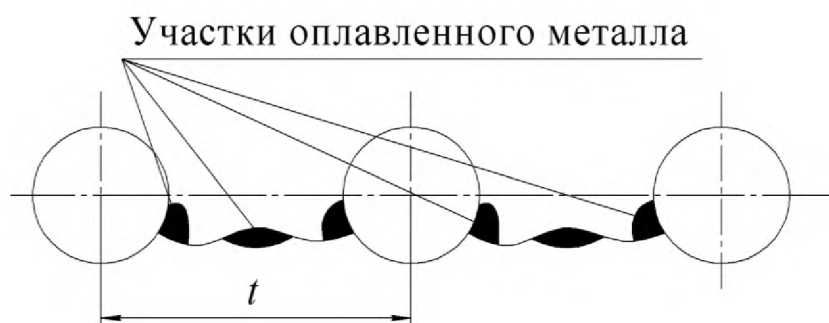


Рисунок 23 – Взаимодействие волокна и матрицы при распространении фронта детонации перпендикулярно направлению укладки волокон

При распространении фронта детонации параллельно направлению укладки волокон, между волокнами армирующего металла участки расплава образуются только на форсированных режимах.

Дальнейшее исследование состояния границ волокно-матрица позволило установить появление участков расплава связанное с увеличением скорости соударения и скорости детонации ВВ [34].

Фотографии микроструктуры армированных композиционных материалов сваренных на различных режимах, полученные на микроанализаторе *JCXA – 733* в режиме растровой электронной микроскопии (РЭМ) приведены на рисунках 24 - 26.

Электронно-зондовый микроанализатор *JCXA-733* позволяет получать изображения:

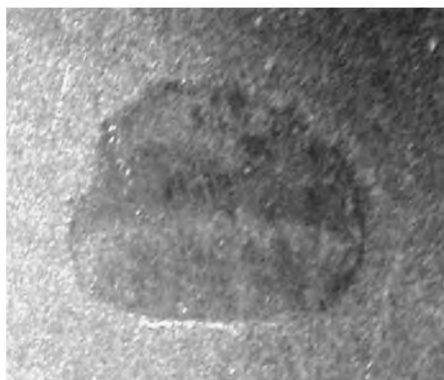
- во вторичных электронах с увеличением от 20 крат до 50000 крат;
- в обратно-рассеянных электронах *COMPO* и *TOPO*;
- в поглощенных электронах;
- в характеристическом рентгеновском излучении выбранных элементов.

Одно из основных достоинств РЭМ состоит в том, что большое число образцов может быть исследовано без предварительной подготовки. Размер исследуемого образца в РЭМ ограничен только размерами столика для установки объектов исследования.

Изучение влияния параметров сварки на структурообразование в композиционном материале производилось при параметрах сварки указанных в таблицах 5 и 6.

На основании данных прочностных испытаний и результатов микроскопического анализа зоны сварного шва, было установлено, что оптимальными режимами сварки образцов композиционных материалов на основе алюминиевого сплава марки АМг5М армированных медной проволокой марки М1 являются $V_k = 1900$ м/с, и V_c в пределах от 595 до 650 м/с (режимы сварки 9 и 10 по таблице 5). Сварной шов образцов композиционного материала в этом случае имеет прямую или слабосинусоидальную границу раздела без образования участков расплава, периферийная область армирующих волокон меди характеризуется отсутствием в ней не-

проваров и оплавлений. Армирующее волокно, представленное на рисунке 24 имеет округлую форму с четкой границей с основным металлом.



×100

Рисунок 24 – Микроструктура армирующих волокон меди после сварки взрывом: режимы сварки 9 и 10 по таблице 5

У образцов композиционного материала сваренных на завышенных скоростных режимах 3, 4, 5, 6 и 11, 12 (скорость соударения и скорость точки контакта см. таблицу 6) сварной шов имеет волновую или синусоидальную границу раздела с образованием участков расплава, периферийная область армирующих волокон меди, представленных на рисунке 25, характеризуется наличием в ней области оплавления алюминиевой матрицы в зоне контакта с волокном



×100

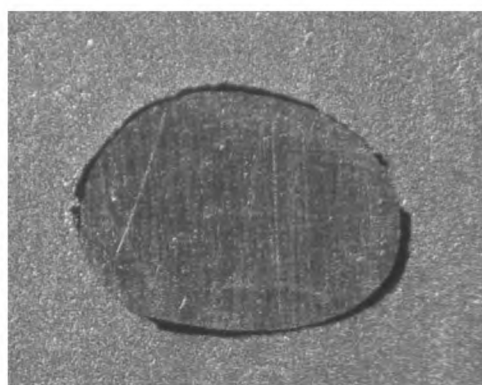
Рисунок 25 – Микроструктура армирующих волокон меди после сварки взрывом: режимы сварки 3, 4, 5, 6 и 11, 12 по таблице 6

Планиметрическим методом на микроскопе Альтами МЕТ 1МТ проведена количественная оценка прослойки расплава в зоне армирующих волокон. Суть метода состоит в том, что на фиксированном участке длины сварного шва определялась суммарная площадь зон расплавления. Затем находилась средняя площадь зоны расплавления и толщина расплавленного слоя при условии равномерного его распределения по всей длине.

Установлено, что наибольшая площадь участков расплава достигает 24000 мкм^2 (режим сварки 5) и 51000 мкм^2 (режим сварки 6). При чем как для режима 5 так и 6 образование прослойки расплава происходит со стороны алюминия (как более легкоплавкого и менее теплопроводного металла).

Таким образом, можно говорить о том, что образование расплава наиболее интенсивно происходит на завышенных скоростных режимах, как по скорости точки контакта, так и по скорости соударения.

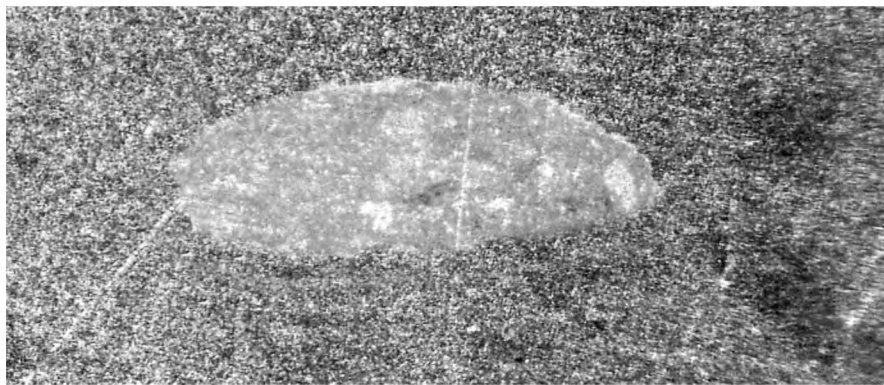
Сварка композиционного материала вблизи нижней границы (режимы 1 и 2, а также 7 и 8 по таблице 6) не обеспечивает достаточной степени контакта матрицы и упрочняющих волокон, представленных на рисунке 26, что не позволит при дальнейшей термической обработке обеспечить устойчивый рост интерметаллида по всему периметру.



×100

Рисунок 26 – Микроструктура армирующих волокон меди после сварки взрывом: режимы сварки 1 и 2, а также 7 и 8 по таблице 6

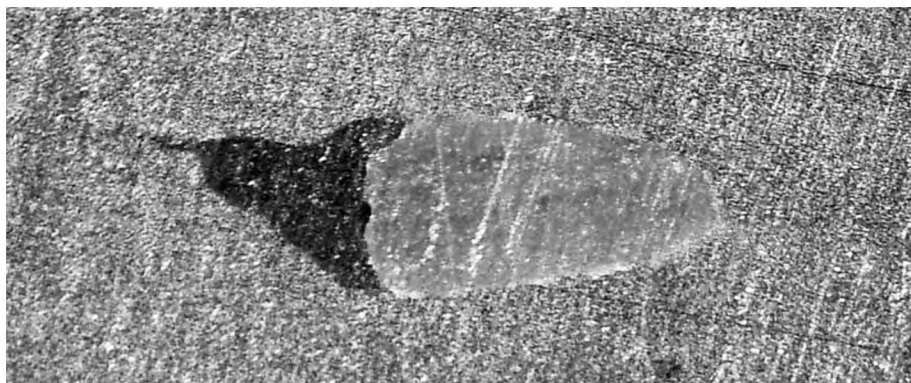
На основании полученных данных прочностных испытаний и результатов микроскопического анализа зоны сварного шва, было установлено, что рациональными режимами сварки образцов композиционных материалов на основе титанового сплава марки ВТ1-0 армированных стальной проволокой марки Ст3 являются $V_k = 2690$ м/с, и V_c от 500 до 530 м/с (режимы сварки 3 и 4 по таблице 7). Сварной шов образцов композиционного материала в этом случае имеет прямую границу раздела без образования участков расплава, периферийная область армирующих волокон стали характеризуется отсутствием в ней непроваров и оплавлений. Армирующее волокно, представленное на рисунке 27, имеет вытянутую вдоль зоны сварного шва форму с четкой границей с основным металлом.



×100

Рисунок 27 – Микроструктура армирующих волокон стали после сварки взрывом: режимы сварки 3 и 4 по таблице 7

У образцов композиционного материала сваренных на завышенных скоростных режимах 5 и 6 скорость соударения и скорость точки контакта (таблицу 6) сварной шов имеет волновую или синусоидальную границу раздела с образованием участков расплава, периферийная область армирующих волокон стали, представленного на рисунке 28, характеризуется наличием в ней области оплавления в зоне контакта с волокном.



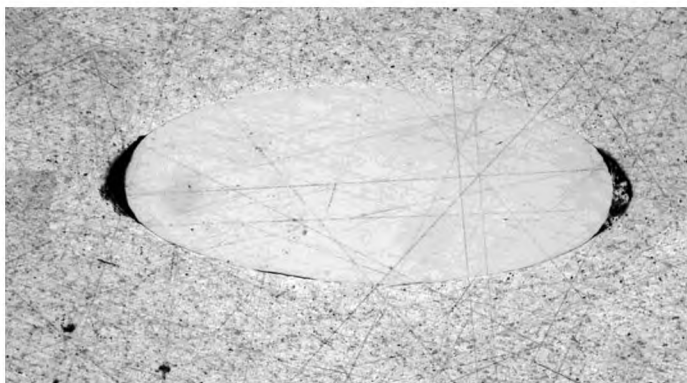
×100

Рисунок 28 – Микроструктура армирующих волокон стали после сварки взрывом: режимы сварки 5 и 6 по таблице 7

Планиметрическим методом на микроскопе Альтами МЕТ 1МТ проведена количественная оценка прослойки расплава в зоне армирующих волокон. Установлено, что наибольшая площадь участков расплава достигает 8900 мкм^2 (режим сварки 5) и 15900 мкм^2 (режим сварки 6). Для режима 5 так и 6 образование прослойки расплава происходит со стороны стали (как более легкоплавкого и менее теплопроводного металла данной пары).

Таким образом, можно говорить о том, что образование расплава наиболее интенсивно происходит на завышенных скоростных режимах, как по скорости точки контакта, так и по скорости соударения.

Сварка композиционного материала вблизи нижней границы (режимы 1 и 2, 7 - 12 по таблице 7) не обеспечивает достаточной степени контакта матрицы и упрочняющих волокон, представленных на рисунке 29, что не позволит при дальнейшей термической обработке обеспечить устойчивый рост интерметаллида по всему периметру.



×100

Рисунок 29 – Микроструктура армирующих волокон стали после сварки взрывом: режимы сварки 1 и 2, 7-12 по таблице 7

Исследование возможности исключения возникающего непровара по периметру контакта волокно-матрица для композиционных материалов на основе алюминиевого сплава марки АМг5М армированных медной проволокой марки М1, а также для композиционных материалов на основе титанового сплава марки ВТ1-0 армированных стальной проволокой марки Ст3 проводили с помощью варьирования сечения материала армирующих элементов. Установлено, что количество непроваров снижается с использованием проволоки меньшего сечения до 0,5 мм и армирующих элементов с овальным сечением (прокатанная проволока). Установлено, что для образования качественного соединения волокна и матрицы без образования промежуточных прослоек и непровара рационально использовать сварочный зазор между матричными пластинами равный 3 мм.

3.1.3 Изучение влияния параметров сварки взрывом на степень упрочнения композиционных материалов

Известно, что при сварке взрывом происходит существенное упрочнение соединяемых материалов в зоне сварного шва. Это упрочнение связано с интенсивной пластической деформацией металлов.

Вопросам изучения процесса пластической деформации композиционных материалов пар медь-алюминий и сталь-титан посвящен ряд работ [29], где произведено исследование характера пластического течения металлов и особенностей распределения сдвиговых деформаций в околошовной зоне композитов.

Так, в частности, в работе [31] разработана оригинальная методика оценки характера пластического течения металла в околошовной зоне, и позволяющая выявлять не только его особенности, но и определять значения величин сдвиговых деформаций в сваренных в широком диапазоне режимов образцов.

В данной работе характер и величину упрочнения композиционных армированных материалов исследовали путем измерения микротвердости методом Викерса [32] согласно ГОСТ 9450-76 на микротвердомере ИТ 5010-01 при нагрузках 20, 50 и 100 г в зависимости от величины твердости исследуемого металла. Измерение микротвердости производилось на 7 - 9 участках, как упрочненной зоны, так и зоны расплава по 3 - 4 отпечатка на каждом.

Твердость алюминиевого сплава марки АМг5М вдоль линии шва измеряли на расстоянии от 0,015 до 1,6 мм от линии соединения и поверхности армирующих волокон с шагом 0,015 мм. Твердость армирующих волокон меди марки М1 измеряли на расстоянии от 0,015 до 0,2 мм от поверхности с шагом 0,015 мм.

Данные свидетельствуют, что на расстоянии от 0,015 до 0,1 мм от линии сварного шва величина упрочнения армирующих волокон меди максимальна и достигает HV от 760 до 840 МПа. По мере удаления от линии шва наклеп меди уменьшается, и на расстоянии более 0,15 мм твердость меди становится равной HV от 590 до 620 МПа. На сплаве алюминия зона наибольшего упрочнения вплотную примыкает к линии сварного шва (0,3 мм) и максимальная твердость здесь составляет HV от 1100 до 1400 МПа, по мере увеличения глубины значения твердости сплава алюминия постепенно снижаются и на расстоянии около 0,7 мм составляют HV от 850 до 950 МПа в зависимости от режима сварки.

Твердость сплава титана марки ВТ1-0 вдоль линии шва измеряли на расстоянии от 0,015 до 2,0 мм от линии соединения и поверхности армирующих

волокон с шагом 0,015 мм. Твердость армирующих волокон стали измеряли на расстоянии от 0,015 до 0,2 мм от поверхности с шагом 0,015 мм.

Данные свидетельствуют, что на расстоянии от 0,015 до 0,015 мм от линии сварного шва величина упрочнения армирующих волокон стали максимальна и достигает HV от 1550 до 1700 МПа. По мере удаления от линии шва наклеп стали уменьшается, и на расстоянии более 0,2 мм твердость стали становится равной HV от 1300 до 1400 МПа. На сплаве титана зона наибольшего упрочнения вплотную примыкает к линии сварного шва (0,2 мм) и максимальная твердость здесь составляет HV от 1900 до 2200 МПа, по мере увеличения глубины значения твердости сплава титана постепенно снижаются и на расстоянии около 0,9 мм составляют HV от 1600 до 1800 МПа в зависимости от режима сварки.

3.1.4 Изучение влияния параметров термической обработки композиционных материалов на формирование заданного комплекса механических свойств

После операции армирования прочность композиционных материалов существенно увеличивается, так для образцов композиционных материалов на основе титанового сплава марки ВТ1-0 армированных стальной проволокой марки Ст3 сваренных на режимах 3 и 4 (таблицу 7) и выбранных в качестве рациональных с отсутствием в зоне сварного шва и периферийной зоне армирующих волокон участков расплава и непроваров прочность составляет 510 - 540 МПа, что превышает исходную прочность неармированного титана более чем на 40 %, а для образцов композиционных материалов на основе алюминиевого сплава марки АМг5М армированных медной проволокой марки М1 сваренных на режимах 9 и 10 (таблицу 6) прочность составляет 360 - 380 МПа, что также удовлетворяет требованиям, предъявляемым к композиционному материалу и превышает исходную прочность неармированного алюминиевого сплава марки АМг5М аналогичной толщины более чем на 35 %.

Для формирования окончательного комплекса свойств композиционных материалов после завершения операции армирования термической обработкой создают

условия для образования интерметаллических фаз в области армирующих волокон, тем самым достигая максимально возможного упрочнения композита за счет формирования структурно-неоднородного состояния материала [35,36,39].

Термической обработке подвергали биметалл, сваренный на вышеуказанных рациональных режимах, в котором отсутствовали участки расплава и интерметаллидных соединений в зоне сварного шва и армирующих волокон. После сварки биметалл подвергали холодной прокатке со степенью деформации от 10 до 15 % целью которой являлось улучшение качества поверхности, в результате чего конечная толщина катаных пластин составила 5 мм. Из полученных заготовок вырезали образцы размером 15×15 мм не менее 20 штук под каждый режим.

Отжиг образцов композиционных материалов на основе алюминиевого сплава марки АМг5М армированных медной проволокой марки М1 производили при температурах 350, 400, 450, 500 °С. Параметры режимов термической обработки представлены в таблице 8.

Отжиг образцов композиционных материалов на основе титанового сплава марки ВТ1-0 армированных стальной проволокой марки Ст3 производили при температурах 800, 900, 1000, 1100 °С. Параметры режимов термической обработки представлены в таблице 9.

После охлаждения на одной из граней, нормальной к поверхности раздела и совпадающей с направлением сварки, изготавливали шлиф, для чего с поверхности снимали слой металла толщиной 1,5-2 мм для исключения влияния побочных явлений. Затем на этих шлифах проводили исследования микроструктуры сварных соединений на металлографических - Альтами МЕТ 1МТ, МИМ-8 и электронном – JСХА-733 микроскопах. С целью исключения влияния второстепенных факторов, исследования изменения структуры в зависимости от времени отжига проводили для каждой из температур на образцах, вырезанных из одного и того же листа.

Термообработку композиционных материалов на основе алюминиевого сплава марки АМг5М армированных медной проволокой марки М1 проводили начиная с температуры 350 °С. При выдержке до 45 минут возникновения фазовых прослоек в зоне армирующего волокна не наблюдается.

Таблица 8 - Параметры режимов термической обработки композиционных материалов на основе алюминиевого сплава марки АМг5М армированных медной проволокой марки М1

Режим ТО	Параметры режима ТО	
	Температура, °С	Время выдержки, мин.
1	350,0	5,0
2		25,0
3		45,0
4		60,0
5		480,0
6		1200,0
7	400,0	5,0
8		25,0
9		45,0
10		60,0
11		300,0
12		720,0
13	450,0	5,0
14		15,0
15		25,0
16		45,0
17		60,0
18		120,0
19		300,0
20		480,0
21	500,0	5,0
22		15,0
23		25,0
24		45,0
25		60,0
26		120,0
27		360,0

Таблица 9 - Параметры режимов термической обработки композиционных материалов на основе титанового сплава марки ВТ1-0 армированных стальной проволокой марки Ст3

Режим ТО	Параметры режима ТО	
	Температура, °С	Время выдержки, мин.
1	800,0	5,0
2		25,0
3		45,0
4		60,0
5		480,0
6		1200,0
7	900,0	5,0
8		25,0
9		45,0
10		60,0
11		300,0
12		720,0
13	1000,0	5,0
14		15,0
15		25,0
16		45,0
17		60,0
18		120,0
19		300,0
20		480,0
21	1100,0	5,0
22		15,0
23		25,0
24		45,0
25		60,0
26		120,0
27		360,0

Начиная с 60 минут в зоне контакта армирующего медного волокна с металлом матрицы зафиксировано образование двух интерметаллидных прослоек со стороны меди толщиной 2 мкм, а со стороны сплава алюминия – около 1 мкм, которые представлены на рисунке 30.

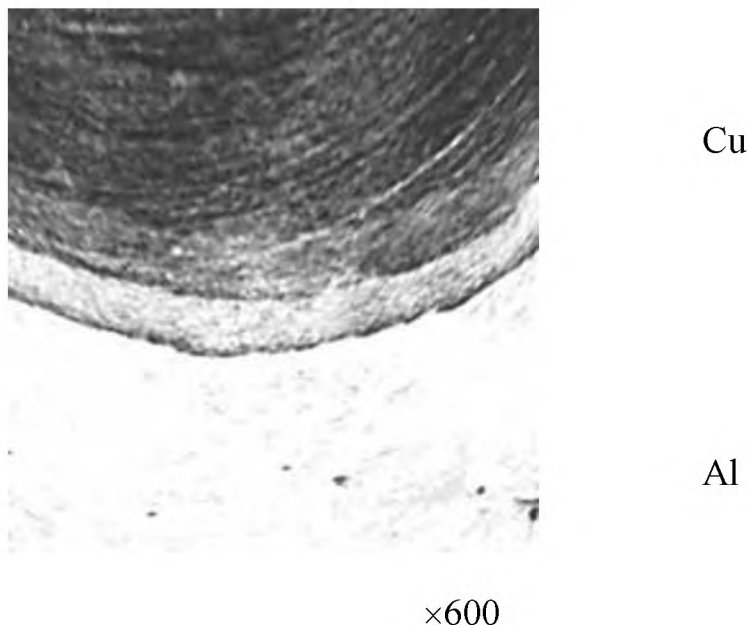


Рисунок 30 – Микроструктура зоны армирующего волокна после ТО (режим ТО № 4)

Толщину данных интерметаллидных прослоек определяли с помощью окуляр - микрометра. В каждом случае производили не менее 20 - 40 измерений, что позволило определять средние квадратичные отклонения. Применение более длительных выдержек от 8 до 20 часов выявляет, еще в большей степени, преимущественный рост прослойки со стороны меди по сравнению с прослойкой со стороны алюминия.

С увеличением температуры термообработки до 400 °С скорость возникновения и роста интерметаллидных прослоек увеличивается. Так выдержка в печи в течение 60 минут приводит к росту прослойки со стороны меди до 4,3 мкм, а со стороны сплава алюминия до 4 мкм, при этом появление прослоек наблюдается уже через 20 минут выдержки, в отличие от термообработки на 350 °С, когда появление прослоек наблюдалось только через 60 минут, что можно объяснить увеличе-

нием скорости процесса взаимной диффузии меди и алюминия. Нагрев в течение 12 часов не вызывает каких-либо новых изменений в скорости роста интерметаллидных прослоек, толщина прослойки со стороны меди достигает 14 мкм, а со стороны алюминия до 8,2 мкм.

При более высокой температуре 500 °С преимущественный рост наблюдается по-прежнему у прослойки со стороны меди. При этом выдержка в печи в течение 2 часов приводит к тому, что общая толщина интерметаллидных прослоек составляет уже около 35% от диаметра армирующего волокна, представленного на рисунке 30, а при выдержке 6 часов данная толщина составляет более 50 %.

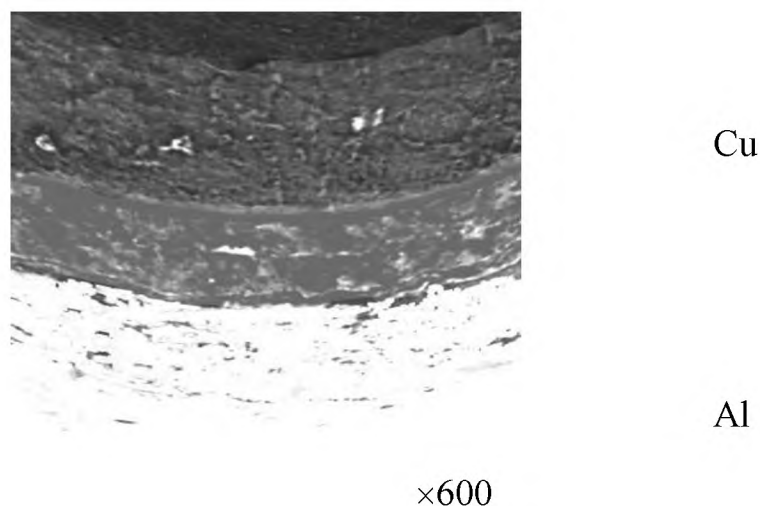
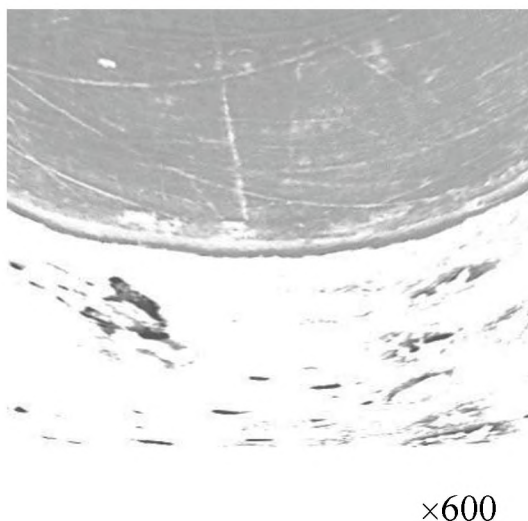


Рисунок 30 – Микроструктура зоны армирующего волокна после ТО (режим ТО № 26)

Термообработку композиционных материалов на основе титанового сплава марки ВТ1-0 армированных стальной проволокой марки Ст3 проводили в условиях вакуума, начиная с температуры 800 °С. При выдержке до 480 минут возникновения фазовых прослоек в зоне армирующего волокна не наблюдается.

Начиная с 480 минут в зоне контакта армирующего стального волокна с металлом матрицы, представленного на рисунке 31, зафиксировано образование двух интерметаллидных прослоек со стороны стали 2 мкм, а со стороны сплава титана – около 1 мкм.



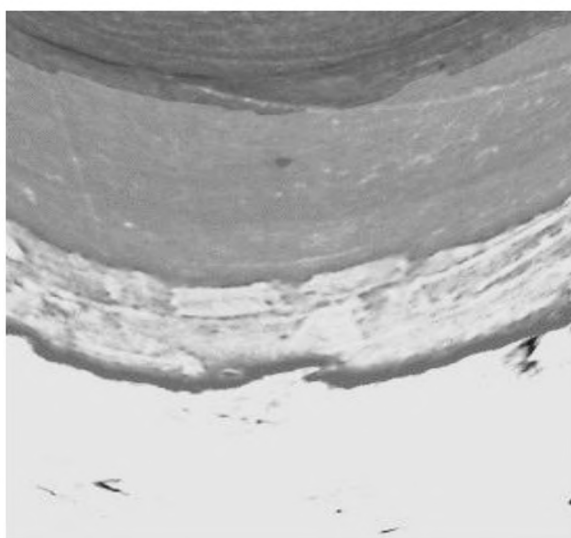
Сталь

Ti

×600

Рисунок 31 – Микроструктура зоны армирующего волокна после ТО (режим ТО № 5)

С увеличением температуры термообработки до 900 °С скорость возникновения и роста интерметаллидных прослоек увеличивается. Преимущественный рост наблюдается у прослойки со стороны армирующего волокна стали. При температуре нагрева 1000 °С и выдержке в печи в течение 8 часов общая толщина интерметаллидных прослоек составляет около 25% от диаметра армирующего волокна (рисунок 32).



Сталь

Ti

×600

Рисунок 32 – Микроструктура зоны армирующего волокна после ТО (режим ТО № 20)

Нагрев композиционного армированного материала до температуры 1100 °С и выдержка в печи в течение 6 часов, приводит к тому, что общая толщина интерметаллидных прослоек составляет более 50 % от диаметра армирующего волокна.

Анализ вышеуказанных данных, позволяет сделать вывод о том, что для композиционного армированного материала, полученного сваркой взрывом характерны, присущие только ему кинетические особенности роста прослоек интерметаллидов в зоне армирующих волокон.

С целью оценки влияния на прочность композиционного материала объема интерметаллической фазы, образованной по периферии армирующих волокон в ходе термической обработки был проведен комплекс исследований механических свойств образцов при испытании на одноосное растяжение на разрывной машине модели ИР 5145-500-11 по ГОСТ 1497-84 для каждого режима ТО.

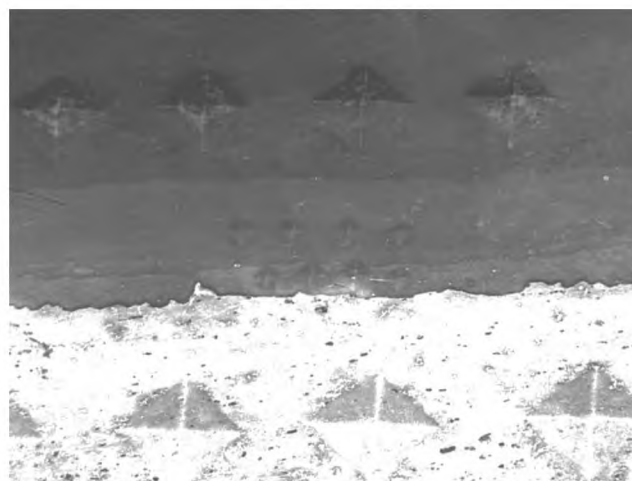
В ходе данного исследования было установлено, что максимальное значение прочности, порядка от 450 до 480 МПа, для образцов композиционных материалов на основе алюминиевого сплава марки АМг5М армированных медной проволокой марки М1 обеспечивает режим ТО №26 (см. табл. 8), при котором общая толщина интерметаллидных прослоек составляет уже около 35% от диаметра армирующего волокна меди. Данное значение прочности композиционного армированного материала превышает исходную прочность неармированного алюминиевого сплава марки АМг5М аналогичной толщины более чем на 50 %.

Для образцов композиционных материалов на основе титанового сплава марки ВТ1-0 армированных стальной проволокой марки Ст3 максимальное значение прочности, порядка от 580 до 610 МПа обеспечивает режим ТО №20 см. табл. 9, при котором общая толщина интерметаллидных прослоек составляет около 25% от диаметра армирующего волокна стали. Данное значение прочности композиционного армированного материала превышает исходную прочность неармированного титанового сплава марки ВТ1-0 аналогичной толщины более чем на 60 %.

3.1.5 Исследование состава и свойств интерметаллидных фаз образующихся при термической обработке в композиционном армированном материале

Как было установлено выше, в ходе термической обработки для образцов композиционных материалов на основе алюминиевого сплава марки АМг5М армированных медной проволокой марки М1 в зоне контакта армирующего медного волокна с металлом матрицы было зафиксировано образование двух интерметаллидных прослоек как со стороны стали, так и со стороны сплава титана, аналогичная картина была зафиксирована и для образцов композиционных материалов на основе титанового сплава марки ВТ1-0 армированных стальной проволокой марки Ст3. В этой связи большой интерес представляет детальное исследование количественного состава образующихся в ходе термической обработки интерметаллидных фаз.

С целью оценить влияние термической обработки на структурные преобразования в периферийной зоне армирующих волокон применяли исследование микротвердости зоны термического влияния и интерметаллидных прослоек методом Викерса согласно ГОСТ 9450-76 и ТУ 3-3.1377-83 на микротвердомере ИТ 5010-01. Измерение микротвердости, представленное на рисунке 33, производилось на 7-9 участках, как упрочненной зоны биметалла, так и интерметаллидной прослойки по 3-4 отпечатка на каждом.



×600

Рисунок 33 – Схема измерения микротвердости на образцов композиционных материалов на основе алюминиевого сплава марки АМг5М армированных медной проволокой марки М1 в зоне контакта армирующего медного волокна с металлом матрицы

Исследование проводилось на всех этапах термической обработки.

Исследования микротвердости интерметаллидных прослоек, образующихся по периферии армирующего волокна в ходе термической обработки показало, что микротвердость каждой из них имеет постоянное значение.

Так для образцов композиционных материалов на основе алюминиевого сплава марки АМг5М армированных медной проволокой марки М1 прослойка со стороны меди обладает наибольшей твердостью, равной HV от 4500 до 4600 Н/мм², прослойка со стороны алюминия HV от 3500 до 3600 Н/мм².

Для образцов композиционных материалов на основе титанового сплава марки ВТ1-0 армированных стальной проволокой марки Ст3 прослойка со стороны титана обладает наибольшей твердостью, равной HV от 8900 до 9100 Н/мм², прослойка со стороны стали HV от 5000 до 5200 Н/мм².

Для изучения свойств интерметаллидных соединений, образующихся по периферии армирующего волокна при термической обработке композиционного армированного материала, были проведены исследования количественного состава данных прослоек на различных режимах термической обработки.

Для определения пространственного распределения компонентов и количественной оценки состава прослойки фазы, образующейся по периферии армирующих волокон в ходе термической обработки композиционного материала применяли, так называемый, метод электронно-зондового количественного анализа. Данный метод [33] проводится, если необходимо точно определить химический состав микрообъемов вещества. Основным его преимуществом является возможность проведения элементарного анализа всех фаз или микросоставляющих, локализованных на поверхности или границах раздела металлов.

Для этих целей использовалась установка, основу которой составляет микроанализатор “JCSA-733”. Установка позволяет проводить рентгеноспектральный анализ в диапазоне элементов начиная с углерода ($Z=6$) до урана ($Z=92$) при ускоряющем напряжении до 50 кВ и токе зонда $10^{-11} - 10^{-6}$ А.

Методика анализа [34] основана на том, что спектрометр микроанализатора настраивают на длину волны излучения выбранного элемента и затем осуществляется перемещение электронного зонда по поверхности образца вдоль выбранного направления, либо перемещают образец под неподвижным электронным зондом с определенной скоростью.

В результате взаимодействия электронного пучка с исследуемым материалом имеют место два процесса, приводящие к возникновению рентгеновского излучения: торможение электронов ведет к возникновению сплошного или непрерывного спектра, и ионизация внутренних оболочек, сопровождающаяся характеристическим рентгеновским излучением. Для целей рентгеноспектрального микроанализа (рентгеновского микроанализа (РМА)) интерес представляет именно это излучение. Спектральный состав характеристического излучения зависит от элементного состава исследуемого образца (от атомных номеров входящих в его состав элементов). Обнаруженные при анализе вторичного излучения характерные линии в рентгеновском спектре указывают на наличие элемента с данным атомным номером, а интенсивность этих линий отражает количество этого элемента.

В основе способа регистрации (детектирования) характеристического излучения лежит соотношение Вульфа-Брэгга (2), а для его реализации используется кристалл-анализатор.

$$n\lambda = 2d \cdot \sin Q \quad (2)$$

где λ - длина волны излучения;

d - межплоскостное расстояние кристалла-анализатора;

Q - регистрируемый прибором угол брэгговского рассеяния;

n - порядок отражения.

Регистрация углов рассеяния при известных значениях n и d дает возможность определить спектральный состав излучения (набор длин волн).

Пучок электронов, сформированный и сфокусированный системой электронной пушки попадает на исследуемый образец, вторичные электроны, излученные в результате взаимодействия электронов зонда с веществом образца регистрируются сцинтилляционным детектором, сигнал с которого после усиления усилителем подается на систему электроннолучевой трубки (ЭЛТ). Система сканирования задает синхронизацию сканирования электронного зонда на поверхности образца с помощью катушек и луча на экране ЭЛТ. Одновременно со вторичными электронами возникает рентгеновское излучение, которое разлагается в спектр на кристаллической решетке анализатора. Компоненты спектра регистрируются детектором, сигнал с которого после усиления и преобразования подается на самописец. В результате на самописце получается график распределения данного элемента вдоль выбранного направления.

Были установлены следующие режимы работы микроанализатора:

- ускоряющее напряжение - 20 кВ;
- ток электронного зонда 0,3 - 0,8 нА;
- диаметр зонда 5 мкм;
- шаг сканирования на образце 1 мкм;

В связи с тем, что диаметр электронного пучка зонда анализатора равен 5 мкм сканирование зоны соединения с толщиной прослоек меньше этого значения невозможно. Для проведения количественного анализа требовалась специальная подготовка образцов. Для того, чтобы увеличить “зону раскрытия” интерметаллидной прослойки, плоскость образцов в области армирующих волокон сошлифовывали под углом α равным 6-7° (рисунок 34). Таким образом при исходных толщинах прослоек h_1 и h_2 удалось “раскрыть” их в соответствии с соотношением:

$$\sin \alpha = \frac{h_n}{S_n}, \quad (3)$$

где α -угол скоса образца;

h_n -толщина прослойки фазы в поперечном сечении;

S_n -длина зоны “раскрытия” прослойки фазы до величин S_1 и S_2 на плоскости и увеличить протяженность интерметаллидной зоны до 7-8 раз.

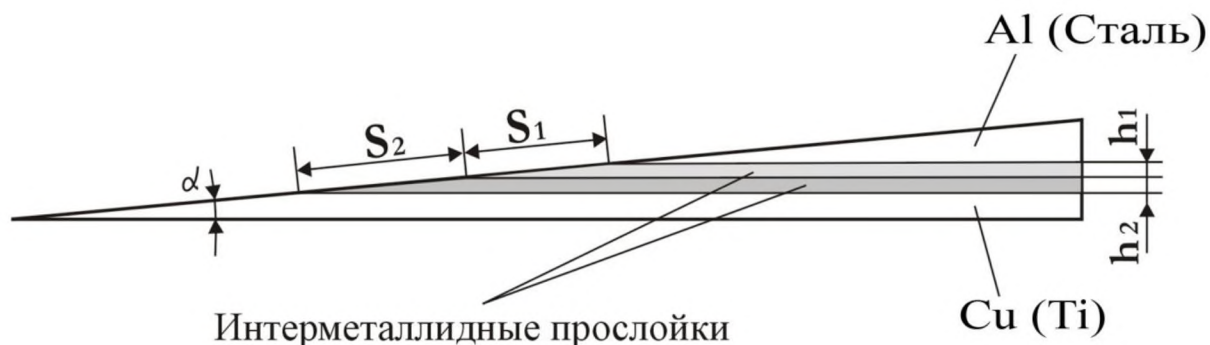


Рисунок 34 – Схема подготовки образцов для количественного анализа

Сравнительную оценку состава прослоек интерметаллидных фаз проводили не менее чем на десяти образцах, прошедших термическую обработку на режимах, указанных в таблицах 8 и 9.

Как следует из кривых количественного анализа в исследуемых образцах четко обнаруживались две видимых прослойки I и II.

Так для образцов композиционных материалов на основе алюминиевого сплава марки АМг5М армированных медной проволокой марки М1 прослойка со сторо-

ны сплава алюминия I соответствует фазе CuAl_6 , а прослойка со стороны армирующего волокна меди II фазе CuAl_2 . Для образцов композиционных материалов на основе титанового сплава марки ВТ1-0 армированных стальной проволокой марки Ст3, представленного на рисунке 35, прослойка со стороны армирующего волокна стали I соответствует фазе TiFe , а прослойка со стороны сплава титана II соответствует фазе Ti_2Fe .

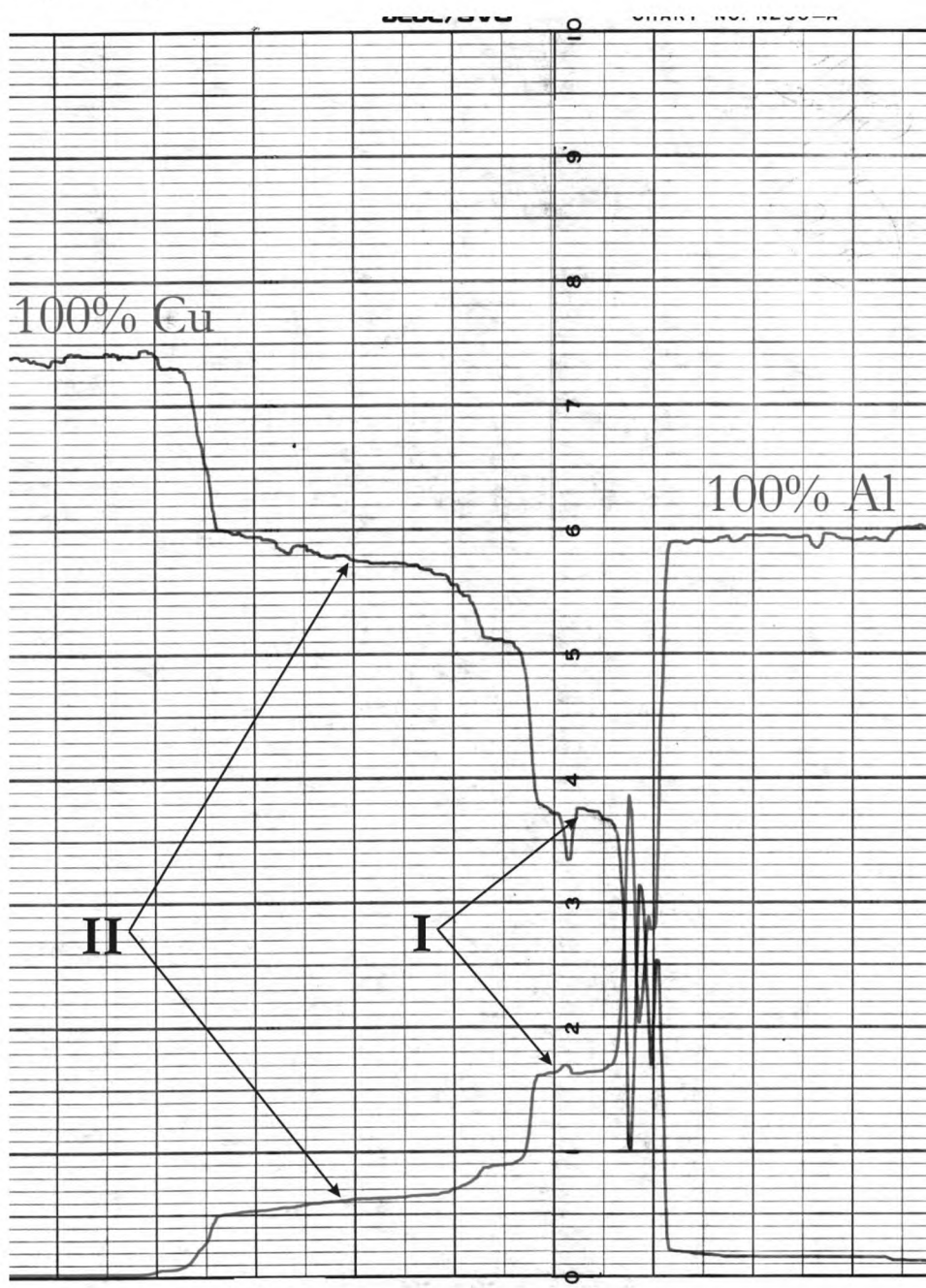


Рисунок 35 – Диаграмма распределения меди и алюминия в зоне образования интерметаллидных прослоек (ТО 500 °С, выдержка 2 часа)

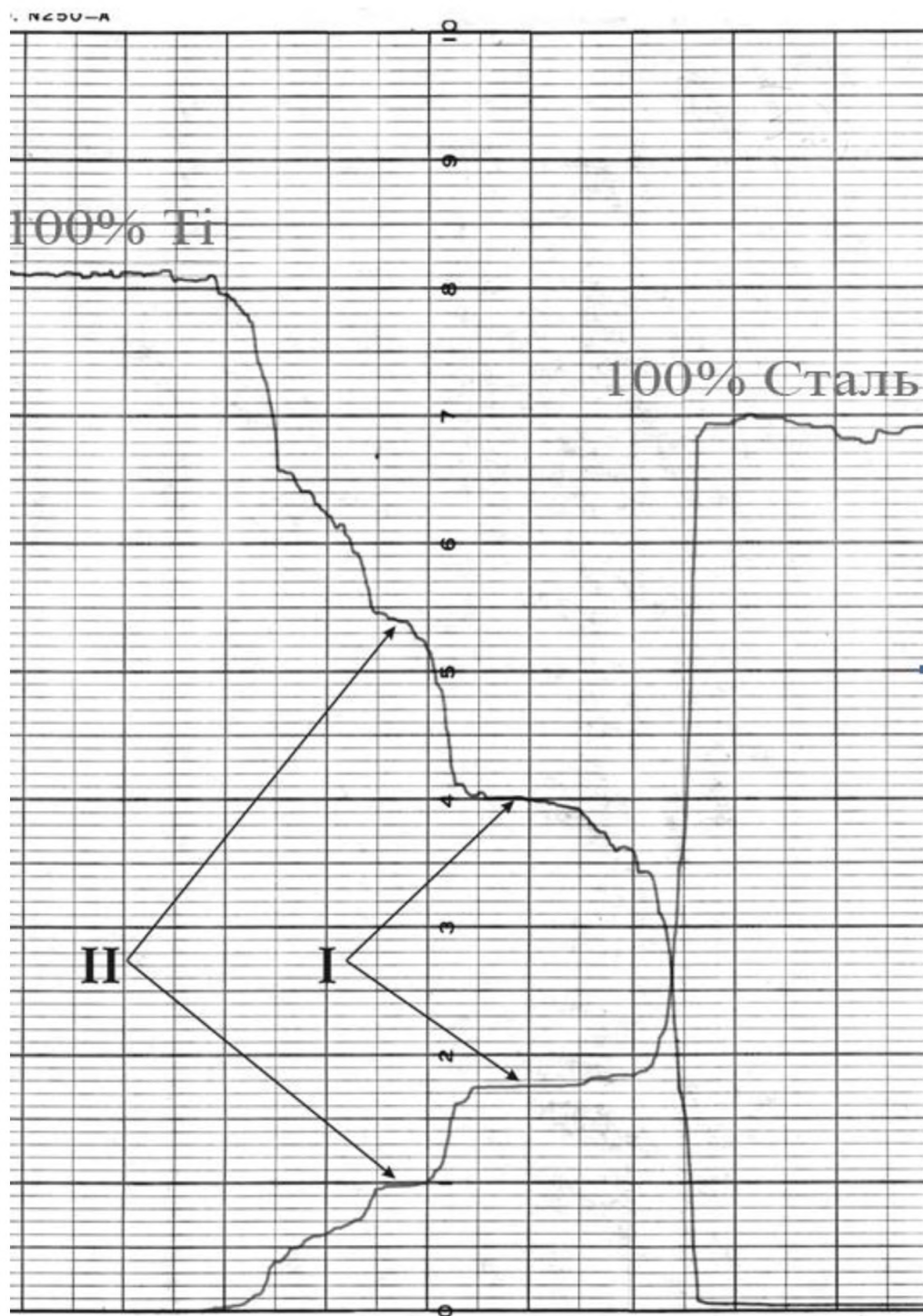


Рисунок 36 – Диаграмма распределения титана и стали поперек в зоне образования интерметаллидных прослоек (ТО 1000 °С, выдержка 8 часов)

Выводы по третьей главе:

– исследованы механические свойства и микроструктура композиционных армированных материалов, полученных сваркой взрывом. На основании данных исследований определены рациональные параметры ударно-волнового нагружения, обеспечивающие наиболее благоприятную конфигурацию сварного шва и отсутствие зон расплава в зоне контакта армирующего волокна с металлом матрицы. Так, для образцов композиционных материалов на основе алюминиевого сплава марки АМг5М армированных медной проволокой марки М1 скорость точки контакта составила 1900 м/с, а скорость соударения от 595 до 650 м/с, для образцов композиционных материалов на основе титанового сплава марки ВТ1-0 армированных стальной проволокой марки Ст3 скорость точки контакта 2690 м/с, и скорость соударения от 500 до 530 м/с;

– установлено, что образцы композиционных армированных материалов, сваренные на рациональных режимах, характеризуются высокими прочностными характеристиками. Так для образцов композиционных материалов на основе алюминиевого сплава марки АМг5М армированных медной проволокой марки М1 прочность составляет от 360 до 380 МПа, что превышает исходную прочность неармированного алюминиевого сплава марки АМг5М аналогичной толщины более чем на 35 %. Для образцов композиционных материалов на основе титанового сплава марки ВТ1-0 армированных стальной проволокой марки Ст3 прочность составляет от 510 до 540 МПа, что превышает исходную прочность неармированного титана более чем на 40 %.

– соединения, полученные на завышенных скоростных режимах, как по скорости точки контакта, так и по скорости соударения характеризуются более низкой прочностью, в зоне сварного шва данных соединений наблюдаются участки локального оплавления армирующих волокон, толщина и протяженность которых меняется в зависимости от параметров сварки.

– исследована возможности исключение возникающего непровара по периметру контакта волокно–матрица для композиционных материалов на основе алюминиевого сплава марки АМг5М армированных медной проволокой марки М1, а

также для композиционных материалов на основе титанового сплава марки ВТ1-0 армированных стальной проволокой марки Ст3

Установлено, что количество непроваров снижается с использованием проволоки меньшего сечения до 0,5 мм и армирующих элементов с овальным сечением (прокатанная проволока). Установлено, что для образования качественного соединения волокна и матрицы без образования промежуточных прослоек и непровара, рационально использовать сварочный зазор между матричными пластинами равный 3 мм.

– изучено влияния параметров термической обработки композиционных материалов на формирование заданного комплекса механических свойств. Установлено, что в ходе термической обработки для образцов композиционных материалов на основе алюминиевого сплава марки АМг5М армированных медной проволокой марки М1 в зоне контакта армирующего медного волокна с металлом матрицы происходит образование двух интерметаллидных прослоек как со стороны стали, так и со стороны сплава титана, аналогичная картина была зафиксирована и для образцов композиционных материалов на основе титанового сплава марки ВТ1-0 армированных стальной проволокой марки Ст3.

Оценка влияния на прочность композиционного материала объема интерметаллической фазы, образованной по периферии армирующих волокон в ходе термической обработки показала, что максимальное значение прочности, порядка 450-480 МПа, для образцов композиционных материалов на основе алюминиевого сплава марки АМг5М армированных медной проволокой марки М1 обеспечивает нагрев до 500 °С с выдержкой в печи в течение 2 часов, при котором общая толщина интерметаллидных прослоек составляет около 35% от диаметра армирующего волокна меди. Данное значение прочности композиционного армированного материала превышает исходную прочность неармированного алюминиевого сплава марки АМг5М аналогичной толщины более чем на 50 %.

Для образцов композиционных материалов на основе титанового сплава марки ВТ1-0 армированных стальной проволокой марки Ст3 максимальное значение прочности, порядка от 580 до 610 МПа обеспечивает нагрев до 1000 °С с выдержкой в

печи в течение 8 часов, при котором общая толщина интерметаллидных прослоек составляет около 25% от диаметра армирующего волокна стали. Данное значение прочности композиционного армированного материала превышает исходную прочность неармированного алюминиевого сплава марки АМг5М аналогичной толщины более чем на 60 %.

– микрорентгеноспектральным электронно-зондовым анализом произведена количественная оценка состава интерметаллидных прослоек образующихся в ходе термической обработки у образцов композиционных материалов в зоне контакта армирующего волокна с металлом матрицы. Установлено, что для образцов композиционных материалов на основе алюминиевого сплава марки АМг5М армированных медной проволокой марки М1 прослойка со стороны сплава алюминия соответствует фазе CuAl_6 , а прослойка со стороны армирующего волокна меди фазе CuAl_2 . Для образцов композиционных материалов на основе титанового сплава марки ВТ1-0 армированных стальной проволокой марки Ст3 прослойка со стороны армирующего волокна стали соответствует фазе TiFe , а прослойка со стороны сплава титана соответствует фазе Ti_2Fe .

Заключение

В соответствии с техническим заданием на магистерскую диссертацию был проведен аналитический и патентный обзор в области разработки основ получения высокопрочных композиционных материалов с интерметаллическим упрочнением. В работе были показаны основные схемы армирования композиционных материалов и дана их краткая характеристика. Разработана плоская схема армирования титана BT1-0 и алюминия АМг5М медной проволокой марки М1 и стальной проволокой марки Ст3. В ходе работы были рассчитаны кинематические (параметры V_0 – скорость метаемой пластины, β – угол поворота метаемой пластины, γ – угол соударения, V_k – скорость движения точки контакта) и физические (динамические, p – давление соударения, t – длительность соударения, T – температура в зоне соударения). Произведен выбор взрывчатых веществ и корректировка параметров ударно-волнового нагружения в условиях открытого полигона.

Изучены методика проведения испытаний механических свойств высокопрочных армированных композиционных материалов. Исследовано влияние состава взрывчатого вещества на образование поверхностных дефектов композиционного материала с матрицей из сплавов АМг5М и BT1-0. Установлено, что наилучшее качество поверхности при сварке взрывом композитов на основе сплава АМг5М обеспечивает ВВ – игданит, а на основе сплава BT1-0 – АТ-1. Исследованы механические свойства и микроструктура композиционных армированных материалов, полученных сваркой взрывом. На основании данных исследований определены рациональные параметры ударно-волнового нагружения, обеспечивающие наиболее благоприятную конфигурацию сварного шва и отсутствие зон расплава в зоне контакта армирующего волокна с металлом матрицы. Так, для образцов композиционных материалов на основе алюминиевого сплава марки АМг5М армированных медной проволокой марки М1 скорость точки контакта составила 1900 м/с, а скорость соударения от 595 до 650 м/с, для образцов композиционных материалов на основе титанового сплава марки BT1-0 армирован-

ных стальной проволокой марки Ст3 скорость точки контакта 2690 м/с, и скорость соударения от 500 до 530 м/с.

Установлено, что образцы композиционных армированных материалов, сваренные на рациональных режимах, характеризуются высокими прочностными характеристиками. Так для образцов композиционных материалов на основе алюминиевого сплава марки АМг5М армированных медной проволокой марки М1 прочность составляет 360-380 МПа, что превышает исходную прочность неармированного алюминиевого сплава марки АМг5М аналогичной толщины более чем на 35 %. Для образцов композиционных материалов на основе титанового сплава марки ВТ1-0 армированных стальной проволокой марки Ст3 прочность составляет от 510 до 540 МПа, что превышает исходную прочность неармированного титана более чем на 40 %.

Соединения, полученные на завышенных скоростных режимах, как по скорости точки контакта, так и по скорости соударения характеризуются более низкой прочностью, в зоне сварного шва данных соединений наблюдаются участки локального оплавления армирующих волокон, толщина и протяженность которых меняется в зависимости от параметров сварки.

Исследована возможности исключение возникающего непровара по периметру контакта волокно–матрица для композиционных материалов на основе алюминиевого сплава марки АМг5М армированных медной проволокой марки М1, а также для композиционных материалов на основе титанового сплава марки ВТ1-0 армированных стальной проволокой марки Ст3

Установлено, что количество непроваров снижается с использованием проволоки меньшего сечения до 0,5 мм и армирующих элементов с овальным сечением (прокатанная проволока). Установлено, что для образования качественного соединения волокна и матрицы без образования промежуточных прослоек и непровара, рационально использовать сварочный зазор между матричными пластинами равный 3 мм.

Изучено влияния параметров термической обработки композиционных материалов на формирование заданного комплекса механических свойств.

Установлено, что в ходе термической обработки для образцов композиционных материалов на основе алюминиевого сплава марки АМг5М армированных медной проволокой марки М1 в зоне контакта армирующего медного волокна с металлом матрицы происходит образование двух интерметаллидных прослоек как со стороны стали, так и со стороны сплава титана, аналогичная картина была зафиксирована и для образцов композиционных материалов на основе титанового сплава марки ВТ1-0 армированных стальной проволокой марки Ст3.

Оценка влияния на прочность композиционного материала объема интерметаллической фазы, образованной по периферии армирующих волокон в ходе термической обработки показала, что максимальное значение прочности, порядка от 450 до 480 МПа, для образцов композиционных материалов на основе алюминиевого сплава марки АМг5М армированных медной проволокой марки М1 обеспечивает нагрев до 500 °С с выдержкой в печи в течение 2 часов, при котором общая толщина интерметаллидных прослоек составляет около 35% от диаметра армирующего волокна меди. Данное значение прочности композиционного армированного материала превышает исходную прочность неармированного алюминиевого сплава марки АМг5М аналогичной толщины более чем на 50 %.

Для образцов композиционных материалов на основе титанового сплава марки ВТ1-0 армированных стальной проволокой марки Ст3 максимальное значение прочности, порядка от 580 до 610 МПа обеспечивает нагрев до 1000 °С с выдержкой в печи в течение 8 часов, при котором общая толщина интерметаллидных прослоек составляет около 25% от диаметра армирующего волокна стали. Данное значение прочности композиционного армированного материала превышает исходную прочность неармированного алюминиевого сплава марки АМг5М аналогичной толщины более чем на 60 %.

Микрорентгеноспектральным электронно-зондовым анализом произведена количественная оценка состава интерметаллидных прослоек образующихся в ходе термической обработки у образцов композиционных материалов в зоне контакта армирующего волокна с металлом матрицы. Установлено, что для образцов композиционных материалов на основе алюминиевого сплава марки АМг5М армирован-

ных медной проволокой марки М1 прослойка со стороны сплава алюминия соответствует фазе CuAl_6 , а прослойка со стороны армирующего волокна меди фазе CuAl_2 . Для образцов композиционных материалов на основе титанового сплава марки ВТ1-0 армированных стальной проволокой марки Ст3 прослойка со стороны армирующего волокна стали соответствует фазе TiFe , а прослойка со стороны сплава титана соответствует фазе Ti_2Fe .

Библиографический список

1. **Арзамасов, Б. Н. Материаловедение : учеб. для вузов [Текст] / Б. Н. Арзамасов, В. И. Макарова, Г. Г. Мухин. – 5-е изд. стер. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. – 648 с.**
2. **Металлы и сплавы : справочник [Текст] / В. К. Афонин, Б. С. Ермакова, Е. Л. Лебедев и др.. – СПб. : Профессионал: Мир и Семья, 2006. – 1090 с.**
3. **Король, В. К. Основы технологии производства многослойных металлов [Текст] / В. К. Король, М. С. Гильденгорн. – М. : Металлургия, 1970. – 237 с.**
4. **Батаев, А. А. Композиционные материалы: строение, получение, применение [Текст] : учеб. / А. А. Батаев, В. А. Батаев. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2002. – 383 с.**
5. **Ильин, А. А. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства : справочник [Текст] / А. А. Ильин, Б. А. Колачев, И. С. Полькин. – М. : ВИЛС – МАТИ, 2009. – 520 с.**
6. **Зубков, Л. Б. Космический металл: все о титане [Текст] / Л. Б. Зубков. – М. : Наука, 1987. – 128 с.**
7. **Titanium'2003: Science and Technology : Proc. 10th World Conf. on Titanium. V. 1–5 [Text]. – Hamburg, Germany, 2003. – 3425 p.**
8. **Крюков, Д.Б. Исследование влияния конфигурации упрочняющих элементов на прочностные свойства моделей композиционных материалов системы титан-алюминий / Д.Б. Крюков, А.В. Прыщак, М.С. Гуськов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. - №4 (32). – С. 112-119.**
9. **Proc. of the 10th World conf. on titanium held at the CCH-Congress Center «Ti-2003», 13-18 july 2003 [Text] : in 5 vol. / ed.: G. Luetjering, J. Albrecht. – Wiley : VCH Verlag, 2004. – V. 1–5. – 3425 p.**
10. **Павлюкова, Д. В. Структура и механические свойства слоистых материалов на основе титана и алюминия, полученных по технологии сварки**

взрывом и дополнительной термической обработки [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.16.09 / Павлюкова Д. В. – Новосибирск, 2011. – 237 с.

11. **Чечулин, Б. Б. Титановые сплавы в машиностроении** [Текст] / Б. Б. Чечулин. – Л. : Машиностроение, 1977. – 248 с.

12. **Борисова, Е. А. Жаропрочные титановые сплавы** [Текст] / Е. А. Борисова, В. М. Ильенко. - М. : Металлургия, 1996. – 384 с.

13. **Глазунов, С. Г. Жаропрочные сплавы на основе титана** [Текст] / С. Г. Глазунов. – М. : Оборингиз, 1958. – 77 с.

14. **Трыков, Ю. П. Слоистые композиты на основе алюминия и его свойства** [Текст] / Ю. П. Трыков, Л. М. Гуревич, В. Г. Шморгунов. – М. : Металлургиздат, 2004. – 230 с.

15. **Гольдман А. Я. Прогнозирование деформационно-прочностных свойств полимерных и композиционных материалов.** [Текст] / А. Я. Гольдман – Л. : Химия, 1988.

16. **Костиков, В. И. Композиционные материалы на основе алюминиевых сплавов, армированных углеродными волокнами** [Текст] / В. И. Костиков, А. Н. Вареников. – М. : Интермет Инжиниринг, 2000. – 446 с.

17. **Способ получения композиционного материала** [Текст] пат. 2522505 Российская Федерация, МПК В32В 7/04 В32В 15/01 В23К20/08. / Розен А. Е., Крюков Д. Б., Гуськов М. С. [и др.] ; заявитель и патентообладатель: Общество с ограниченной ответственностью Инженерно-технологический центр «Сварка». – № 2013119389/02 ; заявл. 26.04.2013 ; опубл. 20.07.14, Бюл. № 20. – 8 с.

18. **Композиционный материал на основе титанового сплава и способ его получения** [Текст] пат. 2647963 Российская Федерация, МПК В32В 7/02 С22F 1/02. / Агарков Г. А., Близник М. Г. [и др.] ; заявитель и патентообладатель: Общество с ограниченной ответственностью «ТБ композит». – № 2016131959 расчет; заявл. 03.08.2016 ; опубл. 21.03.18, Бюл. № 9. – 8 с.

19. **Многослойный композиционный материал и способ его изготовления** [Текст] пат. 2030293 Российская Федерация, МПК В32В 7/04 В22F 15/01. / Мор-

гунов С.В., Митин Б.С., Распопов Н.А. [и др.] ; заявитель и патентообладатель: Научно-производственное объединение «Композит». – № 154613199 расчет; заявл. 03.08.1990 ; опубли. 21.03..1990, Бюл. № 9. – 8 с.

20. **Способ получения композиционного материала** [Текст] пат. 2221682 Российская Федерация, МПК В32В 15/01 В23К 20/08. / Трыков Ю.П., Писарев С.П., Проничев Д.В. [и др.] ; заявитель и патентообладатель: Волгоградский государственный университет. – № 2002111280/02 расчет; заявл. 25.04.2002 ; опубли. 20.01.2004, Бюл. № 2. – 5 с.

21. **Способ получения композиционного материала титан-сталь** [Текст] пат. 2463141 Российская Федерация, МПК В32В 7/04 В23К 20/08 В32В 15/01. / Трыков Ю.П., Писарев С.П., Шморгцн В.Г., Гуревич Л.М. [и др.] ; заявитель и патентообладатель: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). – № 2011114535/02 расчет; заявл. 13.04.2011; опубли. 10.10.2012, Бюл. № 28. – 7 с.

22. **Способ сварки металлов взрывом** [Текст] пат. 94015428 Российская Федерация, В23К 20/08. / Алексеев Ю.Л., Алексеев А.Ю.; заявитель и патентообладатель: Алексеев Ю.Л., Алексеев А.Ю. – № 94015428/02 расчет; заявл. 26.04.1994; опубли. 20.04.1997, Бюл. № 3. – 9 с.

23. **Крюков, Д. Б. Особенности получения композиционных металло-керамических материалов повышенной механической прочности и термостабильности для изделий авиационной техники** [Электронный ресурс] : сб. тезисов Всерос. конф. по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат-2012» / Д. Б. Крюков, А. В. Хорин, А. О. Кривенков. – Электрон. дан. – М. : ФГУП «ВИ-АМ», 2012. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM) ; 12см. – Систем. требования: Pentium II и выше ; от Windows 95 ; CD-ROM дисковод ; мышь. – Загл. с контейнера. – Всероссийской конференции по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат-2012» (Москва, 2012).

24. **Дерибас, А. А. Физика упрочнения и сварки взрывом** [Текст] / А. А. Дерибас. – 2-е изд., доп. и перераб. – Новосибирск : Наука, 1980. – 222 с.

25. **Петушков, В.Г. Применение взрыва в сварочной технике** [Текст] / В.Г. Петушков. – Киев: Наукова думка, 2005. – 754 с.
26. **Зилова, Т. К. Методы испытания, контроля и исследования машиностроительных материалов** [Текст] / Т. К. Зилова, Н. И. Новосильцева. – М. : Машиностроение, 1974. – С. 202–222.
27. **Трыков, А. Ю. Особенности деформации и разрушения биметалла титан-сталь** [Текст] / А. Ю. Трыков, В. П. Белоусов // Получение и обработка материалов высоким давлением : сб. докладов V Всесоюз. конф. – Минск, 1987. – С. 28–29.
28. **Металлы. Методы испытаний на растяжение.** [Текст]. – ГОСТ 1497-84. - Введ. 1986-01-01. – М. : Изд-во стандартов, 1984. – 24 с.
29. **Чугунов, Е. А. Методика изучения пластического течения металла в околошовной зоне при сварке взрывом** [Текст] / Е. А. Чугунов, В. И. Лысак, С. В. Кузьмин // Материалы I межвузовской научно-практической конференции студентов и молодых ученых Волгоградской области. – Волгоград, 1994.
30. **Захарченко, В. В. Прокатка биметалла титан-алюминий** [Текст] / В. В. Захарченко, В. М. Белицкий, В. А. Титов // Обработка металлов давлением в машиностроении. – Харьков, 1982. – Вып. 18. – С. 83–87.
31. **Новая методика исследования пластического течения металла при сварке взрывом** [Текст] / Е. А. Чугунов, В. И. Лысак, С. В. Кузьмин и др. // XXIII Гагаринские чтения : сб. тезисов докладов Рос. молодежной науч. конф. – М., 1997.
32. **Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников.** [Текст]. ГОСТ 9450-76– Введ. 1977-01-01. – М. : Изд-во стандартов, 1993. – 13 с.
33. **Вольдсет, Р. Прикладная спектрометрия рентгеновского излучения :** пер. с англ. [Текст] / Р. Вольдсет. – М. : Атомиздат, 1977.
34. **Лосев, Н. Ф. Количественный рентгеноспектральный флуоресцентный анализ** [Текст] / Н. Ф. Лосев. – М. : Наука, 1969.
35. **Колачев, Б. А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов :** учеб. для студентов вузов, обучающихся по специально-

сти «Металловедение и терм. обработка металлов» [Текст] / Б. А. Колачев, В. И. Елагин, В. А. Ливанов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : МИСИС, 2001. – 413 с.

36. Меркулова, Г. А. Metalловедение и термическая обработка цветных сплавов : учеб. пособие [Текст] / Г. А. Меркулова. – Красноярск, 2008. – 312 с.

37. Metalлография титановых сплавов : справочник [Текст] / Е. А. Борисова, Г. А. Бочвар, М. Я. Брун и др. – М. : Metalлургия, 1980. – 464 с.

38. Титановые сплавы. Metalловедение титана и его сплавов : справочник [Текст] / С. П. Белов, М. Я. Брун, С. Г. Глазунов. – М. : Metalлургия, 1992. – 352 с.

39. Вульф, Б. К. Термическая обработка титановых сплавов [Текст] / Б. К. Вульф. – М. : Metalлургия, 1969. – 374 с.

«ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ФАКУЛЬТЕТ МАШИНОСТРОЕНИЯ И ТРАНСПОРТА
КАФЕДРА «СВАРОЧНОЕ, ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ»
НАПРАВЛЕНИЕ ПОДГОТОВКИ « МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ
МАТЕРИАЛОВ»

Магистерская диссертация на тему:
«Разработка технологических основ получения
высокопрочных композиционных материалов с
интерметаллическим упрочнением и
исследование их структуры и свойств»

Выполнил: ст. гр. 16МТм1

Гуськов Д.О.

Руководитель: к.т.н., доцент

Крюков Д.Б.

Пенза, 2018

Научная новизна и актуальность работы

Актуальность работы: В настоящее время, продолжается дальнейшее всестороннее развитие данной отрасли и, несмотря на то, что уже существует несколько десятков схем получения композиционных материалов, возникает необходимость в разработке новых схем, позволяющих регулировать комплекс свойств композиционного материала. В частности, малоизученным остаётся вопрос по исследованию влияния различных конструктивных элементов в промежуточном слое на конечные механические и прочностные свойства композиционного материала в целом.

Научная новизна: разработка технологии получения слоистого композиционного материала сваркой взрывом и последующей термической обработкой, обеспечивающей высокий модуль упругости и предел прочности композита при растяжении с высокой прочностью сварного соединения.

Цели и задачи магистерской диссертации

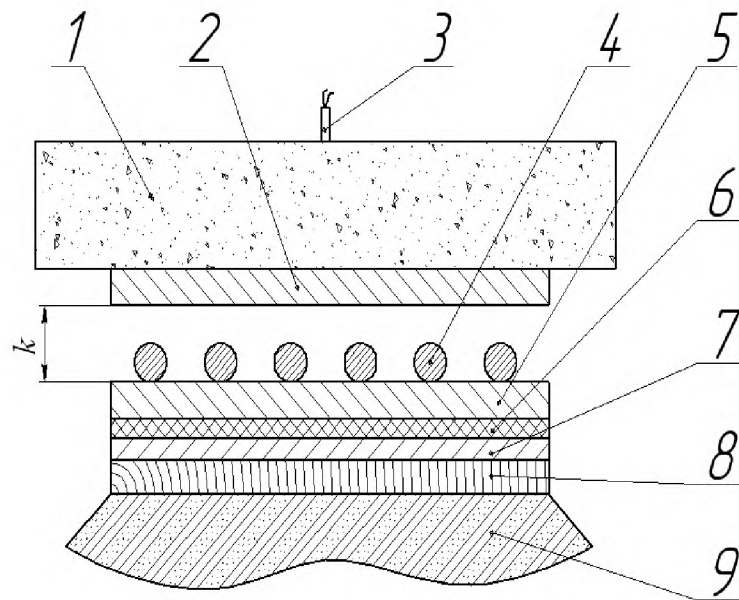
Цель работы: Разработка технологических основ получения высокопрочных композиционных материалов с интерметаллическим упрочнением.

Для решение поставленной цели, были решены следующие задачи:

1. Провести аналитический обзор в области получения и изучения высокопрочных композиционных материалов;
2. Провести патентный обзор в исследуемой области;
3. Изучить способы получения армирования высокопрочных композиционных материалов;
4. Выбрать рациональные параметры сварки взрывом при армировании композиционных материалов и исследовать влияние параметров сварки взрывом на микроструктуру и степень упрочнения композиционных материалов;
5. Изучить методику проведения механических испытаний высокопрочных композиционных материалов
6. Изучить влияние параметров термической обработки композиционных материалов на формирование заданного комплекса механических свойств;
7. Изучить и исследовать состав и свойства интерметаллидных фаз, образующихся при термической обработке в композиционном армированном материале.

Общие данные об объекте исследования

Согласно техническому заданию магистерской диссертации для получения листовых полуфабрикатов высокопрочного композиционного материала в качестве материала матрицы выбраны алюминиевый сплав АМг5М и титановый сплав ВТ1-0 толщиной 2 мм, размером 250×150 мм. В качестве армирующих волокон использовали медную проволоку марки М1 и стальную проволоку марки Ст3 диаметром 1,0 мм.

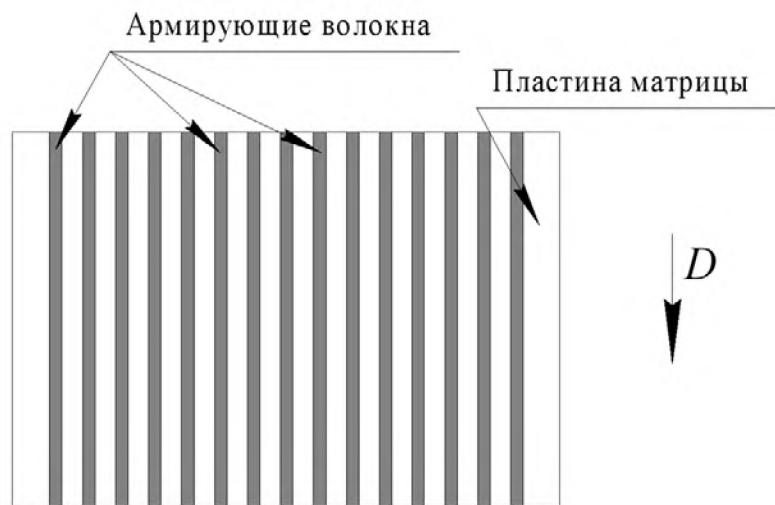


Параллельная схема армирования проволокой:

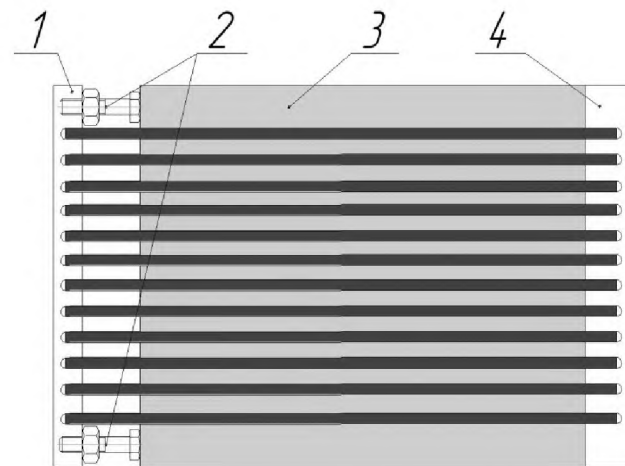
- 1 – заряд ВВ;
- 2 – метаемая пластина матрицы;
- 3 – электродетонатор;
- 4 – проволока;
- 5 – неподвижная пластина матрицы;
- 6 – изоляционный слой;
- 7 – стальное основание;
- 8 – дополнительное основание;
- 9 – грунт;
- k – зазор между матричными пластинами

Технологические особенности способа получения высокопрочных армированных композиционных металлических материалов сваркой взрывом

Сварка взрывом осуществлялась в условиях открытого полигона. Для уменьшения деформации прогиба полуфабрикатов использованы стальные основания толщиной 5 мм. Для увеличения высоты обрубki метаемой пластины использовали дополнительное основание из дерева. На рисунках ниже показаны схемы расположения армирующих элементов между матричными листами.



Схематичное расположение волокон (вид сверху): D – направление распространения фронта детонационной волны показано стрелкой



Механизм закрепления и ориентация армирующих волокон: 1 – уголок, 2 – регулирующее болтовое соединение, 3 – неподвижная пластина матрицы, 4 – металлическая дополнительная пластина

**Режимы и результаты расчета основных параметров процесса сварки образцов
композиционного материала на основе сплава АМг5М армированного медной
проволокой марки М1**

Режим сварки	Тип взрывчатого вещества	Исходные параметры сварки				Результаты расчета		
		Взрывчатое вещество			Величина зазо- ра между пла- стинами k , мм	V_K , м/с	V_C , м/с	γ , град
		D_{BB} , м/с	H_{BB} , мм	ρ_{BB} , г/см ³				
1	АТ-1	2000	15	0,9	2	2000	535	15° 22'
2	АТ-1	2000	15	0,9	3	2000	570	16° 23'
3	АТ-1	2240	20	0,9	2	2240	650	16° 41'
4	АТ-1	2240	20	0,9	3	2240	670	17° 12'
5	АТ-1	2400	25	0,9	2	2400	730	17° 30'
6	АТ-1	2400	25	0,9	3	2400	800	19° 11'
7	Игданит	1780	25	0,84	2	1780	515	16° 38'
8	Игданит	1780	25	0,84	3	1780	555	17° 56'
9	Игданит	1900	30	0,84	2	1900	595	18° 1'
10	Игданит	1900	30	0,84	3	1900	650	19° 41'
11	Игданит	2040	35	0,84	2	2040	615	17° 20'
12	Игданит	2040	35	0,84	3	2040	665	18° 46'

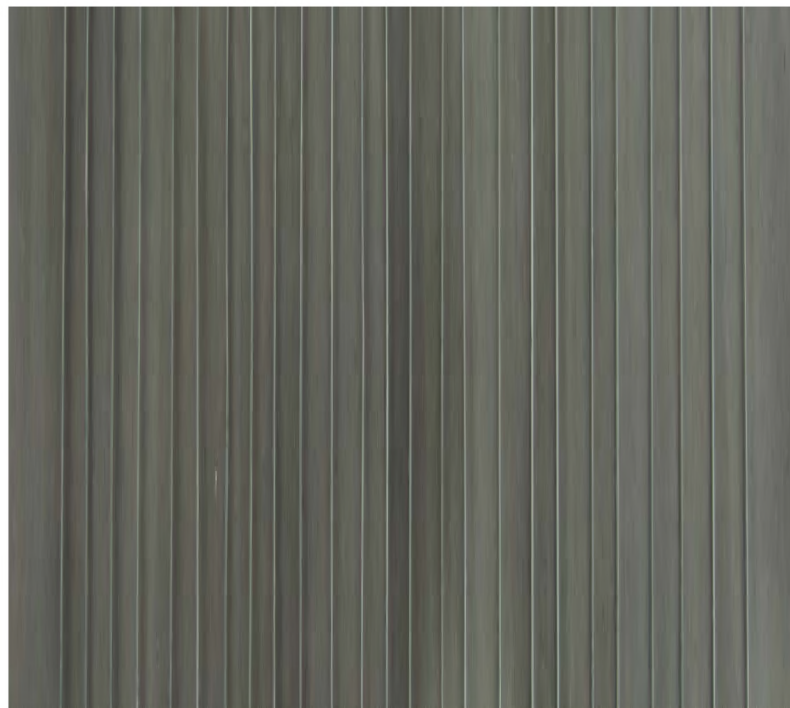
**Режимы и результаты расчета основных параметров процесса сварки
образцов композиционного материала на основе сплава ВТ1-0
армированного стальной проволокой марки Ст3**

Режим сварки	Тип взрывчатого вещества	Исходные параметры сварки				Результаты расчета		
		Взрывчатое вещество			Величина зазора между пластинами k , мм	V_k , м/с	V_c , м/с	γ , град
		$D_{вв}$, м/с	$H_{вв}$, мм	$\rho_{вв}$, г/см ³				
1	АТ-1	2329	20	0,9	3	2330	320	7°9'
2	АТ-1	2329	20	0,9	4	2330	330	8°1'
3	АТ-1	2689	40	0,9	3	2690	500	10°6'
4	АТ-1	2689	40	0,9	4	2690	530	11° 3'
5	АТ-1	2986	60	0,9	3	2985	620	11°9'
6	АТ-1	2986	60	0,9	4	2985	665	12°8'
7	Игданит	1900	30	0,84	3	1900	305	9°2'
8	Игданит	1900	30	0,84	4	1900	320	9°7'
9	Игданит	2040	35	0,84	3	2040	350	9°8'
10	Игданит	2040	35	0,84	4	2040	370	10°4'
11	Игданит	2200	40	0,84	3	2200	395	10°3'
12	Игданит	2200	40	0,84	4	2200	420	10°9'

Расположение армирующих элементов на матрице



Расположение волокон при армировании сплава
АМг5М медной проволокой марки М1



Расположение волокон при армировании сплава ВТ1-0
стальной проволокой марки Ст3

Внешний вид образцов после сварки взрывом



Разрушение образца при сварке взрывом
на форсированных режимах

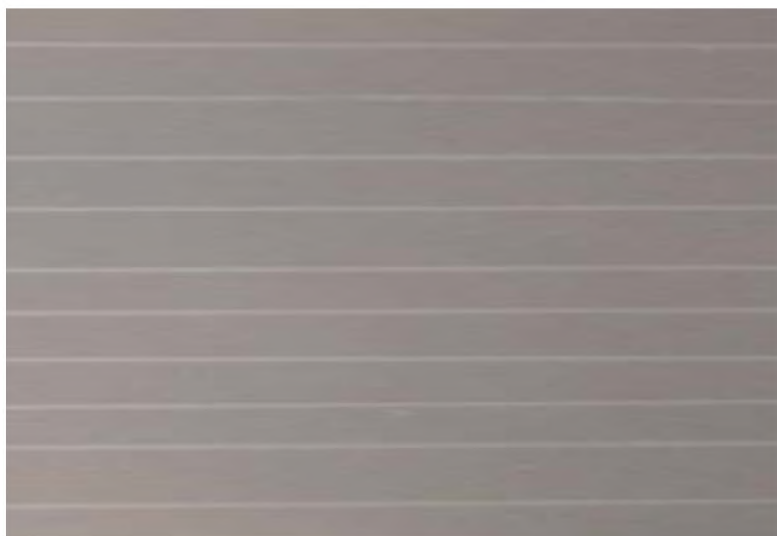


Внешний вид армированного композиционного
материала с матрицей из сплава АМг5М, полученного на
рациональных режимах



Листовой полуфабрикат композиционного
материала на ВТ1-0

Рентгенографические снимки армированного композиционного материала, полученные с помощью импульсного рентгеновского аппарата «САРМА» (B&G) модель 500.



а



б



в

а - локальное защемление армирующего элемента;
б - потеря устойчивости;
в - разрыв армирующих элементов

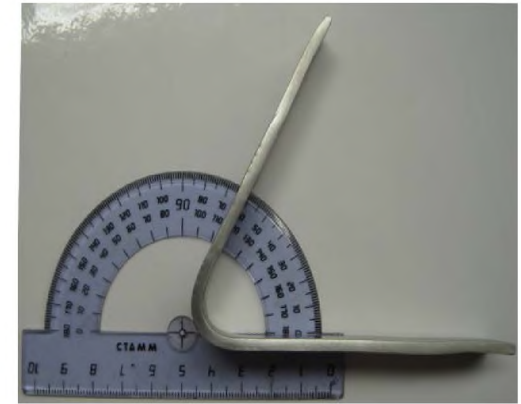
Внешний вид армированного композиционного металлического материала до и после испытаний



а



б



в



г



д

Внешний вид образцов до и после испытания на статический изгиб: а – до испытаний; б – 90° ; в – угол 120° ; г – до параллельности сторон; д – до соприкосновения



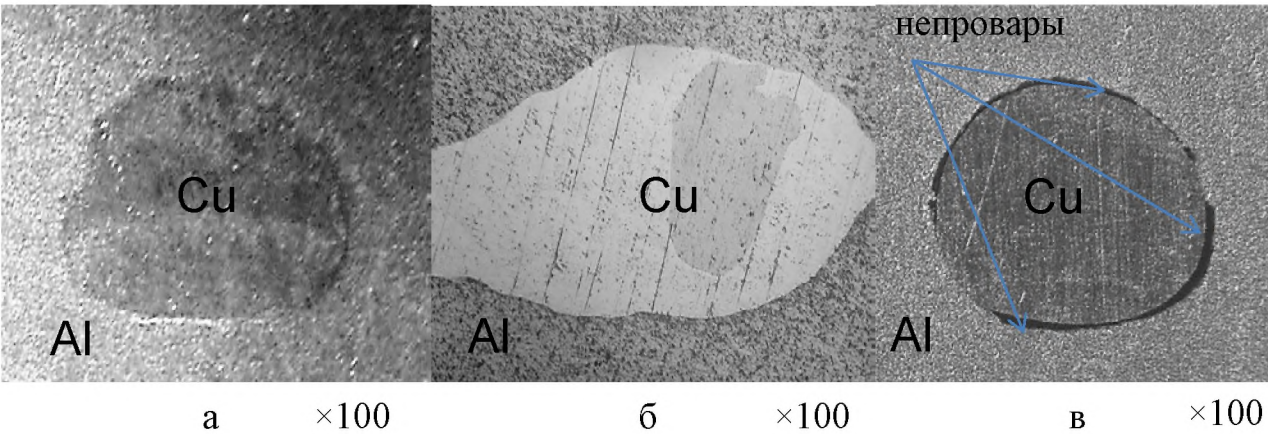
е



ж

Внешний вид образцов до и после испытания на одноосное растяжение : е – вид образца до испытания; ж – вид после

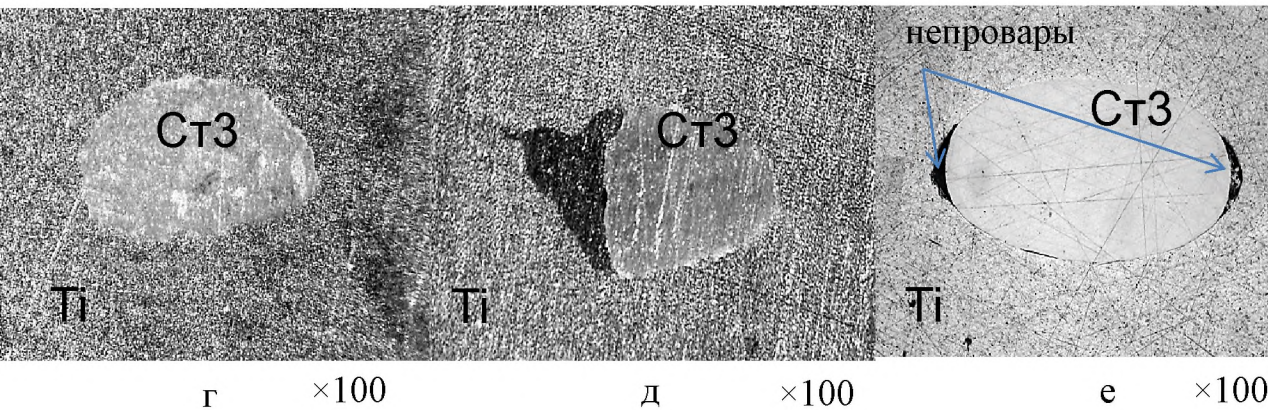
Микроструктура армирующих волокон после сварки взрывом на различных режимах



а - Микроструктура армирующих волокон меди после сварки взрывом: режимы сварки 9 и 10 (рациональные режимы сварки)

б - Микроструктура армирующих волокон меди после сварки взрывом: алюминия режимы сварки: 3, 4, 5, 6 (завышенный режим, наблюдается оплавление алюминиевой матрицы)

в - Микроструктура армирующих стороны волокон меди после сварки взрывом: режимы сварки 1 и 2, а также 7 и 8 (образуются непровары)



г - микроструктура армирующих волокон стали после сварки взрывом: режимы сварки: 3 и 4 (рациональный режим)

д - Микроструктура армирующих волокон стали после сварки взрывом: режимы сварки: 5 и 6 (завышенный режим, наблюдается оплавление матрицы в зоне контакта с волокном)

е - Микроструктура армирующих волокон стали после сварки взрывом: режимы сварки: 1 и 2, 7-12 (образуются непровары)

**Параметры режимов термической обработки композиционных материалов
на основе алюминиевого сплава марки АМг5М армированных медной
проволокой марки М1**

Режим ТО	Параметры режима ТО	
	Температура, °С	Время выдержки, мин.
1	350	5
2		25
3		45
4		60
5		480
6		1200
7	400	5
8		25
9		45
10		60
11		300
12		720

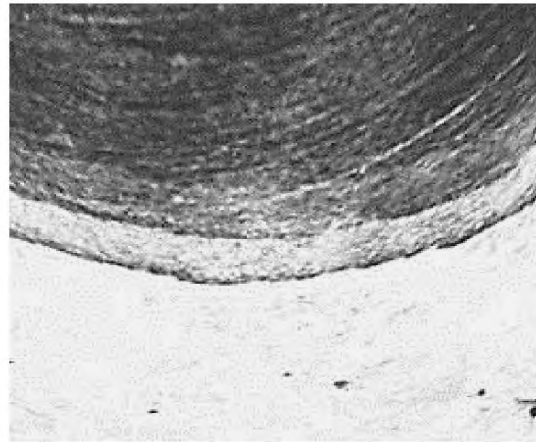
13	450	5
14		15
15		25
16		45
17		60
18		120
19		300
20		480
21	500	5
22		15
23		25
24		45
25		60
26		120
27		360

Параметры режимов термической обработки композиционных материалов на основе алюминиевого сплава марки ВТ1-0 армированных медной проволокой марки СтЗ

Режим ТО	Параметры режима ТО	
	, °С	Время выдержки, мин.
1	800,0	5,0
2		25,0
3		45,0
4		60,0
5		480,0
6		,0
7	900,0	5,0
8		25,0
9		45,0
10		60,0
11		300,0
12		720,0

13	1000,0	5,0
14		15,0
15		25,0
16		45,0
17		60,0
18		120,0
19		300,0
20		480,0
21	1100,0	5,0
22		15,0
23		25,0
24		45,0
25		60,0
26		120,0
27		360,0

Микроструктура армирующего волокна меди после термообработки

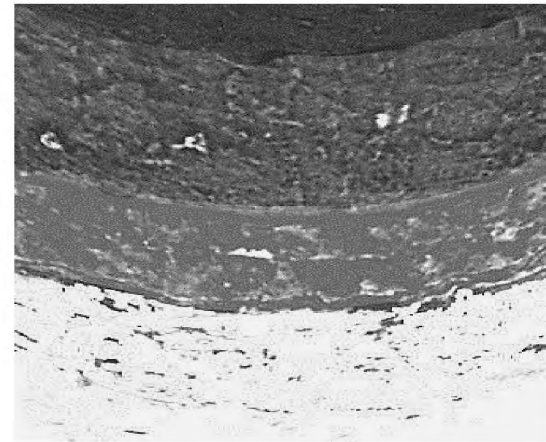


Cu

Al

режим ТО № 4

x600



Cu

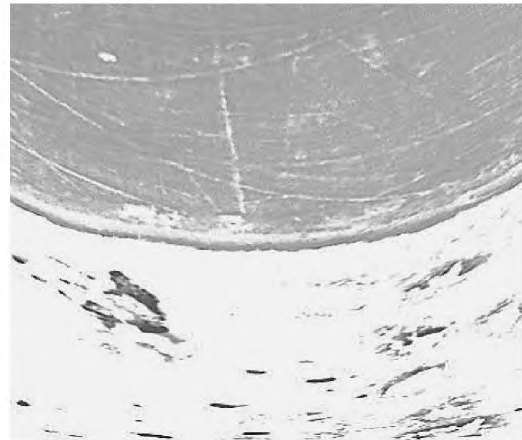
Al

режим ТО № 26

x600

Начиная с 60 минут в зоне армирующего медного волокна с металлом матрицы зафиксировано образование двух интерметаллидных прослоек со стороны меди толщиной 2 мкм, а со стороны алюминия – 1 мкм. С увеличением температуры ТО до 400 °С скорость возникновения и роста интерметаллидных прослоек увеличивается (толщина прослойки со стороны меди достигает 14 мкм, а со стороны алюминия до 8,2 мкм.). Еще большее увеличение температуры до 500 °С и выдержки в печи до 6 часов приводит к тому, что общая толщина интерметаллидных прослоек составляет более 50 % от диаметра армирующего волокна

Микроструктура армирующего волокна после термообработки

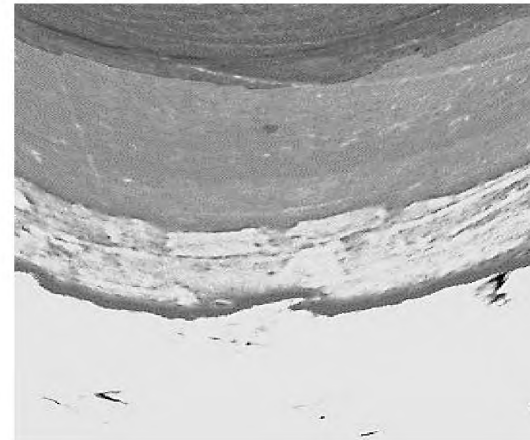


Сталь

Ti

режим ТО № 5

x600



Сталь

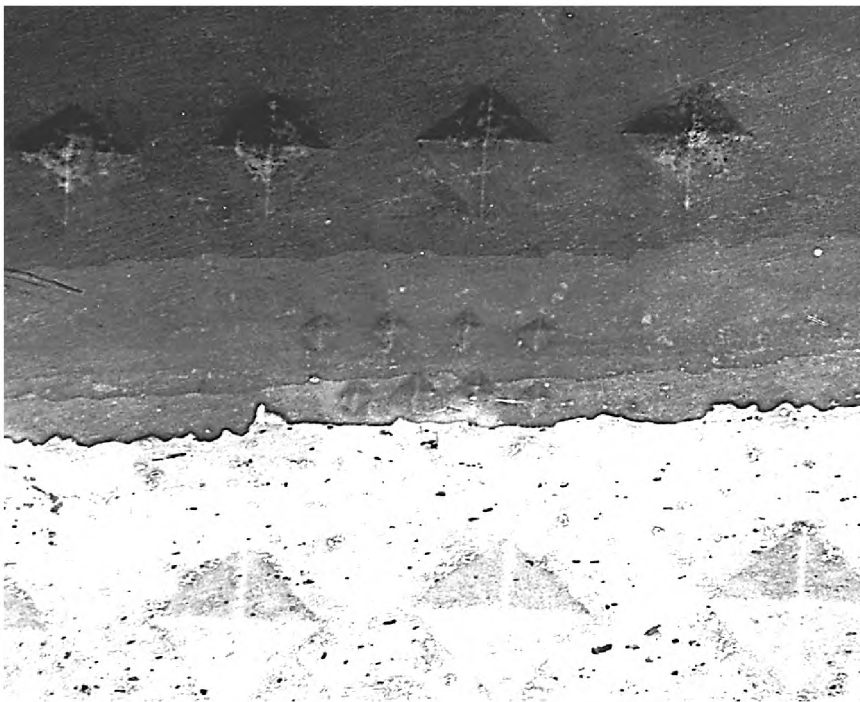
Ti

режим ТО № 20

x600

Начиная с 480 минуты в зоне контакта армирующего волокна стали с металлом матрицы зафиксировано образование двух интерметаллидных прослоек (со стороны стали 2 мкм, со стороны сплава титана около 1 мкм). С увеличением температуры термообработки до 900 °С скорость возникновения и роста интерметаллидных прослоек увеличивается, преимущественный рост наблюдается у прослойки со стороны армирующего волокна стали. Нагрев до температуры 1100 °С и выдержке в течении 6 часов. Приводит к тому, что общая толщина интерметаллидных прослоек составляет 50 % от диаметра армирующего волокна

Схема измерения микротвердости на образцов композиционных материалов на основе алюминиевого сплава марки АМг5М армированных медной проволокой марки М1 в зоне контакта армирующего медного волокна с металлом матрицы



Исследование проводилось на всех этапах термической обработки и оно показало, что микротвердость каждой из интерметаллидных прослоек имеет постоянное значение.

Для композиционных материалов на алюминиевого марки АМг5М медной проволокой М1 прослойка со стороны обладает твердостью, равной HV от до 4600 Н/мм², со стороны алюминия HV от до 3600².

Для образцов композиционных материалов на основе титанового сплава ВТ1-0 армированных стальной проволокой Ст3 прослойка со стороны титана обладает наибольшей твердостью, равной HV от 8900 до 9100 Н/мм², прослойка со стороны стали HV от до 5200 Н/мм²

Основные выводы

Таким образом в ходе работы были выбраны рациональные параметры сварки взрывом при армировании композиционных материалов:

- для образцов композиционных материалов на основе алюминиевого сплава марки АМг5М армированных медной проволокой марки М1 являются $V_k = 1900$ м/с, и V_c в пределах от 595 до 650 м/с, высота заряда ВВ 30 мм.

- для образцов композиционных материалов на основе титанового сплава марки ВТ1-0 армированных стальной проволокой марки Ст3 являются $V_k = 2690$ м/с, и V_c в пределах от 500 до 530 м/с, высота заряда ВВ 40 мм

Так же установлено, что образцы композиционных армированных материалов, сваренные на рациональных режимах, характеризуются высокими прочностными характеристиками. Так для образцов композиционных материалов на основе алюминиевого сплава марки армированных медной проволокой марки М1 прочность составляет 360-380 МПа, что исходную прочность алюминиевого сплава АМг5М аналогичной толщины более чем на 35 %. Для образцов композиционных материалов на титанового сплава ВТ1-0 армированных стальной проволокой Ст3 прочность составляет от 510 до 540 МПа, что превышает исходную прочность неармированного титана более чем на 40 %.

Установлено, что в ходе термической обработки с ростом интерметаллидных прослоек, достигается максимальные значения прочности (АМг5М+М1 450-480 МПа; ВТ1-0+Ст3 580-610 МПа

Публикации по теме магистерской диссертации

1) Крюков Д.Б. Аспекты моделирования новых композиционных армированных материалов с интерметаллическими упрочняющими элементами/Крюков Д.Б., Кривенков А.О., Чугунов С.Н., Гуськов Д.О.// теория и практика современной науки. 2017. № 6 (24). с. 437-440.

2) Гуськов Д.О. Анализ способов создания композиционных материалов на основе сплавов титана и алюминия и перспективы применения технологии сварки взрывом/ Гуськов Д.О., Крюков Д.Б., Егоршин П.Е.// Теория и практика современной науки. 2018. № 2 (32).

