

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

Факультет
промышленных технологий,
электроэнергетики 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)

На правах рукописи

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему:

«Технологические основы получения высокопрочных композиционных
металлических материалов с интерметаллическим упрочнением и
исследование их структуры и свойств»

Магистрант


23.06.25
(подпись, дата)

Федоткин Артем
Сергеевич
(ФИО полностью)

Руководитель
к.т.н., доцент


23.06.25
(подпись, дата)

Крюков Д.Б.
(фамилия, инициалы)

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


23.06.25
(подпись, дата)

Чижова Е.В.
(фамилия, инициалы)

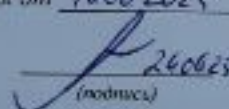
Нормоконтролёр
к.т.н., доцент


24.06.25
(подпись, дата)

Юрина А.В.
(фамилия, инициалы)

Работа допущена к защите (протокол заседания кафедры от 10.06.2025 № 13)

Заведующий кафедрой


24.06.25
(подпись)

Розн А.Е.
(фамилия, инициалы)

Работа защищена с отметкой хорошо (протокол заседания ГЭК от 25.06.25 № 5)

Секретарь ГЭК


25.06.25
(подпись)

Гусев М.С.
(фамилия, инициалы)

ФГБОУ ВО «ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ФАКУЛЬТЕТ ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ,
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ И ТРАНСПОРТА
КАФЕДРА «Сварочное, литейное производство и материаловедение»

«Утверждаю»
Заведующий кафедрой СЛПиМ
д.т.н., профессор А.Е. Розен
подпись
«02» октября 2023 г.

ЗАДАНИЕ
на выпускную квалификационную работу

Магистранту гр. 23МТм1 Факультета промышленных технологий, электроэнергетики и транспорта Политехнического института ПГУ, очной формы обучения по направлению подготовки 22.04.01 «Материаловедение и технология материалов»

Федяшову Артему Сергеевичу

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

Время выполнения ВКР: с 20.10.2023 г. по 04.07.2025 г.

Место преддипломной практики: ООО «НТЦ «СУРА».

Тема работы: Технологические основы получения высокопрочных композиционных металлических материалов с интерметаллическим упрочнением и исследование их структуры и свойств.

Тема утверждена приказом ректора ПГУ № 999 а/о от 02.10.2023.

Техническое задание на работу (назначение устройства, условия применения, внешние воздействия, специальные требования и т.п.): выполнить литературное и патентное исследование способов изготовления высокопрочных композиционных материалов, провести исследования структуры и механических свойств высокопрочных композиционных материалов с интерметаллическим упрочнением.

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;
- литературно-патентный обзор с выявлением патентной и научно-технической информации, исследованием технического уровня и тенденций развития способов получения высокопрочных композиционных материалов;
- рассмотрение технологических особенностей получения высокопрочных армированных композиционных металлических материалов сваркой взрывом, выбор взрывчатого вещества и расчет основных параметров;
- определение методик испытаний свойств композиционных материалов;
- выполнение экспериментальных работ по созданию образцов композиционных металлических материалов повышенной механической прочности с применением сварки взрывом;
- исследование влияния технологических режимов процесса ударно-волнового нагружения на формирование заданной структуры и свойств композиционных металлических материалов;
- заключение – выводы и обоснования по теме работы и полученным результатам.

Презентация магистерской диссертации (перечень и содержание плакатов)

- Тема магистерской диссертации
- Актуальность работы
- Цели и задачи исследования

1 л А4;

1 л А4;

1 л А4;

- Общие данные об объекте исследования	1л А4;
- Технологические особенности способа получения высокопрочных армированных композиционных металлических материалов сваркой взрывом	1л А4;
- Разработка плоских схем сварки взрывом композиционного материала систем «титан-сталь» и «алюминий-медь»	1л А4;
- Сварка взрывом композиционного материала систем «титан-сталь» и «алюминий-медь»	1л А4;
- Рентгенографический контроль полуфабрикатов композиционного материала систем «титан-сталь» и «алюминий-медь»	1л А4;
- Исследование влияния технологических режимов процесса ударно-волнового нагружения на формирование механических свойств композитов	1л А4;
- Исследование влияния технологических режимов процесса ударно-волнового нагружения на формирование технологических свойств композитов	1л А4;
- Исследование влияния параметров сварки взрывом на микроструктуру композиционных материалов системы «алюминий-медь»	1л А4;
- Исследование влияния параметров сварки взрывом на микроструктуру композиционных материалов системы «титан-сталь»	1л А4;
- Микроструктура композиционных материалов после термической обработки	2л А4;
- Микротвердость композиционных материалов после термической обработки	1л А4;
- Публикация результатов работы	1л А4;
- Популяризация результатов работы	1л А4;
- Выводы	3л А4.

Рекомендуемая литература:

1. Лысак, В.И. Сварка взрывом [Текст]: монография / В.И. Лысак, С.В. Кузьмин. — М.: Машиностроение, 2005. — 543 с.
2. Батаев, А. А. Композиционные материалы: строение, получение, применение: учеб. / А. А. Батаев, В. А. Батаев. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2002. – 383 с.
3. Трыков, Ю. П. Слоистые композиты на основе алюминия и его свойства / Ю. П. Трыков, Л. М. Гуревич, В. Г. Шморгунов. – М. : Metallurgizdat, 2004. – 230 с.

Дата выдачи задания: 02.10.2023 г.

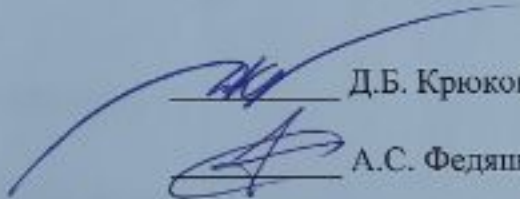
Руководитель ВКР:

к.т.н, доцент

Задание к исполнению принял студент

гр. 23МТм1

02 октября 2023 г.

 Д.Б. Крюков

 А.С. Федяшов

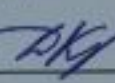
Выпускную квалификационную работу к защите допустить
Декан факультета промышленных технологий,
электроэнергетики и транспорта ПИ ПГУ

 С.Ю. Киреен
ОПОН освоена в полном объеме.
К государственной итоговой
аттестации допустить

ФГБОУ ВО «ПЕНЗНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ФАКУЛЬТЕТ ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ,
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ И ТРАНСПОРТА
КАФЕДРА «СВАРОЧНОЕ, ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО И
МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ»

«Утверждаю»

Руководитель ВКР

к.т.н., доцент  Д.Б. Крюков

«02» октября 2023 г.

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН
на магистерскую диссертацию

Магистранту гр. 23МТм1 Факультета промышленных технологий, электро-энергетики и транспорта Политехнического института ПГУ, очной формы обучения по направлению подготовки 22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов»

Федяшову Артему Сергеевичу

Тема работы: «Технологические основы получения высокопрочных композиционных металлических материалов с интерметаллическим упрочнением и исследование их структуры и свойств».

Наименование этапа работы	Срок исполнения		Отметка о выполнении
	Начало	Окончание	
1. Получение задания, его уяснение, беседа с руководителем. Подготовка к выполнению магистерской диссертации.	02.10.23	02.10.23	Выполнено 
2. Подбор и изучение рекомендованной литературы.	03.10.23	09.10.23	Выполнено 
3. Изучение объекта исследования, постановка цели и задачи работы. Написание введения.	10.10.23	15.12.23	Выполнено 

4. Выполнение литературно-патентного обзора в области получения и изучения высокопрочных композиционных материалов.	16.12.23	19.02.24	Выполнено Ж
5. Изучение способов получения армирования высокопрочных композиционных материалов, выбор рациональные параметры сварки взрывом при армировании композиционных материалов, изучение методик проведения механических испытаний высокопрочных композиционных материалов.	20.02.24	25.04.24	Выполнено Ж
6. Экспериментальная часть работы. Исследование влияния параметров сварки взрывом на микроструктуру и степень упрочнения композиционных материалов, изучение влияния параметров термической обработки композиционных материалов на формирование заданного комплекса механических свойств, изучение состава и свойств интерметаллидных фаз, образующихся при термической обработке в композиционном армированном материале.	20.02.24	25.04.25	Выполнено Ж
7. Завершение оформления пояснительной записки, таблиц, рисунков, схем.	26.04.25	05.06.25	Выполнено Ж
8. Предварительная защита магистерской диссертации.	06.06.25	06.06.25	Выполнено Ж
8. Предоставление завершенной магистерской диссертации нормоконтролеру.	07.06.25	11.06.25	Выполнено Ж
9. Представление магистерской диссертации руководителю на просмотр и проверку на плагиат.	11.06.25	11.06.25	Выполнено Ж
11. Полное завершение всех работ и представление зав. кафедрой на подпись пояснительной записки (совместно с графической частью, протоколом проверки на плагиат и отзывом руководителя).	12.06.25	24.06.25	Выполнено Ж
12. Защита магистерской диссертации.	25.06.25	04.07.25	Выполнено Ж

Прохождение каждого этапа подготовки магистерской диссертации подтверждается подписью руководителя.

Студент учебной группы 23МТм1

Федяшов А.С.

«02» октября 2023 г.

Ректору Пензенского государственного
университета А.Д. Гулякову
студента 2 курса магистратуры
ФПТЭТ очной формы обучения
Федяшова Артёма Сергеевича

ЗАЯВЛЕНИЕ

Я, Федяшов Артём Сергеевич, студент 2 курса магистратуры очной формы обучения направления 22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов», профиля подготовки «Материаловедение и технологии новых материалов», прошу провести проверку с использованием системы «Антиплагиат» магистерской диссертации на тему «Технологические основы получения высокопрочных композиционных металлических материалов с интерметаллическим упрочнением и исследование их структуры и свойств», выполненной мной самостоятельно, на содержание элементов антиплагиата.

Все прямые заимствования из печатных и электронных источников, а также из защищенных ранее выпускных квалификационных работ, кандидатских и докторских диссертаций имеют соответствующие ссылки.

Я, ознакомлен с действующим Стандартом университета «Выпускная квалификационная работа обучающихся по образовательным программам высшего образования – программам бакалавриата, специалитета и магистратуры» СТО ПГУ 3.12-2018, согласно которому обнаружение плагиата является основанием недопуска магистерской диссертации к защите и отчисления из университета.


(подпись студента)

20.06.2025
(дата)

Представлена на проверку

20.06.2025

(дата)

Руководитель магистерской
диссертационной работы,
к.т.н., доцент каф. "Сварочное, литейное
производство и материаловедение" ПГУ

Крюков Д.Б.

Протокол

проверки на оригинальность в системе «Антиплагиат.ВУЗ» магистерской диссертации на тему «Технологические основы получения высокопрочных композиционных металлических материалов с интерметаллическим упрочнением и исследование их структуры и свойств» магистранта 2 курса Федяшова Артёма Сергеевича направления подготовки 22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов», профиль «Материаловедение и технологии новых материалов».

Руководитель магистерской диссертации Крюков Дмитрий Борисович, к.т.н., доцент каф. «Сварочное, литейное производство и материаловедение»

Результат проверки на плагиат магистерской диссертации Федяшова Артёма Сергеевича составляет **60,5 %** оригинальности, что соответствует существующим требованиям стандарта СТО ПГУ 3.12-2018. Магистерская диссертация может быть рекомендована к защите.



СПРАВКА

о результатах проверки текстового документа
на наличие заимствований

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Пензенский государственный
университет»

ПРОВЕРКА ВЫПОЛНЕНА В СИСТЕМЕ АНТИПЛАГИАТ.ВУЗ

Автор работы: Федяшов Артем Сергеевич
Самоцитирование
рассчитано для: Федяшов Артем Сергеевич
Название работы: МД_Федяшов_А.С.
Тип работы: Магистерская диссертация
Подразделение: Каф. "Сварочное, литейное производство и материаловедение" ПГУ

РЕЗУЛЬТАТЫ

■ ОТЧЕТ О ПРОВЕРКЕ КОРРЕКТИРОВАЛСЯ: НИЖЕ ПРЕДСТАВЛЕНЫ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕРКИ ДО КОРРЕКТИРОВКИ

СОВПАДЕНИЯ	40.43%	СОВПАДЕНИЯ	39.18%
ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	59.29%	ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	60.53%
ЦИТИРОВАНИЯ	0.28%	ЦИТИРОВАНИЯ	0.29%
САМОЦИТИРОВАНИЯ	0%	САМОЦИТИРОВАНИЯ	0%

ДАТА ПОСЛЕДНЕЙ ПРОВЕРКИ: 20.06.2025

ДАТА И ВРЕМЯ КОРРЕКТИРОВКИ: 20.06.2025 09:01

Структура
документа:
Модуль поиска:

Проверенные разделы: основная часть с.16-60, 61-101, введение с.4-15, выводы с.60-61

Медицина; Патенты СССР, РФ, СНГ; СМИ России и СНГ; Переводные заимствования; СПС ГАРАНТ: аналитика; Перефразирования по коллекции IEEE; Кольцо вузов; Публикации eLIBRARY; Шаблонные фразы; ИПС Адилет; IEEE; Цитирование; Коллекция НБУ; Диссертации НББ; Публикации РГБ; Сводная коллекция ЭБС; Переводные заимствования по коллекции Гарант: аналитика; Переводные заимствования IEEE; Публикации eLIBRARY (переводы и перефразирования); Публикации РГБ (переводы и перефразирования); СПС ГАРАНТ: нормативно-правовая документация; Кольцо вузов (переводы и перефразирования); Переводные заимствования по коллекции Интернет в английском сегменте; Перефразированные заимствования по коллекции Интернет в английском сегменте; Интернет Плюс; Переводные...

Работу проверил: Крюков Д.Б.

ФИО проверяющего

Дата подписи:

20.06.25

Подпись проверяющего



Чтобы убедиться
в подлинности справки, используйте QR-код,
который содержит ссылку на отчет.

Ответ на вопрос, является ли обнаруженное заимствование
корректным, система оставляет на усмотрение проверяющего.
Предоставленная информация не подлежит использованию
в коммерческих целях.

ОТЗЫВ
НА МАГИСТЕРСКУЮ ДИСЕРТАЦИОННУЮ РАБОТУ
МАГИСТРАНТА

Федяшова Артёма Сергеевича

Тема работы:

«Технологические основы получения высокопрочных композиционных металлических материалов с интерметаллическим упрочнением и исследование их структуры и свойств»

Магистерская диссертационная работа Федяшова А.С. состоит из пояснительной записки и содержит 103 страницы, 36 рисунков, 9 таблиц, 39 источников литературы, 1 приложение. Магистерская диссертационная работа Федяшова А.С. выполнена в соответствии с заданием.

В соответствии с заданием на магистерскую диссертационную работу в пояснительной записке Федяшова А.С. представлены следующие разделы: аннотация, введение с обоснованием актуальности темы исследования, установления объекта и предмета, постановкой цели и задач исследования, выбор направления исследований, экспериментальные исследования композиционных металлических материалов с обоснованием применяемых методов исследования, оборудование и методика планируемых экспериментов, обобщение и оценка результатов исследования, разработка технологических основ получения высокопрочных композиционных металлических материалов с интерметаллическим упрочнением и исследование их структуры и свойств.

В презентации магистерской диссертации представлены:

Актуальность работы; цели и задачи магистерской диссертации; общие данные об объекте исследования; технологические особенности получения композиционных металлических материалов сваркой взрывом; режимы и результаты расчета основных параметров процесса сварки взрывом образцов композиционного материала на основе сплава АМг5М армированного медной проволокой марки М1, а также образцов композиционного материала на основе сплава ВТ1-0 армированного стальной проволокой марки Ст3; результаты разработки плоских схем сварки взрывом композиционного мате-

риала систем «титан-сталь» и «алюминий-медь»; образцы для исследования механических и технологических свойств композиционных материалов; результаты прочностных испытаний композиционных материалов; характерные зоны исследования микроструктуры композиционного материала; микроструктура композиционного материала сваренного на различных режимах; параметры режимов термической обработки экспериментальных образцов композиционных материалов; результаты исследования микроструктуры экспериментальных образцов композиционных материалов после термической обработки; результаты исследования микротвердости экспериментальных образцов композиционных материалов после термической обработки; основные выводы; публикации по теме магистерской диссертации.

Во время подготовки магистерской диссертации Федяшов А.С. проводил свою работу в соответствии с календарным графиком. При выполнении работы Федяшов А.С. проявил творческую самостоятельность и высокие инженерно-технические знания, зарекомендовал себя с положительной стороны. Работа проводилась планомерно, в требуемом объеме, возникающие по работе замечания исправлялись в срок и на высоком качественном уровне.

При работе над экспериментальной частью диссертационной работы Федяшов А.С. зарекомендовал себя как будущий специалист в области материаловедения, обладающий высокой квалификацией и профессиональными навыками, умеющий на высоком качественном уровне самостоятельно решать сложные конструкторские и технологические задачи, использовать техническую и нормативную документацию.

Магистерская диссертационная работа Федяшова А.С. на тему: «Технологические основы получения высокопрочных композиционных металлических материалов с интерметаллическим упрочнением и исследование их структуры и свойств» соответствует всем предъявляемым требованиям.

Считаю, что Федяшов А.С. заслуживает присвоения квалификации магистра по направлению подготовки 22.04.01 «Материаловедение и технология материалов»

Руководитель магистерской
диссертационной работы,
к.т.н., доцент каф. "Сварочное, литейное
производство и материаловедение" ПГУ



Крюков Д.Б.

РЕЦЕНЗИЯ

на мастерскую диссертацию студента группы 23МТм1
ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет»

Федяшова Артема Сергеевича

Тема магистерской диссертации: «Технологические основы получения высокопрочных композиционных металлических материалов с интерметаллическим упрочнением и исследование их структуры и свойств».

Пояснительная записка Федяшова А.С. выполнена в соответствии с заданием на магистерскую диссертацию.

Во введении обосновывается актуальность темы магистерской диссертации, сформулированы цель и задача исследования.

В первом разделе проведен анализ и обоснование принятого направления исследований и способов реализации. Выполнен аналитический обзор в области разработки высокопрочных композиционных материалов. Проведен патентный поиск и определены основные тенденции развития высокопрочных армированных композиционных материалов. Проведен анализ основных схем армирования композиционных материалов, раскрыты основные технологические особенности схем армирования, дана их краткая характеристика. Предложена схема сварки взрывом армированных композиционных материалов.

Во втором разделе выполнены экспериментальные работы по созданию образцов композиционных металлических материалов повышенной механической прочности с применением сварки взрывом. Получены образцы и проведена качественная оценка их состояния, в том числе с использованием неразрушающего метода контроля.

В третьей главе рассмотрено изучение влияния технологических режимов процесса ударноволнового нагружения на формирование механических и

технологических свойств композиционных материалов. Установлено влияние степени термической обработки на показатели временного сопротивления материала. Проведен количественный и структурный анализ интерметаллической прослойки композиционного материала.

Проблема разработки новых высокопрочных композиционных материалов выделяется из проблем современного материаловедения и является актуальной задачей. Материалы с высокими показателями удельной прочности и жесткости способны существенно увеличить тактико-технические показатели аппаратов авиационной и космической отрасли промышленности РФ.

Пояснительная записка и презентация выполнены в соответствии с ГОСТ и ЕСКД. В презентации магистерской диссертации автор приводит: цели и задачи исследования; общие данные об объекте исследования; технологические особенности способа получения высокопрочных армированных композиционных металлических материалов сваркой взрывом результаты исследования влияния технологических режимов процесса ударно-волнового нагружения на формирование механических и технологических свойств композитов; анализ микроструктуры сварного соединения после сварки взрывом и термической обработки; основные публикации по теме работы и основные выводы по результатам исследования.

Замечания по магистерской диссертации: при изучении состава интерметаллических прослоек следовало бы использовать рентгенофазовый анализ, для более точного определения фазового состава.

Магистерская диссертация Федяшова А.С. выполнена на требуемом уровне, соответствует заданию, содержит необходимый наглядный материал. Считаю, что магистерская диссертация может быть допущена к защите в ГЭК, а ее автор заслуживает присвоения квалификации магистра по направлению 22.04.01 «Материаловедение и технологии новых материалов».

К.т.н., инженер-технолог

АО ФНЦП «ПО «Старт» им. М.В. Проценко»

(подпись, дата)

Чижова Е.В.



Оглавление

Введение	4
1 Выбор направления исследований. Теоретическое обоснование и разработка способов создания высокопрочных композиционных материалов с интерметаллическим упрочнением	8
1.1 Анализ и обоснование принятого направления исследований и способов реализации. Выполнение аналитического обзора в области разработки высокопрочных композиционных материалов	8
1.1.1 Аналитический обзор в области разработки высокопрочных композиционных материалов	8
1.1.2 Классификация композиционных материалов	17
1.1.3 Способы получения волокнистых композиционных материалов	23
1.2 Проведение патентных исследований	27
1.3 Общие данные об объекте исследования	30
1.4 Технический уровень и тенденции развития	31
1.5 Технологические особенности получения высокопрочных армированных композиционных металлических материалов сваркой взрывом	33
1.6 Технологические схемы получения армированных композиционных материалов сваркой взрывом	36
1.7 Выбор взрывчатого вещества для сварки взрывом	38
1.8 Методики испытаний свойств композиционных материалов	41
2 Экспериментальные исследования композиционных металлических материалов. Обобщение и оценка результатов исследования	47
2.1 Выполнение экспериментальных работ по созданию образцов композиционных металлических материалов повышенной механической прочности с применением сварки взрывом	47

2.1.1 Расчет технологических параметров сварки взрывом армированного композиционного материала и выбор состава взрывчатого вещества	48
2.1.2 Разработка плоских схем сварки взрывом композиционного материала систем «титан-сталь» и «алюминий-медь»	52
3 Исследование влияния технологических режимов процесса ударноволнового нагружения на формирование заданной структуры и свойств композиционных металлических материалов.....	59
3.1 Изучение влияния технологических режимов процесса ударноволнового нагружения на формирование заданной структуры и свойств композиционных материалов	59
3.1.1 Выбор рациональных параметров сварки взрывом при армировании композиционных материалов	59
3.1.2 Исследование влияния параметров сварки взрывом на микроструктуру композиционных материалов.....	67
3.1.3 Изучение влияния параметров сварки взрывом на степень упрочнения композиционных материалов	75
3.1.4 Изучение влияния параметров термической обработки композиционных материалов на формирование заданного комплекса механических свойств.....	76
3.1.5 Исследование состава и свойств интерметаллидных фаз образующихся при термической обработке в композиционном армированном материале	85
Заключение	95
Библиографический список.....	99

Введение

В современном мире промышленность активно интегрирует разработку и применение композиционных материалов (КМ), что открывает новые горизонты для технологических инноваций и конструктивных решений. Эти материалы, обладая уникальными физико-механическими и химическими свойствами, значительно отличаются от традиционных материалов, обеспечивая возможность, как глубокую модернизацию существующих изделий, так и разработку принципиально новых технологий. В последние годы наблюдается рост интереса к алюминиевым и титановым композитам, которые демонстрируют высокую прочность при минимальном удельном весе, устойчивость к коррозии и термическим нагрузкам, а также адаптируемость под специфические задачи. В настоящее время применение композиционных материалов на основе алюминиевых и титановых сплавов сосредоточено в трех конкретных областях: автомобильной промышленности, авиакосмической промышленности, и строительная отрасль [1].

Основные сферы применения таких материалов охватывают автомобильную и авиакосмическую промышленность, где их используют для снижения массы конструкций без потери прочности, а также строительство – для создания легких, но устойчивых к внешним воздействиям компонентов. Однако сфера интереса расширяется и на другие области: в машиностроении композиты применяются для производства износостойких деталей высокой точности, а в электронике – для разработки элементов с оптимальной теплопроводностью и контролируемым коэффициентом теплового расширения. Особое внимание уделяется методам улучшения характеристик материалов, таким как упрочнение сплавами или внедрение наноструктурных добавок. Эти технологии позволяют повысить износостойкость и долговечность изделий, что особенно важно для высоконагруженных систем. Тем не менее ключевой сложностью остается создание «персонализированных» композитов, сочетающих заданные параметры – например, сочетание легкости, теплопроводности и механической прочности для специализированного оборудования [2].

Развитие цифровой экономики и автоматизации также влияет на производство композитов, стимулируя модернизацию производственных линий и внедрение интеллектуальных систем контроля качества. По данным исследований, цифровизация способствует ускорению процессов разработки и тестирования новых материалов, снижая временные и финансовые затраты. Однако экономическая нестабильность и геополитические факторы остаются вызовами для масштабирования технологий, требуя гибкости в стратегиях реализации. Вопросам повышения качества материалов для авиационной, ракетно-космической и военной техники в Российской Федерации уделяется большое внимание. Для поддержания и развития указанных отраслей промышленности созданы и успешно реализуются Президентские и ведомственные программы. Материалы, применяемые при конструировании в указанных областях должны обеспечивать требуемые эксплуатационные характеристики изготовленных из них объектов. Необходимо решить проблему разработки новых материалов, которые бы полностью отвечали требованиям, как по отдельным специальным, тактико-техническим, так и по экономическим показателям.

Композиционные материалы (КМ) активно исследуются в научных центрах с целью их внедрения в промышленные процессы. Такое внимание связано с их уникальным сочетанием химических, физико-механических и эксплуатационных характеристик, которые невозможно воспроизвести с помощью традиционных металлов или сплавов. Например, особый интерес вызывают композиты на основе алюминиевых и титановых сплавов, обладающие высокой прочностью при минимальном весе. Методы их создания включают применение высокотемпературных технологий, значительных энергетических ресурсов и сложного оборудования, что позволяет получать материалы с однородным фазовым и химическим составом [3]. При этом в ряде случаев допустима определенная неоднородность структуры, которая не препятствует использованию таких материалов в промышленности, например, в авиастроении или машиностроении.

В данной работе представлены общие сведения о композитах на основе титана и алюминия, 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 алюминий.

Научная новизна: разработка технологии получения армированного 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 на основе титана и алюминия с интерметаллическим слоем.

Предмет исследования: взаимосвязь структуры, состава, механических, теплофизических и технологических свойств армированного высокопрочного композиционного материала на основе титана и алюминия с интерметаллическим упрочнением.

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

Для решение 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 высокопрочных композиционных материалов

1.1.1.1 Алюминиевые сплавы

Легкие металлические сплавы, такие как алюминий, магний, бериллий и титан, а также медные сплавы, получили широкое распространение в качестве конструкционных материалов благодаря своей низкой плотности (до 4500 кг/м³), которая обеспечивает легкость изделий без потери прочности. Алюминий, являющийся одним из ключевых представителей этой группы, имеет температуру плавления около 660 °С и кристаллизуется в гранецентрированную кубическую решетку, сохраняя стабильность структуры при нагревании благодаря отсутствию полиморфных превращений. Его плотность составляет 2699 кг/м³, что делает его легким, однако высокая химическая активность компенсируется образованием защитной оксидной пленки Al_2O_3 на поверхности, предотвращающей коррозию.

Классификация первичного алюминия основывается на содержании примесей: особой чистоты (А999 с 99,999% Al), высокой чистоты (А995–А95 с 0,005–0,05 % примесей) и технической чистоты (А85–А0 с 0,15–1% примесей). Для промышленного применения чаще используется технический алюминий марок АД0 и АД1, выпускаемый в виде листов, профилей и прутков. Благодаря высокой пластичности и способности к обработке давлением, алюминий легко деформируется и сваривается контактной или газовой сваркой, однако он плохо поддается меха-

нической обработке резанием. Основная область применения – ненагруженные конструкции, где важны малый вес, свариваемость и коррозионная стойкость: рамы, двери, трубопроводы, цистерны для перевозки нефтепродуктов, а также упаковочные материалы, такие как фольга, которую можно прокатывать до толщины менее 0,1 мм.

Высокая теплопроводность алюминия (примерно 237 Вт/(м·К)) делает его незаменимым в теплообменниках для промышленных и бытовых холодильных систем. Его отражающая способность используется в прожекторах и рефлекторах, где требуется эффективное распределение светового потока. В электротехнике алюминий применяется для производства кабелей и проводов: при электропроводности, составляющей 65 % от меди, алюминиевые провода вдвое легче медных при одинаковой проводимости. Это делает их экономически выгодным решением для линий электропередачи.

Алюминиевые сплавы, обладающие удельной прочностью до 700 МПа при плотности не более 2,85 г/см³, широко используются в авиации, автомобилестроении и машиностроении. Они эффективно сопротивляются динамическим и инерционным нагрузкам, обеспечивая снижение массы конструкций без ущерба для надежности. Например, в авиастроении такие сплавы применяются для создания обшивки фюзеляжей и крыльев, а в автомобилестроении – для изготовления двигателей и шасси, что позволяет повысить топливную эффективность и снизить выбросы CO₂ [2,16].

1.1.1.2 Магниевые сплавы

Вследствие высокой химической активности магния выбор металлов, пригодных для легирования магниевых сплавов, сравнительно невелик. Сплавы на основе Mg разделяются на 2 основные группы:

- для производства фасонных отливок – литейные;
- для производства полуфабрикатов прессованием, прокаткой, ковкой и штамповкой – деформируемые.

Сплавы на основе Mg обладают пониженной стойкостью к коррозии из-за высокого электроотрицательного потенциала и недостаточных защитных свойств 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 занимают ключевое место среди современных конструкционных материалов благодаря уникальному сочетанию высокой удельной прочности, коррозионной стойкости и устойчивости к экстремальным температурам. Эти свойства обусловили их широкое применение в судостроении, энергетике, авиации, химическом машиностроении и других отраслях, где критически важны долговечность и надежность конструкций. В последние годы спрос на титановые сплавы значительно вырос, особенно в производстве упругих элементов и сложных конструкций, что стимулирует расширение ассортимента полуфабрикатов и готовых изделий, а также увеличение объемов промышленного выпуска.

Однако технологии производства титановых сплавов продолжают совершенствоваться, так как их фазовые превращения, лежащие в основе механической и термической обработки, требуют детального изучения для оптимизации процессов. Например, структура материала и методы термомеханической обработки напрямую влияют на эффективность окончательного упрочнения, что особенно важно для ответственных деталей, эксплуатируемых в агрессивных условиях [4]. В авиастроении и космической технике, где используются сплавы с жаропрочностью до 600 °C, такие как BT38, особенно актуальны исследования, направленные на повышение прочностных характеристик при сохранении пластичности и ударной вязкости.

Современные разработки фокусируются на создании режимов термической обработки, позволяющих достичь предела прочности до 1400 МПа без ущерба для эксплуатационных свойств. Одним из перспективных решений стал высокопроч-

ный сплав ВТ23М ($\alpha+\beta$)-класса, сочетающий высокую прочность с хорошей технологичностью. Его применение может быть расширено в производстве несущих конструкций для авиации и морской техники, где критично снижение массы при максимальной надежности [5,11].

Кроме того, в условиях растущего спроса на титановые сплавы в атомной энергетике, опреснительных установках и системах морского добычи нефти и газа, актуальность приобретают исследования по импортозамещению и снижению себестоимости производства. Это связано с тем, что титан остается одним из самых дорогих конструкционных материалов, что ограничивает его массовое применение в ряде отраслей. Тем не менее, благодаря своей универсальности и адаптивности к специфическим требованиям, титановые сплавы продолжают оставаться незаменимыми в высокотехнологичных сферах, обеспечивая конкурентоспособность современных инженерных решений.

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 путём 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 – направленно закристаллизованные эвтектические сплавы, упрочнённые интерметаллидными карбидами ниобия и тантала [7].

1.1.1.5 Слоистые металлокомпозиты

Одним из перспективных направлений в современной промышленности является разработка и совершенствование слоистых металлокомпозитных материалов, таких как СИАЛ и АЛОР. АЛОР представляет собой гибридный материал, состоящий из чередующихся слоев высокопрочного органопластика и алюминиевого сплава, соединенных через адгезионные связи. Органопластик, используемый в таких композитах, чаще всего изготавливается на основе арамидных или других синтетических волокон, обладающих исключительной удельной прочностью, жесткостью при растяжении, а также высокой вязкостью разрушения. Эти характеристики обеспечиваются за счет уникального взаимодействия между полимерной матрицей и органическими волокнами, что позволяет материалу эффективно распределять нагрузку и сопротивляться образованию трещин.

По сравнению с традиционными алюминиевыми сплавами, АЛОР демонстрирует аналогичные механические свойства, однако его плотность значительно ниже, что позволяет достичь существенного выигрыша в массе конструкции. Например, при одинаковых прочностных характеристиках детали из АЛОРа могут быть до 30 % легче, чем аналоги из чистого алюминия. Это делает материал особенно востребованным в авиационной и автомобильной промышленности, где снижение веса напрямую влияет на топливную эффективность и экологические показатели.

Кроме того, АЛОР обладает повышенной устойчивостью к усталостным разрушениям. Скорость распространения трещин в этом материале значительно замедляется по сравнению с классическими металлами, что обусловлено способностью слоистой структуры гасить напряжения и препятствовать локальному разрушению. С увеличением доли органопластика в композите его прочность возрас-

тает, что открывает возможности для создания сверхлегких, но крайне надежных конструкций. Такие свойства особенно актуальны для производства элементов воздушных судов, космических аппаратов и высоконагруженных деталей в энергетике [10].

Интерес к подобным материалам усиливается в условиях роста требований к энергоэффективности и устойчивому развитию. Хотя АЛОР не относится к биокompозитам, его использование в транспорте и промышленности способствует снижению углеродного следа за счет уменьшения массы техники и, соответственно, расхода топлива. Параллельно исследуются технологии, позволяющие интегрировать в слоистые структуры натуральные волокна, которые уже применяются в других типах композитов благодаря экологичности и возобновляемости ресурсов.

Таким образом, развитие металлокомпозитов вроде АЛОР открывает новые горизонты для инженерных решений, сочетая преимущества металлов и полимеров. Их применение в высокотехнологичных отраслях подтверждает потенциал таких материалов в обеспечении баланса между прочностью, легкостью и долговечностью, что соответствует современным трендам в материаловедении.

1.1.1.6 Слоистые интерметаллидные композиты

Современные технологии материаловедения открывают новые горизонты благодаря разработке слоистых интерметаллидных композитов – инновационного класса конструкционных материалов, сочетающих уникальные механические и физические свойства. Такие композиты демонстрируют высокую удельную прочность, жаропрочность, теплопроводность, электрическую и магнитную стабильность, что делает их востребованными в авиации, энергетике и микроэлектронике. Их создание стало возможным благодаря точному конструированию многослойной структуры, где чередуются сплошные металлические и интерметаллидные слои. Эта архитектура реализуется через комплексные технологии, включающие реактивную диффузию, сварку взрывом и пластическую деформацию.

Основу композита составляют разнородные металлы, такие как пары Ti-Fe, Mg-Al, Cu-Al, Ni-Al и другие. При нагревании эти системы вступают в реактивную диффузию, образуя тонкие интерметаллидные прослойки заданной толщины. Свойства материала напрямую зависят от объемной доли таких слоев, их химического состава и распределения. Например, в трехслойном композите «алюминий АД1 + никель НП1 + алюминий АД1» исследована кинетика диффузионных процессов на границах слоев. Установлено, что в зоне соединения формируются фазы, повышающие адгезию между компонентами и обеспечивающие равномерное распределение нагрузок [10].

Особый интерес представляет технология сварки взрывом с последующей холодной прокаткой, позволяющая создавать гетерогенные структуры без нарушения целостности слоев. Этот метод обеспечивает прочное сцепление материалов за счет динамического давления, возникающего при взрывном импульсе, а дальнейшая прокатка выравнивает толщину и улучшает межфазное взаимодействие. Полученные материалы демонстрируют улучшенные характеристики: повышенную устойчивость к термическим и механическим нагрузкам, что критично для высокотехнологичных отраслей, таких как космическая инженерия и производство турбин.

Слоистая структура открывает широкие возможности для комбинирования свойств: например, сочетание легкости алюминиевых сплавов с коррозионной стойкостью никеля или жаропрочностью титановых соединений. Это позволяет создавать материалы, адаптированные под специфические условия эксплуатации, включая экстремальные температуры и агрессивные среды. Параллельно исследуются пути снижения энергозатрат и себестоимости производства, что особенно актуально в условиях импортозамещения и роста требований к экологичности материалов.

1.1.1.7 Порошковые сплавы

Порошковые твердые сплавы представляют собой сложные композиционные материалы, созданные методом спекания специально подобранных химических компонентов. Их структура включает в себя сочетание высокопрочных тугоплавких элементов, таких как карбиды и карбонитриды вольфрама, титана или тантала, которые обеспечивают исключительную износостойкость и термическую устойчивость, и пластичных связующих материалов – чаще всего кобальта (Co) или никеля (Ni), реже молибдена (Mo). Такая комбинация позволяет достичь уникального баланса между прочностью, пластичностью и размерной стабильностью, что критично для инструментов, работающих в экстремальных условиях. Например, в металлургии и машиностроении такие сплавы применяются для изготовления резцов, сверл и штампов, где важны долговечность и сопротивление тепловому и механическому износу.

Особое внимание заслуживают порошковые композиты на основе алюминиевых сплавов, которые демонстрируют повышенные характеристики жаропрочности и жаростойкости. Эти материалы способны сохранять свои эксплуатационные свойства при высоких температурах, что делает их незаменимыми в авиадвигателестроении и энергетике. Благодаря легкости алюминия и добавкам упрочняющих фаз, такие композиты сочетают низкую плотность (около 2,7 г/см³) с высокой удельной прочностью, что соответствует ключевым требованиям современных конструкционных материалов. Например, в автомобильной промышленности их используют для создания легких, но прочных деталей трансмиссий и двигателей, что снижает массу транспорта и повышает топливную эффективность.

Преимущества порошковых сплавов и алюминиевых композитов расширяются за счет их коррозионной стойкости, которая особенно важна в химической промышленности и морском судостроении. Кроме того, технологии порошковой металлургии позволяют точно регулировать состав и структуру материала, создавая изделия с заданными свойствами – от высокой твердости до электро- и тепло-

проводности. Это делает их конкурентоспособными по сравнению с традиционными литыми или деформируемыми сплавами, особенно в условиях необходимости минимизации массы при максимальной надежности.

Таким образом, развитие порошковых твердых сплавов и алюминиевых композитов открывает новые возможности для инженерных решений, обеспечивая баланс между прочностью, термостойкостью и легкостью. Их применение в высокотехнологичных отраслях подтверждает потенциал для дальнейшего совершенствования конструкций, соответствующих современным требованиям к эффективности и устойчивости.

1.1.1.8 Полимерные композиционные материалы

Полимерными композиционными материалами (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 жёсткости, 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 самолётов, но и, по аналогии с военными самолётами, в высоконагруженных деталях типа крыльев и вертикальных рулей [15].

1.1.2 Классификация композиционных материалов

Композиционные материалы представляют собой синтетические вещества, созданные искусственно, которые обладают уникальными характеристиками благодаря сочетанию нескольких компонентов с различными химическими и структурными свойствами. Эти материалы отличаются от природных аналогов тем, что их структура и функциональные свойства формируются на этапе проектирования, что позволяет адаптировать их под конкретные задачи – будь то авиационные конструкции, медицинские импланты или элементы автомобилей. Основные признаки композиционных материалов включают:

- Многокомпонентность – они состоят из двух или более элементов, разделенных четкой границей. Например, в стеклопластике основу составляет полимерная матрица, усиленная стеклянными волокнами.
- Синергетические свойства – конечные характеристики материала превосходят свойства отдельных компонентов. Так, углепластик сочетает легкость полимера с высокой прочностью углеродных волокон, что невозможно достичь в чистом виде у каждого из них по отдельности.
- Макроскопическая однородность и микроскопическая неоднородность – на уровне глаза материал кажется целостным, но под микроскопом видно, что его структура состоит из различных фаз, таких как матрица и армирующие элементы.
- Проектируемость – форма, состав и распределение компонентов определяются еще на этапе разработки, что позволяет создавать материалы с заданными параметрами, например, повышенной теплостойкостью или электропроводностью.

Классификация по типу матрицы. В зависимости от основного компонента, вокруг которого строится структура, композиционные материалы делятся на три группы:

- Полимерные матрицы – наиболее распространенные, так как обеспечивают легкость, коррозионную стойкость и простоту обработки. Примеры: стекло-

пластики (армированы стекловолокном), органопластики (органические волокна, такие как арамид) и углепластики (углеродные волокна).

- Керамические матрицы – применяются в условиях экстремальных температур (до 1600 °С) и агрессивных сред. Часто армируются керамическими волокнами или частицами, что повышает их устойчивость к растрескиванию.

- Металлические матрицы – используются в авиакосмической промышленности для создания деталей, выдерживающих высокие нагрузки. Например, алюминиевые сплавы с включениями бора или графита обеспечивают прочность при минимальном весе.

Армирование и ориентация волокон. Армирующие компоненты играют ключевую роль в улучшении механических свойств. По ориентации они подразделяются на:

- Изотропные материалы – обладают одинаковыми свойствами во всех направлениях. Например, дисперсионно-упрочненные композиты, где мелкие частицы равномерно распределены в матрице, или хаотично армированные материалы с короткими волокнами, случайно ориентированными в пространстве.

- Анизотропные материалы – их свойства зависят от направления нагрузки. Это однонаправленные композиты с параллельными волокнами (например, в лопатках турбин) или слоистые структуры с трехмерным армированием, обеспечивающие прочность в нескольких плоскостях одновременно.

Форма армирующих элементов также влияет на поведение материала:

- Нульмерные наполнители (частицы) – равномерно распределенные в матрице, улучшают износостойкость и жесткость. Пример: керамические гранулы в металлических композитах для подшипников.

- Одномерные наполнители (волокна) – вытянутые в одном направлении, обеспечивают высокую прочность вдоль оси. Используются в авиационных панелях и спортивном инвентаре.

– Двумерные наполнители (ткани, пластины) – создают плоские структуры с равномерным распределением нагрузки. Применяются в корпусах судов и автомобильных деталях.

При разработке анизотропных материалов учитывается симметрия структуры и ориентация волокон. Например, продольно-поперечная укладка с нуль-, одномерными и двухмерными наполнителями позволяет добиться оптимального баланса между прочностью и гибкостью. Однонаправленные композиты, где волокна расположены параллельно, демонстрируют максимальную прочность вдоль оси, что критично для несущих элементов крыльев самолетов.

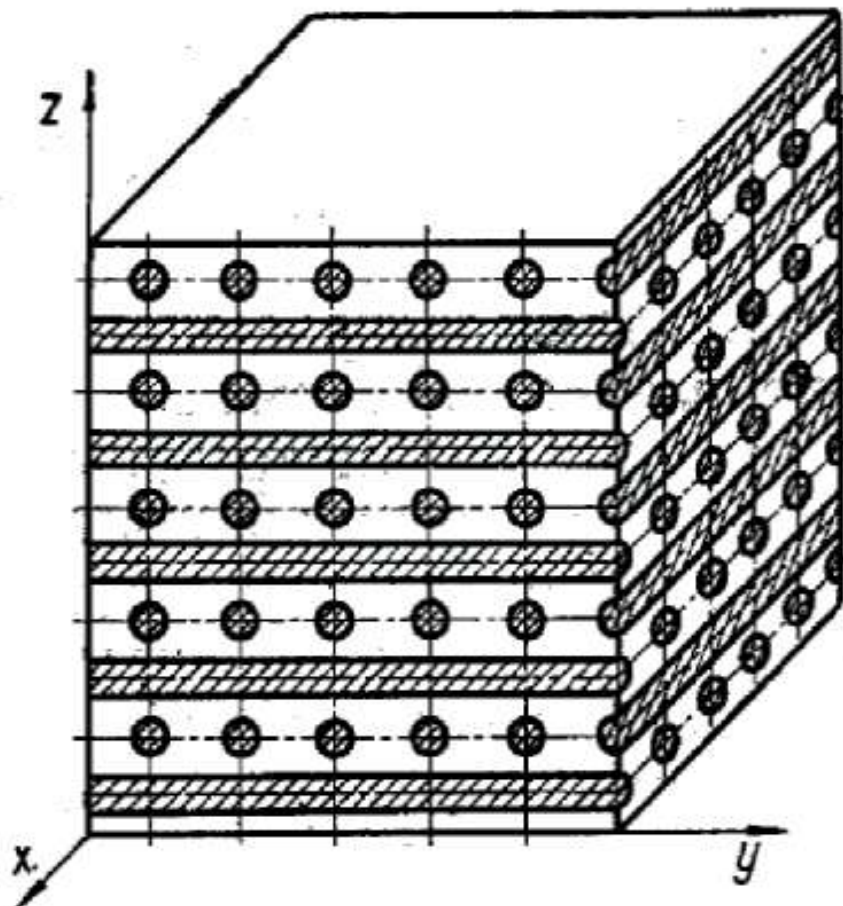


Рисунок 1 – Схематическое изображение структуры КМ с продольно-поперечной укладкой волокон

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

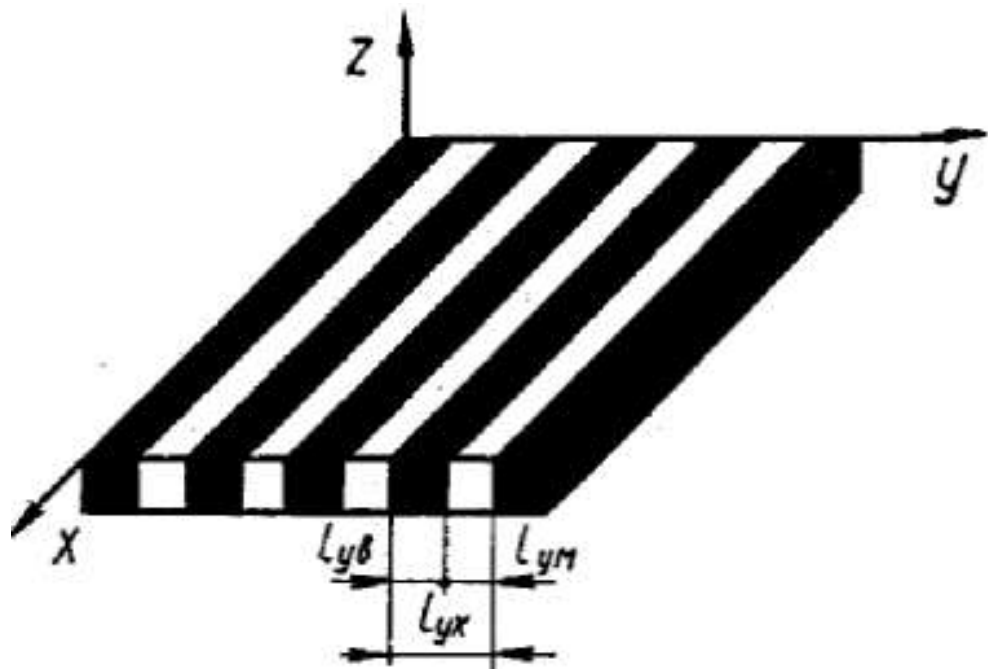


Рисунок 2 – Схематическое изображение структуры одно-направленного КМ
(черные области волокна, белые – матрица)

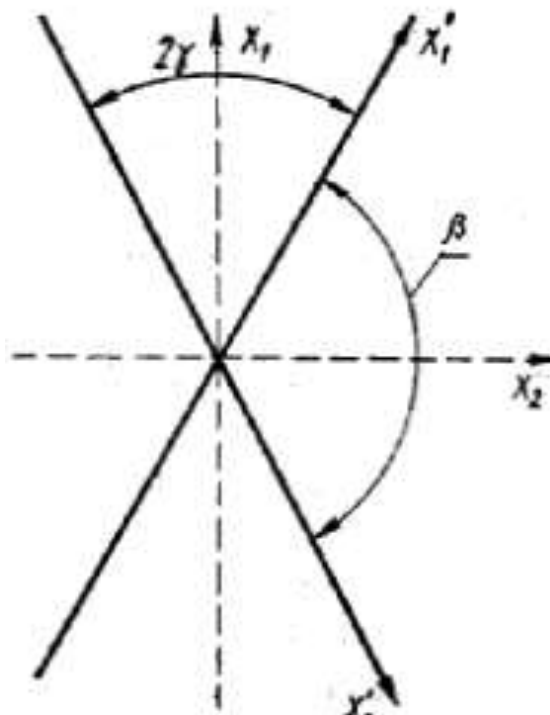


Рисунок 3 – Направления осей армирования в КМ с неортогональной укладкой
волокон

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

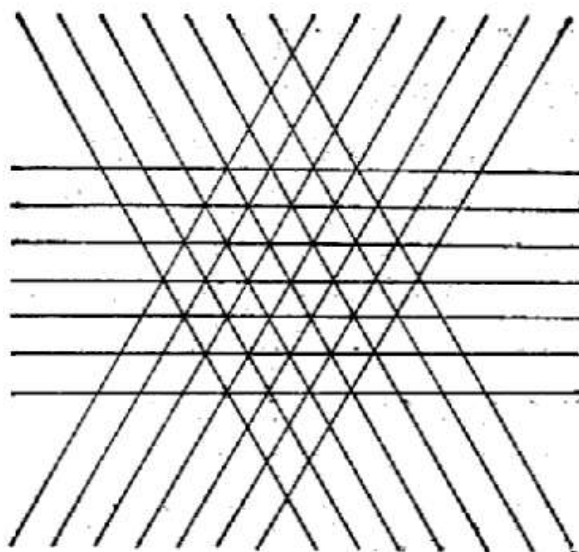


Рисунок 4 –Схема ориентации арматуры в слоистых КМ со звездной укладкой волокон в смежных слоях

Для расширения функциональных возможностей композиционных материалов (КМ) и усиления определенных характеристик часто применяют комбинирование наполнителей различной формы. Например, для повышения прочности сцепления между одномерными армирующими элементами (например, стеклянными или углеродными волокнами) и полимерной матрицей в состав вводят нульмерные частицы, такие как карбид кремния или асбестовые волокна. Это позволяет улучшить передачу нагрузки между компонентами и снизить вероятность расслоения материала. Также эффективно использование армирующих элементов одинаковой формы, но разного химического состава: например, для увеличения модуля упругости стеклопластиков дополнительно добавляют борные волокна, которые обеспечивают синергетический эффект за счет сочетания легкости и высокой жесткости.

Армирование композитов может осуществляться как изолированными наполнителями, так и их сплетенными структурами. Особенно распространено применение нуль- и одномерных наполнителей для создания трехмерно армирован-

ных материалов, где сложная геометрия соединений повышает устойчивость к динамическим нагрузкам. Многослойные или хаотично ориентированные волокна позволяют добиться изотропности свойств, что критично для деталей, испытывающих воздействие усилий в разных направлениях.

Упрочнение (армирование волокнами) металлов любым типом элементов преследует цель повышения прочности и модуля упругости (при сохранении плотности) для эксплуатации их в условиях знакопеременных температур [2]. При условии, что прочность и модуль упругости композиций однонаправленной непрерывной либо дискретной структуры связаны с объемным содержанием упрочняющей фазы, характеристики композиционного материала будут определяться следующими выражением $\sigma_c = \sigma_f v_f + \sigma_m^* (1 - v_f) - \sigma_c$.

В действительности вопрос прогнозирования свойств армированного композиционного материала гораздо сложнее, так как помимо величин предела прочности и модуля упругости компонентов, напряжения в матрице в момент разрушения волокна и объемных долей матрицы и волокон характеристики армированного материала зависят от множества других факторов и главные из них следующие:

- объемное содержание и ориентация армирующих волокон в волокнистых композиционных материалах в конкретных условиях эксплуатации;
- степень взаимодействия волокна и матрицы в процессе получения армированного композиционного материала и дальнейшей его эксплуатации;
- наличие специальных покрытий армирующих волокон для компонентов, имеющих низкую химическую стойкость одного к другому;
- сохранение целостности упрочняющих элементов, т. е. отсутствие разрушений армирующей фазы в процессе получения волокнистых композиционных материалов;
- обеспечение требуемой прочности соединения волокна и матрицы;
- дополнительная деформация волокон и матрицы в процессе армирования;
- окончательная термическая обработка.

Классификация КМ по технологическим признакам включает разделение полимерных материалов на литейные, прессованные и намоточные. Литье и прессование чаще всего используют для получения композитов с хаотичной структурой, тогда как ориентированную армирующую сетку формируют методом намотки или направленного прессования. Для металлических композитов применяют литейные методы (например, пропитку арматуры расплавленным сплавом или направленную кристаллизацию эвтектических систем) или деформируемые технологии, такие как горячее прессование, диффузионная сварка и штамповка. Последние также адаптируют для керамических композитов, за исключением динамических методов, таких как взрывное прессование [4].

По эксплуатационному принципу КМ подразделяются на несколько групп. Общеконструкционные материалы используются в авиации, судостроении и автомобилестроении для создания несущих элементов, выдерживающих значительные нагрузки при минимальном весе. Жаропрочные и термостойкие композиты применяются в турбинных лопатках, камерах сгорания и теплозащитных покрытиях, где необходимы устойчивость к высоким температурам и резким перепадам тепла. Фрикционные и антифрикционные материалы обеспечивают долговечность подшипников и зубчатых передач, а ударопрочные композиты находят применение в бронетехнике, защищая от кинетических и взрывных воздействий. Особую группу составляют материалы со специальными свойствами – электропроводными, магнитными или радиационно-стойкими, которые используются в электронике, ядерной энергетике и других высокотехнологичных сферах.

1.1.3 Способы получения волокнистых композиционных материалов

Современные технологии производства композиционных материалов предусматривают использование нескольких подходов, отличающихся по способу соединения армирующих компонентов и матрицы. Основные методы включают твердофазные, жидкофазные и осаждение-напыление, каждый из которых имеет свои особенности и область применения.

Эти технологии основаны на механическом объединении волокон (или других армирующих элементов) с матрицей в виде порошка или фольги. После соединения заготовка подвергается горячему прессованию, диффузионной сварке, экструзии или прокатке. Дополнительно может применяться спекание для улучшения прочностных характеристик материала. Однако такой подход сопряжен с риском повреждения волокон в процессе деформации или их химического взаимодействия с матрицей при высоких температурах. Например, при горячем прессовании алюминиевых композитов с углеродными волокнами возможна деградация армирующего компонента из-за термического напряжения.

Более распространенным является жидкофазный способ, при котором матрица расплавляется перед пропиткой армирующих элементов. Это позволяет избежать разрушения волокон, так как расплав легко проникает в пучки или дисперсные маты, сохраняя их структуру. Метод особенно эффективен для легкоплавких металлов, таких как алюминий, медь, никель и серебро, которые хорошо смачивают армирующие волокна. Для повышения качества пропитки часто используют вакуум, что снижает образование пор и обеспечивает равномерное распределение матрицы. Тугоплавкие металлы, например титан или вольфрам, обрабатываются методом горячего прессования с временным образованием жидкой фазы. Полученные заготовки затем подвергают горячей прокатке или выдавливанию. При этом важно ориентировать волокна вдоль направления обработки, чтобы минимизировать их повреждение.

Третья группа технологий связана с осаждением матричного материала на армирующий компонент из пара или раствора. Например, химическое или электролитическое осаждение позволяет создавать равномерное покрытие, но требует последующего уплотнения из-за наличия пустот в структуре. Этот метод широко применяется в производстве композитов с полимерной матрицей, где важна точность распределения армирующих элементов. Также используется газоплазменное напыление для создания керамических покрытий на металлических подложках, что актуально для жаропрочных деталей авиадвигателей.

Особое место занимает порошковая металлургия, позволяющая получать КМ с заданной пористостью за счет точного контроля концентрации волокон. Технология включает смешивание порошков матрицы и армирующих компонентов, формование и спекание. Для равномерного распределения компонентов применяют конусные, Y-образные смесители или устройства со смещенной осью вращения. Мокрое смешивание в спирте или воде предотвращает комкование волокон, тогда как использование шаровых мельниц может нарушить их ориентацию. Химические методы, такие как осаждение матрицы из растворов, обеспечивают высокую однородность, но имеют низкую производительность [14].

После смешивания смесь сушат при температуре 100–120 °С, если плотность компонентов схожа. При значительных различиях в плотности сушку исключают, чтобы избежать расслоения при засыпке в форму.

Выбор технологии зависит от типа матрицы, армирующих элементов и требуемых свойств материала. Твердофазные методы подходят для создания высокопрочных композитов с металлической матрицей, жидкофазные – для легкоплавких систем, а осаждение-напыление – для точного контроля структуры. Современные разработки направлены на комбинирование методов, например, вакуумную инфузию с последующим автоклавным формованием, что расширяет возможности применения КМ в авиации, автомобилестроении и электронике

На основе анализе используемых в настоящее время технологических приемов изготовление изделий из композиционных материалов сформулирована и предложена следующая схема технологического процесса получения армированного композиционного материала с интерметаллическим упрочнением: анализ напряженного состояния детали, выбор схемы армирования, анализ технологического передела, выбор схемы и расчет параметров и проведение СВ, операции технологического передела и термическая обработка.

Анализ напряженно деформированного состояния детали выполняет две основных задачи. Первая задача заключается в выявлении наиболее нагруженных участков склонных к разрушению в процессе эксплуатации конструкции и определении основных действующих нагрузок на него. Вторая задача непосредствен-

но сопряжена со следующей стадией технологического процесса - выбор подходящей схемы армирования детали способной при одинаковых геометрических размерах изделия сохранять прочность при действии основных нагрузок, определенных в первой задаче.

Анализ технологического передела предшествующий стадии выбора схемы сварки взрывом определяет не только количество и применяемые методы формообразования полуфабрикатов КМ, а также их геометрическую форму изготовления. Полуфабрикаты КМ получаемые при помощи сварки взрывом имеют цилиндрический или листовой вид. Следующим этапом получения КМ является сварка взрывом, её выполняют либо во взрывной камере, либо в условиях открытого полигона, по определенным на предыдущей стадии режимам и схемам. Полученный в результате сварки полуфабрикат КМ подвергают операциям формообразования. Завершающей стадией производства изделия из волокнистого композиционного металлического материала является сопутствующая термическая обработка, в результате которой достигается формирование необходимого количества интерметаллической фазы, которая служит упрочнителем и повышает эксплуатационные характеристики изделия.

Технологическая схема процесса получения КМ с интерметаллическим упрочнением, заключается в объединении известных способов получения КМ. Отличительной особенностью предложенной технологии является формирование механических характеристик композита в результате термической обработки на заключительной стадии после операций формообразования.

В результате приведенной комплексной технологии предполагается получить КМ с интерметаллическим упрочнением на основе алюминиевой и титановой матрицы, который будет обладать повышенными механическими характеристиками по сравнению исходными сплавами при сохранении малой плотности материала. Интерметаллиды образуются в результате диффузионного взаимодействия металлов матрицы и волокон, до частичного или полного превращения армирующих компонентов.

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 армированных композитов систем «титан-сталь» и «алюминий-медь» с упрочнением в виде интерметаллидов, поиск патентной и научно-технической информации.

Регламент поиска. Исследуемый объект: композиционный материал на основе титана и алюминия с интерметаллидным упрочнением.

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.

Предмет поиска: технологические основы получения высокопрочных композиционных материалов на основе титана и алюминия. 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	25 лет	Реестр изобретений РФ ФИПС
Способ получения композиционных материалов сваркой взрывом	<i>B32B7/04</i>	Россия, США, Швеция	25 лет	Реестр изобретений РФ 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]
Способ получения композиции он-ных материалов своркой 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]

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4
	Россия <i>RU 2463141 C1</i> <i>B32K 15/01</i>	ГОУ ВПО Волгоградский государственный техниче- ский 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., Россия, № 94015428/02, 26.04.1994	«Способ сварки ме- таллов взрывом» [22]

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

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 также 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 проволоку основе марки М1 и стальную проволоку марки Ст3 диаметром 1,0 мм.

На рисунке 5 показана плоскопараллельная схема армирования титана и алюминия арматурой виде проволоки. В схеме армирования титана стальной проволокой для увеличения скорости соударения использовалась стальная пластина толщиной 2 мм, которая устанавливалась без зазора на метаемую пластину 2.

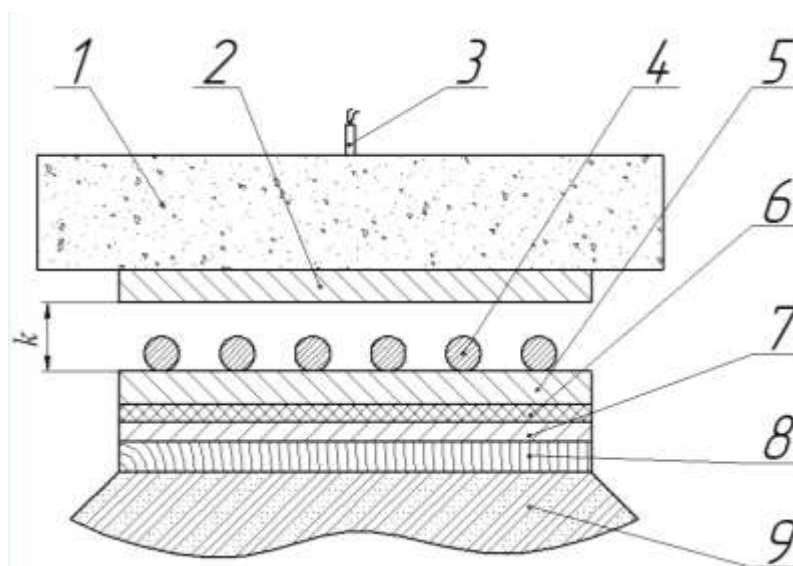


Рисунок 5 – Параллельная схема армирования проволокой: 1 – заряд ВВ; 2 – метаемая пластина матрицы; 3 – электродетонатор; 4 – проволока; 5 – неподвижная пластина матрицы; 6 – изоляционный слой; 7 – стальное основание; 8 – дополнительное основание; 9 – грунт; k – зазор между матричными пластинами

1.4 Технический уровень и тенденции развития

В современной промышленности наблюдается активное развитие технологий создания композиционных материалов, несмотря на уже существующее множество методов их получения. Однако потребность в разработке новых подходов остается актуальной, поскольку необходимо обеспечивать гибкое управление комплексом свойств материалов под конкретные задачи. Недостаточно изучены механизмы влияния конструктивных элементов промежуточного слоя на механическую прочность и устойчивость к нагрузкам конечного продукта [23]. Это особенно важно для слоистых композитов на основе титана, которые часто эксплуатируются в условиях экстремальных температур. Подобные условия могут вызывать структурные изменения на границах слоев, что снижает долговечность материала. Для решения этой проблемы разрабатываются покрытия с заданными теплофизическими характеристиками, способные защитить материал от термического разрушения.

Титан и его сплавы благодаря уникальным физико-механическим свойствам занимают ключевое место среди конструкционных материалов. По сравнению с алюминиевыми сплавами и сталями, титан превосходит их по удельной прочности и хладостойкости, а относительно медно-никелевых сплавов и нержавеющей сталей демонстрирует превосходную коррозионную стойкость. Замена традиционных сталей на титановые сплавы позволяет сочетать высокую прочность и пластичность при низкой плотности, повышая удельные показатели жесткости и прочности, что делает их незаменимыми в авиастроении, автомобилестроении, судостроении, медицине и других отраслях.

Одной из перспективных сфер применения титановых сплавов с интерметаллическим упрочнением является машиностроение. В автомобилестроении, например, использование жаропрочных титановых компонентов позволяет снижать массу деталей возвратно-поступательных механизмов без потери прочности. Это достигается за счет внедрения высокопрочных сплавов в производство несущих конструкций, клапанов, шатунов, кулачковых валов, элементов трансмиссий и

систем выхлопа. Например, применение титановых шатунов уменьшает нагрузку на подшипники на 30%, повышая надежность двигателей.

В судостроении среднепрочные титановые сплавы находят применение в изготовлении гребных валов, насосных деталей, обшивки и винтов. Высоколегированные титановые материалы используются для создания тонкостенных труб в конденсаторах и теплообменниках, а также глушителей дизельных двигателей подводных лодок. Это позволяет снизить общую массу корабля, увеличивая грузоподъемность и скорость перемещения [23].

Авиационная промышленность предъявляет особые требования к материалам: они должны обладать высокой удельной прочностью, жаропрочностью, устойчивостью к усталостным нагрузкам и коррозии. Жаропрочные титановые сплавы работают при температурах выше 610 °С, что делает их идеальными для компрессорных лопаток, турбинных дисков и воздухозаборников сверхзвуковых самолетов. Нелегированный титан применяется для кожухов, закрылков и защитных оболочек, тогда как легированные версии используются в каркасах фюзеляжей, шасси и трубопроводах. Замена легированных сталей на титановые сплавы в авиастроении снижает массу летательных аппаратов на 40%, сохраняя их надежность и экономичность.

Современные тренды в материаловедении, такие как автоматизация производства и интеграция цифровых технологий, усиливают потенциал композитных материалов. Например, внедрение автоматизированных систем укладки волокон повышает точность и однородность структуры, что критично для высоконагруженных конструкций. Параллельно развивается порошковая металлургия, позволяющая создавать материалы с заданной пористостью и распределением армирующих элементов. Эти подходы открывают новые возможности для адаптации свойств композитов под специфические условия эксплуатации, что соответствует требованиям устойчивого развития и энергоэффективности.

1.5 Технологические особенности получения высокопрочных армированных композиционных металлических материалов сваркой взрывом

Сварка детонированием проводилась на открытой площадке, где для минимизации деформации изгиба заготовок применялись стальные основания толщиной 5 мм. Для увеличения высоты обрезки выстреливаемой пластины дополнительно использовались деревянные подложки, которые позволяли регулировать динамику взаимодействия между компонентами. На схеме, представленной на рисунке 6, изображено расположение армирующих вставок между слоями матричных листов, что обеспечивало равномерное распределение нагрузки и повышало прочностные характеристики конечного изделия.

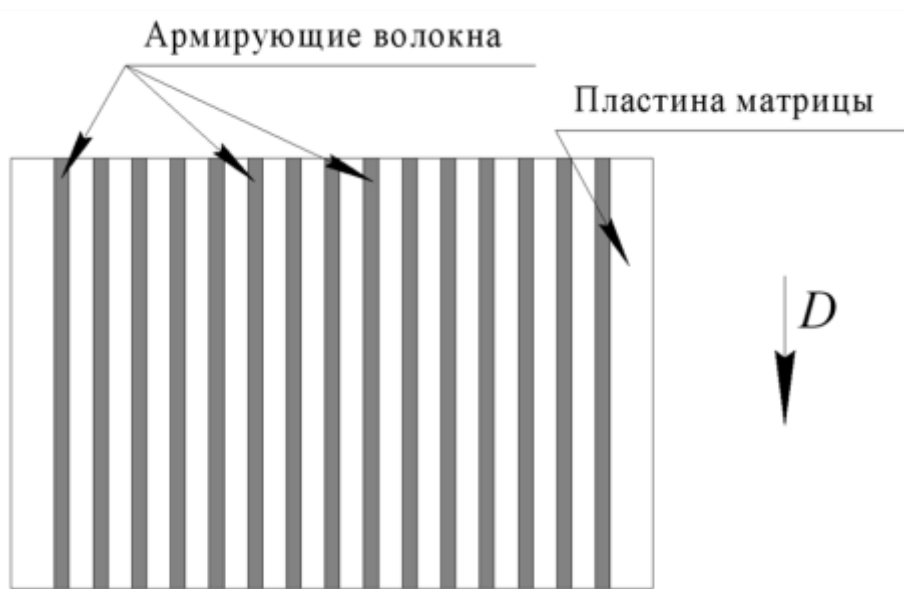


Рисунок 6 – Схематичное расположение волокон (вид – сверху): D – направление распространения фронта детонационной волны показано стрелкой

В ходе экспериментальных исследований было установлено, что реализация схемы, изображённой на рисунке 6, невозможна из-за нарушения исходного расположения армирующих компонентов в процессе сварки. Это связано с тем, что волокна смещаются относительно заданной позиции, что приводит к образо-

ванию участков с непроваром в местах их скопления. Для устранения данного недостатка предложен механизм фиксации армирующих элементов относительно матрицы, обеспечивающий стабильное положение компонентов в процессе технологической обработки. Такой подход позволяет сохранить заданный шаг армирования и повысить однородность структуры материала. Подробное описание конструкции механизма закрепления представлено на рисунке 7, где показаны элементы, обеспечивающие точное позиционирование армирующих компонентов.

Смещение волокон в традиционных схемах сварки объясняется динамическими нагрузками, возникающими при взаимодействии компонентов. Это явление требует корректировки технологии, особенно при работе с материалами, чувствительными к нарушению геометрической стабильности. Предложенный механизм учитывает эти особенности и направлен на минимизацию дефектов, связанных с непроваром, что подтверждается результатами экспериментов.

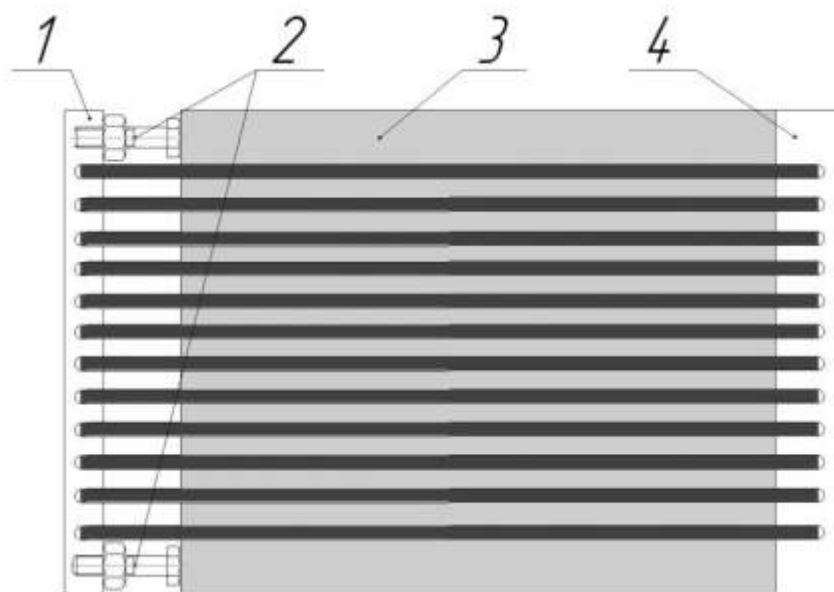


Рисунок 7 – Механизм закрепления и ориентации армирующих волокон:
1 – уголок, 2 – регулирующее болтовое соединение, 3 – неподвижная пластина матрицы, 4 – металлическая дополнительная пластина

Разработанный механизм фиксации и ориентации армирующих волокон основан на использовании дополнительных стальных элементов – уголков и пла-

стин, установленных в зонах крепления волокон. Основной задачей конструкции является обеспечение стабильного положения волокон в процессе сварки и предотвращение их смещения, которое может привести к дефектам, таким как непровар в местах скопления армирующих компонентов.

Длина пластины 4 и уголка 1 соответствуют ширине неподвижной матричной пластины. Для обеспечения жёсткости и компенсации динамических нагрузок при сварке толщину пластины выбирали 2 мм, а ширину от 30 до 40 мм. Уголок с полками шириной 20 мм и толщиной 2 мм обеспечивал надёжное крепление к основанию. Для точного позиционирования волокон вдоль пластины и уголка просверливались технологические отверстия диаметром, превышающим диаметр волокна на 0,2 мм, что позволяло минимизировать механическое повреждение армирующих элементов при фиксации. Расстояние между центрами отверстий строго соответствовало заданному шагу армирования, что критично для равномерного распределения нагрузки в композите.

Для стабилизации положения армирующих волокон перед сваркой пластина 4 жёстко крепилась к основанию 3, а уголок 1 фиксировался болтовым соединением 2. Такая конструкция позволяла не только выдерживать заданную ориентацию волокон в пространстве, но и предотвращать их выброс из сварочного зазора в момент взрыва. Это особенно важно для слоистых композитов, где искривление или смещение волокон снижает прочностные характеристики материала в направлении армирования.

Преимуществом механизма стало сочетание простоты конструкции с высокой точностью контроля геометрических параметров. Эксперименты показали, что равномерное распределение волокон и их ориентация под углом 0° или 90° к нагрузке значительно повышают прочность и ударную вязкость материала, что подтверждается исследованиями влияния ориентации волокон на свойства композитов. Кроме того, предотвращение дефектов типа непровара способствовало улучшению адгезии между волокнами и матрицей, что снижало риск деструкции и гидролиза на границе раздела фаз.

1.6 Технологические схемы получения армированных композиционных материалов сваркой взрывом

Несмотря на чрезвычайно короткую продолжительность процесса сварки взрывом, составляющую порядка микросекунд (10^{-6} с), в зоне соударения успевают протекать сложные физико-механические процессы, необходимые для формирования прочного соединения между металлами. Эти процессы включают активное деформирование поверхностных слоев, очистку от загрязнений и оксидных пленок, а также образование новых атомных связей через диффузионные и пластические механизмы. Контроль над этими явлениями осуществляется за счет регулирования параметров удара – таких как скорость соударения пластин, угол их расположения и выбор типа взрывчатого вещества (ВВ), что позволяет оптимизировать прочность и качество соединения.

Технологически сварка взрывом реализуется по двум основным схемам. Первая предполагает наклонное расположение соединяемых пластин под определенным углом, представлена на рисунке 8а, а вторая – их параллельное размещение, представленное на рисунке 8б.

Высокие скорости соударения приводят к возникновению экстремальных давлений в зоне контакта (до нескольких гигапаскалей), что вызывает интенсивную пластическую деформацию и локальное повышение температуры. Эти факторы способствуют удалению поверхностных загрязнений, активации атомов металлов и образованию прочного соединения без расплавления основных материалов – ключевая особенность твердофазного процесса. Характерной чертой сварных швов, полученных таким способом, является волнообразная форма границы раздела между пластинами, обусловленная динамикой взаимодействия при ударе. Однако в некоторых случаях возможно формирование плоских соединений, если параметры удара и свойства материалов позволяют избежать волновой неустойчивости.

Особую сложность представляет моделирование процесса, поскольку требует учета нелинейных упруго-пластических характеристик материалов и точного

описания уравнений состояния в условиях ударных нагрузок. Эта задача остается актуальной для повышения предсказуемости результатов сварки и оптимизации технологических параметров. Тем не менее, методика широко применяется в промышленности для создания биметаллических соединений, особенно в авиастроении, судостроении и энергетике, где критичны прочность и коррозионная стойкость соединений [24].

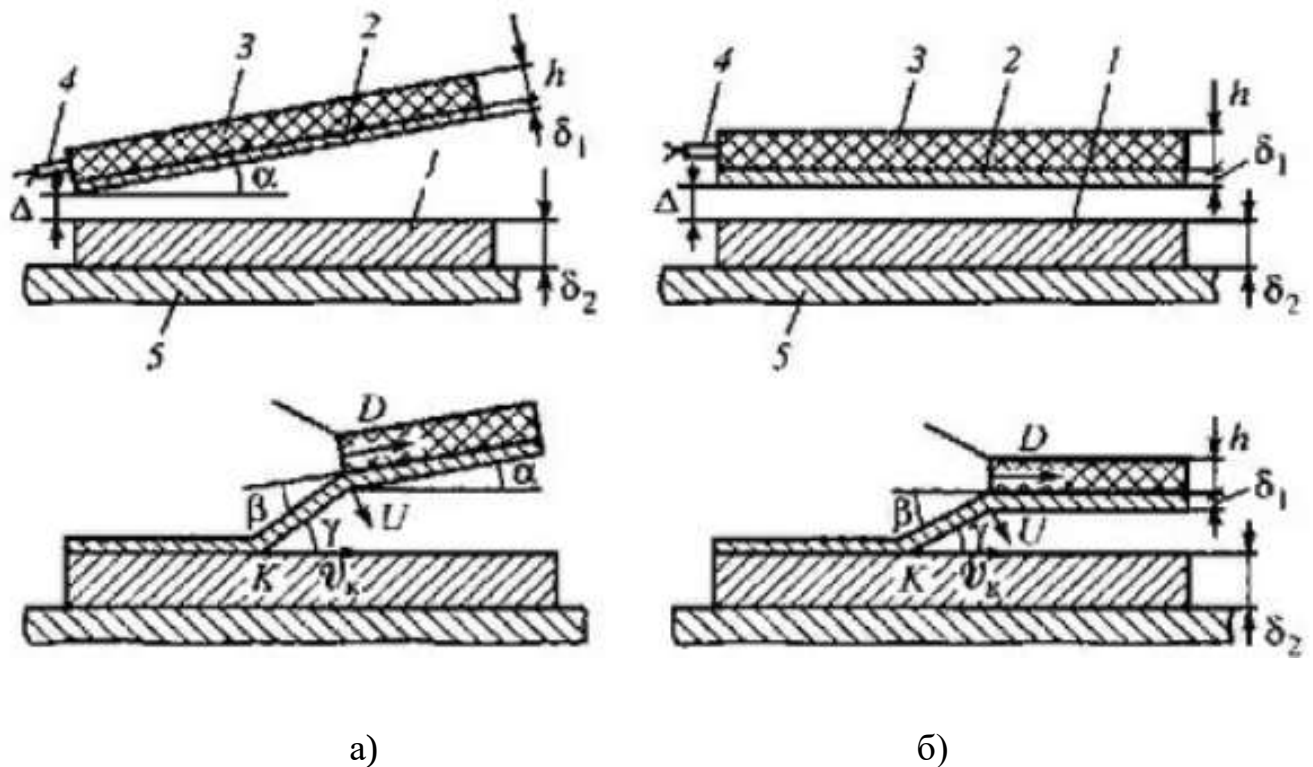


Рисунок 8 – Принципиальные схемы СВ: а) - угловая, б) – параллельная;
 1 – неподвижная пластина; 2 – метаемая пластина; 3 – заряд ВВ; 4 – детонатор;
 5 - основание

Физические процессы, происходящие при сварке взрывом (СВ), а также структурные и механические характеристики получаемых соединений зависят от множества факторов, которые условно разделены на кинематические и физические (динамические) параметры. Конкретно, характеристики взрывчатого вещества (ВВ) играют ключевую роль: скорость детонации (D), плотность заряда (ρ), показатель политропы продуктов взрыва (k), масса заряда (m) и толщина слоя ВВ (δ) напрямую влияют на динамику удара и распределение энергии в зоне контакта.

Свойства свариваемых металлов также критичны – их физико-механические параметры (плотность, твердость, вязкость), теплофизические характеристики (теплопроводность, теплоемкость, температура плавления), а также микрорельеф поверхностей и начальная температура определяют способность материалов к пластической деформации и образованию прочных связей.

Особое внимание уделяется начальному u между пластинами α , коэффициенту нагрузки (r) – безразмерному параметру, характеризующему соотношение энергетических воздействий, и сварочному зазору (h), который представляет собой начальное расстояние между пластинами. Увеличение зазора приводит к возрастанию скорости соударения, что сначала улучшает прочность соединения за счет более эффективной очистки поверхностей и активации атомов, но при превышении оптимального значения вызывает дефекты, такие как трещины или непровар, из-за избыточной энергии взрыва. Для обеспечения высокой и стабильной прочности необходимо точно контролировать плотность заряда ВВ по всей поверхности свариваемых листов и подбирать начальный зазор, соответствующий сочетанию конкретных металлов.

Кроме того, структурная неоднородность соединения, обусловленная термомеханическими процессами, требует учета ударной адиабаты материалов – зависимости давления от объема при адиабатических условиях, которая определяет поведение металлов под экстремальными нагрузками. Эти аспекты делают процесс СВ сложным для моделирования, однако позволяют создавать уникальные биметаллические соединения с высокой коррозионной стойкостью и прочностью, востребованные в авиации, судостроении и энергетике [24].

1.7 Выбор взрывчатого вещества для сварки взрывом

Сварка взрывом предъявляет строгие и специфические требования к выбору и применению взрывчатых веществ, поскольку от их характеристик напрямую зависит качество соединения и безопасность процесса. Основные параметры, которые необходимо учитывать, включают скорость детонации, стабильность горения

в плоских зарядах и эксплуатационную безопасность. Во-первых, скорость детонации ВВ должна быть ниже скорости звука в соединяемых металлах, чтобы обеспечить твердофазное соединение без расплавления материалов. Обычно этот диапазон составляет от 1500 м/с до значения, соответствующего скорости звука в конкретном металле. Во-вторых, для зарядов большой площади и малой толщины, часто используемых в СВ, критически важно поддерживать стабильную детонацию, так как любые отклонения могут привести к неравномерному распределению энергии и дефектам шва. В-третьих, ВВ должны быть экономически доступными, безопасными при обращении и обладать длительной стабильностью свойств, что особенно важно в промышленных условиях.

Для выполнения этих условий чаще всего применяются смесевые порошкообразные ВВ, такие как композиции на основе тротила (ТНТ), аммиачной селитры (NH_4NO_3) и поваренной соли (NaCl). Эти составы сочетают относительно низкую стоимость, высокую стабильность и возможность точной настройки параметров детонации. Однако скорость детонации таких веществ зависит от ряда факторов: высоты и формы заряда, насыпного веса, химического состава смеси и размера гранул. Например, увеличение плотности заряда повышает скорость детонации, тогда как избыточная пористость может вызвать её снижение [25].

Экспериментальные исследования показывают, что большинство литературных данных по детонации сосредоточены на цилиндрических или стандартных зарядах, что ограничивает их применимость в условиях СВ, где требуются плоские и равномерные заряды. В идеализированных моделях, игнорирующих потери энергии из-за теплопередачи или неполного сгорания компонентов, теория детонации позволяет рассчитать скорость детонации на основе теплоты взрыва (Q) и начальной плотности заряда p_0 . Однако при реальных условиях, особенно для зарядов, размеры которых меньше критической величины ($2L$, где L – ширина зоны химической реакции), возникают существенные отклонения. В таких случаях волна разрежения проникает в зону реакции до её завершения, что приводит к снижению давления, скорости детонации и, в конечном итоге, к полному затуханию процесса при достижении критического размера заряда (d_k).

Однородные ВВ (тексоген, ТНТ, ТЭН) имеют небольшие критические (от 0,5 до 3,0 мм) и предельные размеры заряда. 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 $p_0 = 1,6 \text{ г/см}^3$ $d_k = 0,5 \text{ мм}$.

Более сложный характер изменения 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.

При использовании ВВ одного и того же химического состава их поведение в процессе детонации может значительно различаться в зависимости от плотности, формы заряда, наличия оболочки и степени измельчения компонентов. Например, продолжительность химической реакции, ширина зоны детонации и минимальные размеры заряда, при которых возможна устойчивая детонация, напрямую зависят от этих параметров. Чем выше плотность заряда, тем интенсивнее протекает реакция, что может, как повысить эффективность взрыва, так и привести к нестабильности процесса при нарушении оптимальных условий. Форма заряда также играет ключевую роль: в плоских зарядах, часто применяемых в СВ, распределение энергии более равномерное, чем в цилиндрических аналогах, что критично для формирования качественных соединений.

В промышленной практике СВ широко используются плоские заряды смесей аммонита №6 с аммиачной селитрой, различающиеся по химическому составу и гранулометрическим характеристикам. Высота таких зарядов варьируется от 10 до 200 мм, что позволяет регулировать энергию взрыва под конкретные задачи. Скорость детонации в этих системах зависит не только от высоты заряда, но и от однородности смеси: при увеличении степени измельчения компонентов улучшается их взаимодействие, что повышает стабильность детонации и снижает вероятность дефектов шва. Однако слишком мелкий помол может привести к повышенной чувствительности ВВ к внешним воздействиям, что требует точного баланса между эффективностью и безопасностью.

Особое внимание необходимо уделять краевым эффектам при использовании зарядов большой высоты. Волны разгрузки, распространяющиеся со стороны боковых граней заряда, могут нарушать симметрию детонационного фронта, изменяя давление и температуру в зоне реакции. Кроме того, направление подхода детонационного фронта к границе заряда влияет на характер разлета продуктов взрыва: при наклонном угле фронта наблюдается асимметричное распределение энергии, что усиливает локальные деформации метаемой пластины. Эти факторы могут вызвать неравномерный прогиб краев заготовки, приводя к образованию непроваров в краевых зонах сварного соединения. Для минимизации подобных дефектов рекомендуется корректировать геометрию заряда, использовать демпфирующие вставки или оптимизировать начальный зазор между пластинами [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].

Оценку механических свойств производили по ГОСТ 1497-84 [28] методом испытания образцов на одноосное растяжение на разрывной машине модели ИР 5145-500-11, технические характеристики которой представлены в таблице 3.

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

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

Подготовка образцов производилась механическим способом с применением угловой шлифовальной машинки модели *Makita GA 9020 SF*.

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 проводятся на металлографическом микроскопе Альтами MET 1MT, технические характеристики представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Технические характеристики Металлографический микроскоп АЛЬ-ТАМИ МЕТ 1MT

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
взрывчатое Объективы обладающих :	<p>Планахроматические объективы для светлого и темного поля на бесконечность (<i>Infinity Color Corrected System</i>):</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:	<p>пятипозиционный, с точной фиксацией объективов относительно оптической оси.</p>

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 регулируемыми 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, после чего заливают в обоймах эпоксидной смолой или сплавом Вуда. Поверхность образца шлифовалась и полировалась.

Травление по алюминию осуществляли реактивом следующего состава: 1 часть воды, 3 части концентрированной азотной и 2 части концентрированной соляной кислот. Для титана и зоны сварного соединения использовали реактив, состоящий из 5 %-го водного раствора азотной кислоты и 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	целью 8~2000 армированного <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 МТВ-1 НВ 100 $\pm$ 25 при нагрузке 9807 Н НВ 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 основных схем 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

Разработка технологических схем сварки взрывом для композиционных материалов систем «титан-сталь» и «алюминий-медь» основана на обеспечении высококачественного соединения между матричными слоями и армирующими волокнами. Это требование обусловлено необходимостью сохранения общей прочности композита и возможностью его последующего взаимодействия в процессе термической обработки, которая может вызывать диффузионные процессы и фазовые превращения на границе раздела. Качественное соединение также предотвращает образование дефектов, таких как трещины, расслоения и непровары, которые могут снизить эксплуатационные характеристики материала.

После выполнения сварки взрывом проводится комплексный контроль качества, включающий визуальный осмотр и микроструктурный анализ. При визуальном осмотре выявляются критические дефекты: трещины, сколы, расслоения матрицы и волокон, а также оценивается сплошность поверхности материала и отсутствие раковин, свищей и других дефектов. Микроструктурный анализ фокусируется на контроле качества границы раздела между матрицей и волокнами. Основными параметрами здесь являются отсутствие или минимальное количество непроваров, оплавленных участков и промежуточных фаз, которые могут исключать операции формообразования и отрицательно влиять на механические и технологические свойства полуфабриката. Например, промежуточные фазы на границе раздела могут снижать адгезию между компонентами и повышать хрупкость соединения [8].

Для достижения заданных характеристик сварного шва ключевым этапом является подбор рациональных технологических параметров. Это включает опти-

мизацию высоты и состава взрывчатого вещества (ВВ), начального зазора между матричными слоями и армирующими компонентами, а также угла расположения заряда. Например, скорость детонации ВВ должна быть ниже скорости звука в соединяемых металлах, чтобы обеспечить твердофазное соединение без расплавления материалов. Кроме того, необходимо учитывать краевые эффекты при использовании зарядов большой высоты, так как волны разгрузки со стороны боковых граней заряда могут нарушать симметрию детонационного фронта, приводя к неравномерному распределению энергии и дефектам шва.

В рамках исследований были получены образцы композиционных материалов методом сварки взрывом. В качестве матрицы использовался алюминиевый сплав АМг5М, армированный медной проволокой марки М1, а также титановый сплав ВТ1-0, усиленный стальной проволокой марки Ст3. Выбор этих пар обусловлен их широким применением в авиации, судостроении и энергетике, где критичны сочетание легкости, прочности и коррозионной стойкости. Полученные образцы демонстрируют потенциал технологии для создания биметаллических соединений с заданными свойствами, что подтверждается результатами микроструктурного анализа и испытаний на прочность.

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

Основными технологическими параметрами сварки взрывом являются скорость детонации, величина зазора между метаемым и неподвижным элементами, а также безразмерный параметр, определяемый по [24] формуле 1.69. Скорость соударения рассчитывали путем совместного решения уравнений 1.4 - 1.7 по [24], угол соударения по формуле:

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

где γ – угол соударения, град.;

V – скорость соударения, м/с;

D – скорость детонации, м/с.

Вычисляемые значения сопоставляли с площадкой свариваемости. На рисунке 9 представлена принципиальная схема сварки взрывом армированных композиционных материалов.

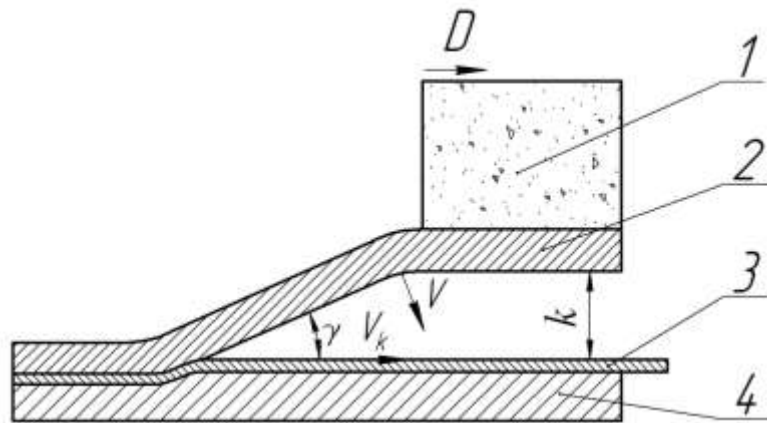


Рисунок 9 – Схема нагружения волокна при сварке взрывом композита: 1 – ВВ; 2, 4 – матричные пластины; 3 – армирующее волокно; γ – угол соударения, V_k – скорость точки контакта

Исследования по влиянию параметров СВ на получение качественного сварного соединения матрицы и волокна использовали два типа ВВ – смесь аммонита 6ЖВ и селитры в пропорции 50/50 (АТ-1) и игданит.

В таблице 6 и 7 представлены режимы и результаты расчета кинематических параметров СВ образцов композиционного материала на основе сплава АМг5М армированного проволокой марки М1 и сплава ВТ1-0 армированного проволокой марки Ст3.

Таблица 6 – Режимы и результаты расчета кинематических параметров процесса сварки композита системы «алюминий-медь»

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 кинематических параметров процесса сварки композита системы «титан-сталь»

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.

На поверхности материалов компонентов недопустимо наличие окислов, оксидных пленок, влаги и металлических включений - поверхности тщательно зачищают и обезжиривают. 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. СВ проводили на открытом полигоне по схеме, указанной на рисунке 5, с закреплением волокон.

На рисунке 10 и 11 показано расположение волокон при армировании сплава алюминия медной проволокой и титанового сплава стальной проволокой соответственно.



Рисунок 10 – Расположение волокон при армировании сплава АМг5М медной проволокой марки М1



Рисунок 11 – Расположение волокон при армировании сплава ВТ1-0 стальной проволокой марки Ст3

В ходе экспериментов были получены образцы композиционных материалов на основе алюминиевого сплава АМг5М и титанового сплава ВТ1-0. При визуальном осмотре алюминиевых композитов после сварки взрывом выявлены существенные дефекты, вызванные использованием ВВ типа АТ-1. В частности, его воздействие приводит к разрушению поверхности матричной пластины, образованию раковин и свищей, что ухудшает внешний вид материала и снижает его технологическую ценность. Для устранения этих недостатков было предложено использовать дополнительный изоляционный слой между пластиной и ВВ. Однако этот подход сопровождается снижением скорости соударения в зоне контакта матрицы и армирующих элементов, что вызывает непровар и снижает прочность соединения. Применение более толстых зарядов ВВ для компенсации энергии удара оказалось экономически нецелесообразным из-за роста затрат на производство и необходимость одновременного использования изоляционных материалов.

В результате исследований установлено, что оптимальным вариантом для сварки алюминиевых композитов является использование ВВ – игданит. Этот состав обеспечивает лучший внешний вид поверхности материала по сравнению с АТ-1, исключая потребность в дополнительной изоляции. Кроме того, игданит обладает высокой стабильностью параметров детонации: при незначительном из-

менении толщины заряда его скорость детонации остается практически постоянной, а насыпная плотность – равномерной. Это позволяет поддерживать стационарные режимы сварки и избежать неустойчивости процесса, характерной для других типов ВВ.

Однако при использовании форсированного режима сварки, связанного с увеличением энергии взрыва, наблюдается обратный эффект: повреждение матрицы и нарушение целостности армирующих волокон. Это приводит к снижению прочности композита и разрушению матричных слоев, что визуализировано на рисунке 12. Подобные дефекты объясняются чрезмерным динамическим напряжением, вызывающим микроскопические трещины в алюминиевой матрице и отслоение волокон. Для предотвращения таких последствий необходимо строго контролировать параметры взрыва, чтобы избежать перегрузки материала, особенно при работе с легкими сплавами, чувствительными к ударным нагрузкам. На рисунке 13 показан внешний вид армированного композиционного материала с матрицей из сплава АМг5М, полученного на рациональных режимах.



Рисунок 12 – Разрушение образца при сварке взрывом на форсированных режимах

При визуальном осмотре поверхности композита на основе сплава ВТ1-0 появление поверхностных дефектов не выявлено. На рисунке 14 представлен

внешний вид композиционного материала на основе титанового сплава после сварки взрывом полученного на рациональных режимах.



Рисунок 13 – Листовой полуфабрикат армированного композиционного материала на основе АМг5М

Установлено, что сварка взрывом позволяет получать листовые армированные композиционные материалы с армирующими элементами.

Объемная доля – армирующих – компонентов – композиционного – материала составила 4,5 до 5,6%,

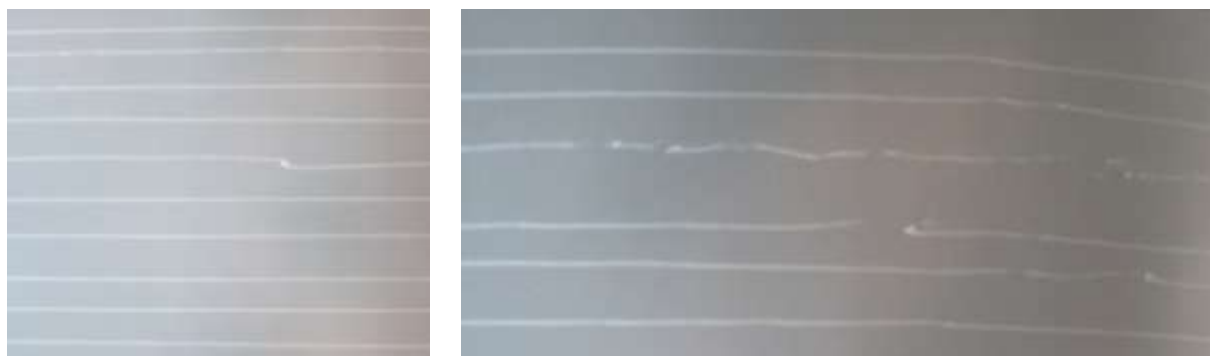
Исследовали целостность волокон их направленность и расположение в волокнистом композиционном материале. Для исследования выбран неразрушающий рентгенографический метод контроля. На рисунке 15 и 16 представлены характерные рентгенографические снимки армированного композиционного материала, полученные с помощью импульсного рентгеновского аппарата «САРМА» (B&G) модель 500.



Рисунок 14 – Листовой полуфабрикат армированного композиционного материала на основе ВТ1-0



Рисунок 15 – Рентгенографический снимок образца армированного композиционного материала



а)

б)

Рисунок 16 – Рентгенографический снимок образца армированного композиционного материала: а – локальное заземление армирующего элемента; б – потеря устойчивости, разрыв армирующих элементов

На основании результатов неразрушающего контроля армированных композиционных материалов были выявлены дефекты, такие как разрывы и локальные заземления армирующих элементов, которые оказывают прямое влияние на формирование интерметаллической фазы и общие физико-механические свойства композита. Для диагностики таких дефектов применяются современные методы, включая акустический, тепловой и оптический контроль, регламентированные стандартом ГОСТ Р 56787-2015 для полимерных композитов. Например, активная термография позволяет выявлять неоднородности структуры за счет регистрации различий в теплопроводности материалов. Эти дефекты нарушают равномерное распределение нагрузки между матрицей и армирующими компонентами, что снижает прочность соединения и повышает риск расслоения, особенно в условиях циклических нагрузок.

Локальные заземления в структуре композита играют роль концентраторов напряжений, что приводит к локальному снижению прочности материала. Анализ механизмов разрушения армированных композитов показал, что причиной повреждений армирующих элементов часто становятся форсированные технологические режимы – такие как чрезмерная скорость детонации ВВ или неподходящий зазор между слоями. Это вызывает динамическое перенапряжение, приводящее к

микротрещинам в матрице и разрушению волокон. Например, использование зарядов с нестабильными параметрами детонации (например, ВВ типа АТ-1) может спровоцировать неравномерное распределение энергии, что усугубляет дефекты поверхности – раковины, свищи и непровары.

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 СтЗ.

- исследовано влияние состава взрывчатого вещества на образование поверхностных дефектов композиционного материала с матрицей из сплавов АМГ5М и ВТТ1-0. 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 ударноволнового нагружения на формирование заданной структуры и свойств композиционных металлических материалов

3.1 Изучение влияния технологических режимов процесса ударноволнового нагружения на формирование заданной структуры и свойств композиционных материалов

3.1.1 Выбор рациональных параметров сварки взрывом при армировании композиционных материалов

Достижение оптимального баланса между физико-механическими и эксплуатационными характеристиками в готовых изделиях, а также их воспроизводимость представляют собой ключевую задачу материаловедения. Для ее решения необходимо установить четкие взаимосвязи между структурой композиционных материалов и их свойствами, а также учесть параметры ударно-волнового нагружения, которые напрямую влияют на качество соединения. Особое внимание уделяется сварке взрывом алюминиевых и медных сплавов, а также системам «титан-сталь», где возникают ограничения, связанные с необходимостью минимизации энергозатрат в зону соединения для предотвращения термического разрушения материалов.

Для определения рациональных диапазонов скорости соударения V_c и скорости точки контакта V_k , а также изучения их влияния на прочность соединений, были проведены серия экспериментов с использованием сплава АМг5М, армированного проволокой М1, и сплава ВТ1-0 с проволокой Ст3. Сварка выполнялась по схеме, представленной на рисунке 5. В качестве ВВ – смеси аммонита 6ЖВ с аммиачной селитрой (50/50) и игданита. Последний характеризуется стабильностью скоростных параметров при инициировании, что критично для обеспечения равномерного распределения энергии взрыва.

Эксперименты проводились в широком диапазоне скоростей:

– Для алюминиевого сплава с медным армированием скорость точки контакта V_k варьировалась от 1780 до 2400 м/с, а скорость соударения V_c – от 535 до 800 м/с.

– Для титано-стального композита V_k составляла 1900–2985 м/с, а V_c – от 300 до 660 м/с.

Расчет параметров взрывного нагружения производили по формулам (1.4-1.7) и (1.10-1.13) [24]. Особое внимание уделено выбору ВВ, так как их характеристики (скорость детонации, плотность заряда) напрямую влияют на динамику удара и качество соединения. Например, игданит, в отличие от аммонита, обеспечивает более стабильную детонацию, что подтверждается исследованиями в области методологии расчета и выбора параметров сварки

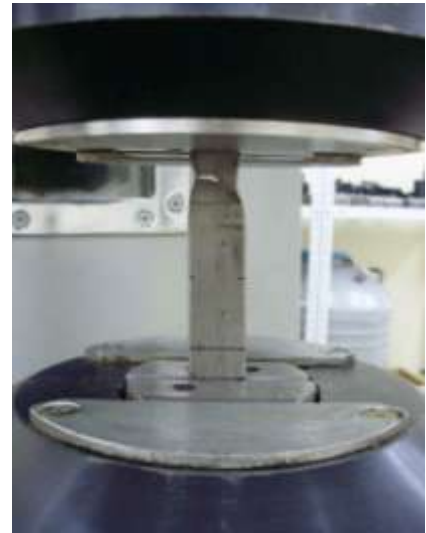
В зависимости от условий эксплуатации композиционных металлических материалов повышенной механической прочности армированных медной и стальной проволокой и их функционального назначения к ним предъявляется ряд требований и назначается комплекс испытаний для оценки качества сварки. Методы испытаний по воздействию на материал подразделяются на качественные и количественные. Помимо этого, они делятся на два класса разрушающего и неразрушающего контроля [28,29]. Методы позволяют определять сплошность соединения, осуществить контроль топографии, кристаллической структуры и химического состава. Производится металлографический анализ структуры соединения компонентов. Количественными методами определяют прочность материала, ударную вязкость, угол изгиба и др.

В работе проведена 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 17.



а)



б)

Рисунок 17 – 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 18. Изготовление, а также площади образцов до и после испытания контролировали на микроскопе Альтами МЕТ 1МТ с точностью 0,01 мм.

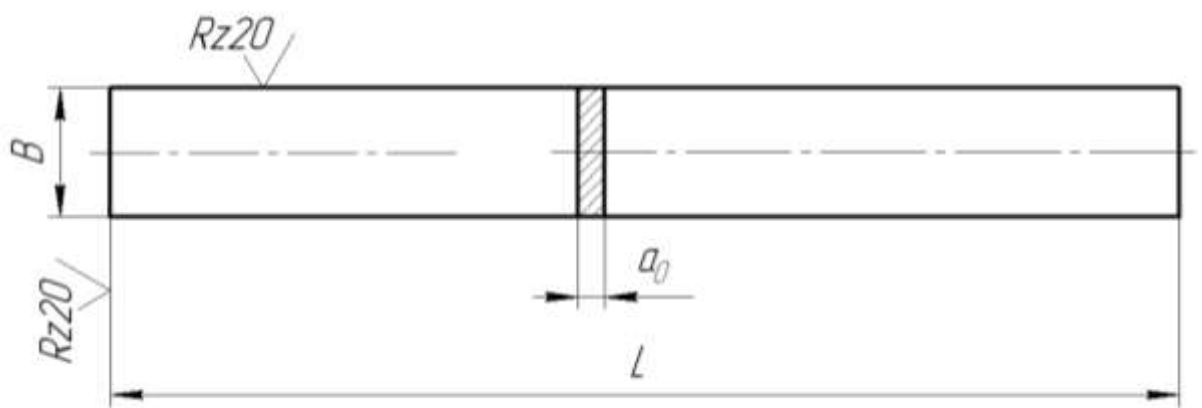


Рисунок 18 – Эскиз образцов армированного композиционного металлического материала: B - ширина образца; L - длина – образца; a_0 - толщина образца

Внешний вид образцов до и после испытаний представлен на рисунке 19, что позволяет визуально оценить изменения структуры материала и наличие де-

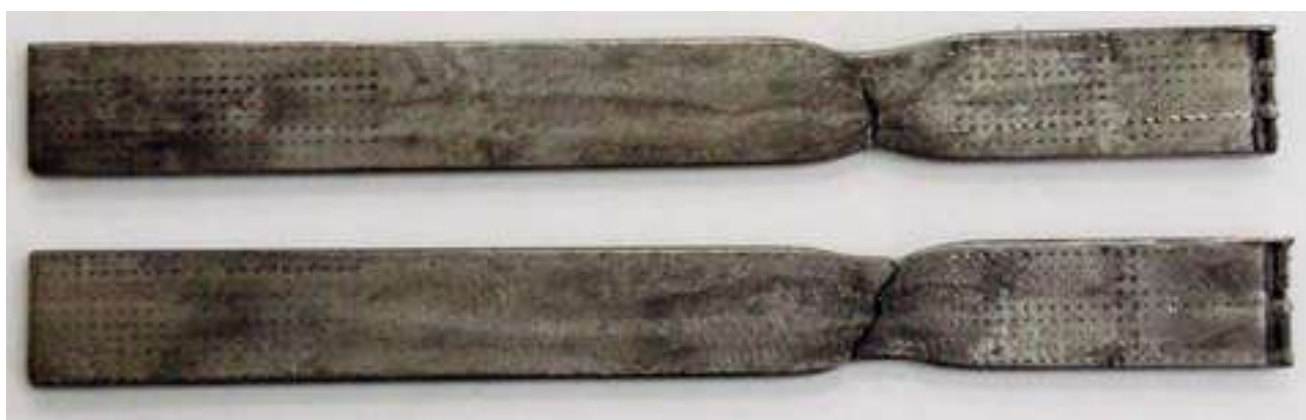
фектов, вызванных различными режимами сварки взрывом. Результаты исследований механических свойств показали, что для композиционных материалов на основе алюминиевого сплава АМг5М, армированных медной проволокой М1, наиболее высокие значения прочности достигаются при использовании режимов 9 и 10 (см. таблицу 6). В этих условиях прочность образцов составила от 360 до 380 МПа, что полностью соответствует техническим требованиям, предъявляемым к таким материалам, и превышает прочность неармированного алюминиевого сплава марки АМг5М аналогичной толщины более чем на 35,9 %. Это свидетельствует о высокой эффективности армирования медью, которая обеспечивает равномерное распределение нагрузки между матрицей и армирующими элементами, предотвращая локальное разрушение материала.

Для режимов 1, 2, а также 7 и 8 характерны более низкие показатели прочности, находящиеся в диапазоне от 310 до 340 МПа. При этом наибольшая прочность среди этих режимов зафиксирована для вариантов 1 и 2. Снижение прочности связано с недостаточной энергией удара, которая не позволяет достичь оптимального взаимодействия между матрицей и волокнами. В результате формируются зоны непроваров или слабой адгезии, что подтверждается данными о зависимости скорости детонации от плотности заряда ВВ, приведенными в методиках расчета параметров сварки.

Минимальные значения прочности (от 275 до 290 МПа) были зарегистрированы для образцов, полученных при завышенных скоростных режимах 3, 4, 5, 6 и 11, 12. Эти режимы характеризуются чрезмерной энергией взрыва, которая вызывает локальное разрушение армирующих волокон и микротрещины в алюминиевой матрице. Кроме того, при скоростях соударения ниже 520 м/с наблюдалось неполное схватывание металлов: в некоторых случаях соединение отсутствовало полностью, а в других – проявлялось в виде частичной сварки, что указывает на критическую важность соблюдения баланса между энергией удара и физико-механическими свойствами материалов.



а)



б)

Рисунок 19 – Внешний вид образцов до и после испытаний: а) – вид образца до испытаний; б) – вид образца после испытаний

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 ; находиться в диапазоне от 595 до 650 м/с, характерны наилучшие прочностные показатели.

Для образцов композита на основе сплава ВТ1-0 армированных проволокой марки Ст3 полученных на режимах 3 и 4 (см. таблицу 6) прочность составляет 530 МПа. Это удовлетворяет требованиям, предъявляемым к композиту, и превышает исходную прочность неармированного 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.

На режимах 5 и 6 значения прочности минимальны – от 375 до 420 МПа.

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 композита показал, что для образцов на основе титанового сплава марки ВТ1-0 армированных стальной проволокой марки Ст3 сваренных при скорости $V_k = 2690$ м/с, и скорость соударения V_c , находиться 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 рисунках 20 и 21.

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, приведенных в таблице 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 20 – 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 21 – 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

Для комплексной оценки влияния исходных параметров сварки взрывом на качество соединения были проведены исследования микроструктуры полученных композиционных армированных материалов. Особое внимание уделено анализу границы раздела между матрицей и армирующими элементами, так как именно в этих зонах концентрируются напряжения, влияющие на прочность и долговечность материала. Однако в доступной литературе практически отсутствуют данные по изготовлению и травлению шлифов для разнородных соединений, таких как алюминиевый сплав АМг5М, армированный медной проволокой М1, или титановый сплав ВТ1-0 с армированием стальной проволокой Ст3. Это связано с рядом технологических трудностей, обусловленных различием физико-химических свойств соединяемых металлов.

Одной из ключевых проблем при подготовке шлифов стало различие в твердости алюминия и меди. При механической обработке алюминиевая матрица выработывалась интенсивнее, чем медь, что приводило к образованию ступенчатого перехода на границе раздела. Такая неоднородность затрудняла визуализацию микроструктуры и требовала разработки специальных методов выравнивания поверхностей. Еще одной сложностью стало травление шлифов из разнородных металлов. Из-за разницы электрохимических потенциалов растворения алюминия и меди стандартные травители давали неоднородное травление, что затрудняло выявление деталей структуры. На момент начала исследований отсутствие универсальных травителей для таких комбинаций металлов требовало разработки индивидуальных режимов.

Для преодоления этих проблем был разработан метод приготовления шлифов, включающий закрепление образцов в оправках и заливку их сплавом Вуда или эпоксидной смолой. Это позволило предотвратить деформацию образцов при последующей механической обработке. Поверхность, предназначенная для анализа, предварительно обрабатывалась напильником, после чего проводилась много-

этапная шлифовка с использованием абразивной бумаги различной зернистости. Для снижения износа и предотвращения царапин перед шлифовкой бумага покрывалась слоем парафина или смесью парафина с керосином, что уменьшало трение и обеспечивало равномерное удаление материала.

Для выявления макроструктуры сварных соединений применялись специальные реактивы. Для системы «алюминий-медь» использовался 10%-ный раствор едкого натрия и надсернистого аммония, которые обеспечивали контрастное выделение границ зерен и зон термического влияния. В случае титано-стальных композитов применяли смесь 25 % азотной и 3 % плавиковой кислот, позволяющую визуализировать интерметаллидные слои и дефекты сварки. Эти реактивы подбирались экспериментально, так как стандартные травители не обеспечивали четкого разделения фаз из-за резкого контраста в скоростях растворения компонентов.

Для получения микрошлифов проводилась многоступенчатая полировка. Сначала использовалось грубое шлифование, затем переходили к более тонким абразивам. Окончательная полировка выполнялась на сукне, смоченном оксидом хрома, с постепенным переходом на мягкое сукно для исключения царапин. Скорость вращения диска не превышала 1200 об/мин, чтобы избежать перегрева и термического повреждения структуры. На нетравленных шлифах уже на этапе первичного анализа можно было выявить поры, трещины, неметаллические включения и измерить толщину интерметаллидных слоев, если они формировались в зоне сварки.

Особую сложность представляли образцы с алюминиевой матрицей, так как алюминий склонен к образованию оксидной пленки, которая маскировала истинную структуру. Для ее удаления применялось комбинированное воздействие механической полировки и кратковременного травления, что позволило достичь необходимого качества поверхности для микроскопии. В случае титано-стальных соединений критичным оказалось предотвращение гидридного растрескивания, которое могло возникнуть из-за поглощения водорода в процессе травления. Для

минимизации риска использовались инертные атмосферы и контролируемое время травления.

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 22. С увеличением скорости детонации площадь оплавленных участков увеличивается.

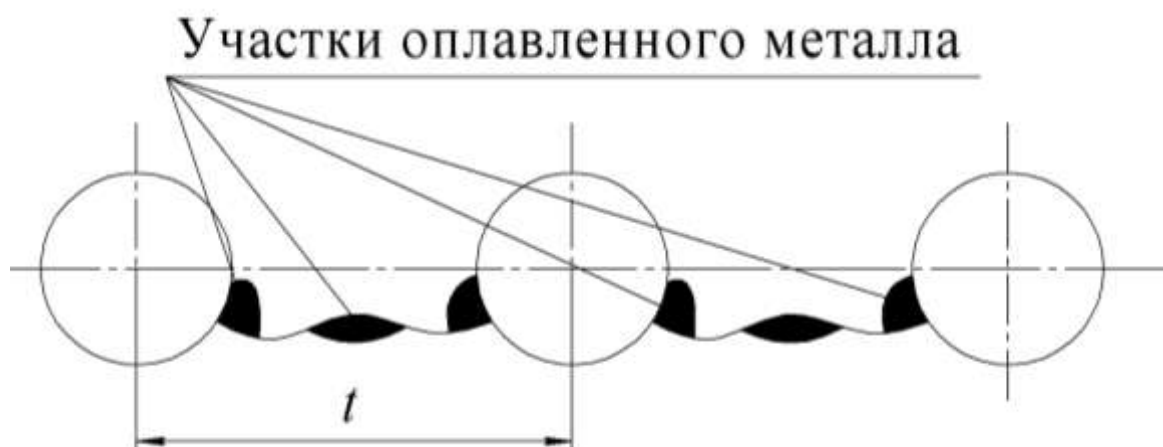


Рисунок 22 – Взаимодействие волокна и матрицы при распространении фронта детонации перпендикулярно направлению укладки волокон

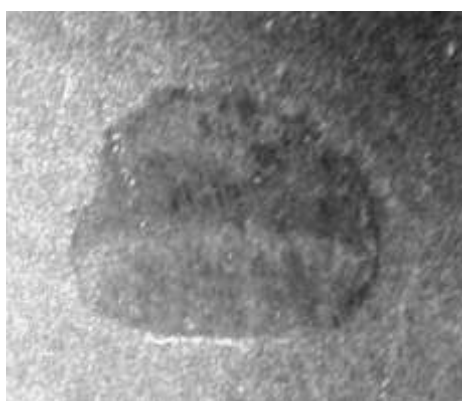
При распространении фронта детонации параллельно направлению укладки волокон, между волокнами армирующего металла участки расплава образуются только на форсированных режимах.

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

Для выявления микроструктуры использовали микроанализаторе JCXA– 733 в режиме растровой электронной микроскопии (РЭМ). Фотографии микрострук-

туры армированных композитов приведены на рисунках 24 - 26. Изучение влияния параметров сварки на структурообразование в композиционном материале производилось при параметрах сварки указанных в таблицах 6 и 7.

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 6). 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 непроваров и оплавлений. Армирующее волокно, представленное на рисунке 23 имеет округлую форму с четкой границей с основным металлом.



×100

Рисунок 23 – Микроструктура армирующих волокон меди после сварки взрывом: режимы сварки 9 и 10

У образцов композиционного материала сваренных на завышенных скоростных режимах 3, 4, 5, 6 и 11, 12 (скорость соударения и/или скорость точки контакта см. таблицу 6) образуются участки расплава, периферийная область армирующих волокон меди, представленных на рисунке 24, характеризуется наличием в ней области оплавления алюминиевой матрицы в зоне контакта с волокном



×100

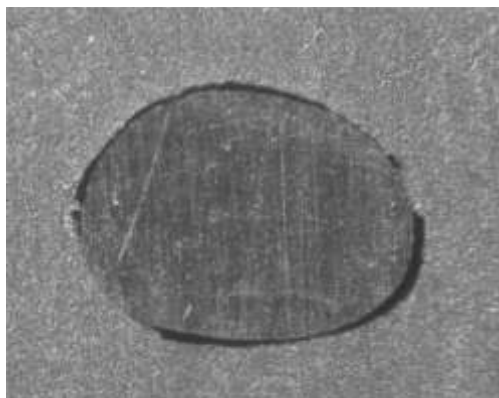
Рисунок 24 – Микроструктура армирующих волокон меди после сварки взрывом:
режимы сварки 3, 4, 5, 6 и 11, 12

Планиметрическим методом на микроскопе Альтами МЕТ 1МГГ 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). Причем 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.

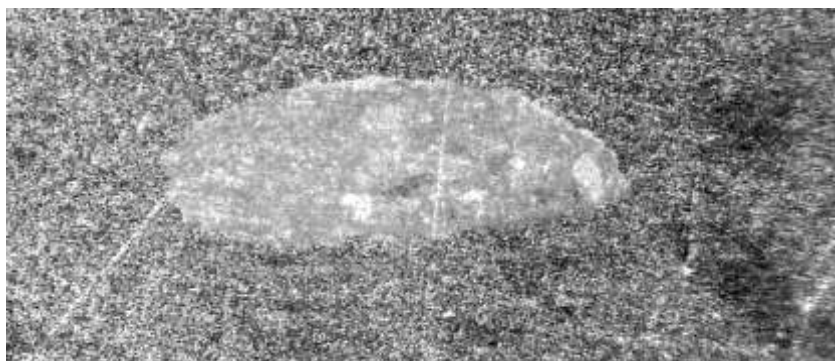
Сварка композиционного материала вблизи нижней границы (режимы 1 и 2, а также 7 и 8 по таблице 6) не обеспечивает достаточной степени контакта матрицы и упрочняющих волокон, представленных на рисунке 25, что не позволит при дальнейшей термической обработке обеспечить устойчивый рост интерметаллида по всему периметру.



×100

Рисунок 25 – Микроструктура армирующих волокон меди после сварки взрывом:
режимы сварки 1 и 2, а также 7 и 8

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, 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 26, имеет вытянутую вдоль зоны сварного шва форму с четкой границей с основным металлом.



×100

Рисунок 26 – Микроструктура армирующих волокон стали после сварки взрывом:
режимы сварки 3 и 4

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 27, характеризуется наличием в ней области оплавления в зоне контакта с волокном.



×100

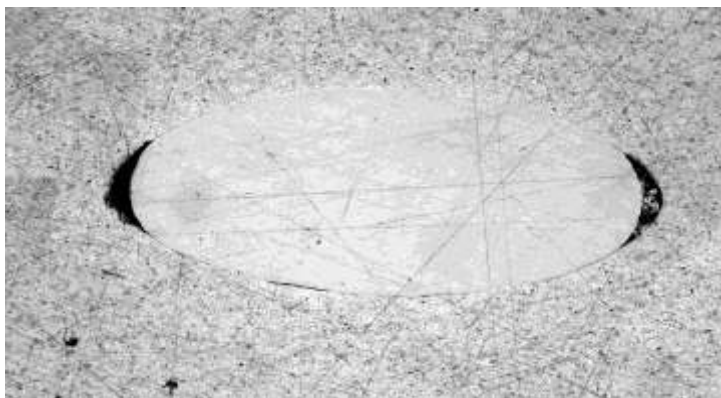
Рисунок 27 – Микроструктура армирующих волокон стали после сварки взрывом: режимы сварки 5 и 6

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 28, что не позволит при даль-

нейшей термической обработке обеспечить устойчивый рост интерметаллида по всему периметру.



×100

Рисунок 28 – Микроструктура армирующих волокон стали после сварки взрывом:
режимы сварки 1 и 2, 7-12

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 выполнения операции армирования прочностные характеристики композиционных материалов значительно возрастают. Например, для образцов на основе титанового сплава ВТ1-0, усиленных стальной проволокой Ст3, полученных методом сварки взрывом на режимах 3 и 4 (см. таблицу 7), прочность достигает от 510 до 540 МПа. Это значение превышает прочность неармированного титана на 40 %, что связано с эффективным распределением нагрузки между матрицей и армирующими элементами. Аналогично, для алюминиево-медных композитов на основе сплава АМг5М с медной проволокой М1, сваренных на режимах 9 и 10 (таблица 6), прочность составляет от 360 до 380 МПа, что также превышает

исходные показатели алюминиевой матрицы более чем на 35 %. Такие результаты подтверждают эффективность армирования для повышения механической устойчивости материалов, особенно в условиях динамических нагрузок.

Для достижения оптимального комплекса свойств после завершения сварки взрывом проводится термическая обработка, направленная на формирование интерметаллических фаз в области армирующих волокон. Этот процесс позволяет реализовать структурно-неоднородное состояние материала, что способствует дополнительному упрочнению за счет сложного взаимодействия между матрицей и армирующими компонентами. Например, термообработка стимулирует диффузионные процессы, приводящие к образованию прочных межфазных связей и снижению дефектности на границе раздела, что критично для долговечности соединений.

Эксперименты показали, что предварительные режимы сварки (режимы 3, 4 для титана и 9, 10 для алюминия) обеспечивают отсутствие участков расплава и непроваров, что подтверждается микроструктурным анализом. После сварки биметаллические заготовки подвергались холодной прокатке с деформацией от 10 до 15 %, что позволило улучшить качество поверхности и достичь конечной толщины пластин 5 мм. Целью прокатки также являлось уплотнение структуры и устранение возможных микронеоднородностей, возникших в процессе сварки. Из полученных заготовок вырезались образцы размером 15×15 мм (не менее 20 штук на каждый режим), которые использовались для дальнейших испытаний.

Отжиг композиционных материалов на основе алюминиевого сплава АМг5М, усиленного медными волокнами М1, осуществлялся при температурах 350, 400, 450 и 500 °С. Параметры термической обработки, включая продолжительность выдержки и скорость нагрева, представлены в таблице 8. Для титано-стальных композитов на базе сплава ВТ1-0 с армированием стальной проволокой Ст3 режимы отжига подбирались с учетом более высокой термостойкости титана, что потребовало применения температур 800, 900, 1000 и 1100 °С. Подробные параметры этих режимов указаны в таблице 9. Такой диапазон температур выбран

для обеспечения диффузионных процессов на границе раздела матрицы и армирующих элементов, что критично для формирования прочного соединения.

После термической обработки образцы охлаждали, после чего изготавливали шлифы на грани, перпендикулярной зоне сварки и совпадающей с направлением сварки. Для исключения влияния поверхностных дефектов, возникших при обработке, снимали слой металла толщиной от 1,5 до 2 мм. На подготовленных шлифах проводили анализ микроструктуры с использованием металлографических микроскопов Альтами МЕТ 1МТ и МИМ-8, а также электронного микроскопа JСХА-733. Такой подход позволил выявить межфазные переходы, наличие пор и трещин, а также оценить толщину интерметаллидных слоев, если они формировались.

Для минимизации влияния случайных факторов исследования проводились на образцах, вырезанных из одного листа. Это обеспечивало сопоставимость данных и исключало вариации, связанные с неоднородностью исходного материала. Например, при изучении зависимости структурных изменений от времени отжига для каждой температуры использовали образцы из одной партии, что повысило точность экспериментов.

Термообработка алюминиевых композитов начиналась с температуры 350 °С. При выдержке до 45 минут в зоне армирующих волокон не наблюдалось образования фазовых прослоек, что указывает на отсутствие интенсивных диффузионных процессов в этом диапазоне. Это может быть связано с низкой активностью меди при относительно низких температурах, что подтверждается исследованиями взаимодействия алюминия с медью в твердофазных условиях.

Для титано-стальных композитов использование высоких температур (до 1100 °С) способствовало активному взаимодействию между титановой матрицей и стальными волокнами. Однако важно было избежать чрезмерного роста хрупких интерметаллидных фаз, которые могут снизить пластичность материала. Для этого параметры отжига корректировали с учетом данных о кинетике диффузионных процессов в биметаллических системах.

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 мин 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 29.

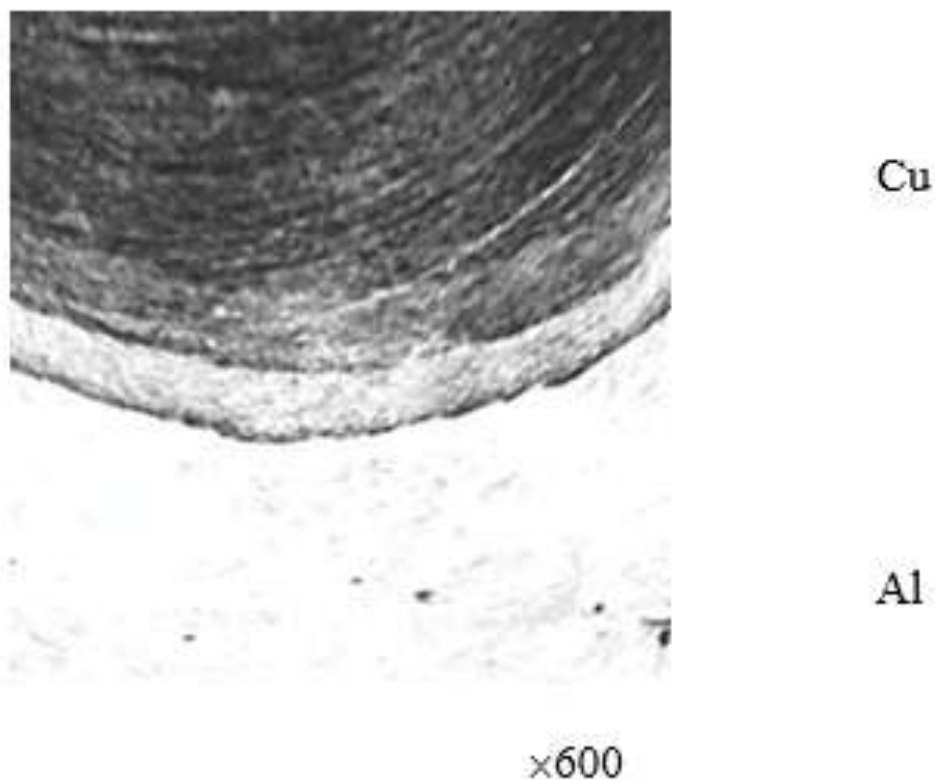


Рисунок 29 – Микроструктура зоны армирующего волокна после ТО (режим ТО № 4)

Толщину данных интерметаллидных прослоек определяли с помощью окуляр - микрометра. В каждом случае производили не менее 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 мин 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 мин выдержки, в отличие от термообработки на 350 °С, когда появление прослоек наблюдалось только через 60 мин, что можно объяснить увеличением 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 %.

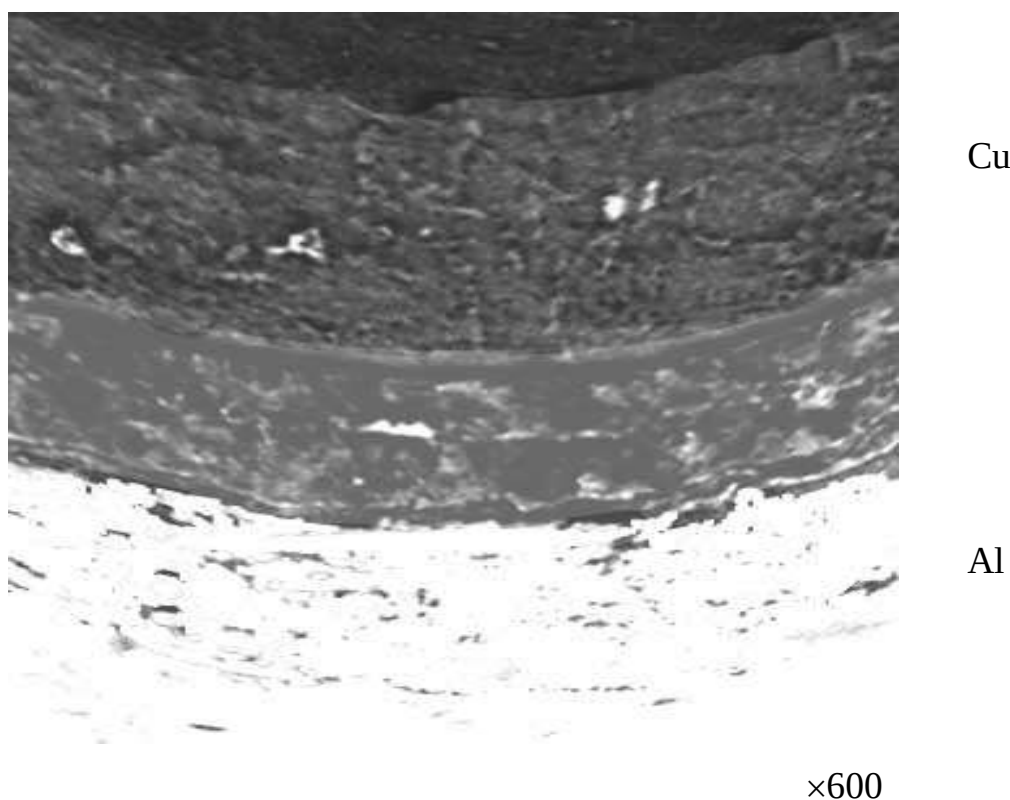


Рисунок 30 – Микроструктура зоны армирующего волокна после ТО (режим ТО № 26)

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.

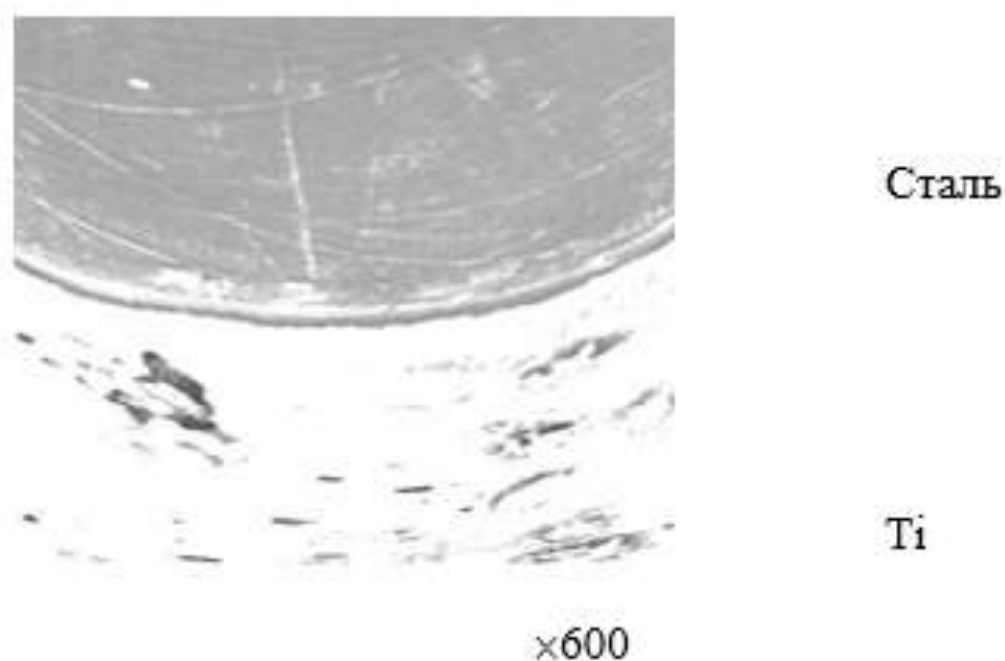


Рисунок 31 – Микроструктура зоны армирующего волокна после ТО (режим ТО № 5)

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, микроструктура показана на рисунке 32.

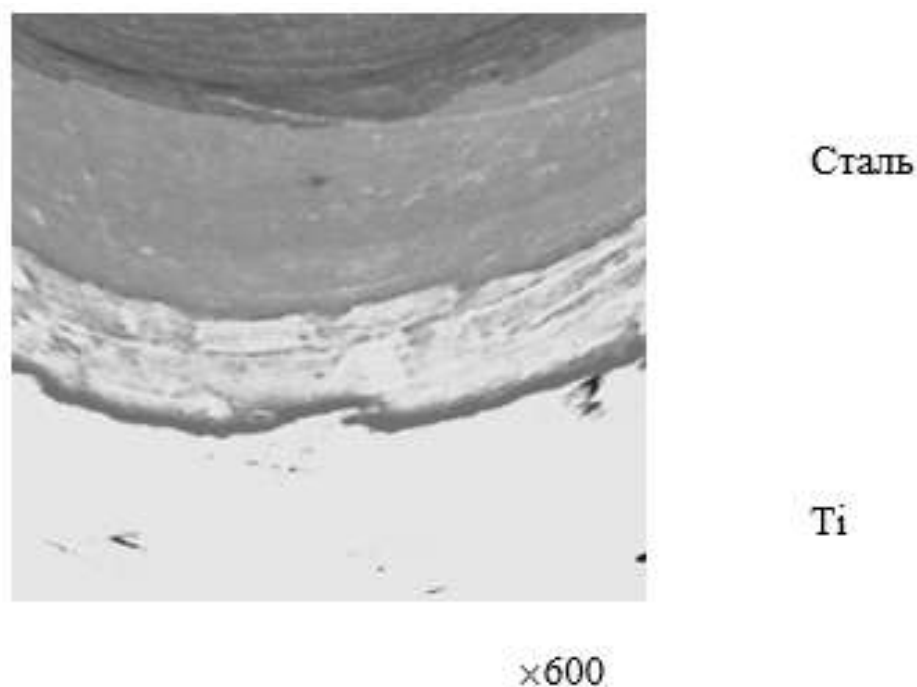


Рисунок 32 – Микроструктура зоны армирующего волокна после ТО (режим ТО № 20)

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 мате-

риалов 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. таблицу 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, так и интерметаллидной прослойки по 3-4 отпечатка на каждом.

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/мм^2 , прослойка со стороны алюминия HV от 3500 до 3600 Н/мм^2 .

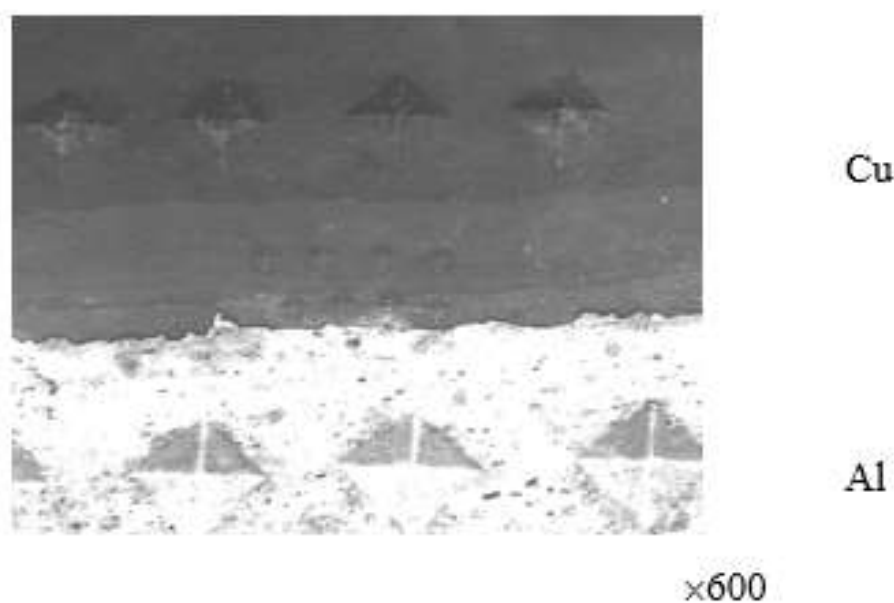


Рисунок 33 – Схема измерения микротвердости на образцов композиционных материалов на основе алюминиевого сплава марки АМТт5М армированных медной проволокой марки М1 в зоне контакта армирующего медного волокна с металлом матрицы

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 6900 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.

Для определения пространственного распределения компонентов и количественной оценки состава прослойки фазы, образующейся по периферии армирующих волокон в ходе термической обработки применяли, так называемый, метод электронно-зондового количественного анализа [33]. Исследование проводили на установке, основу которой составляет микроанализатор JСХА-733.

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 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).

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 того, чтобы увеличить «зону раскрытия» интерметаллидной прослойки, плоскость образцов в области армирующих волокон сошлифовывали под углом равным 6-7°, как показано на рисунке 34. Таки 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.

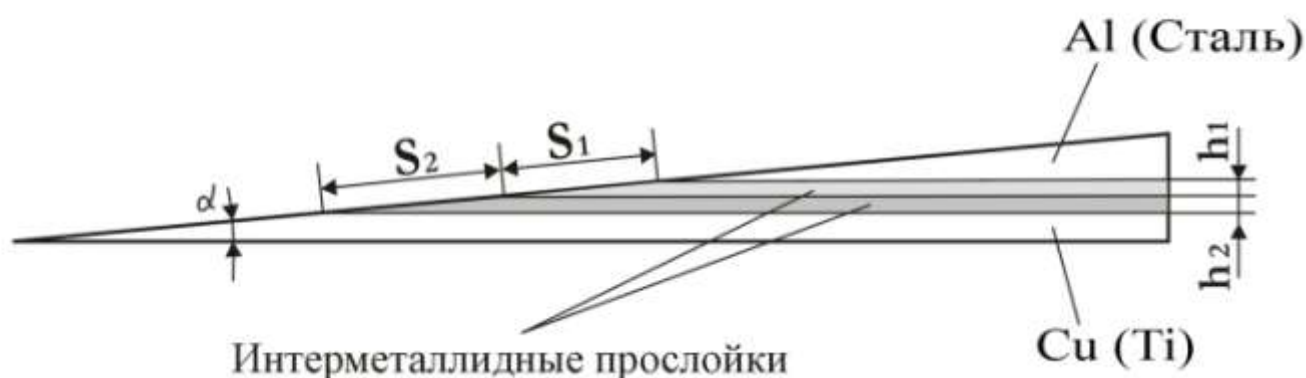


Рисунок 34 – Схема подготовки образцов для количественного анализа

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 I со стороны сплава алюминия 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 .

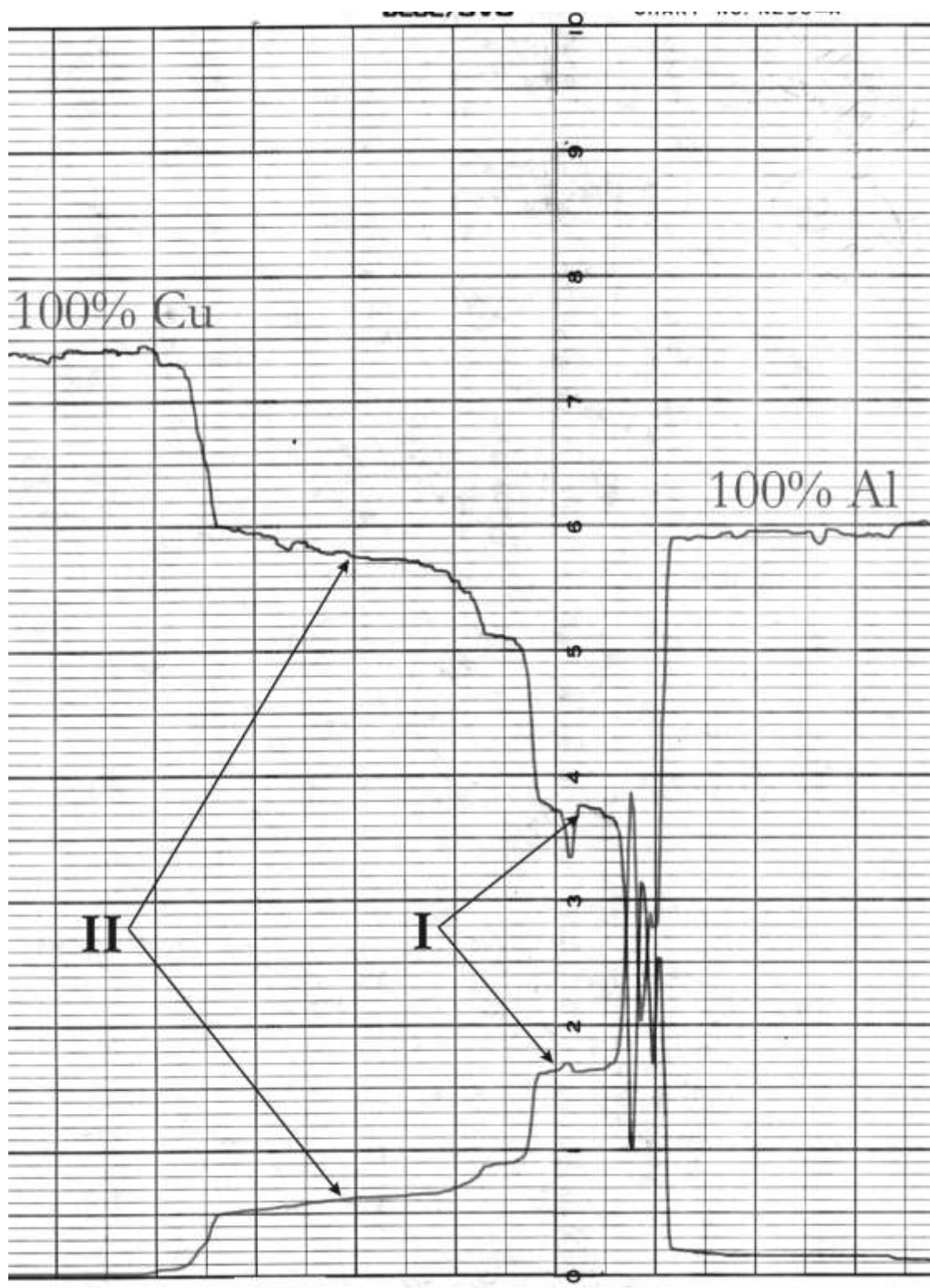


Рисунок 35 – Диаграмма распределения меди и алюминия в зоне образования интерметаллидных прослоек (ТО 500 °С, выдержка 2 часа)

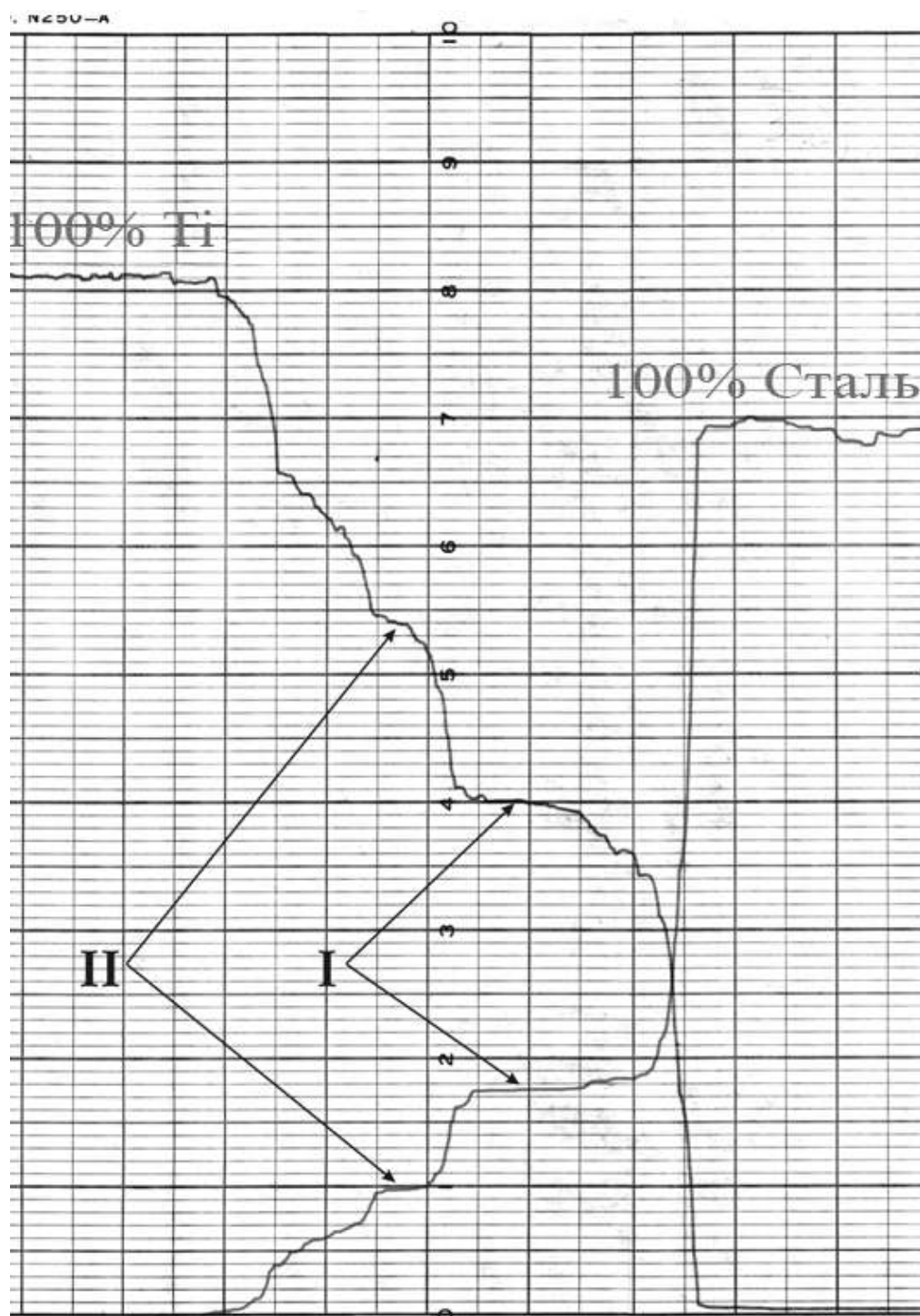


Рисунок 36 – Диаграмма распределения титана и стали в зоне образования интерметаллидных прослоек (ТО 1000 °С, выдержка 8 часов)

Выводы по третьей главе:

Исследованы механические свойства и микроструктура композиционных армированных материалов, полученных сваркой взрывом. На основании данных исследований определены рациональные параметры ударно-волнового нагруже-

ния, 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 МП, 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 сечени-

ем (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 МП 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 пре-

вышает 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 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 ВТ1-0 и алюминия АМг5М медной проволокой марки М1 и стальной проволокой марки Ст3. В ходе выполнения работы рассчитаны кинематические параметры (V_0 – скорость метаемой пластины, β – угол поворота метаемой пластины, γ – угол соударения, V_k – скорость движения точки контакта). 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 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. 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 МП 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 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 прово-

локой 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-О 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 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 .

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. : Metallurgia, 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. : Metallurgizdat, 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. / Моргунов С.В., Митин Б.С., Распопов Н.А. [и др.] ; заявитель и патентообладатель:

Научно-производственное объединение «Композит». – № 154613199 расчет; заявл. 03.08.1990 ; опубл. 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 ; опубл. 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 (ВолГТУ). – № 2011114535/02 расчет; заявл. 13.04.2011; опубл. 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; опубл. 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. Дерibas, А. А. Физика упрочнения и сварки взрывом [Текст] / А. А. Дерibas. – 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 специальности

«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.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет»
Кафедра «Сварочное, литейное производство и материаловедение»

Магистерская диссертация на тему:
«Технологические основы получения
высокопрочных композиционных металлических
материалов с интерметаллическим упрочнением и
исследование их структуры и свойств»

Выполнил: ст. гр. 23МТм1

Федяшов А.С.

Руководитель: к.т.н., доцент

Крюков Д.Б.

Пенза, 2025

Актуальность работы: В настоящее время, продолжается дальнейшее всестороннее развитие авиационной и ракетно-космической 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.

Объект исследования: армированный высокопрочный композиционный материал на основе титана и алюминия с интерметаллическим слоем.

Предмет исследования: взаимосвязь структуры, состава и механических свойств армированного высокопрочного композиционного материала на основе титана и алюминия с интерметаллическим упрочнением.

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

Цель и задачи магистерской диссертации

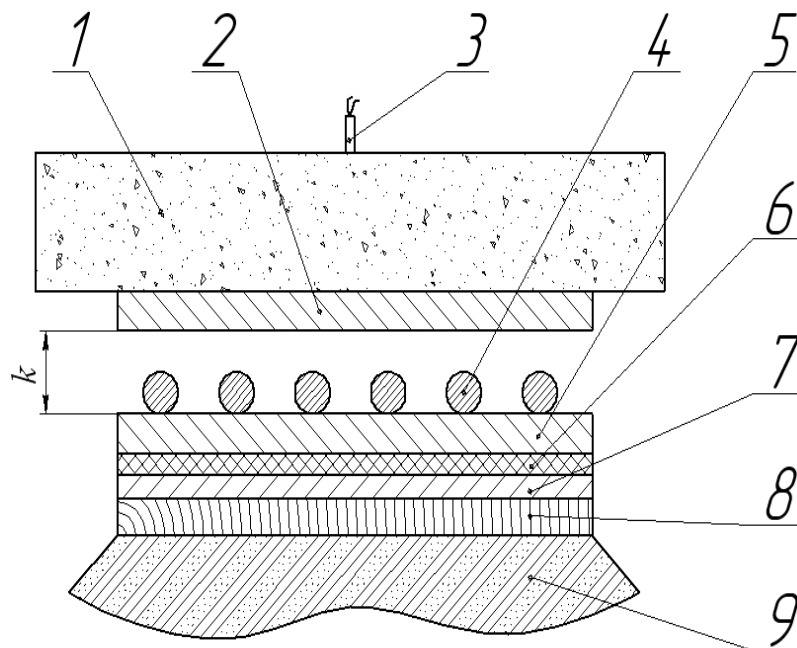
Цель работы: Разработка технологических основ получения высокопрочных композиционных материалов с интерметаллическим упрочнением.

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 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 250×1500 мм. В качестве армирующих волокон использовали медную проволоку марки М1 и стальную проволоку марки Ст3 диаметром 1,0 мм.

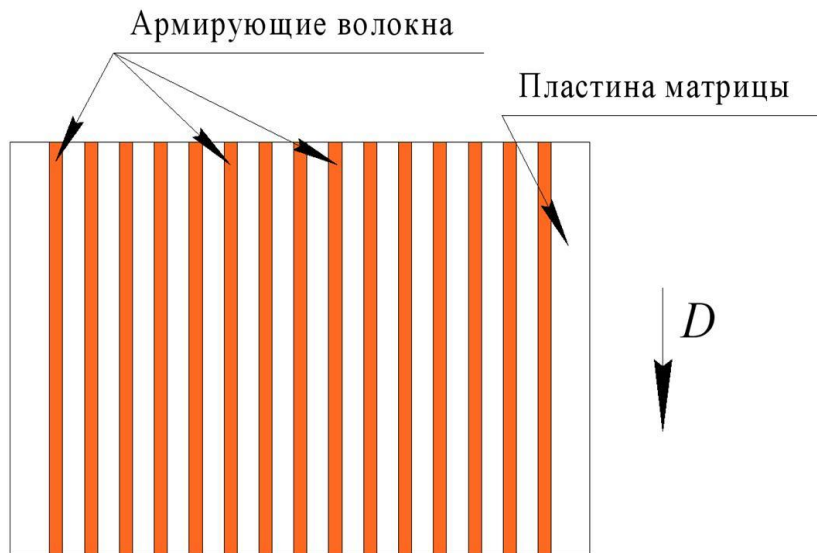


Параллельная схема армирования проволокой:

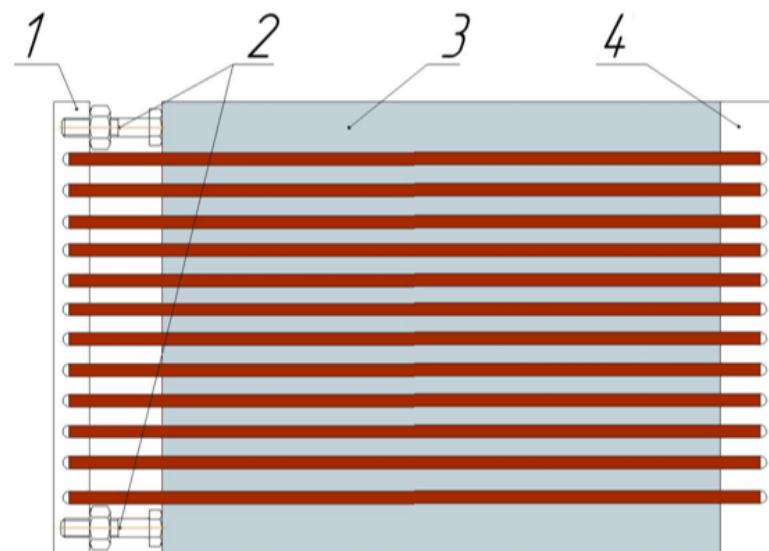
- 1 – заряд ВВ;
- 2 – метаемая пластина матрицы;
- 3 – электродетонатор;
- 4 – проволока;
- 5 – неподвижная пластина матрицы;
- 6 – изоляционный слой;
- 7 – стальное основание;
- 8 – дополнительное основание;
- 9 – грунт;
- k – зазор между матричными пластинами

пластинами

Технологические особенности способа получения высокопрочных армированных композиционных металлических материалов сваркой взрывом



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

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



Расположение волокон при армировании сплава АМг5М медной проволокой марки М1



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

Сварка взрывом композиционного материала систем «титан-сталь» и «алюминий-медь»



Внешний вид композиционного материала с матрицей из сплава ВТ1-0, полученного на рациональных режимах



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



Разрушение образца при сварке взрывом на форсированных режимах

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 %.

Рентгенографический контроль полуфабрикатов композиционного материала систем «титан-сталь» и «алюминий-медь»

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



а



б



в

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

Исследование влияния технологических режимов процесса ударно-волнового нагружения на формирование механических свойств композитов

9



а



б

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

Композит на основе сплава АМг5М :

$V_K = 1900$ м/с, $V_C = 595 - 650$ м/с

Временное сопротивление от 360 до 380 МПа

Композита на основе титана ВТ1-0:

$V_K = 2690$ м/с, $V_C = 500 - 530$ м/с

Временное сопротивление 530 МПа

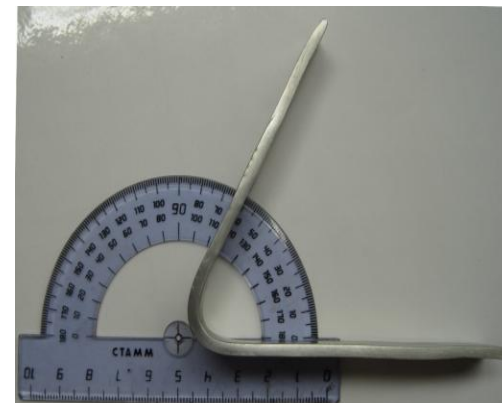
Исследование влияния технологических режимов процесса ударно-волнового нагружения на формирование технологических свойств композитов 10



а



б



в



г



д

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.

Исследование влияния параметров сварки взрывом на микроструктуру композиционных материалов системы «алюминий-медь»

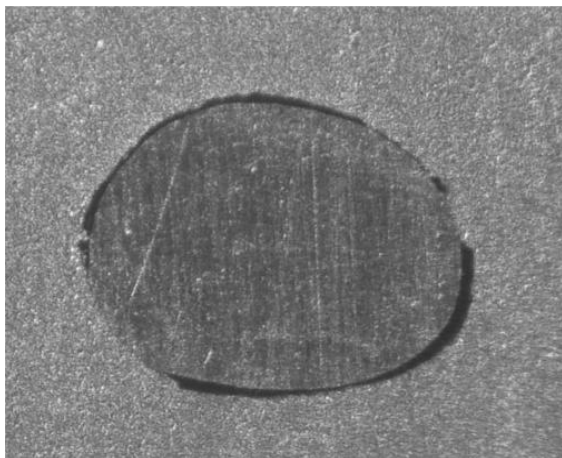


Рисунок 1 — Микроструктура армирующих волокон меди после сварки взрывом: режимы сварки 1 и 2, а также 7 и 8

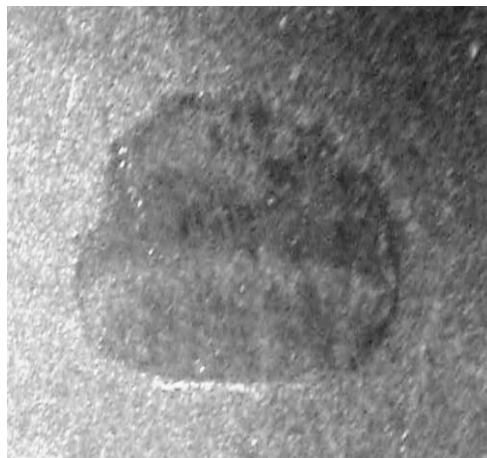


Рисунок 2 — Микроструктура армирующих волокон меди после сварки взрывом: режимы сварки 9 и 10

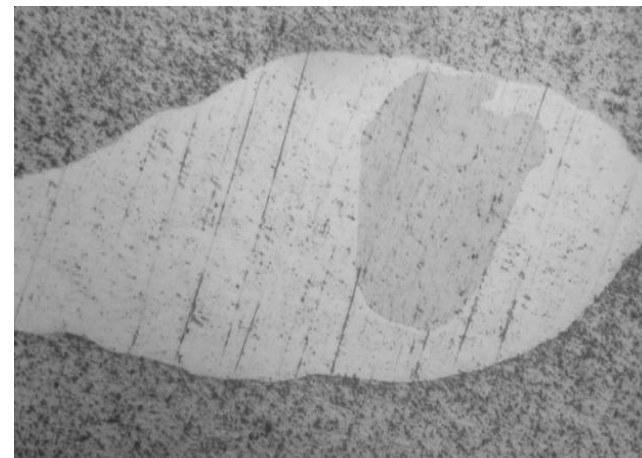


Рисунок 3 — Микроструктура армирующих волокон меди после сварки взрывом: режимы сварки 3, 4, 5, 6 и 11, 12

Исследование влияния параметров сварки взрывом на микроструктуру композиционных материалов системы «титан-сталь»

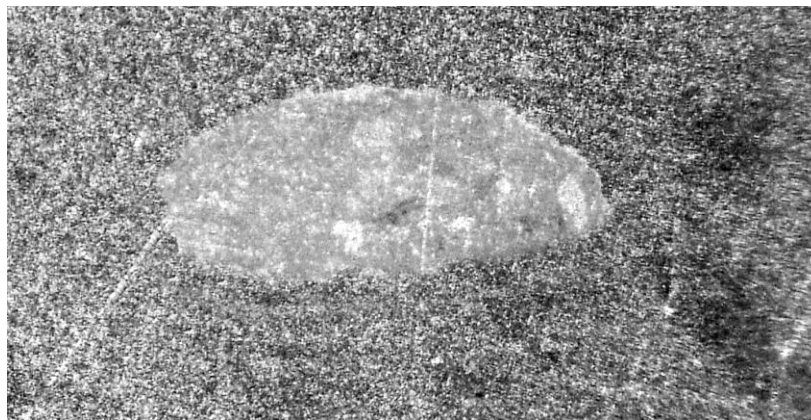


Рисунок 2 – Микроструктура армирующих волокон стали после сварки взрывом: режимы сварки 3 и 4

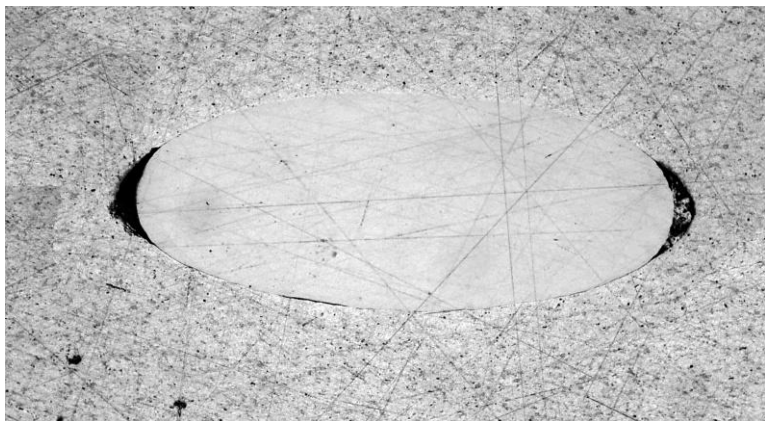


Рисунок 1 – Микроструктура армирующих волокон стали после сварки взрывом: режимы сварки 1 и 2,
7-12

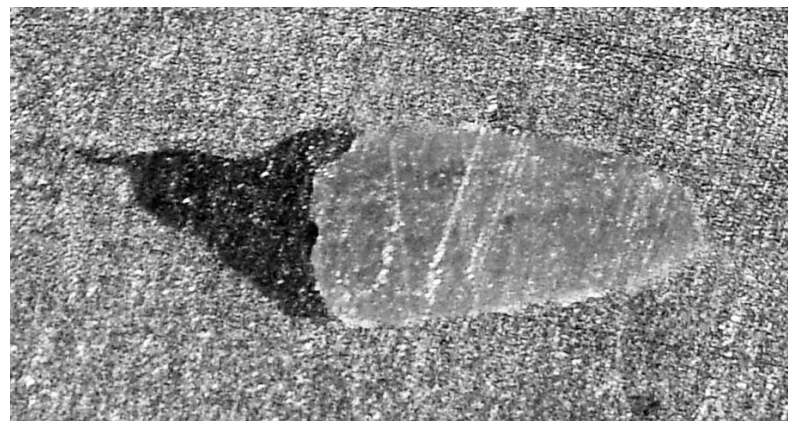
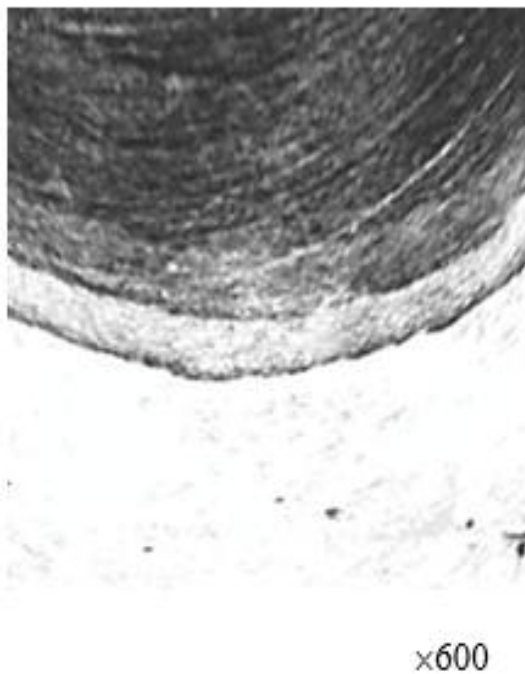
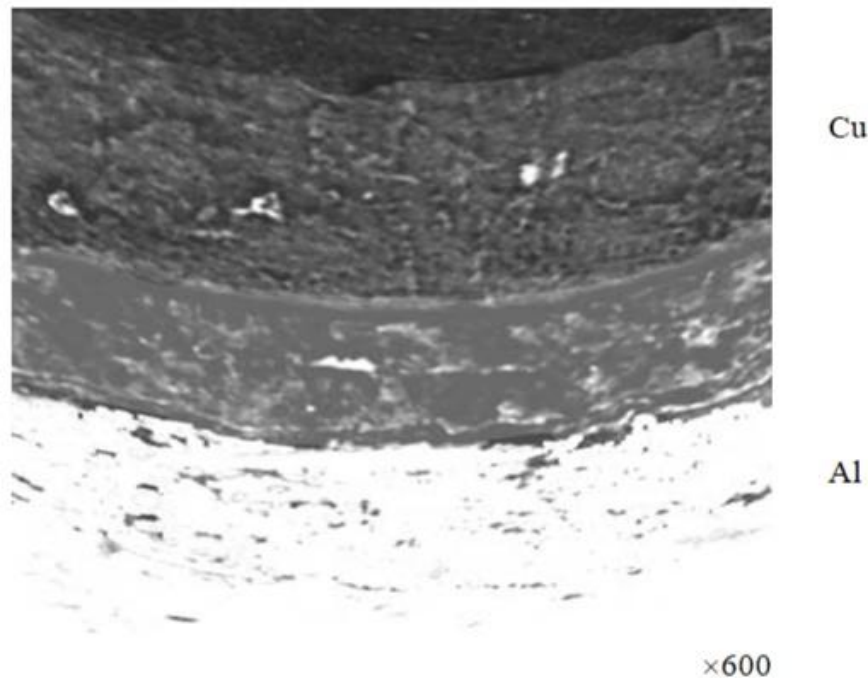


Рисунок 23 – Микроструктура армирующих волокон стали после сварки взрывом: режимы сварки 5 и 6

Микроструктура композиционных материалов после термической обработки

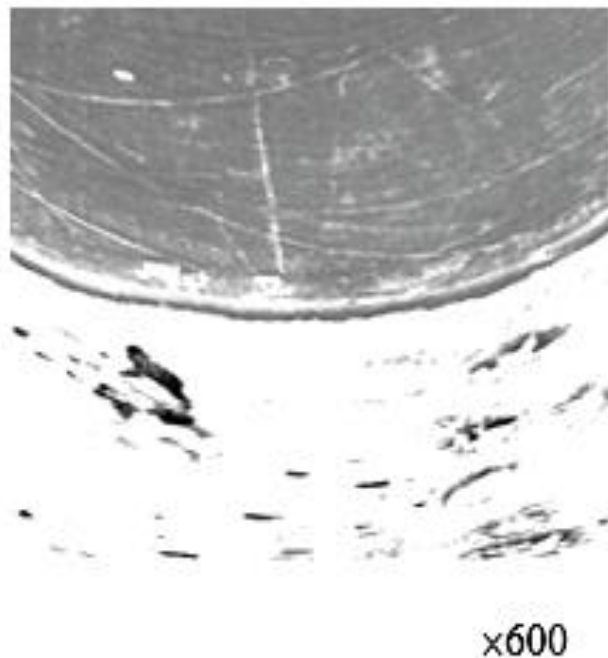


Микроструктура зоны армирующего волокна
после ТО (режим ТО № 4, Cu, Al)



Микроструктура зоны армирующего волокна после
ТО (режим ТО № 26 , Cu, Al)

Микроструктура композиционных материалов после термической обработки

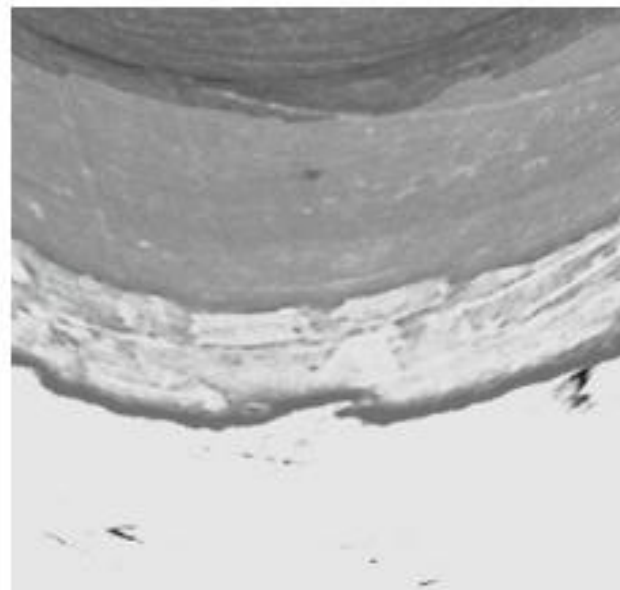


Сталь

Ti

×600

Микроструктура зоны армирующего волокна
после ТО (режим ТО №5, Сталь, Ti)



Сталь

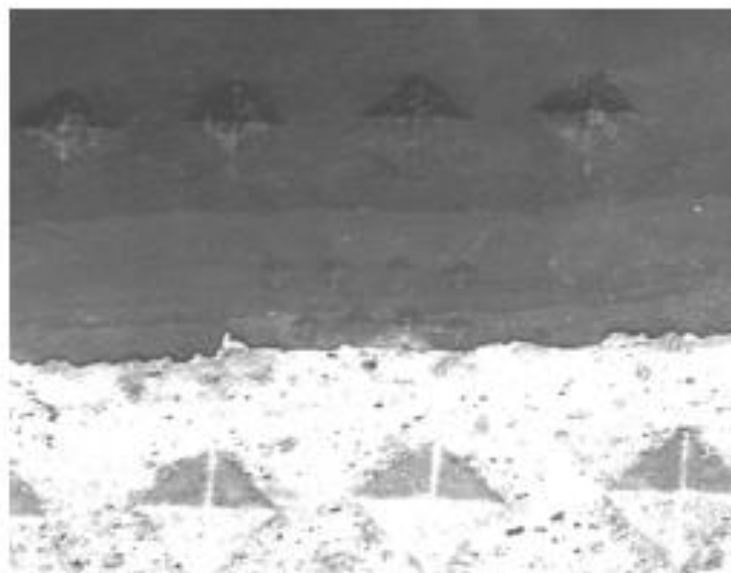
Ti

×600

Микроструктура зоны армирующего волокна после
ТО (режим ТО № 20 , Сталь, Ti)

Микротвердость композиционных материалов после термической обработки

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 производилось на 7-9 участках, как упрочненной зоны биметалла, так и интерметаллидной прослойки по 3-4 отпечатка на каждом.



×600

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

Публикация результатов работы

Научная статья **ВАК (К2)**:

1. Влияние схемы армирования на прочность композиционного материала, полученного сваркой взрывом / Гуськов М.С., Крюков Д.Б., Федяшов А.С. и др. // Транспортное машиностроение. 2024. № 11 (35). С. 71-78.

Научные статьи **РИНЦ**:

1. Выбор направления распространения фронта детонационной волны при формировании композиционного материала/ А.Д. Вавилов, А.С. Федяшов, М.С. Гуськов, и др.// В сборнике: Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации ("Шляндинские чтения - 2024"). Материалы XVI Международной научно-технической конференции с элементами научной школы и конкурсом научно-исследовательских работ для студентов, аспирантов и молодых ученых. Пенза, 2024. С. 246-249.

2. Структурные превращения в композите системы Al-Cu, полученного по комплексной технологии / А.С. Федяшов, А.Д. Вавилов, М.С. Гуськов, и др.// В сборнике: Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации ("Шляндинские чтения - 2024"). Материалы XVI Международной научно-технической конференции с элементами научной школы и конкурсом научно-исследовательских работ для студентов, аспирантов и молодых ученых. Пенза, 2024. С. 249-251.

3. Схемы получения армированных композиционных материалов методом высокоэнергетического воздействия /Федяшов А.С., Маслова Н.Ю., Корольков А.О. и др.// В сборнике: Перспективные материалы и высокоэффективные процессы обработки. Сборник научных трудов по материалам III Всероссийской молодежной конференции . Саратов, 2024. С. 286-289.

4. Получение армированных композиционных материалов с применением комплексной технологии /Федяшов А.С., Маслова Н.Ю., Корольков А.О. // В сборнике: Перспективные материалы и высокоэффективные процессы обработки. Сборник научных трудов по материалам III Всероссийской молодежной конференции . Саратов, 2024. С. 289-291.

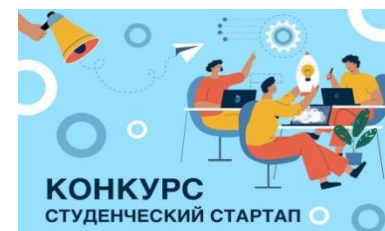
Популяризация результатов работы

Заявки в **Фонд содействия инновациям** :

№ С1-427020 «Разработка технологии получения композиционного материала для изготовления элементов корпуса авиационной техники». Старт-Взлет 2024 г.

№ СтС-504295 «Разработка технологии получения композиционного материала на основе алюминиевых сплавов с интерметаллическим упрочнением». 2025 г.

Ректорские гранты 2024 **НИОКР** «Разработка композиционного материала с высокими показателями удельной прочности и жесткости для изделий двойного назначения».



Проведен аналитический и патентный обзор в области разработки основ получения высокопрочных композиционных материалов с интерметаллическим упрочнением.

Показаны основные схемы армирования композиционных материалов и дана их краткая характеристика.

Разработана плоская схема и рассчитаны параметры сварки взрывом армирования титана ВТ1-0 и алюминия АМг5М медной проволокой марки М1 и стальной проволокой марки Ст3.

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 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.

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. Для образцов композиционных материалов на основе алюминиевого сплава марки АМг5М армированных медной проволокой марки МП 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 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 %.

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-О 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 титанового сплава марки ВТ1-0 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 .

***Спасибо
за внимание!***

Федяшов Артем Сергеевич

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОПРОЧНЫХ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С
ИНТЕРМЕТАЛЛИЧЕСКИМ УПРОЧНЕНИЕМ И ИССЛЕДОВАНИЕ
ИХ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ**

Направление подготовки: 22.04.01 «Материаловедение и технологии
материалов»

Профиль (магистерская программа) «Материаловедение и технологии новых
материалов»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание академической степени магистра

Работа выполнена на кафедре «Сварочное литейное производство и материаловедение» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет (ПГУ)»

Научный руководитель:

кандидат технических наук,
доцент Крюков Д.Б.

Защита состоится «25» июня 2025 г. в 9 часов в аудитории 1-112а в Пензенском государственном университете по адресу: 440026, Пензенская область, город Пенза, Красная ул., д.40.

Общая характеристика работы

Актуальность темы магистерской работы

В современном мире промышленность активно интегрирует разработку и применение композиционных материалов (КМ), что открывает новые горизонты для технологических инноваций и конструктивных решений. Эти материалы, обладая уникальными физико-механическими и химическими свойствами, значительно отличаются от традиционных материалов, обеспечивая возможность, как глубокую модернизации существующих изделий, так и разработку принципиально новых технологий. В последние годы наблюдается рост интереса к алюминиевым и титановым композитам, которые демонстрируют высокую прочность при минимальном удельном весе, устойчивость к коррозии и термическим нагрузкам, а также адаптируемость под специфические задачи. В настоящее время применение композиционных материалов на основе алюминиевых и титановых сплавов сосредоточено в трех конкретных областях: автомобильной промышленности, авиакосмической промышленности, и строительная отрасль

Основные сферы применения таких материалов охватывают автомобильную и авиакосмическую промышленность, где их используют для снижения массы конструкций без потери прочности, а также строительство – для создания легких, но устойчивых к внешним воздействиям компонентов. Однако сфера интереса расширяется и на другие области: в машиностроении композиты применяются для производства износостойких деталей высокой точности, а в электронике – для разработки элементов с оптимальной теплопроводностью и контролируемым коэффициентом теплового расширения. Особое внимание уделяется методам улучшения характеристик материалов, таким как упрочнение сплавами или внедрение наноструктурных добавок. Эти технологии позволяют повысить износостойкость и долговечность изделий, что особенно важно для высоконагруженных систем. Тем не менее ключевой сложностью остается создание

«персонализированных» композитов, сочетающих заданные параметры – например, сочетание легкости, теплопроводности и механической прочности для специализированного оборудования.

Цель и задачи исследования

Целью магистерской диссертации является разработка технологических основ получения высокопрочных композиционных материалов с интерметаллическим упрочнением.

Для решение 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.

Методы исследования

Для решения поставленных задач в работе использовались статистические испытания (одноосное растяжение образцов, измерение микротвердости), методы для исследования технологических свойств

металлических образцов, металлографические исследования, электронно-зондовый количественный анализ, расчетные методы.

Научная новизна полученных результатов

Композиционные материалы (КМ) активно исследуются в научных центрах с целью их внедрения в промышленные процессы. Такое внимание связано с их уникальным сочетанием химических, физико-механических и эксплуатационных характеристик, которые невозможно воспроизвести с помощью традиционных металлов или сплавов. Например, особый интерес вызывают композиты на основе алюминиевых и титановых сплавов, обладающие высокой прочностью при минимальном весе. Методы их создания включают применение высокотемпературных технологий, значительных энергетических ресурсов и сложного оборудования, что позволяет получать материалы с однородным фазовым и химическим составом. При этом в ряде случаев допустима определенная неоднородность структуры, которая не препятствует использованию таких материалов в промышленности, например, в авиастроении или машиностроении.

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

Практическая ценность

Результаты исследования были представлены на научно-практических конференциях, также опубликованы в журналах РИНЦ и оформлены в форме заявок на научные проекты. Часть магистерской диссертации выполнялась в рамках НИОКР «Разработка композиционного материала с высокими показателями удельной прочности и жесткости для изделий двойного назначения».

Основные положения, выносимые на защиту

- исследование структуры и свойств армированного металлического композиционного материала;
- расчет режимов ударно-волнового воздействия.
- металлографическое исследование зоны соединения после сварки взрывом и термической обработки.
- исследование состава интерметаллических прослоек.

Структура и объем работы

Магистерская диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем работы составляет 103 страниц текста, содержащего 36 рисунков и 9 таблицы. Список литературы содержит 39 наименования.

Основное содержание работы

Во введении обосновывается актуальность темы магистерской диссертации, сформулированы цель и задача исследования.

В первом разделе проведен анализ и обоснование принятого направления исследований и способов реализации. Выполнен аналитический обзор в области разработки высокопрочных композиционных материалов. 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 основных схем армирования композиционных материалов, раскрыты основные технологические особенности схем армирования, дана их краткая характеристика. Предложена схема сварки взрывом армированных композиционных материалов.

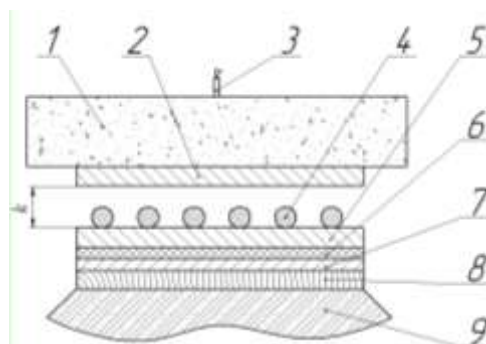


Рисунок 1 – Параллельная схема армирования проволокой: 1 – заряд ВВ; 2 – сдвигаемая пластина матрицы; 3 – электродетонатор; 4 – проволока; 5 – неподвижная пластина матрицы; 6 – изоляционный слой; 7 – стальное основание; 8 – дополнительное основание; 9 – грунт; k – зазор между матричными пластинами

Предложенный механизм учитывает эти особенности и направлен на минимизацию дефектов, связанных с несправкой, что подтверждается результатами экспериментов.

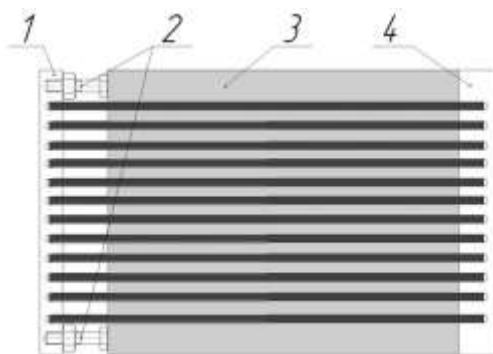


Рисунок 2 – Механизм закрепления и ориентации армирующих волокон: 1 – уголок, 2 – регулирующее болтовое соединение, 3 – неподвижная пластина матрицы, 4 – металлическая дополнительная пластина

Обоснован выбор взрывчатых веществ для проведения сварки взрывом армированных композиционных материалов. Определены основные методы испытаний и оборудование для оценки механических и технологических свойств, а также структуры армированных композиционных материалов.

Во втором разделе выполнены экспериментальные работы по созданию образцов композиционных металлических материалов повышенной механической прочности с применением сварки взрывом.

Проведен расчет параметров сварки взрывом для композиционных материалов системы «алюминий-медь» и «титан-сталь». Приведена принципиальная схема сварки взрывом армированных композиционных материалов.

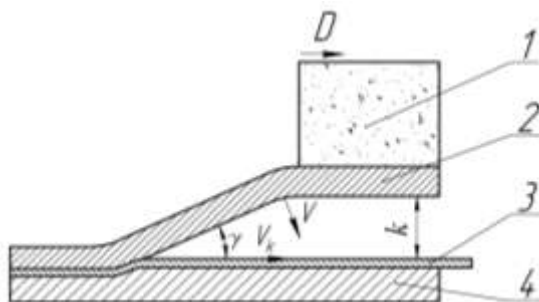


Рисунок 3 – Схема нагружения волокна при сварке взрывом композита: 1 – ВВ; 2, 4 – матричные пластины; 3 – армирующее волокно; γ – угол соударения, V_k – скорость точки контакта

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. Приведено исследования влияния состава ВВ на внешний вид и сохранность компонентов. Проведен рентгенографический контроль сплошности композитов.



Рисунок 4 – Рентгенографический снимок образца армированного композиционного материала

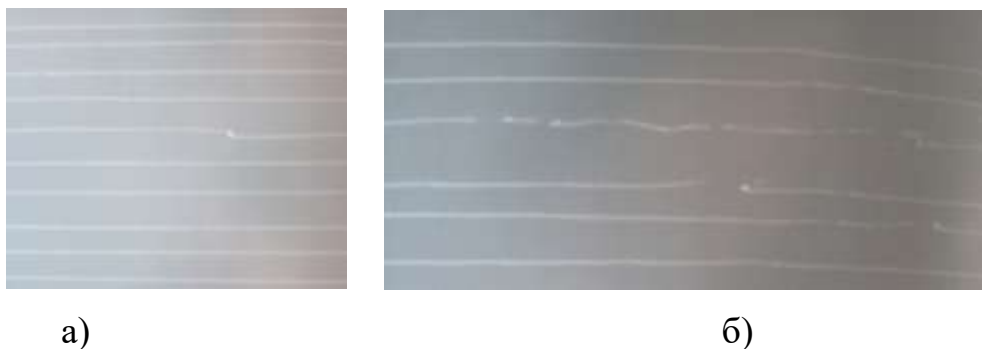


Рисунок 5 – Рентгенографический снимок образца армированного композиционного материала: а) – локальное заземление армирующего элемента; б) – потеря устойчивости, разрыв армирующих элементов

Установлено влияние параметров сварки на потерю устойчивости и разрушение армирующих элементов.

Исследовано влияние состава взрывчатого вещества на образование поверхностных дефектов композиционного материала с матрицей из сплавов АМГ5М и ВТТ1-0. Установлено, что наилучшее качество поверхности при сварке взрывом композитов на основе сплава АМГ5М обеспечивает ВВ – игданит, а на основе сплава ВТ1-0 – АТ-1.

В третьем разделе рассмотрено изучение влияния технологических режимов процесса ударноволнового нагружения на формирование заданной структуры и свойств композиционных материалов. Проведен выбор рациональных параметров сварки взрывом при армировании композиционных материалов. Эксперименты проводились в широком диапазоне скоростей:

– Для алюминиевого сплава с медным армированием скорость точки контакта V_k варьировалась от 1780 до 2400 м/с, а скорость соударения V_c – от 535 до 800 м/с.

– Для титано-стального композита V_k составляла 1900–2985 м/с, а V_c – от 300 до 660 м/с.

В работе проведена 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.

Образцы изготавливали в соответствии с эскизом, приведенным на рисунке 6. Изготовление, а также площади образцов до и после испытания контролировали на микроскопе Альтами МЕТ 1МТ с точностью 0,01 мм.

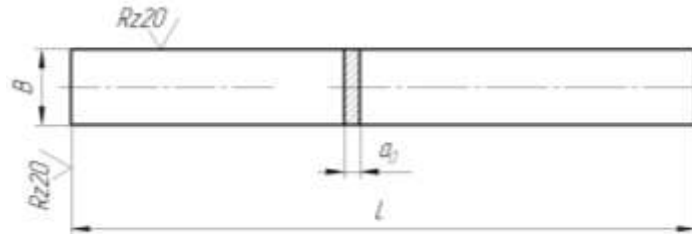


Рисунок 6 – Эскиз образцов армированного композиционного металлического материала: B - ширина образца; L - длина – образца; a_0 - толщина образца

Внешний вид образцов до и после испытаний представлен на рисунке 7, что позволяет визуально оценить изменения структуры материала и наличие дефектов, вызванных различными режимами сварки взрывом.

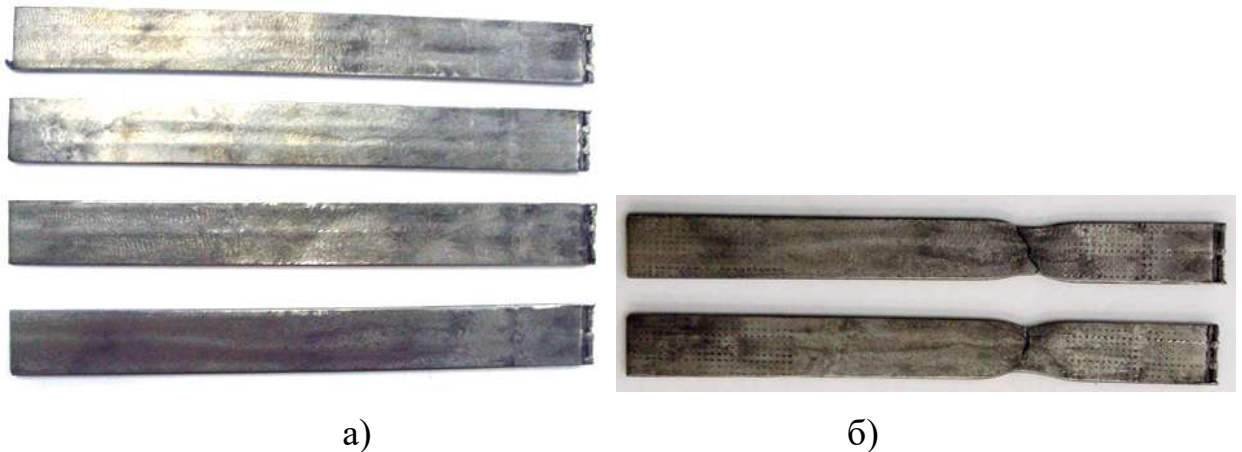


Рисунок 7 – Внешний вид образцов до и после испытаний: а) – вид образца до испытания; б) – вид образца после испытания

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 ; находиться в диапазоне от 595 до 650 м/с, характерны наилучшие прочностные показатели.

Для образцов композита на основе сплава ВТ1-0 армированных проволокой марки Ст3 полученных на режимах 3 и 4 прочность составляет 530 МПа. Это удовлетворяет требованиям, предъявляемым к композиту, и превышает исходную прочность неармированного титанового сплава марки ВТ1-0 более чем на 40 %. Анализ данных по прочности композита показал, что для образцов на основе титанового сплава марки ВТ1-0 армированных стальной проволокой марки Ст3 сваренных при скорости $V_k = 2690$ м/с, и скорость соударения V_c , находиться в диапазоне от 500 до 530 м/с характерны наилучшие прочностные показатели.

Проведена оценка 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 ИР 5145-500-11.



Рисунок 8 – Испытание образцов композиционного материала системы «титан-сталь» до соприкосновения сторон



Рисунок 9 – Внешний вид армированного композиционного металлического материала системы «алюминий -медь» после испытания до соприкосновения сторон

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 и образцы композиционных материалов на основе титанового сплава марки ВТ1-0 армированные стальной проволокой марки Ст3 сваренные на режимах 3 и 4, приведенных в таблице 7, сохранили свою целостность до соприкосновения сторон, что свидетельствует о высоких технологических свойствах и о возможности применения к ним дальнейших операций формообразования.

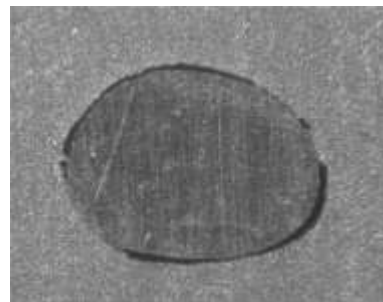
Исследовано влияние параметров сварки взрывом на формирование микроструктуры композитов. При анализе использовали микроанализаторе *JСХА– 733* в режиме растровой электронной микроскопии (РЭМ). микроструктуры использовали микроанализаторе *JСХА– 733* в режиме растровой электронной микроскопии (РЭМ). Фотографии микроструктуры армированных композитов приведены на рисунках 10 и 11.



Рисунок 10 – Микроструктура армирующих волокон меди после сварки взрывом: режимы сварки 9 и 10 ($\times 100$)



а)



б)

Рисунок 11 – Микроструктура армирующих волокон меди после сварки взрывом: а) – режимы 3, 4, 5, 6 и 11, 12; б) – режимы 1 и 2, 7 и 8 ($\times 100$)

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. 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 несправов и оплавлений.



Рисунок 12 – Микроструктура армирующих волокон стали после сварки взрывом: режимы сварки 3 и 4 ($\times 100$)



а)

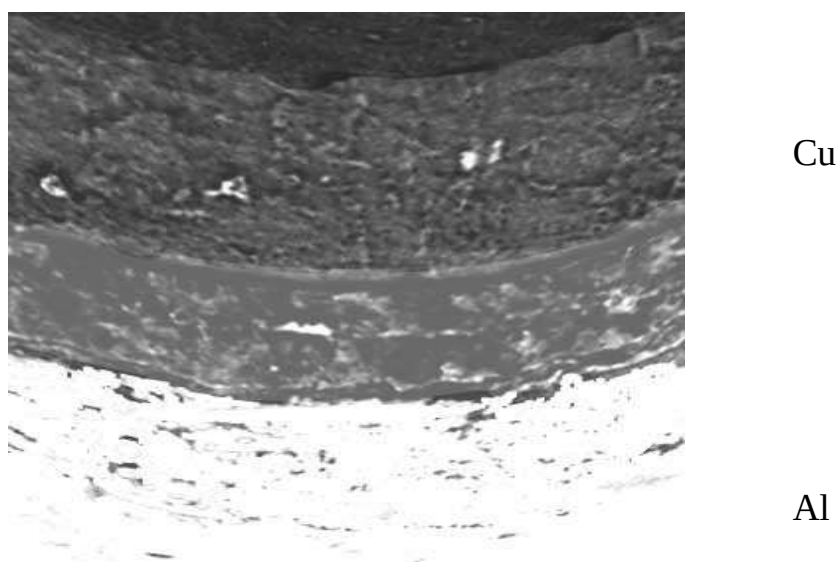


б)

Рисунок 13 – Микроструктура армирующих волокон стали после сварки взрывом: а) – режимы 5 и 6; б) – режимы 1 и 2, 7-12 ($\times 100$)

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, V_c от 500 до 530 м/с. Неправары и оплавления также отсутствовали.

Проводили отжиг композиционных материалов на основе алюминиевого сплава АМг5М, усиленного медными волокнами М1, при температурах 350, 400, 450 и 500 °С. Для титано-стальных композитов на базе сплава ВТ1-0 с армированием стальной проволокой Ст3 режимы отжига подбирались с учетом более высокой термостойкости титана, что потребовало применения температур 800, 900, 1000 и 1100 °С. Продолжительность выдержки варьировалась до 1200 мин. Такой диапазон температур выбран для обеспечения диффузионных процессов на границе раздела матрицы и армирующих элементов, что критично для формирования прочного соединения.



×600

Рисунок 14 – Микроструктура зоны армирующего волокна после ТО (режим ТО № 26)

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.

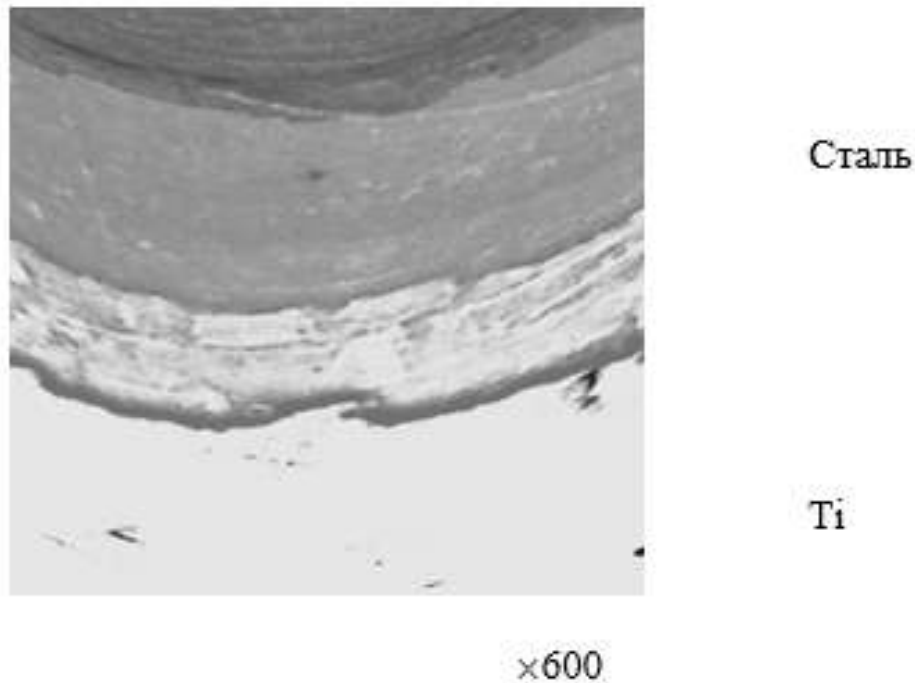


Рисунок 15 – Микроструктура зоны армирующего волокна после ТО (режим ТО № 20)

Проведена 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 МП 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.

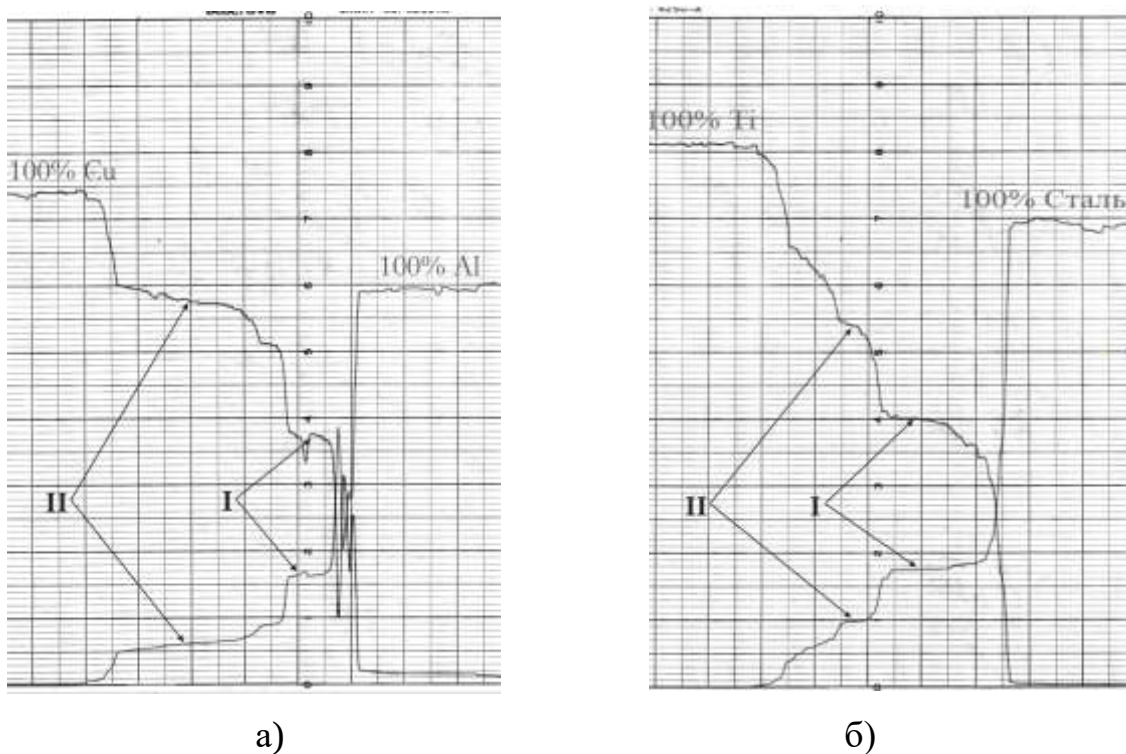


Рисунок 16 – Диаграмма распределения: а) – меди и алюминия в зоне образования интерметаллидных прослоек (ТО 500 °С, выдержка 2 часа) ; б) – титана и стали в зоне образования интерметаллидных прослоек (ТО 1000 °С, выдержка 8 часов)

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 .

В заключении формулируются основные результаты, полученные в магистерской диссертации.

Список публикаций по теме диссертации

Научная статья ВАК (К2):

1. Влияние схемы армирования на прочность композиционного материала, полученного сваркой взрывом / Гуськов М.С., Крюков Д.Б., Федяшов А.С. и др. // Транспортное машиностроение. 2024. № 11 (35). С. 71-78.

Научные статьи РИНЦ:

1. Выбор направления распространения фронта детонационной волны при формировании композиционного материала/ А.Д. Вавилов, А.С. Федяшов, М.С. Гуськов, и др.// В сборнике: Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации ("Шляндинские чтения - 2024"). Материалы XVI Международной научно-технической конференции с элементами научной школы и конкурсом научно-исследовательских работ для студентов, аспирантов и молодых ученых. Пенза, 2024. С. 246-249.

2. Структурные превращения в композите системы Al-Cu, полученного по комплексной технологии / А.С. Федяшов, А.Д. Вавилов, М.С. Гуськов, и др.// В сборнике: Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации ("Шляндинские чтения - 2024"). Материалы XVI Международной научно-технической конференции с элементами научной школы и конкурсом научно-исследовательских работ для студентов, аспирантов и молодых ученых. Пенза, 2024. С. 249-251.

3. Схемы получения армированных композиционных материалов методом высокоэнергетического воздействия /Федяшов А.С., Маслова Н.Ю., Корольков А.О. и др.// В сборнике: Перспективные материалы и

высокоэффективные процессы обработки. Сборник научных трудов по материалам III Всероссийской молодежной конференции . Саратов, 2024. С. 286-289.

4. Получение армированных композиционных материалов с применением комплексной технологии /Федяшов А.С., Маслова Н.Ю., Корольков А.О // В сборнике: Перспективные материалы и высокоэффективные процессы обработки. Сборник научных трудов по материалам III Всероссийской молодежной конференции . Саратов, 2024. С. 289-291.