

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
ФБГОУ ВО «ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Факультет

Кафедра

промышленных технологий,
электроэнергетики и транспорта
(наименование)

«Сварочное, литейное производство
и материаловедение»
(наименование)

Направление подготовки

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

Профиль

«Материаловедение и технологии
новых материалов»
(наименование)

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

на тему

«Исследование структуры и механических свойств многослойных
металлических материалов на основе стали 20Х13 и 65Х13, полученных
сваркой взрывом»

Студент

Сайфиддинзода С.М.
(подпись, дата)

Сайфиддинзода С.М.
(фамилия полностью)

Научный руководитель
к.т.н., доцент

Кривенков А.О.
(подпись, дата)

Кривенков А.О.
(фамилия, инициалы)

Нормоконтролёр
к.т.н., доцент

Хорин А.В.
(подпись, дата)

Хорин А.В.
(фамилия, инициалы)

Работа допущена к защите (протокол заседания кафедры от 25.08.2021 № 10)

Заведующий кафедрой

Розен А.Е.
(подпись, дата)

Розен А.Е.
(фамилия, инициалы)

Работа защищена с отметкой удовлетворительно (протокол заседания ГЭК от 18.08.2021 № 8)

Секретарь ГЭК
к.т.н., доцент

Гуськов М.С.
(подпись, дата)

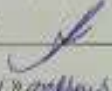
Гуськов М.С.
(фамилия, инициалы)

Пенза 2021

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

«Утверждаю»

Заведующий кафедрой СЛП и М

д.т.н., профессор  А.Е. Розен

«01» ~~февраля~~ 2021 г.

ЗАДАНИЕ

на выпускную квалификационную работу

Студенту гр. 17МП Факультета промышленных технологий, электроэнергетики и транспорта Политехнического института ПГУ, очной формы обучения по направлению подготовки 22.03.01 «Материаловедение и технология материалов»

ФИО студента Сайфиддинзода С. М

Научный руководитель работы: к.т.н., доцент Кривенков А.О.

Время выполнения ВКР: с 01.02.2021 г. по 18.06.2021 г.

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

Тема работы: Исследование структуры и механических свойств многослойных металлических материалов на основе стали 20Х13 и 65Х13, полученных сваркой взрывом

Тема утверждена приказом ректора ПГУ № 59/о от 01 февраля 2021 г.

Техническое задание на работу (назначение устройства, условия применения, внешние воздействия, специальные требования и т.п.): Исследование структуры и механических свойств многослойных металлических материалов на основе стали 20Х13 и 65Х13, полученных сваркой взрывом

Объём и содержание основной части работы

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

- введение с обоснованием актуальности темы исследования, установлением объекта и предмета, постановкой цели и задач исследования;
- теоретический анализ – методы обработки изделий и физические основы метода сварки взрывом;
- исследовательский раздел – влияние параметров термической обработки на микроструктуру и механические свойства разработанных материалов;
- экспериментальный раздел – описание результатов исследования и выявленных зависимостей;
- заключение – выводы и обоснования по теме работы и полученным результатам.

Презентация бакалаврской работы (перечень и содержание плакатов)

- слайд 1 «Тема выпускной квалификационной работы»
- слайд 2 «цели и задачи исследования»

- слайд 3 «характеристика и область применения композиционных материалов, полученных сваркой взрывом»
- слайд 4 «материал экспериментальных образцов»
- слайд 5 «выбора параметров и принципиальной схемы сварки взрывом»
- слайд 6 «технологические параметры сварки взрывом образцов исследуемого композиционного материала»
- слайд 7 «оборудование для термической обработки композита»
- слайд 8 «оборудование для исследования микроструктуры КМ на основе стали»
- слайд 9 «оборудование для испытаний композиционных материалов на одноосное растяжение»
- слайд 10 «оборудование для исследования микротвердости композиционных материалов»
- слайд 11 «оценка качества экспериментальных образцов композиционных металлических материалов, полученных сваркой взрывом»
- слайд 12 «исследование микроструктуры экспериментальных образцов композиционного металлического материала»
- слайд 13 «исследование прочности и пластичности экспериментальных образцов КМ после термической обработки»
- слайд 14 «исследования микротвердости экспериментальных образцов КМ после термической обработки»
- слайд 15 «основные выводы»

Рекомендуемая литература:

1. **Особенность и сущность технологии сварки взрывом**
[Текст]: сборник научн. тр. / под.ред. Дж. Пиатти.- М.: Металлургия, 1982. - 304 с.

2. **Сталь листовая горячекатаная двухслойная коррозионностойкая, изготовленная методом сварки взрывом**
[Текст]: ТУ 27.32.09.010-2005. - Введ. 2006-04-05. - М.: ООО Институт биметаллических сплавов, 2005. - 13 с.: ил.

3. **Заготовки двухслойные сталь-титан, изготовленные методом сварки взрывом** [Текст]: ТУ 27.81.09.009-2005. - Введ. 2005-03-25. - М.: ООО Институт биметаллических сплавов, 2005. - 21 с.: ил.

4. **Сталь листовая горячекатаная двухслойная коррозионностойкая, изготовленная методом сварки взрывом**
[Текст]: ТУ 27.32.09.010-2005. - Введ. 2006-04-05. - М.: ООО Институт биметаллических сплавов, 2005. - 13 с.: ил.

1. **Дата выдачи задания: г.**

Руководитель ВКР:
к.т.н, доцент

А.О. Кривенков

Задание к исполнению принял студент
гр. 17MT1

Сайфиддинзода С.М

«01» февраля 2021 г.

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

ОПОП освоена в полном объеме.
К государственной итоговой
аттестации допустить

С.Ю. Киреев

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

«Утверждаю»

Руководитель ВКР

к.т.н., доцент А.О. Кривенков

«01» февраля 2021 г.

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

на выпускную квалификационную работу

Студенту гр. 17МП1 Факультета промышленных технологий, электроэнергетики и транспорта Политехнического института ПГУ, очной формы обучения по направлению подготовки 22.03.01 «Материаловедение и технология материалов»

Сайфудинов А.С.

Тема работы: Исследование структуры и механических свойств многослойных металлических материалов на основе стали 20Х13 и 65Х13, полученных сваркой взрывом

Наименование этапа работы	Срок исполнения		Отметка о выполнении
	начало	окончание	
1 Получение задания, его уточнение, беседа с руководителем. Подготовка к выполнению ВКР.	01.02.2021	02.02.2021	
2 Подбор и изучение рекомендованной литературы.	03.02.2021	20.02.2021	
3 Изучение объекта исследования, постановка цели и задачи работы. Написание введения.	27.02.2021	28.02.2021	
4 Литературный и патентный поиск по теме исследования. Теоретический анализ метода обработки изделий, физических основ метода ударно-волнового нагружения.	01.03.2021	14.03.2021	
5 Обоснование применяемых методов исследования, оборудование и методика планируемых экспериментов. Разработка программы эксперимента и его осуществление. Написание второго раздела работы.	15.03.2021	15.04.2021	
6 Экспериментальный раздел – описание результатов исследования и выявленных зависимостей. Написание третьего раздела.	16.04.2021	02.05.2021	

7 Завершение оформления пояснительной записки, схем и рисунков.	03.05.2021	18.05.2021	
8 Представление завершённой ВКР нормо-контролеру	10.06.2021	16.06.2021	
9 Представление ВКР руководителю на про-смотр и проверку на плагиат.	04.06.2021	06.06.2021	
10 Предварительная защита ВКР	04.06.2021	04.06.2021	
11 Полное завершение всех работ и представ-ление зав. кафедрой на подпись пояснитель-ной записки (совместно с графической ча-стью, протоколом проверки на плагиат и отзы-вом руководителя)	08.06.2019	17.06.2021	
12 Защита выпускной квалификационной ра-боты	18.06.2021	18.06.2021	

Прохождение каждого этапа подготовки ВКР подтверждается подписью руководителя.

Студент учебной группы 17МТ

«1» 02 2021г.

 С.М. Сайфидлизова

Ректору Пензенского
государственного университета
А.Д. Гулякову
студента 4 курса Факультета
промышленных технологий,
электроэнергетики и транспорта
Сайфиддинзоды Сорбони Мирзоалӣ
(фамилия, имя, отчество)

ЗАЯВЛЕНИЕ

Я, Сайфиддинзода Сорбони Мирзоалӣ, студент 4 курса ФПГЭТ направления подготовки 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов», профиля подготовки «Материаловедение и технологии новых материалов», прошу провести проверку с использованием системы «Антиплагиат» выпускной квалификационной работы на тему: «Исследование структуры и механических свойств многослойных металлических материалов на основе стали 20Х13 и 65Х13, полученных сваркой взрывом», выполненной мной самостоятельно, на содержание элементов плагиата.

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, программам специалитета и программам магистратуры», согласно которому обнаружение плагиата является основанием для недопуска ВКР к защите и отчисления из университета.


(подпись студента)
06.06.2021
(дата)

ВКР представлена на проверку 06.06.2021

Руководитель ВКР


Подпись

А.О. Кривенков
И.О. Фамилия

Протокол
 проверен на оригинальность в системе «Антиплагиат.ВУЗ» выпускной квалификационной работы на тему «Исследование структуры и механических свойств многослойных металлических материалов на основе стали 20Х13 и 65Х13, полученных сваркой взрывом» студента 4 курса Сибирского государственного университета геотехнических наук – Новосибирского государственного технического университета (СибГТУ) – «Сибирский государственный университет геотехнических наук – Новосибирский государственный технический университет» направления подготовки 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов», профиля подготовки «Материаловедение и технологии новых материалов»
 Руководитель ФКР Кривенко Алексей Олегович, к.т.н., доцент каф. «Сварочное, литейное производство и материаловедение»



© 2004 by The Authors
Journal compilation © 2004 by Blackwell Publishing Ltd

Полный текст статьи доступен по адресу: <http://www.voprosy-filosofii.ru>

POPOWICZKA TRZYKOLOROWA I KRYSTAL ANHYDRATOWY

[illegible]

РЕЗУЛЬТАТЫ

© 2005 by Blackwell Publishing Ltd, *Journal of Internal Medicine* 257: 105–112

MARKET SHARE	2008	2009	2010	2011	2012
THE HANSEN CO.	41.7%	41.7%	41.7%	41.7%	41.7%
THE HANSEN CO.	41.7%	41.7%	41.7%	41.7%	41.7%
THE HANSEN CO.	41.7%	41.7%	41.7%	41.7%	41.7%
THE HANSEN CO.	41.7%	41.7%	41.7%	41.7%	41.7%

DATA SOURCES: ENR/ENR SOURCEBOOK: Q1 2001

DATA BY DESIGN WORKS CORPORATION, STANLEY TYP

[illegible]Полный текст: [Мухоморов А. Г.](#)

© 2004 Blackwell Publishing Ltd *Journal of Internal Medicine* 255: 103–110

DATA ANALYSIS

DATE OF ORDER

Page 10 of 10



«Вот так обстоит
в нашей стране положение: миллиарды рублей
каждый день тратятся на то, чтобы

Универзитет у Београју, Факултет за одржавање животне средине
Београд, Србија. Е-пошта: elena@fodp.f.bg.ac.rs
elena@fodp.f.bg.ac.rs

Руководитель ВКР

Edizione

А.О. Кривенков
И.О. Фомин

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Пензенский государственный университет»

ОТЗЫВ

**РУКОВОДИТЕЛЯ О ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
БАКАЛАВРА**

Студента группы 17МГ1: Сайфиддинзоды Сорбонг Мирзоалӣ

Тема: «Исследование структуры и механических свойств многослойных металлических материалов на основе стали 20Х13 и 65Х13, полученных сваркой взрывом».

Направление подготовки – 22.03.01 «Материаловедение и технология материалов», профиль подготовки – «Материаловедение и технология материалов».

Выпускная квалификационная работа Сайфиддинзоды С.М. состоит из расчетно-пояснительной записки и презентации.

Объектом исследования является композиционный материал на основе стали 20Х13-стали 65Х13-стали 20Х13, полученный методом ударно-волнового нагружения с последующей термической обработкой.

Предметом исследования являются микроструктура и механические свойства полученных композиционных материалов после термической обработки.

Целью ВКР является исследование структуры и механических свойств композиционного материала на основе стали 20Х13-стали 65Х13-стали 20Х13, полученного сваркой взрывом.

Задачи ВКР: провести анализ способа получения композиционных материалов, обосновать выбор метода получения; изучить технологические основы ударно-волнового нагружения; обосновать выбор материала для дальнейших исследований; изучить методики исследования микроструктуры и механических свойств композиционных материалов; исследовать влияние параметров термической обработки на микроструктуру и механические свойства разработанных материалов.

Пояснительная записка и презентация выполнены в соответствии с ГОСТ и ЕСКД. В презентации ВКР автор приводит: цели и задачи ВКР; анализ способов получения КМ; особенности процесса сварки взрывом; обоснование выбора исходного материала; примеры параметров и принципиальной схемы сварки взрывом; методики и результаты исследования микроструктуры и механических свойств композиционных металлических материалов на основе стали.

Сайфиддинзода С.М. относится к числу инициативных студентов, умеющих планировать время выполнения работы и способных самостоятельно

принимать рациональные решения. Адекватен, убеждаем, с коллегами поддерживает хорошие отношения. Задание по календарному плану выполняла в срок, на достаточно хорошем теоретическом и практическом уровне.

За время выполнения выпускной квалификационной работы Сайфиддинзода С.М. показал себя технически грамотным студентом, обладающим современными методами решения профессиональных задач и навыками проведения научных исследований.

Выполненная работа соответствует требованиям, предъявляемым к выпускным квалификационным работам.

Считаю, что выпускная квалификационная работа заслуживает оценки «отлично», а ее автор Сайфиддинзода С.М. присвоения квалификации бакалавр по направлению подготовки 22.03.01 «Материаловедение и технология материалов» и профилю подготовки «Материаловедение и технология материалов».

Отзыв составил
к.т.н., доцент каф. «СЛНМ»
ФГБОУ ВО «ПГУ»

 Кривенков А.О.

Аннотация

Выпускная квалификационная работа содержит 60 с., 31 рис., 11 табл., 25 использованных источников, 1 приложение.

КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ, СВАРКА ВЗРЫВОМ, МНОГОСЛОЙНЫЙ МАТЕРИАЛ, ПАТЕНТНЫЙ ПОИСК, ПРОЧНОСТЬ, МИКРОСТРУКТУРА

Объектом исследования является композиционный материал следующего типа: сталь 20Х13 сталь 65Х13 сталь 20Х13, полученный методом ударно-волнового нагружения.

Предметом исследования являются механические свойства, полученных композиционных материалов после термической обработки.

Целью данной выпускной квалификационной работы является: изучение структуры и механических свойств композиционного материала на основе стали 20Х13 стали 65Х13 стали 20Х13, полученного сваркой взрывом.

Задача выпускной квалификационной работы;

а) провести анализ способа получения композиционных материалов, обосновать выбор метода получения;

б) изучить технологические основы ударно-волнового нагружения;

в) обосновать выбор материала для дальнейших исследований;

г) изучить методики исследования микроструктуры и механических свойств композиционных материалов;

д) исследовать влияние параметров термической обработки на микроструктуру и механические свойства разработанных материалов.

Эффективность полученных результатов выражается в повышении механических свойств композиционных материалов на основе разнородных сталей, полученных ударно-волновым нагружением.

Содержание

Введение	5
1 Особенность и сущность технологии сварки взрывом	6
1.1 Схемы сварки и описание процесса	6
1.2 Основные параметры сварки взрывом.....	8
1.3 Перспективность использования способа сварки взрывом.....	11
1.3.1 ООО «Битруб Интернэшнл»	12
1.3.2 НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей» ..	13
1.3.3 ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ».....	14
1.4 Патентное исследование.....	15
2 Физические основы метода ударно-волнового нагружения.....	20
2.1 Выбор материала для создания металлического композиционного материала	20
2.2 Обоснование выбора параметров и принципиальной схемы сварки взрывом.....	26
3 Методы оценки механических свойств металлических композиционных материалов.....	33
3.1 Оборудование для обработки и исследования композиционных материалов	33
3.1.1 Оборудование для термической обработки КМ	33
3.1.2 Оборудование для исследования микроструктуры композиционного материала	35
3.1.3 Оборудование для испытаний композиционных мате- риалов на одноосное растяжение	37
3.1.4 Оборудование для исследования микротвердости компози- ционных материалов.....	40
4 Результаты исследований образцов композиционных металлических материалов.....	43
4.1 Оценка качества экспериментальных образцов композиционных металлических материалов, полученных сваркой взрывом	43

4.2 Термическая обработка многослойных композиционных материалов.....	46
4.3 Проведение исследований микроструктуры многослойных композиционных материалов после термической обработки.....	48
5 Испытание на одноосное растяжение экспериментальных образцов композиционных металлических материалов после термической обработки.....	50
5.1 Исследование на одноосное растяжение экспериментальных образцов композиционных металлических материалов	52
Заключение	55
Список использованных источников	58
Приложение А	61

Введение

Разработка материалов с особыми свойствами, а также технологических процессов их производства является одной из важнейших задач современного материаловедения. Следует отметить, что наиболее очевидные и относительно доступные методы формирования рациональной структуры материалов подробно изучены и успешно реализуются в различных технологических процессах. Хотя потенциал этих методов с нашей точки зрения еще далеко не исчерпан, тем не менее, как в научном сообществе, так и в промышленности в последние десятилетия наблюдается повышенный интерес к поиску новых способов воздействия на материалы, обеспечивающих формирование структурно-фазовых состояний, которые, в свою очередь, способствуют необычным сочетаниям физических, механических и функциональных свойств [1].

Технология литья используется для производства самых разнообразных изделий. Сегодня сварка взрывом становится все более распространенной. Аналогичный технологический процесс может быть использован для получения биметаллических заготовок. В качестве подготовки можно использовать самые разнообразные материалы[2]..

Сварка взрывом-относительно новый и перспективный технологический процесс, позволяющий получать биметаллические заготовки и изделия практически неограниченных размеров из различных металлов и сплавов, в том числе труднодоступных для сварки другими методами[3].

Природа исходных металлических материалов является основным фактором, определяющим их свариваемость, структуру, образующуюся в процессе сварки взрывом, а также механические свойства полученных соединений. В зависимости от типа взаимодействия различают материалы, полностью растворимые друг в друге и образующие непрерывный ряд твердых растворов; материалы, образующие при взаимодействии химические соединения (в частности интерметаллиды); материалы, не растворимые друг в друге (как

правило, они представляют собой механическую смесь взаимодействующих элементов) [4].

1. Особенность и сущность технологии сварки взрывом

1.1 Схемы сварки и описание процесса

Существует огромное разнообразие технологий склеивания металлов [1], которые иногда не поддаются объяснению. Так, в 1961 году произошла сварка взрывом. Это тип сварки, который используется на основе использования энергии взрыва. Для этой цели используются различные взрывчатые вещества, такие как: гранулят, гранулят, гексоген, аммиачная селитра, аммонит, аммониты.

Сварка взрывом относится к группе механических процессов соединения металлов, при которых химическая энергия заряда взрывчатого вещества преобразуется в механическую энергию, что придает одной из свариваемых деталей большую скорость движения. При столкновении движущейся детали со стационарной генерируется кинетическая энергия, которая идет на пластическую деформацию соединенных слоев металла, что приводит к сварке металла.

Сварное соединение [2] образуется в течение миллионных долей секунды, т. е. практически мгновенно. Сварное соединение происходит за счет образования металлических связей при совместной пластической деформации свариваемых металлических поверхностей. Короткая продолжительность сварки предотвращает возникновение диффузионных процессов. Эта особенность процесса позволяет сваривать металлы, образующие хрупкие интерметаллические соединения в обычных процессах сварки плавлением металлов, что делает швы непригодными для использования.

Основная [3] схема сварки взрывом показана на рисунке 1. Неподвижная пластина (позиция 4) бросили и тарелку (позиция 3) расположены под углом друг к другу, на расстоянии x от вершины угла. Взрывчатое вещество расположено на метательной плите (пункт 2), а детонатор расположен в

верхней части угла (пункт 1). Процесс сварки происходит на опоре (рисунке 5). Опорой может быть металл, земля, песок и другие вещества.

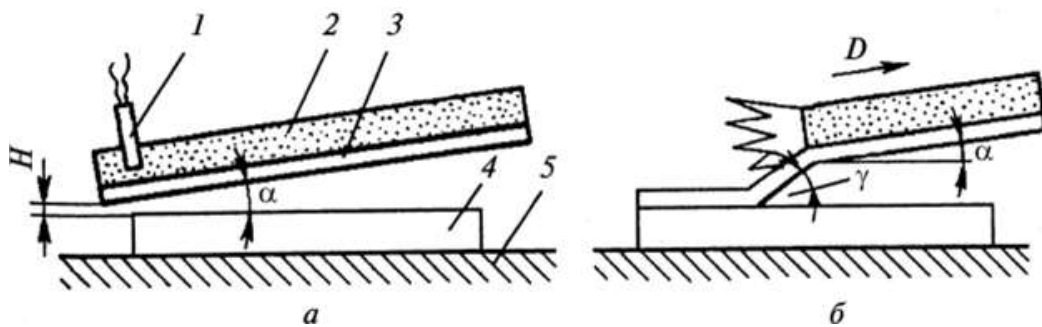


Рисунок 1 - Схема сварки взрывом под углом

Брошенная пластина по площади больше основной пластины, это необходимо для минимизации эффекта бокового расширения металлических деталей при взрыве.

На практике наиболее распространенной является схема, когда угол составляет около 0° , так называемая параллельная схема. При сварке взрывом можно получить швы неограниченной площади. В этом случае процесс сварки осуществляется тем легче, чем больше отношение площади стыка к толщине забрасываемой металлической детали. Соединения производились площадью от 15 до 20 м². На рисунке 2 представлены основные схемы, которые являются основой для всех технологических схем, разработанных для каждого конкретного случая: а-сварка трех-и многослойных плоских соединений одновременно одним зарядом взрывчатого вещества; б-приварка двух наружных слоев к листу взрывом из одной точки двух зарядов взрывчатого вещества; в - наружная футеровка цилиндрических корпусов кольцевым зарядом взрывчатого вещества; г - сварка биметаллических цилиндрических заготовок переменного диаметра для изготовления из неоднородных металлов бесступенчатых переходников труб; д - сварка труб к трубным сеткам теплообменников.

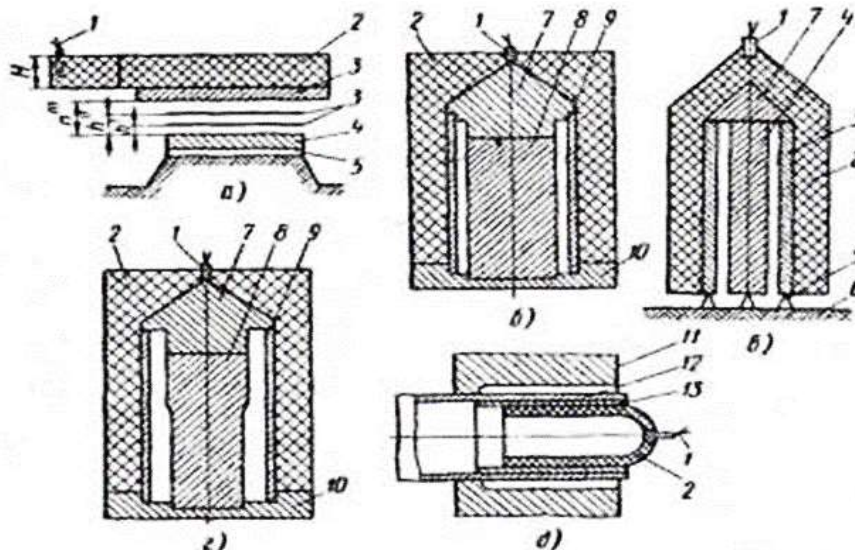


Рисунок 2 - Технологические схемы сварки взрывом соединений различного типа: 1 - детонатор; 2 - заряд ВВ; 3 - метаемые пластины; 4 - неподвижная пластина; 5 - подложка; 6 - грунт; 7 - металлическая призма или конус для центрирования заготовок и направления фронта детонационной волны; 8 - облицовываемый цилиндр; 9 - метаемая труба; 10 - центрирующая шайба; 11 - трубная решетка; 12 - трубка; 13 - буферная пластмассовая цилиндрическая вставка

1.2 Основные параметры сварки взрывом

Анализ рассмотренной [1] принципиальной схемы соударения металла при сварке взрывом (рисунке 2) позволяет выделить три параметра, характеризующих этот процесс:

- скорость V_m , которую приобретают частицы брошенной пластины в момент ее столкновения со стационарной; в литературе эта скорость называется «скоростью столкновения», «скоростью движения метапластины», «скоростью метания»;

- скорость V_c , с которой брошенная пластина «катится» на неподвижную «скорость перемещения вершины угла встречи», «скорость точки контакта» или просто «скорость контакта»;

- угол γ , образованный наклонным участком метаемой пластины и поверхностью неподвижной [«угол соударения», «динамический угол встречи»].

Величина перечисленных параметров непосредственно влияет на свойства получаемых соединений:

- скорость метания [1] U_m имеет нижний предел (свой для каждого металла), меньше которого соединение металлов не происходит; его постепенное увеличение выше этого предела приводит к образованию прочного соединения, но сопровождается последовательным увеличением размера волн, образующихся на контактирующей поверхности, увеличением степени упрочнения свариваемых металлов, с увеличением скорости метания степень пластической деформации металлов возрастает, а при чрезмерном увеличении V_m деформация становится настолько большой, что пластичность металла исчерпывается - появляются трещины, разрывы, и прочность сварных соединений начинает снижаться;

- скорость контакта V_c имеет верхний предел, выше которого сварное соединение не образуется, критическим значением скорости контакта является скорость звука в соединяемых металлах S_c ; постепенное снижение V_c сопровождается образованием сварных соединений, однако при его значениях, превышающих $0,8 S_c$, в соединениях наблюдается непрерывный слой расплавленного и кристаллизованного металла, изменение V_m в диапазоне от $0,3$ до $0,8 S_c$ характеризуется наличием волнообразного профиля контактирующей поверхности с локальными включениями расплавленного металла, а при более низких значениях V_c наблюдается плавление металла. Скорость метания и скорость контакта можно назвать кинематическими параметрами сварки взрывом. Третий параметр, угол встречи, не является независимым параметром, так как он неразрывно связан со скоростями V_m и V_k .

1.3 Перспективность использования способа сварки взрывом

Сварка взрывом относится к разновидности сварки давлением и является одним из перспективных способов получения композиционных материалов различного назначения. Неподвижная пластина и метательная пластина расположены на заданном расстоянии. Заряд взрывчатого вещества с детонатором помещается на метательную пластину. Сварка выполняется на опоре (металлическая плита, бетон, песок и т.д.). При инициировании фронт детонации распространяется вдоль заряда взрывчатого вещества. Под действием высокого давления расширяющихся продуктов взрыва метаемая пластина приобретает скорость порядка нескольких сотен метров в секунду и соударяется с неподвижной пластиной, в результате чего образуется сварное соединение. Разработаны технологии сварки взрывом изделий плоской и цилиндрической геометрии, а также сварки целых конструкций.

Высокопроизводительный и экономичный процесс сварки взрывом позволяет получать соединения практически любых разнородных металлов и сплавов с прочностью на уровне прочности основных металлов. Таким образом, производство крупногабаритных пуль из биметаллической титановой стали, алюминиевой стали, циркониевой стали и многих других возможно только с помощью сварки взрывом.

Сварка взрывом - это уникальный метод, позволяющий получить зону непрерывного соединения на поверхностях двух и более металлов или сплавов площадью до десяти квадратных метров. В этом случае нанесенный слой может иметь толщину от 0,1 мм до 30 мм, причем толщина основного металла не ограничена.

Сварка взрывом может быть использована для получения различных биметаллических, многослойных и композиционных материалов с улучшенными высокопрочными, антикоррозионными, термостойкими и другими свойствами для использования в химической промышленности, нефтегазодобыче, алюминиевой, электротехнической и других отраслях промышленности. Ассортимент материалов, сваренных взрывом, довольно велик и постоянно расширяется. Из вышесказанного следует, что сварочный взрыв стабильно

занимает свои позиции, но не является перспективным для других, наиболее распространенных и популярных областей [2].

Как в России, так и за рубежом ведутся исследования по получению композиционных материалов повышенной механической прочности, армированных неметаллическими волокнами, дисперсными частицами и пространственными армирующими компонентами. В России изучением композиционных материалов занимаются многие предприятия и учреждения. Лидирующую позицию занимает ООО «Битруб Интернэшнл».

1.3.1 ООО «Битруб Интернэшнл»

С 2004 года компания «Рубин» производит биметалла методом сварки взрывом в Московской области на территории и в сотрудничестве с Федеральным государственным предприятием Научно-исследовательский институт «Геодезия». Свою историю «Битруб» начал в Барнауле в 1992 г., как российско-корейское предприятие для поиска и продвижения на корейский рынок российских технологий, в том числе по нанесению покрытий на металлы для защиты от коррозии и износа. Предприятие является основным производителем в России биметалла сваркой взрывом и имеет мощности для производства от 7 до 8 тысяч м² биметалла в год. ООО «Бит Руб Интернэшнл» использует в производстве ряд своих оригинальных разработок и ноу-хау. Преимуществами компании являются сочетание науки и производства, тесное сотрудничество с институтами Российской Академии наук (ИСМАН, Черноголовка), научно-исследовательскими центрами ГНЦ НПО ЦНИИТМАШ (Москва), вузами АлтГТУ (Барнаул), ПГУ (Пенза), ФГУП Центральный научно-исследовательский институт КМ «ПРОМЕТЕЙ», ГНЦ РФ ФГУП «ЦНИИ чермет им. И. П. Бардина».

Качество биметалла обеспечивается современной технологией производства и соответствует ГОСТ 10885-85 [3] для обеспечения непрерывности адгезии слоев нулевого и первого класса при 100% ультразвуковом контроле. Каждая партия биметалла сопровождается

сертификатом, в котором фиксируются данные изготовителей металла основного и плакирующего слоев, результаты испытаний на прочность соединения слоев в биметалле на резку, разрыв и изгиб. Требования к биметаллу, объем испытаний указывается в протоколе поставки или техническом задании при заключении договора. Поставка может быть произведена в соответствии с техническими условиями ТУ 27.32.09.010-2005 [4] и

ТУ 27.81.09.009-2005 [5].

Данное предприятие имеет ряд технологических преимуществ:

- Возможно изготовление биметалла из практически любых сталей и сплавов.
- Технологическая мобильность: возможно изготовление биметалла практически любой марки с толщиной базового слоя от 8 мм (по согласованию сторон от 6 мм) до 500 мм (09Г2С, 12ХМ различных категорий прочности, ст.20, 22К, ст.3сп и др.) и плакирующего слоя от 1 мм до 25 мм (08Х18Н10Т, 12Х18Н10Т, 10Х17Н13М2Т, 08Х13 и других высоколегированных сталей и их зарубежных аналогов Тп321, ТП316Тi, Тп316Л, Тр410 *ASTM* и др.), изготовленные из титана марки VT1-0, меди М1, М0, латуни L-63 и L59, никелевых и хромоникелевых сплавов.
- Круглогодичное производство [6].

1.3.2 НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»

Крупнейший межотраслевой материаловедческий центр страны, признанный лидер в области разработки принципиально новых, имеющих общегосударственное значение перспективных материалов и технологий, обеспечивающих решение задач научно-технического развития промышленности и сохранение обороноспособности государства. Предприятие сохраняет статус государственного научного центра Российской Федерации (ГНЦ РФ) с 1994 года.

Разработки «Прометея» направлены на развитие ключевых отраслей промышленности: судостроения, атомной, тепловой и гидроэнергетики,

газодобывающей и нефтеперерабатывающей промышленности, машиностроения и военной техники, где изделия, конструкции и оборудование работают в экстремальных условиях эксплуатации. Коллектив института насчитывает более 1300 человек, основой которого являются известные ученые и специалисты в области металловедения, металлургии, сварки, неметаллических композиционных материалов, нанотехнологий.

Основная научно-техническая деятельность НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей» сосредоточена на следующих направлениях:

- конструкционные стали и функциональные материалы для морской техники;
- материалы энергетических установок;
- титановые сплавы и сплавы алюминия;
- неметаллические материалы и защита от коррозии.

По каждому из перечисленных направлений специалисты института проводят весь комплекс работ - от выбора и создания материала до контроля, за его поведением в процессе эксплуатации при различных условиях, в том числе экстремальных.

В качестве облицовочного слоя компания использует титановый сплав BT1-0, нержавеющей сталь типа 0X18H10T, медные, медно-никелевые и алюминиевые сплавы толщиной от 0,5 до 16 мм [7].

1.3.3 ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»

Федеральное государственное унитарное предприятие Российский федеральный ядерный центр Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики - крупнейший в стране научно-исследовательский институт, решающий сложные задачи оборонного, научного и народнохозяйственного значения. Основанный в 1946 году институт внес определяющий вклад в создание ядерного и термоядерного оружия в СССР, ликвидацию атомной монополии США. Здесь были разработаны первые отечественные атомная и водородная бомбы. Деятельность института

обеспечила достижение мирового ядерного равновесия в годы «холодной войны», удержала человечество от глобальных военных конфликтов. ВНИИЭФ положил начало реализации масштабной программы Советского Союза по проведению ядерных взрывов в мирных целях. В 1962 году была решена уникальная задача зажигания и горения термоядерного горючего при отсутствии делящихся материалов. Это был важный шаг на пути к термоядерной энергетике будущего.

РФЯЦ-ВНИИЭФ имеет мощную вычислительную, экспериментальную и производственную базу и представляет собой систему тесно взаимодействующих институтов: теоретической и математической физики, экспериментальной газодинамики и физики взрыва, ядерной и радиационной физики, лазерно-физических исследований. В его состав также входят научно-технический центр физики высоких плотностей энергии и направленных потоков излучений, электрофизическое отделение, конструкторские бюро, производственно-технологический и конверсионный комплексы. Одним из основных направлений деятельности организации является сварка и пайка различных материалов.

Институт имеет большой опыт разработки, внедрения новых и совершенствования существующих технологических процессов прецизионной электронно-лучевой сварки сталей различных марок, коррозионностойких и водородостойких сплавов, тугоплавких и цветных металлов, а также их комбинаций, позволяющих производить сварку деталей без последующей механической обработки.

Установки электронно-лучевой сварки и лазерные установки нового поколения с программируемыми параметрами процессов сварки и резки, а также новые технологии прецизионной сварки коренным образом повлияли на конструкции важных узлов и изделий, повысив их прочность, надежность, герметичность и технологичность.

Разработаны технологии аргонно-дуговой, контактной, и микроплазменной сварки узлов из различных металлов и сплавов толщиной от

0,01 мм. Отработана технология пайки малогабаритного металлокерамического гермовывода (Ø5х6 мм) активным припоем с герметичностью не хуже $1 \cdot 10^{-8}$ мЗ Па/с. Корпус, токовывод гермовывода из сплава 29НК, титана ВТ1-0 в любых сочетаниях, изолятор гермовывода из керамики ВК94-1 (22ХС), ЛФП. Создана экспериментальная база и разработаны уникальные технологии взрывной штамповки полусферических оболочек из труднодеформируемых сплавов и взрывной сварки листовых и цилиндрических слоев разнородных биметаллов.

Во ВНИИЭФ работали такие выдающиеся ученые, как И. В. Курчатов, Ю. Б. Харитон, Я. Б. Зельдович, А. Д. Сахаров, Н. Н. Боголюбов, М. А. Лаврентьев, И. Е. Тамм, Г. Н. Флеров, Е. А. Негин, С. Г. Кочарянц, А. И. Павловский, Ю. Н. Бабаев, С. Б. Кормер и многие другие. В институте созданы и развиваются крупные научные школы физиков, математиков, конструкторов, экспериментаторов, технологов, химиков.

Высокий научно-технический потенциал позволяет РФЯЦ-ВНИИЭФ расширять сферу исследований и разработок, в том числе в области сварки материалов взрывом, и быстро осваивать новые области высоких технологий, получать научные результаты мирового уровня, проводить уникальные фундаментальные и прикладные исследования.

По открытым научным направлениям с начала 1990-х годов интенсивно развивается международное научно-техническое сотрудничество.

Таким образом, показана актуальность использования технологии сварки взрывом для получения КМ из различных металлов и сплавов, в том числе и разнородных, обладающих высоким уровнем физико-механических и эксплуатационных характеристик как в России, так за рубежом.

1.4 Патентное исследование

Патентное исследование (патентно-информационный поиск, патентный поиск) - это исследования технического уровня, тенденций развития объектов техники, патентной чистоты, их эффективности использования по назначению. Исследования проводятся на основе анализа источников патентной информации

при разработке научно-технических прогнозов, планов развития науки и техники, создания научных исследований и разработок, освоения и производстве продукции. Объем источников научно-технической информации зависит от объекта и задачи исследований.

Цель исследований - определение технического уровня и тенденций развития в области получения сварка взрывом, поиск патентной и научно-технической информации.

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

Выбранные элементы регламента приведены в таблице 1. В ней записаны также индексы МПК (международная патентная классификация). В заголовке таблицы регламента указано общее название исследуемого объекта

Регламент поиска.

Исследуемый объект: сварка взрывом, области ее применения и технологические схемы сварки.

Объектом исследования является сварка взрывом, области ее применения и технологические схемы сварки. Предмет поиска: кинетической энергии разогнанной до большой скорости детали производится пластическая деформация контактирующих слоев металла на требуемых деталях.

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

Наименование информационной базы (фонда): Патентные фонды ФИПС.

Таблица 1 – Регламент поиска патентной документации

Предмет поиска	Индекс МПК	Широта поиска	Глубина поиска	Источник информации
Сварка взрывом	<i>B23K 20/08</i>	Россия	10 лет	Реестр изобретений РФ ФИПС
	<i>B21D 26/08</i>	Россия	10 лет	Реестр изобретений РФ ФИПС
	<i>F16C 33/04</i>	Россия	10 лет	Реестр изобретений РФ ФИПС
	<i>B32B 7/04</i>	Россия	10 лет	Реестр изобретений РФ ФИПС
	<i>B23K 101/06</i>	Россия	10 лет	Реестр изобретений РФ ФИПС

B23K 20/08 Изобретение относится к технологии получения изделий с внутренними полостями с помощью энергии взрыва и может быть использовано при изготовлении, например, деталей термического и химического оборудования, теплорегуляторов и т.п.

B21D 26/08 Изобретение может быть использовано при получении сваркой взрывом многослойных трубных заготовок. Плакируемую заготовку

устанавливают в массивной матрице.

F16C 33/04 Изобретение относится к технологии сварки взрывом и может найти применение в машиностроении, при изготовлении многослойной конструкции подшипников скольжения, в частности, состоящих из прочного стального основания и плакирующего слоя из антифрикционного сплава бронзы, содержащей свинец.

Основные способы соединения компонентов металлов между собой: литейное плакирование, холодная и горячая прокатка, сварка взрывом.

B32B 7/04 Изобретение относится к технологии получения многослойных композиционных материалов сваркой взрывом и может быть использовано для изготовления крупногабаритных металлических конструкций, в том числе для нефтехимической (корпуса реакторов, колонн, емкостей), атомной (реакторы, теплообменные аппараты), судостроительной (корпусы, переходные элементы, танки) отраслей промышленности.

B23K 101/06 Изобретение может быть использовано при изготовлении слоистых структур сложного профиля сваркой взрывом, например тонкостенных цилиндрических и эллиптических оболочек из биметаллов.

Результаты данного анализа представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты анализа

Предмет поиска	Страна выдачи, вид и номер охранного документа, индекс МПК	Заявитель (патентообладатель), номер заявки, дата публикации	Название изобретения (полной модели образца)
1	2	3	4

Сварка взрывом	Россия, <i>RU 2486043 C1,</i> <i>B23K 20/08</i> <i>B23K 101/14</i>	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Волгоградский государственный технический университет» (ВолгГТУ) 2012118875/02, 04.05.2012	Способ получения изделий с внутренним полостями сваркой взрывом [10]
	Россия, <i>RU 2433025 C1</i> <i>B21D 26/08</i>	Ганин Дмитрий Рудольфович, Панычев Анатолий Алексеевич 2010114064/02, 12.04.2011	Способ плакирования трубных заготовок сваркой взрывом [11]

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4
	Россия, <i>RU 2692009</i> <i>C1</i> <i>F16C 33/04</i>	Федеральное государственное унитарное предприятие «Рос- сийский федеральный ядерный центр Всероссийский научно- исследовательский институт экспери-ментальной физики» «РФЯЦ-ВНИИЭФ») 2018123840, 12.07.2017	Способ получения антифрикционного сплава со сталь сваркой взрывом [12]
	Россия, <i>RU 2453409</i> <i>C2</i> <i>B32B 7/04</i>	Открытое Акционерное Общество «Государственный научно-исследовательский институт машиностроения им. В.В.Бахирева» 2010134455/02, 17.08.2012	Способ получения крупногабаритных листов композиционного материала сваркой взрывом [13]

	Россия RU 2537671 C1 B23K 101/06	Федеральное государственное унитарное предприятие ядерный центр-Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики «ФГУП РФЯЦ ВНИИЭФ» 2013139761/02, 27.08.2013	Способ изготов- ления биметалли- ческих труб свар- кой взрывом [14]

В связи с вышеизложенной информацией, можно сделать несколько выводов:

Сварка взрывом была и остается одним из наиболее часто используемых и приоритетных методов сварки взрывом от различных внешних факторов. Это подчеркивается наличием многих патентов в этой области исследований патентной информации.

Современный технологический уровень технологии сварочного взрыва значительно вырос, как сама технология, так и индивидуальный подбор материалов постоянно совершенствуются. Это видно по наличию множества патентов в этой области исследований.

Совершенствование технологии сварки сопровождается значительным повышением характеристик и свойств получаемых при сварке материалов, что способствует все более широкому внедрению технологии на различных производственных площадках.

2 Физические основы метода ударно-волнового нагружения

2.1 Выбор материала для создания металлического композиционного материала

В рамках выпускной квалификационной работы были изучены экспериментальные образцы композиционных металлических материалов следующего типа (3 слоя): Сталь 20Х13+Сталь 65Х13, полученные в ходе научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в рамках программы "СТАРТ" Фонда содействия развитию малых промышленных предприятий в научно-технической сфере (проект № 39147 «Композитный режущий инструмент»).

Анализ свойств сырья при создании композиционных металлических материалов позволил нам выбрать конкретные марки материалов для разработки различных типов композитов. Когда режущие, режущие и контактные поверхности инструмента и обрабатываемого материала находятся в условиях сильного трения и износа, относительное скольжение происходит при повышенных температурах, скоростях и нормальных контактных нагрузках, которые в некоторых случаях достигают твердости обрабатываемого материала. При резании зона контакта характеризуется малыми размерами, достаточно высокой степенью ювенильности, неравномерным распределением рабочих напряжений и температур, а также неравномерными условиями на рабочих поверхностях инструмента.

Основные особенности условий трения при резании, рубке, особенно в тяжелых условиях работы инструмента (обработка металлов, грунтов, твердых пород и др.) значительные контактные напряжения; высокая температура поверхности инструмента, например, вследствие перемещения и деформации обрабатываемого материала; возникновение чрезмерных температурных градиентов, вызывающих термические напряжения в поверхностном слое инструмента; пластическая деформация и упрочнение поверхностного слоя инструмента; окисление поверхности инструмента; структурные преобразования.

Таким образом, для эффективной работы режущего инструмента, повышения его надежности и срока службы необходимо обеспечить достаточную остаточную прочность и износостойкость инструмента. В связи с

этим при выборе инструментального материала для создания композита учитывался комплекс показателей механических и эксплуатационных свойств материалов его компонентов (прочность, твердость от 55 HRC), износостойкости и коррозионной стойкости.

Этим условиям соответствуют коррозионностойкие легированные стали с различным содержанием углерода и инструментальные стали, которые будут использоваться при исследовании композиционных материалов для изготовления режущего инструмента.

Исследуемыми материалами являлись экспериментальные образцы многослойных композитов (3 слоя): сталь 20X13-65X13-20X13. Толщина свариваемых материалов: сталь 20X13 - 2 мм; сталь 65X13 - 1,2 мм. Размеры образцов свариваемых материалов составляли 330×230×10 мм. Количество образцов каждого типа составляет 10 шт.

Основными особенностями условий эксплуатации инструмента являются: трение при резании, резание, особенно в тяжелых условиях работы инструмента (обработка металлов, грунта, твердых пород и др.); значительные контактные напряжения; высокая температура поверхности инструмента, например, вследствие перемещения и деформации обрабатываемого материала; возникновение чрезмерных температурных градиентов, вызывающих термические напряжения в поверхностном слое инструмента; пластическая деформация и упрочнение поверхностного слоя инструмента; окисление поверхности инструмента; структурные преобразования.

В связи с этим основными требованиями к свойствам таких инструментов являются достаточная твердость, износостойкость и коррозионная стойкость. Обзор также показал, что для обеспечения эффекта самоотверждения требуется разница в твердости слоев композиционного материала. Поэтому для дальнейших исследований в рамках ВКР был выбран композиционный материал, состоящий из слоев коррозионностойкой стали с различным содержанием углерода: 20X13 и 65X13 в различных комбинациях. Для назначения режимов термической обработки композиционных материалов мы использовали

диаграмму состояния системы железо-хром-углерод с содержанием хрома 13 % (рисунке 7).

Сталь 20Х13: относится к ферритно-мартенситному классу, термостойкая (до 550 ° С), термостойкая (до 700 ° С), коррозионностойкая. Назначение: детали с высокой пластичностью, подвергающиеся ударным нагрузкам (клапаны гидравлического пресса, предметы домашнего обихода), а также изделия, подвергающиеся воздействию умеренно агрессивных сред (осадки, водные растворы солей органических кислот при комнатной температуре и др.). Самая высокая коррозионная стойкость достигается после термообработки (заковки с отпуском) и полировки. Твердость после заковки и низкого отпуска составляет до 42 ... 46 HRC.

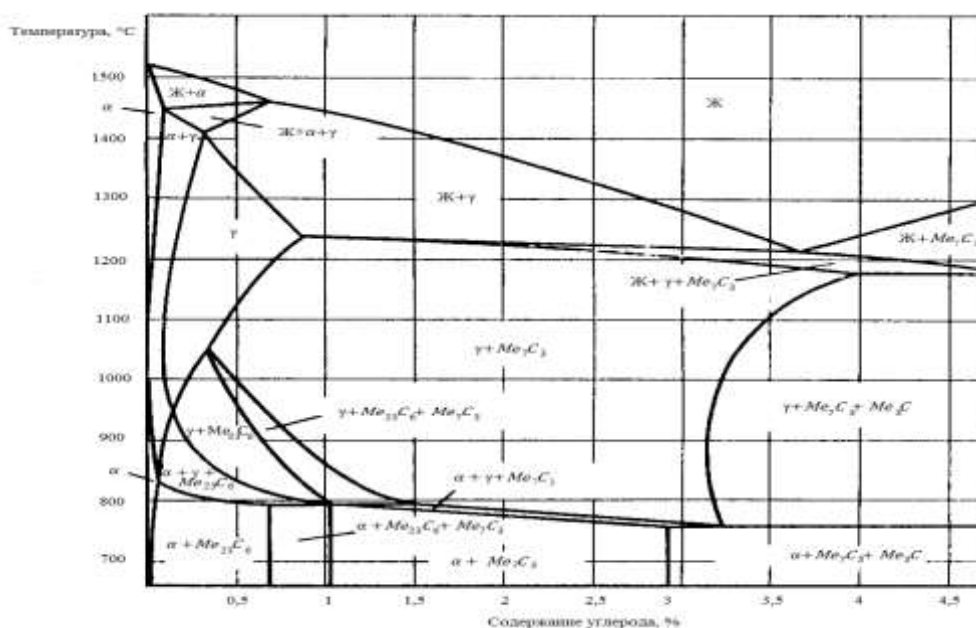


Рисунок 3 - Диаграмма состояния системы железо-хром-углерод с содержанием хрома 13%

Химический состав и свойства стали 20Х13 в соответствии с ГОСТ 5632- 2014 [5] приведены в таблицах 3 и 4.

Таблица 3 - Химический состав стали 20Х13 в % (ГОСТ 5632- 2014)

Элемент	C	Si	Mn	S	P	Cr
Значение, %	до 0,25	до 0,6	до 0,6	до 0,025	до 0,03	12...14

Таблица 4 - Механические свойства стали 20X13 при T=20°C (ГОСТ 5632- 2014)

Параметр	Сортамент	ГОСТ	Предел прочности, σ_B , МПа	Предел текучести, σ_T , МПа	Относительное удлинение, δ_5 , %
Значение	Лист толстый	7350-77	509	372	20
	Лист тонкий	5582-75	500	-	20
	Сортовой прокат	5949-75	600	450	16
	Лента	4986-78	500	-	16

Температура критических точек стали 20X13: $A_{c1} = 820^\circ\text{C}$, $A_{c3}(A_{cm}) = 950^\circ\text{C}$, $A_{r1} = 780^\circ\text{C}$. Температура заковки: 1000...1050°C в масле.

Структура стали в состоянии доставки показана на рисунке 4 и состоит из феррита и карбидов.



× 500

а)



× 1000

б)

Рисунок 4 - Структура стали 20X13

Сталь 65X13: коррозионностойкая, жаропрочная сталь, используемая для изготовления лезвий безопасных бритв, режущих инструментов, при использовании для износа: кухонных ножей, пил, съемных лезвий и т.д. Твердость после заковки и низкого отпуска составляет до 57-59 HRC.

Химический состав и свойства стали 65X13 в соответствии с ГОСТ 5632- 2014 приведены в таблицах 5.

Таблица 5 - Химический состав стали 65X13 в % (ГОСТ 5632- 2014)

Элемент	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr
---------	---	----	----	----	---	---	----

Значение, %	0,6...0,7	0,2...0,5	0,25...0,8	до 0,5	до 0,025	до 0,03	12...14
-------------	-----------	-----------	------------	--------	----------	---------	---------

Таблица 6 - Механические свойства стали 65X13 при T=20°C (ГОСТ 5632- 2014)

Сорта- мент	ТУ	Предел прочност и, σ_b , МПа	Предел текучести , σ_T , МПа	Относительно е удлинение, δ_5 , %	Твердость HV
Лента 0,1 мм	ТУ 14-1-4105-86 (нагартованное)	888...112 7	-	-	280...320
Лента 0,4 мм	ТУ 14-131-764-88 (нагартованное)	-	-	-	220...280
Подкат 3 мм	ТУ 14-1-3918-85 (термич. обработ.)	< 785	-	<18	<97HRB

Температура критических точек стали 65X13: $A_{c1} = 805...810$ °C; $A_{c3} = 880$ °C. Температура закалки стали 65X13: 1040...1050 °C.

Структура стали в состоянии поставки показана на рисунке 10 и представляет собой феррит и карбиды.



× 500

а)



× 1000

б)

Рисунок 5 - Структура стали 65X13

Химические элементы, входящие в состав стали, по-разному влияют на ее структуру и свойства. Углерод оказывает значительное влияние на механические и технологические свойства стали. Карбиды железа обладают высокой

твердостью, а кроме того, они позволяют упрочнять сталь термической обработкой. Обратным эффектом такого легирования считается ухудшение пластических свойств и свариваемости. Хром повышает износостойкость стали за счет образования на ее поверхности оксидов хрома. Кроме того, он положительно влияет на способность металла к термическому упрочнению, повышает устойчивость к образованию коррозии. Кремний и марганец являются основными окислителями и способствуют удалению кислорода из его состава. Кроме того, эти элементы хорошо влияют на технологические качества, такие как пластичность и свариваемость. Никель повышает термостойкость. Сера и фосфор являются вредными примесями, которые значительно снижают прочностные свойства стали и ответственны за появление такого эффекта, как хрупкость. Кроме того, сера увеличивает склонность стали к покраснению, что означает повышенный риск растрескивания при обработке давлением. Их наличие в стали объясняется несовершенством технологии плавки и чистотой химического состава исходной шихты [6].

Таким образом, был проведен отбор сырья для создания композитов для дальнейших исследований в рамках ВКР, изучены их исходные свойства, компоненты и области применения, а также определены температуры критических точек сталей, необходимые для выполнения операций термообработки. При выборе исходных материалов учитывается требуемое соотношение твердости наружных слоев композита и внутреннего режущего слоя. Закалка и отпуск выбраны в качестве основных операций термообработки для обеспечения требуемого уровня свойств композиционных материалов.

2.2 Обоснование выбора параметров и основной схемы сварки взрывом

Сварка взрывом является перспективным и рациональным методом получения высокопрочных и высокомодульных композиционных металлических материалов. Сварка взрывом - это метод сварки давлением, при котором соединение создается в результате столкновения, вызванного энергией взрыва.

Сварка позволяет соединять заготовки в виде пластин и труб значительной площади по всей поверхности. Наиболее технологичной является плоскопараллельная схема сварки. Метательный элемент устанавливается с определенным зазором над неподвижным базовым элементом. Поверх него укладывается слой взрывчатого вещества и устанавливается электродетонатор. Детонация распространяется через заряд взрывчатого вещества с определенной скоростью детонации D . Это значение зависит от состава, плотности, размера и других характеристик взрывчатого вещества [16].

Скорость детонации взрывчатых веществ, используемых для сварки взрывом, колеблется от 2000 до 3500 м/с. Под действием расширяющихся продуктов взрыва брошенный элемент изгибается вдвое и сталкивается с неподвижным основанием.

Скорость удара зависит от соотношения массы брошенного элемента и массы взрывчатого вещества, а также от продолжительности ускорения. В точке контакта создается давление порядка нескольких гигапаскалей, под воздействием которого происходит пластическая деформация металлов металлических и немобильных элементов. Образуется кумулятивная струя, которая очищает поверхности. В результате пластической деформации соединения образуется соединение. В зависимости от параметров сварки соединительная линия может быть волнистой или не иметь ярко выраженного волнового характера.

Сварка взрывом выполняется по плоской или цилиндрической схемам. В первом случае получают заготовки, площадь которых может быть ограничена только размером листового металла (площадью от 20 до 50 м²). По цилиндрической схеме осуществляется наружная или внутренняя футеровка труб.

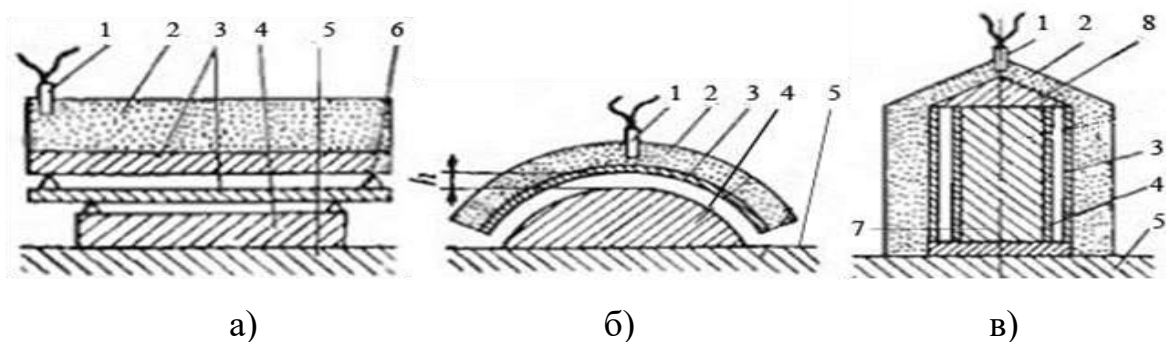
Сварка взрывом - это соединение элементов методом направленного энергетического взрыва и относится к категории взрывной обработки металла.

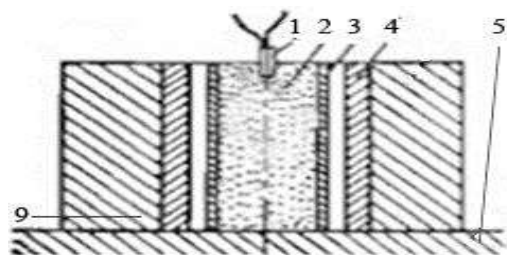
Во время движения взрыва детали ударяются друг о друга с высокой скоростью и образуют сварочное соединение, надежность которого

обеспечивается деформационными изменениями на поверхности. Из-за высокой скоротечности метода отсутствует объемная диффузия.

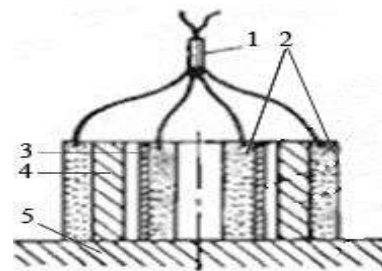
Существует множество различных схем технологической работы. Они объединяются воздействием продуктов детонации на цель и ударом с другими поверхностями. Все типы схем основаны на двух оригинальных, которые имеют принципиальные отличия - параллельные и угловые. Технологические схемы сварки взрывом приведены на рисунке 6.

Уровень полученных свойств, которые обеспечивает сварка взрывом, во многом зависит от скорости процесса метания. На низкой скорости практически нет шансов на формирование соединения, несмотря на полное соблюдение других основных условий. Стоит отметить, что несоответствующие скорости контакта не являются препятствием для получения высококачественной и надежной готовой продукции при условии, что заранее рассчитана подходящая скорость метания. Этот параметр оказывает прямое влияние на тип соединения, т. е. обрабатываемая область изменяет характеристики концентрации тепла в зависимости от скорости. Расчеты, как правило, носят экспериментальный характер, так как не существует устоявшегося метода определения режимов в этой области. Это связано с тем, что теория данного технологического процесса до сих пор не создана из-за невозможности полного исследования, а также сложности предварительного определения всех нюансов поведения металлических поверхностей и взрывной волны. То есть каждый отдельный случай требует создания режима расчета и собственного метода работы [17].





г)



д)

Рисунок 6 - Технологические схемы сварки взрывом: а) - параллельная для сварки многослойных поверхностей; б) - плакирование наружной поверхности труб; в) - эквидистантная схема; г) - плакирование внутренней поверхности труб; д) - плакирование крупногабаритных обечаек с противозарядом; 1 - детонатор; 2 - заряд взрывчатого вещества; 3 - метаемый элемент; 4 - неподвижный элемент; 5 - опра; 6 - установочный элемент; 7 - стержень; 8 - конус; 9 – матрица

Преимущества сварки взрывом

- Высокая скорость обработки соединяемых элементов. Как отмечалось ранее, для соединения металла требуется всего несколько долей секунды.

Однако подготовка полигона и самих материалов требует довольно большого количества времени.

- Возможность получения высококачественных биметаллических соединений. Следует учитывать, что другие технологии не позволяют соединять материалы с различными физико-механическими параметрами.

- Технология позволяет соединять материалы, которые характеризуются низкой степенью обрабатываемости.

- Вы можете создать изделие для дальнейшейковки и штамповки. В последнее время для укрепления поверхности стали использовать ковку и штамповку. Обычный шов характеризуется тем, что он не выдерживает воздействия переменных нагрузок.

- Можно получить изделие со сложной формой углов. Примером могут служить изделия с изгибами.

Недостатки обработки ударной волной:

- Низкая степень безопасности при взрыве. Это связано с тем, что управлять взрывной волной довольно сложно.

- Для того, чтобы предоставить рассматриваемые услуги, вам необходимо пройти специальное обучение и получить на это разрешение. Несоблюдение технологии приводит к тому, что заготовка может быть повреждена.

- Работы могут проводиться только при наличии специальной защитной камеры или полигона.

- Автоматизировать этот процесс практически невозможно. Именно поэтому каждый процесс соединения продуктов должен быть тщательно подготовлен.

Основными технологическими параметрами сварки взрывом являются скорость детонации D , [м/с], зазор между метаемым и неподвижным элементами h , [мм], а также безразмерный параметр r , определяемый как отношение массы заряда взрывчатого вещества к массе метаемого элемента, по формуле 2.1 [18]:

$$r = \frac{H\rho_{BV}}{S_1\rho_{МП}}, \quad (2.1)$$

где H - высота заряда взрывчатого вещества, мм;

ρ_{BV} - плотность взрывчатого вещества, г/см³;

S_1 - толщина метаемой пластины, мм;

$\rho_{МП}$ - плотность метаемой пластины, г/см³. гека

В процессе соединения элементов матрицы и армирующих волокон обеспечивается надежное металлическое соединение. На стадии металлической металлическая матрица из отдельных компонентов все компоненты обладают высокой пластичностью и могут подвергаться различным видам технологической обработки. После завершения формирования создаются условия для образования интерметаллических фаз. Упрочнение композита и достижение им заданных эксплуатационных показателей достигается на стадии термообработки. Формируется структурно неоднородное состояние материала, которое приобретает необходимые характеристики.

На сегодняшний день для сварки листовых материалов взрывом используются две технологические схемы: с параллельным и с угловым распределением соединяемых элементов, как показано на рисунке 7 [19].

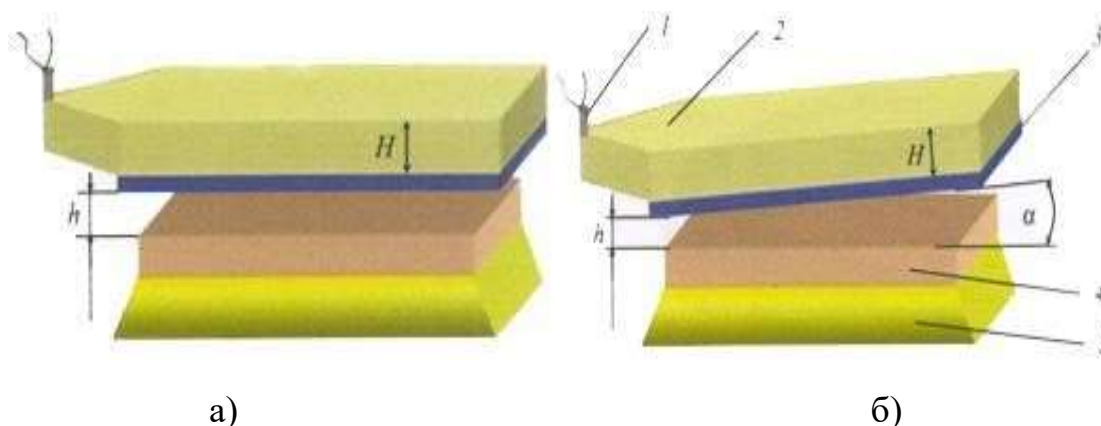


Рисунок 7 - Схемы сварки взрывом плоских заготовок: а) - угловая; б) - параллельная); 1 - электродетонатор, 2 - контейнер с зарядом ВВ, 3 и 4 - подвижная и неподвижная пластины соответственно, 5 - основание схемы (грунт, песок, металлическая плита и т.п.)

С практической точки зрения очевидным недостатком схемы угловой сварки взрывом является то, что по мере увеличения расстояния от точки инициирования заряда взрывчатого вещества увеличивается зазор h между свариваемыми элементами, что приводит к соответствующему изменению условий столкновения пластин, что, в свою очередь, влияет на характер свойств получаемого композита.

По сравнению с угловой схемой сварки взрывом параллельная схема ($\alpha=0$) создает условия (при определенных допущениях) для квазистационарного течения процесса с постоянными значениями скорости, что позволяет использовать ее для реализации большинства практических задач.

В схеме с параллельным расположением свариваемых пластин скорость точки контакта, которая показывает скорость распространения зоны высокого давления по свариваемой поверхности, принимается равной скорости детонации взрывчатых веществ.

На основе проведенного исследования технологических схем получения сваркой взрывом композиционных металлических материалов для изготовления композита Сталь 20Х13+Сталь 65Х13+Сталь, состоящего из трех и более слоев было предложено использовать одновременную схему сварки взрывом плоских заготовок, приведенную на рисунке 8.

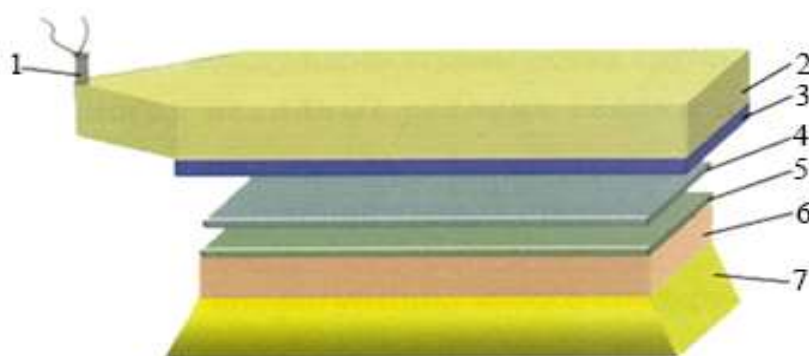


Рисунок 8 - Одновременная схема сварки взрывом плоских заготовок:

1 – электродетонатор, 2 - контейнер с взрывчатым веществом, 3 - метаемая пластина, 4 - промежуточная пластина, 5 - неподвижная пластина, 6 - металлическое основание, 7 – грунт

Для проведения сварки взрывом использовали режимы, указанные в таблице 7.

Таблица 7 - Режимы и результаты расчета технологических параметров процесса сварки, образцов композиционного материала Сталь 20Х13+Сталь 65Х13+Сталь 20Х13

Режим сварки	Тип взрывчатого вещества	Исходные параметры сварки				Результаты расчета		
		Характеристики взрывчатого вещества			Величина зазора между слоями, мм	V_k , м/с	V_c между слоями, м/с	
		$D_{вв}$, м/с	$H_{вв}$, мм	$\rho_{вв}$, г/см ³			1-2	2-3
1	Игданит	2500,0	70,0	0,75	2	2500,0	540,9	508,8
2	Игданит	2300,0	60,0	0,75	2	2300,0	484,8	449,4

3	Игданит	2100,0	50,0	0,75	2	2100, 0	428,6	388,7
---	---------	--------	------	------	---	------------	-------	-------

После сварки взрывом проводили визуальный и измерительный контроль (ВИК) по ГОСТ Р ИСО 17637-2014 [19] и ультразвуковой контроль (УЗК) по ГОСТ Р 55724-2013 [21] композиционного материала. Визуальный осмотр выявляет такие недопустимые дефекты, как трещины, сколы и расслоения композитного материала, а также оценивает его поверхность на целостность и отсутствие оболочек, свищей. При ультразвуковом контроле основными контрольными параметрами являются отсутствие внутренних дефектов, так как они негативно влияют на дальнейшие технологические свойства полуфабриката.

В результате из трех основных режимов сварки для получения экспериментальных образцов КМ для дальнейших исследований выбирали рациональный режим, обеспечивающий отсутствие вышеуказанных дефектов композита.

Таким образом, решена задача рационального технологического параметра и определена схема ударно-волнового нагружения для получения многослойных композиционных металлических материалов сваркой взрывом.

3 Методы оценки механических свойств металлических композиционных материалов

3.1 Оборудование для обработки и исследования композиционных материалов

3.1.1 Оборудование для термической обработки КМ

Для устранения упрочнения, повышения деформируемости материала после сварки взрывом в рамках ВКР была проведена термическая обработка (отжиг) композитных заготовок. Для отжига использовалась муфельная печь, оснащенная микропроцессорным регулятором температуры *P200*, который предназначен для измерения и программного регулирования температуры в электропечах сопротивления. В основе прибора лежит цифровое вычислительное устройство, содержащее однокристалльную микро-ЭВМ типа *AT89C55*,

микросхему запоминающего устройства элементы для передачи обработки информации.



а)



б)

Рисунок 9 - Печь с микропроцессорным счетчиком-контроллером температуры ПТ200: а) - общий вид муфельной печи; б) – терморегулятор ПТ200

Таблица 8 - Основные технические характеристики микропроцессорного терморегулятора ПТ200 [21]

Параметр	Значение
Диапазон измеряемых регулируемых температур, °C	20,0...1250,0
Основная абсолютная погрешность прибора (с учетом погрешности компенсации изменения термо-э.д.с. холодного спая), °C:	
- при температуре окруж. воздуха 10,0...15,0 °C:	±8
- при температуре окруж. воздуха 15,0...40,0 °C:	±6

Рабочие условия применения: - температура окружающего воздуха, °С: - относительная влажность воздуха, %: - атмосферное давление, кПа:	10,0...40,0 80,0 (при плюс 35 °С более низких температур без конденсации) 86,0...106,7
Погрешность компенсации температуры холодных спаев диапазоне температур окружающего воздуха, °С: 10,0...15,0 °С 15,0...40,0 °С	 ±5 ±3
Напряжение питания, В:	200,0
Частота питающего напряжения, Гц:	50,0
Потребляемая мощность, Вт, не более:	5,0
Габаритные размеры, мм:	125,0×105,0×52,0
Масса, кг	0,6

Эта муфельная печь используется для обработки материалов в воздушной среде до температуры плюс 1250 °С или для нагрева материалов, сопровождающегося выделением продуктов сгорания.

Термическая обработка композиционного материала включает в себя отжиг (перекристаллизация отжиг), обеспечивающий снятие наклепа и разупрочнение материала, вызванное наклепом в результате пластической деформации после сварки взрывом. При нагреве композита обязательным условием является выбор необходимой температуры, которая обеспечивает полную перекристаллизацию всех слоев материала. Благодаря рациональным режимам отжига зерна материала восстанавливают свою первоначальную форму, а композит восстанавливает первоначальный уровень свойств (повышается пластичность, снижается твердость - повторная кристаллизация и удаление упрочнения). Для исследуемого типа композита рациональная температура отжига составляет от плюс 880 до 900 °С, охлаждение в печи.

В результате исследования изучено влияние параметров последующего отжига композитов после сварки взрывом на характер изменений их

микроструктуры и свойств. Показано, что в состоянии после отжига материал перекристаллизовывается, что приводит к снижению твердости (размягчению) композита и, как следствие, к улучшению его обрабатываемости.

3.1.2 Оборудование для исследования микроструктуры композиционного материала

Исследование микроструктуры экспериментальных образцов композиционных металлических материалов проводилось на прямом металлографическом микроскопе модульной конструкции с цифровой камерой, с планахроматической оптикой «до бесконечности» *ALTAMI MET 6C*, представленном на рисунке 10.



Рисунок 10 - Металлографический микроскоп АЛЬТАМИ MET 6С
Микроскоп оснащен программным обеспечением «*Altami Studio*» для управления цифровыми камерами, выполнения измерений и автоматического анализа изображений.

Технические характеристики металлографического микроскопа АЛЬТАМИ MET 6 С представлены в таблице 8 [22].

Таблица 9 - Технические характеристики металлографического микроскопа АЛЬТАМИ MET 6С

Параметр	Значение
Методы исследований	В отраженном свете: светлое поле и поляризация

Увеличения, крат	25, 50, 62, 100, 125, 200, 250, 400, 500, 600, 800, 1000, 1200, 1250, 1500, 1600, 2000, 2500
Дополнительная комплектация	Цифровая камера с программным обеспечением «AltamiStudio»

Исследование микроструктуры проводили на специально подготовленных образцах-микрофотографиях, подготовленных по ГОСТ Р 57180-2016 [24].

Для выявления особенностей микроструктуры проводили химическое травление микрофотографий с использованием реагентов на основе концентрированной азотной HNO_3 (от 65 до 68 мас.%) и соляной HCl (от 32 до 35 мас.%), взятых в соотношении кислот 1:3 по объему (массовое соотношение, в пересчете на чистые вещества, составляет около 1:2).

Внешний вид обоймы с протравленными микрошлифами 3-х слойного композиционного материала приведен на рисунке 11.



Рисунок 11 - Микрошлифы образцов трехслойных композиционных металлических материалов

Процесс проведения исследований микроструктуры экспериментальных образцов композиционных металлических материалов показан на рисунке 12.

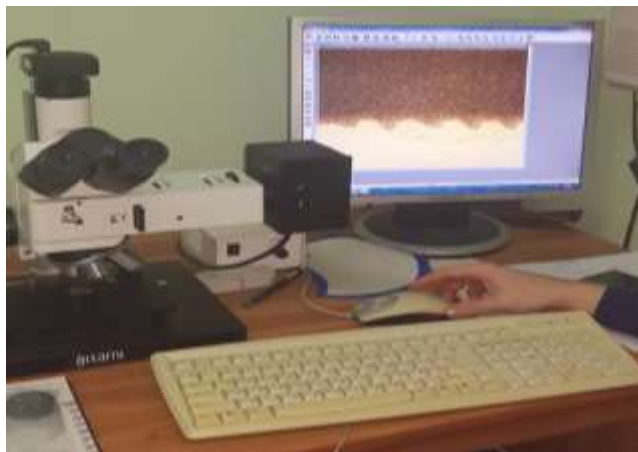


Рисунок 12 - Исследование микроструктуры экспериментальных образцов композиционных металлических материалов

Таким образом, изучена технология изготовления и травления микрошлифов с дальнейшим анализом микроструктуры на металлографическом микроскопе АЛЬТАМИ МЕТ 6С.

3.1.3 Оборудование для испытаний композиционных материалов на одноосное растяжение

Исследование механических свойств экспериментальных образцов композиционных металлических материалов после сварки взрывом и после обжига проводили путем испытаний на одноосное растяжение (прочность на растяжение) при нормальной температуре на разрывной машине модели IR 5145-500. Испытания проводились в соответствии с ГОСТ 1497-84 (ISO 6892-84) [24].



Рисунок 13 - Разрывная машина ИР 5145-500

Технические характеристики разрывной машины ИР 5145-500 для испытаний на одноосное растяжение представлены в таблице 10 [25].

Таблица 10 – Технические характеристики ИР 5145-500

Параметр		Значение
Наибольшая предельная нагрузка, κH		500,0
Пределы допускаемой погрешности нагрузки, % (в диапазоне нагрузок, κH)		± 1 (20,0...500,0)
Скорость перемещения активного захвата, мм/мин		0,05...200,0
Номинальная цена единицы наименьшего разряда	при индикации нагрузки, H	10,0
	при измерении перемещения активного захвата, мм	0,01
Ход движения траверсы без захватов, мм		850,0
Ширина рабочего пространства, мм		750,0
Питание		3N, 380В, 50Гц
Максимальная потребляемая мощность, кВт		5,3
Габаритные размеры (ширина $\times$ длина $\times$ высота), мм	Установка испытательная	1340,0 $\times$ 1175,0 $\times$ 2710,0
	Стойка приборная	1500,0 $\times$ 750,0 $\times$ 895,0
Масса, кг	Установка испытательная	1840,0
	Стойка приборная	260,0

Для проведения испытаний на одноосное растяжение готовились образцы, согласно эскизу, представленному на рисунке 14.

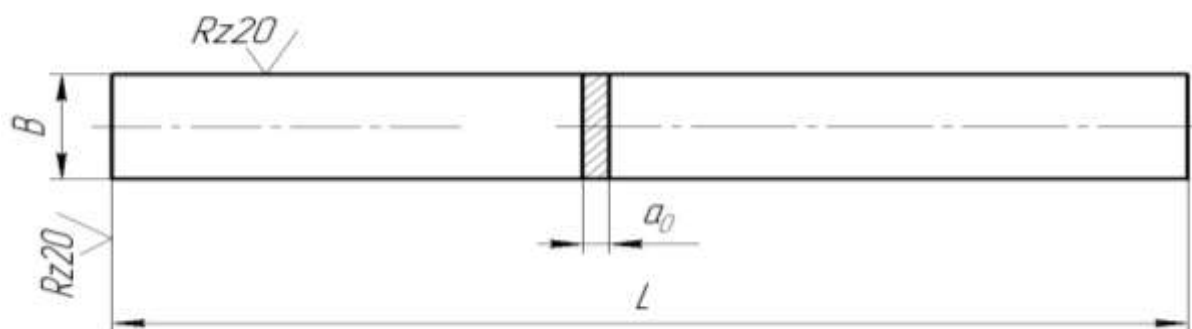


Рисунок 14 - Эскиз образцов для испытания на растяжение: B - ширина образца; L - длина образца; a_0 - толщина образца

На рисунке 15 представлен внешний вид экспериментальных образцов композиционных металлических материалов до и после проведения испытаний на одноосное растяжение.



а)



б)

а) до проведения испытаний на одноосное растяжение;

б) после проведения испытаний на одноосное растяжение.

Рисунок 15 – Экспериментальные образцы композиционных металлических материалов

Процесс проведения испытаний согласно ГОСТ 1497-84 на одноосное растяжение экспериментальных образцов композиционных металлических материалов приведены на рисунке 16.



Рисунок 16 - Испытания на одноосное растяжение экспериментальных образцов композиционных металлических материалов

Таким образом, обоснован выбор технологического оборудования для проведения технического обслуживания, изучения микроструктуры и прочностных характеристик композиционных металлических материалов, полученных сваркой взрывом.

3.1.4 Оборудование для исследования микротвердости композиционных материалов

Исследование твердости экспериментальных образцов композиционных металлических материалов после закалки и отпуска проводили на стационарном твердомере (микротвердость HV) модели ПМТ-3 по ГОСТ 9450-76 (СТ СЭВ 1195-78) с нагрузкой на индентор 200 гр ($HV0, 2$) [36].

Стационарный твердомер ПМТ-3 на (рисунке 17) предназначен для измерения поверхностной твердости образцов металлов, керамики, стекла и других материалов методом микро-Виккерса в соответствии с ГОСТ 9450-76. ПМТ-3 оснащен системой отображения изображения отпечатка пальца на микрометре MOV-1-16х с микрометрической шкалой с наименьшей ценой деления 0,001 мм, общим увеличением $\times 130$ и $\times 500$, подсветкой точки загрузки, фильтрами темного и светлого полей, коаксиальным поворотным столом и механизмом ручной загрузки. Технические характеристики твердомера ПМТ-3 приведены в таблице 17.



Рисунок 17 - Твердомер ПМТ-3

Таблица 11 - Технические характеристики твердомера ПМТ-3

Наименование	Обозначения (показатели)
Увеличение микроскопа	130× и 487×
Алмазная пирамида: угол при вершине	136°С
Острие при вершине	не более 1 мкм
Пределы нагрузки	2...200 г
Пределы измерения диагоналей отпечатков (с объективом $F=6,2$)	0,05 – 0,25 мм
Предметный столик: пределы угла поворота	~0 ...180°С
Пределы продольного перемещения	0...10 мм
Пределы поперечного перемещения	0 – 10 мм
Цена деления шкалы микрометрической подачи	0,01 мм
Питание – через трансформатор от сети переменного тока	127/220 В
Наименование	Обозначения (показатели)
Габаритные размеры:	
- микротвердомера в рабочем положении	410×290×200 мм
- трансформатора	145×110×70 мм
Вес:	
- микротвердомера	21,6 кг
- трансформатора	1,72 кг

Для исследования микротвердости экспериментальных образцов композиционных металлических материалов были подготовлены микроострые поверхности, представленные на рисунке 19.



Рисунок 19 - Микрошлифы образцов композиционных металлических материалов

Таким образом, обоснован выбор технологического оборудования для выполнения ТО, исследования микроструктуры и прочностных характеристик композиционных металлических материалов, полученных сваркой взрывом.

4 Результаты исследований образцов композиционных металлических материалов

В рамках ВКР были проведены следующие виды исследований и испытаний механических свойств экспериментальных образцов композиционных металлических материалов:

- исследование микроструктуры по ГОСТ Р 57180-2016;
- испытания на растяжение (прочность на растяжение) при нормальной температуре по методике ГОСТ 1497-84 (ИСО 6892-84).;

- исследование твердости после закалки и отпуска по методике ГОСТ 9450-76 (СТ СЭВ 1195-78) с нагрузкой на инденторе 200 гр. ($HV_{0.2}$)

4.1 Оценка качества экспериментальных образцов композиционных металлических материалов, полученных сваркой взрывом

Для оценки качества КМ после сварки взрывом проводили визуально-измерительный и ультразвуковой контроль. Были взяты 3 серии образцов, полученные СВ на режимах указанных в таблице 7, подраздел 2.2.



Рисунок 20 - Дефекты (деформация) композиционного материала при сварке на режиме 1 (70 мм)

При визуальном осмотре композитных образцов Сталь 20Х13+Сталь 65Х13+Сталь 20Х13 после сварки взрывом в режимах, указанных в таблице 7, было установлено, что в режиме 1 пластическая деформация металла происходит в конечной точке фронта детонации, как показано на рисунке 21, что может привести к образованию оплавления в зоне сварки, которые являются недопустимыми дефектами. композита.



Рисунок 21 - Листовой полуфабрикат композиционного материала (без дефектов) при сварке на режиме 2 (60 мм)

Визуальный осмотр образцов композитов после сварки взрывом в режиме 2, указанном в таблице 10, не выявил поверхностных дефектов, а поверхность композитов имеет наилучший внешний вид, что подтверждается рис. 21. Проведенный ультразвуковой контроль не выявил никаких внутренних дефектов.

При визуальном осмотре образцов исследуемого композита после сварки взрывом в режимах, указанных в таблице 10, было установлено, что в режиме 3 на краях композита происходит неполное обрубание металла, как видно на рис. 22. Последующий ультразвуковой контроль выявил наличие не сварных зон, прилегающих к местам неполного обрубания композита, что является недопустимым дефектом и композит признан дефектным.

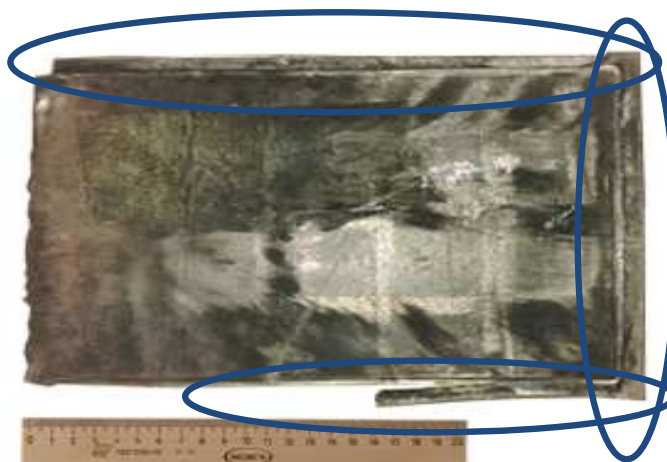


Рисунок 22 - Дефекты (неполная обрубка) композиционного материала при сварке взрывом на режиме 3 (50 мм)

Ранее было установлено, что национальные технологические параметры композитной сварки в исследуемой области соответствуют режиму 2, который обеспечивает получение высококачественного композитного материала.

Таким образом, был проведен визуальный осмотр поверхности композитов на наличие поверхностных дефектов и ультразвуковой контроль для выявления внутренних дефектов полученных композиционных материалов; по результатам контроля были определены рациональные технологические параметры и схема сварки взрывом для обеспечения получения высококачественных композиционных образцов.

4.2 Термическая обработка многослойных композиционных материалов

Перед выполнением основных операций термической обработки образцы были промаркированы (пронумерованы) для последующей идентификации на (рисунке 23).



а)



б)

а) образцы для исследования микроструктуры; б) образцы для исследования механических свойств.

Рисунок 23 - Пример маркировки экспериментальных образцов многослойных композиционных материалов перед термической обработкой

Рекристаллизационный отжиг образцов проводили для устранения упрочнения и повышения деформируемости материала после сварки взрывом. Рациональная температура отжига для композитов составляет 880...900°C, выдерживают в печи 2,5-3 часа, охлаждают вместе с печью.

Для придания требуемых свойств композитам проводилась термическая обработка, включающая:

- укладку образцов многослойных композиционных материалов в печь с обеспечением зазоров между ними для равномерного прогрева образца на (рисунке 24);

- закалку для повышения твердости, износостойкости и коррозионной стойкости материала на (рисунке 25);

- отпуск для снятия внутренних напряжений после закалки, что необходимо для предотвращения разрушения материала инструмента при его эксплуатации.



Рисунок 24 - Укладка образцов многослойных композиционных материалов в печь перед термической обработкой



Рисунок 25 - Нагрев под закалку многослойных композиционных материалов

При термообработке композита в обязательном порядке соблюдаются технологические параметры (режимы) обработки: температура нагрева, время выдержки, скорость охлаждения (средняя).

При отработке режимов термической обработки для исследуемых типов композита были выбраны следующие режимы термической обработки:

1. Закалка: температура нагрева 1050-1100 °С, время выдержки 1,5...2 мин, охлаждение в масле. Отпуск: температура нагрева 200...250 °С, время выдержки 1,5...2 мин, охлаждение в масле.

2. Закалка: температура нагрева 1050-1100 °С, время выдержки 1,5...2 мин, охлаждение в масле. Отпуск: температура нагрева 300...350 °С, время выдержки 1,5...2 мин, охлаждение в масле.

Таким образом, для образцов многослойных композиционных материалов, полученных сваркой взрывом, был выполнен комплекс работ по термообработке, включающий отработку технологических параметров термообработки (закалка и отпуск). Основными технологическими параметрами термообработки, влияющими на свойства композиционных материалов, являются температура нагрева, время выдержки и время охлаждения (скорость).

4.3 Проведение исследований микроструктуры многослойных композиционных материалов после термической обработки

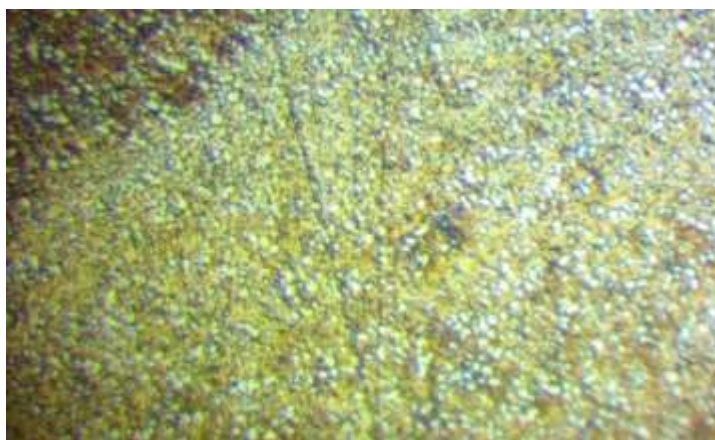
Исследование микроструктуры многослойных композиционных материалов (Сталь 20Х13 - Сталь 65Х13 - Сталь 20Х13) после закалки и низкого отпуска при указанных рациональных режимах показало, что основными компонентами структуры композиционных слоев являются мартенситные и карбидные зерна ($Cr_{23}C_6$). Карбиды в структуре сталей имеют округлую и пластинчатую форму.

На рисунках 26 и 27 представлены микроструктуры отдельных слоев композита после закалки и низкого отпуска.



x20

Рисунок 26 - Микроструктура стали 20X13



x20

Рисунок 27 - Микроструктура стали 65X13

Анализ микроструктуры показал, что карбидная составляющая в стали 65X13 занимает около 55-60% от общего объема, что позволяет говорить о большей износостойкости и твердости этого слоя по сравнению со сталью 20X13, где карбидная составляющая занимает около 25-30 %.

Полученные результаты исследований микроструктуры многослойных композиционных материалов после термообработки свидетельствуют о том, что основными компонентами структуры композиционных слоев являются мартенситные и карбидные зерна (Cr_{23}C_6), при этом объем карбидного компонента увеличивается от поверхности к центру для композиционных материалов исследуемого типа: Сталь 20X13 (25-30%) - Сталь 65X13 (55-60%) - Сталь 20X13 (25-30%). Такой характер слоистого распределения карбидов в

структуре композиционных материалов свидетельствует о различии механических свойств композита в слоях и возможности изготовления на его основе режущего инструмента с эффектом самозатачивания.

5 Испытание на одноосное растяжение экспериментальных образцов композиционных металлических материалов после термической обработки

Исследование механических свойств экспериментальных образцов композиционных металлических материалов после закалки и отпуска проводили путем испытаний на одноосное растяжение (предел прочности при растяжении) при нормальной температуре на разрывной машине модели IR 5145-500 (рисунке 24 таблица 8). Испытания проводились в соответствии с ГОСТ 1497-84 (ИСО 6892-84, СТ СЭВ 471-88) [35].

Установлено, что в результате отжига происходит снятие наклёпа, приводящее к снижению твердости (разупрочнению) композита и как следствие к улучшению его обрабатываемости. При этом прочность снижается с 840 МПа (после сварки взрывом) до 646 МПа, пластичность возрастает: относительное удлинение с 3,5 % (после сварки взрывом) до 25 %, сужение с 5,2 % (после сварки взрывом) до 46,2%.

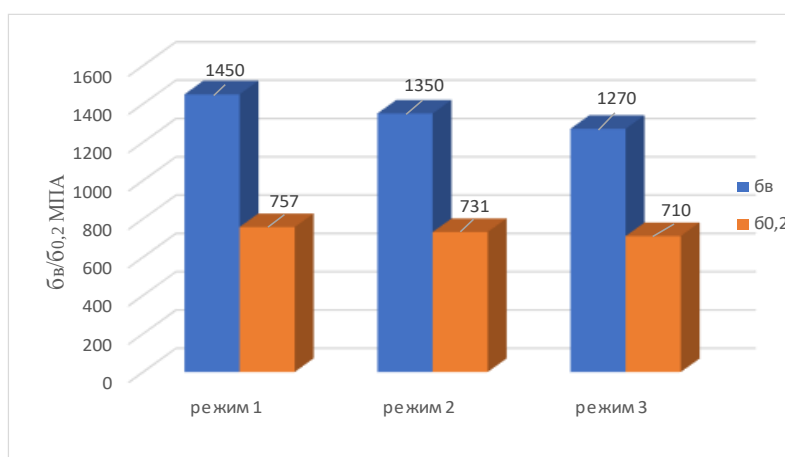
Результаты испытаний показывают, что для экспериментальных образцов композиционных металлических материалов в состоянии после закалки и низкого отпуска значение прочности находится в диапазоне 1352,3...1508,6 МПа, предел текучести-в диапазоне 757,3...844,8 МПа, относительное удлинение - от 1,2...2,2 %, относительное сужение-от 6,1...6,4 %.

Для экспериментальных образцов композиционных металлических материалов в состоянии после закалки и среднего отпуска значение прочности находится в диапазоне 1306,1...1402,2 МПа, предел текучести-в диапазоне 731,4...785,2 МПа, относительное удлинение-от 8,2...9,3%, относительное сужение-от 18,2...19,3 %.

Для экспериментальных образцов композиционных металлических материалов в состоянии после закалки и высокого отпуска значение прочности

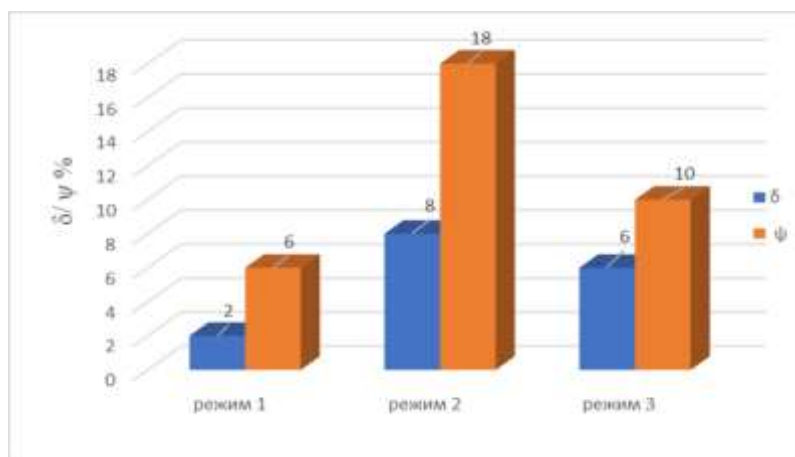
снижается и находится в диапазоне 1256,3...1355,1 МПа, предел текучести - в диапазоне 703,5...758,9 МПа, относительное удлинение-от 5,2...7,2%, относительное сужение-от 8,1...10,2 %.

На рисунках 28, 29 отражена зависимость значений прочности и пластичности образцов композиционных материалов в зависимости от вида термической обработки.



режим 1 – закалка + низкий отпуск; режим 2 – закалка + средний отпуск;
режим 3 – закалка + высокий отпуск

Рисунок 28 - Прочность образцов композиционных материалов после термической обработки



режим 1 - закалка + низкий отпуск; режим 2 – закалка + средний отпуск;
режим 3 – закалка + высокий отпуск

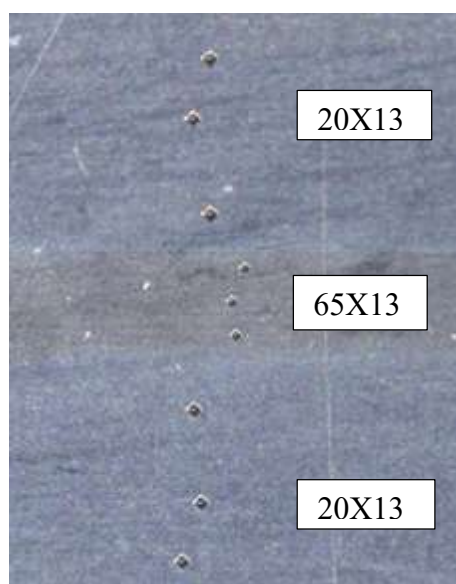
Рисунок 29 - Пластичность образцов композиционных материалов после термической обработки

Таким образом, установлено, что в результате отпуска происходит постепенное снижение прочности всех видов композиционных материалов. В то же время повышение пластичности наблюдается только при низком и среднем отпуске. При высоком отпуске наблюдается негативное явление, известное как отпускная хрупкость, при котором помимо снижения прочностных характеристик, пластичность композита так же начинает снижаться.

5.1 Исследование твердости экспериментальных образцов композиционных металлических материалов после термической обработки

Исследование твердости экспериментальных образцов композиционных металлических материалов после закалки и отпуска проводили на стационарном твердомере (микротвердость HV) модели ПМТ-3 по методике ГОСТ 9450-76 (СТ СЭВ 1195-78) с нагрузкой на инденторе 200 гр. ($HV_{0.2}$) [36].

Фото отпечатков индентора на композиционном материале при проведении исследований микротвердости экспериментальных образцов на твердомере ПМТ-3 приведены на (рисунке 30).



×20

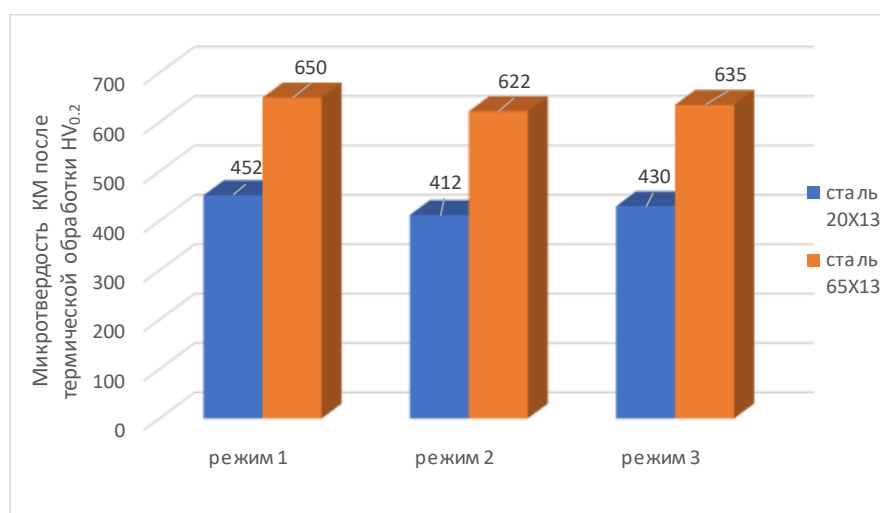
Рисунок 30 - Схема «уколов индентора» при определении микротвердости композиционного материала

Результаты исследований микротвердости выявили:

1. Для экспериментальных образцов композиционных металлических материалов в состоянии после закалки и низкого отпуска величина микротвердости находится в диапазоне: для стали 20X13 $HV_{0.2}$ 452...480, для стали 65X13 (режущий слой) $HV_{0.2}$ 650...673 на (рисунке 31).

2. Для экспериментальных образцов композиционных металлических материалов в состоянии после закалки и среднего отпуска величина микротвердости находится в диапазоне: для стали 20X13 $HV_{0.2}$ 412...433, для стали 65X13 (режущий слой) $HV_{0.2}$ 622...645 на (рисунке 31).

3. Для экспериментальных образцов композиционных металлических материалов в состоянии после закалки и высокого отпуска величина микротвердости находится в диапазоне: для стали 20X13 $HV_{0.2}$ 430...446, для стали 65X13 (режущий слой) $HV_{0.2}$ 635...653 на (рисунке 31).



режим 1 - закалка + низкий отпуск; режим 2 – закалка + средний отпуск;
режим 3 – закалка + высокий отпуск

Рисунок 31 - Микротвердость композиционных материалов после термической обработки

Оценка микротвердости композитных слоев позволила установить, что композитный материал обладает максимальной общей твердостью слоев после закалки и низкого отпуска. Минимальные значения твердости слоя наблюдаются в композиционном материале после закалки и среднего отпуска. После закалки и

высокого отпуска общая твердость слоев композиционных материалов начинает увеличиваться. Это связано с тем, что карбидообразующие элементы (в данном материале хром) способствуют образованию мартенсита, устойчивого к распаду. Разложение мартенсита сопровождается выделением легированных карбидов, которые вызывают замедление падения твердости, а иногда и ее повышение. Увеличение твердости при температурах отпуска 450-500 °С и выше за счет выделения карбидов объясняется явлением вторичной твердости. Такой вид термической обработки для изготовления композиционных инструментов неприемлем, так как наряду с увеличением твердости происходит снижение пластичности, что приводит к охрупчиванию материала.

Таким образом, были оценены механические свойства многослойных композиционных материалов после термической обработки. Установлены оптимальные диапазоны температуры нагрева и времени выдержки образцов в печи при закалке и отпуске, обеспечивающие полный и равномерный нагрев композита.

Заключение

В ходе выполнения ВКР проведен анализ различных типов многослойных композиционных материалов.

Показана актуальность использования технологии сварки взрывом для получения КМ из различных металлов и сплавов, в том числе и разнородных, обладающих высоким уровнем физико-механических и эксплуатационных характеристик как в России, так за рубежом. Произведен патентный поиск в области металлических КМ, подтверждена их перспективность и актуальность, а также современный технологический уровень технологии ударно-волнового нагружения.

Обоснован выбор исходных материалов для создания композитов (сталь 20Х13 и сталь 65Х13), изучены их состав, свойства и области применения.

Проведен анализ технологических схем получения сваркой взрывом композиционных металлических материалов. Выявлены преимущества и недостатки схемных решений при сварке взрывом плоских металлических заготовок. Установлено, что в параллельной схеме сварки взрывом создаются условия для квазистационарного протекания процесса с постоянными величинами технологических параметров, что позволяет применять ее для реализации большинства практических задач.

Изучены методики исследований свойств и микроструктуры КМ, полученных сваркой взрывом. Проведены исследования микроструктуры и микротвердости композитов, испытания КМ на одноосное растяжение.

Исследовано влияние режимов сварки взрывом на формирование поверхностных дефектов и ($H_{\text{св}}$) композиционного материала. Установлено, что лучшее качество при сварке взрывом трехслойных композитов на основе Сталь 20Х13+Сталь 65Х13+Сталь 20Х13 обеспечивает режим 2 ($H_{\text{св}} = 60$ мм). Обоснован выбор рациональных режимов сварки взрывом: тип взрывчатого вещества - игданит; $D_{\text{св}} = 2300,0$ м/с; $H_{\text{св}} = 60,0$ мм; $\rho_{\text{св}} = 0,75$ г/см³; величина зазора между слоями 2 мм.

Проведены исследования микроструктуры композиционных материалов после термообработки (закалки и отпуска), которые свидетельствуют о том, что основными компонентами структуры композиционных слоев являются мартенситные и карбидные зерна (Cr_{23}C_6), при этом объем карбидного компонента увеличивается от поверхности к центру для композиционных материалов исследуемого типа: Сталь 20Х13 (25-30%) - Сталь 65Х13 (55-60%) - Сталь 20Х13 (25-30%).

Исследования механических свойств, экспериментальных образцов композиционных металлических материалов установили, что в ходе сварки взрывом композиты получают значительный наклёп, приводящий к изменению их физико-механических свойств (упрочнению). Прочность КМ составляет 840,8 МПа, пластичность: удлинение 3,5 %, сужение 5,2 %.

Изучено влияние параметров последующего за сваркой взрывом отжига композитов на характер изменения их свойств. Установлено, что в результате отжига происходит снятие наклёпа, приводящее к снижению твердости (разупрочнению) композита и как следствие к улучшению его обрабатываемости. При этом прочность снижается (с 840 до 646 МПа), пластичность возрастает удлинение с 3,5 % до 25 %, сужение с 5,2 % до 46,2 %.

Исследования прочности экспериментальных образцов композиционных металлических материалов после термообработки выявили, что в результате увеличения температуры отпуска, наблюдается постепенное снижение прочности композиционных материалов (с 1350...1500 МПа до 1250...1300 МПа). В то же время повышение пластичности наблюдается только после среднего отпуска. При высоком отпуске наблюдается негативное явление, известное как отпускная хрупкость, при котором пластичность композита начинает снижаться.

Исследование микротвердости композитных слоев позволила установить, что композитный материал обладает максимальной твердостью слоев после закалки и низкого отпуска. Минимальные значения твердости

слоя наблюдаются в композиционном материале после закалки и среднего отпуска. После закалки и высокого отпуска твердость слоев композиционных материалов начинает увеличиваться. Это связано с тем, что карбидообразующие элементы (в данном материале хром) способствуют образованию мартенсита, устойчивого к распаду.

Таким образом, все поставленные задачи ВКР решены в полном объеме, цель ВКР достигнута.

Список использованных источников

1. **Особенность и сущность технологии сварки взрывом** [Текст]: сборник научн. тр. / под.ред. Дж. Пиатти.- М.: Металлургия, 1982. - 304 с.
2. **Сталь листовая горячекатаная двухслойная коррозионностойкая, изготовленная методом сварки взрывом** [Текст]: ТУ 27.32.09.010-2005. - Введ. 2006-04-05. - М.: ООО Институт биметаллических сплавов, 2005. - 13 с.: ил.
3. **Заготовки двухслойные сталь-титан, изготовленные методом сварки взрывом** [Текст]: ТУ 27.81.09.009-2005. - Введ. 2005-03-25. -М.: ООО Институт биметаллических сплавов, 2005. - 21 с.: ил.
4. **Сталь листовая горячекатаная двухслойная коррозионностойкая, изготовленная методом сварки взрывом** [Текст]: ТУ 27.32.09.010-2005. - Введ. 2006-04-05. - М.: ООО Институт биметаллических сплавов, 2005. - 13 с.: ил.
5. **Заготовки двухслойные сталь-титан, изготовленные методом сварки взрывом** [Текст]: ТУ 27.81.09.009-2005. - Введ. 2005-03-25. -М.: ООО Институт биметаллических сплавов, 2005. - 21 с.: ил.
6. **ООО «Битруб Интернэшнл»** [Электронный ресурс] / *Bitrube International*: [сайт]. URL: <http://www.bitrube.ru/> (дата обращения: 16.03.2021).
7. **Об институте** [Электронный ресурс] / Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»: [сайт]. URL: <http://www.crism-prometey.ru/index.aspx> (дата обращения: 16.03.2021).
8. **Об институте** [Электронный ресурс] / Федеральное государственное унитарное предприятие «РФЯЦ-ВНИИЭФ» [Электронный ресурс] [сайт]. URL: <https://www.atomic-energy.ru/VNIIEF>
9. **Продукция** [Электронный ресурс] / Общество с ограниченной ответственностью «Биметалл»: [сайт]. URL: <http://www.volgobimetall.ru/> (дата обращения: 17.01.2019).
10. **Способ получения изделий с внутренним полостями сваркой взрывом** [Текст]: пат. 2 522 505 Рос. Федерация: МПК В23К20/08, В23К 101/14 Трыков Ю. П. [и.др.]; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования

Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ). - № 2012118875/02 заявл. 2012.05.04; опубл. 2013.06.27

11. Способ плакирования трубных заготовок сваркой взрывом [Текст]: пат. 2 433 025 Рос. Федерация; МПК B23K 20/08 B21D 26/08 Ганин Д. Р. [и.др.]; заявитель и патентообладатель Ганин Дмитрий Рудольфович, Панычев Анатолий Алексеевич. №2010114064/02 заявл. 12.04.2010; опубл.10.11.2011 Бюл. № 31,

12. Способ получения антифрикционного сплава со сталь сваркой взрывом [Текст]: пат. 2 692 009 Рос. Федерация: МПК B23K 20/08 F16C 33/04 Михайлов А.Л. [и.др.]; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» (ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»). №2018123840 заявл. 12.07.2017 опубл. 19.06.2019 Бюл. № 17

13. Способ получения крупногабаритных листов композиционного материала сваркой взрывом [Текст]: пат. 2 453 409 Рос. Федерация: МПК B23K 20/08 B32B 7/04 Авенян В. А. [и.др.]; заявитель и патентообладатель открытое Акционерное Общество «Государственный научно-исследовательский институт машиностроения им. В.В. Бахирева». №: 2010134455/02 заявл. 17.08.2010 опубл. 20.06.2012 Бюл. № 17-6

14. Способ изготовления биметаллических труб сваркой взрывом. [Текст]: пат. 2 537 671 Рос. Федерация: МПК B23K 20/08 B23K 101/06 Дреннов О. Б. [и.др.]; Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский Федеральный ядерный центр-Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики»-ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» №2013139761/02, заявл. 27.08.2013 опубл. 10.01.2015 Бюл. № 1

15. Легированные нержавеющие стали и сплавы коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки [Текст]: ГОСТ 5632-2014. - Введ. 2015-01-01. - М.: Стандартинформ, 2015. 48 с.: ил.

16. Банников, Е.А. Сварка [Текст]: справочник. - М.:

Издательство «АСТ», 2014. – 256 с.

17. **Сварка взрывом** [Текст]: монография / Ю.А. Конон, Л.Б. Первухин, А.Д. Чудновский; под ред. В.М. Кудинова. - М.: Машиностроение, 1987. – 216 с.

18. **Лысак, В.И. Сварка взрывом** [Текст] / В.И. Лысак, С.В. Кузьмин. – М.: Машиностроение, 2005. - 544 с.

19. **Процессы обработки материалов взрывом** [Текст]: учеб. пособие для вузов / Крупин А.В. [и др.]. - М.: Металлургия, 1996. - 336 с.

20. **Контроль неразрушающий. Визуальный контроль соединений, выполненных сваркой плавлением** [Текст]: ГОСТ Р ИСО 17637-2014. - Введ. 2016-01-01. - М.: Стандартинформ, 2015. - 15 с.: ил. 1.

21. **Свидетельство об утверждении типа средств измерений** [Электронный ресурс] / Свидетельство об утверждении типа средств измерений: [сайт]. URL: <http://nd-gsi.ru/grsi/230xx/23225-02.pdf> (дата обращения: 16.03.2021).

22. **Альтами** [Электронный ресурс] / Металлографический микроскоп АЛЬТАМИМЕТ 6С: [сайт]. URL: http://altami.ru/microscopes/metallurgical/digi/altami_met6s/ (дата обращения: 16.03.2021).

23. **Соединения сварные. Методы определения механических свойств, макроструктуры и микроструктуры** [Текст]: ГОСТ Р 57180-2016. - Введ. 2017-06-01. - М.: Стандартинформ, 2016. - 19 с.: ил.

24. **Металлы. Методы испытаний на растяжение** [Текст]: ГОСТ 1497-84. - Введ. 1986-01-01. - М.: Стандартинформ, 1984. - 22 с.: ил.

25. **Завод испытательных приборов** [Электронный ресурс] / ИП 5145-500 Разрывная машина на 500кН: [сайт]. URL: <http://www.ziptest.ru/product/razryvnye-mashiny-i-prinadlezhnosti-k-nim/ir-5145-500-razryvnaya-mashina-na-500kn/> (дата обращения: 16.03.2021).

Приложение А



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФГБОУ ВО ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
Кафедра «Сварочное, литейное производство и материаловедение»

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

«ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
МНОГОСЛОЙНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СТАЛИ
20Х13 И 65Х13, ПОЛУЧЕННЫХ СВАРКОЙ ВЗРЫВОМ»

Выполнил: ст. гр. 17МТ1 Сайфиддинзода С.М.

Руководитель: к.т.н., доцент Кривенков А.О.

Пенза, 2021 г.

Цель: исследование структуры и механических свойств композиционного материала сталь 20Х13 + сталь 65Х13 + сталь 20Х13, полученного сваркой взрывом.

Задачи:

- провести анализ способа получения композиционных материалов, обосновать выбор метода получения;
- изучить технологические основы ударно-волнового нагружения;
- обосновать выбор материала для дальнейших исследований;
- изучить методики исследования микроструктуры и механических свойств композиционных материалов;
- исследовать влияние параметров термической обработки на микроструктуру и механические свойства разработанных материалов.

Объектом исследования является композиционный материал: 20Х13+65Х13+20Х13, полученный методом ударно-волнового нагружения с последующей термической обработкой.

Актуальность: Исследования проводились в рамках НИОКР по программе СТАРТ Фонда содействию малых форм предприятий «Композитный режущий инструмент»

ХАРАКТЕРИСТИКА И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ СВАРКОЙ ВЗРЫВОМ 3

Параметр	Значение
Сортамент	Лист, труба
Толщина основного слоя, мм	от 1 до 500
Толщина плакирующего слоя, мм	от 1 до 30
Марка материала для получения КМ	09Г2С, 20Х13, 09Х18Н10Т, Ст.3; АМг5, 08Х13, ВТ1-0, медные сплавы и др.
Применение	Судостроение, атомная, тепловая и гидроэнергетика, газодобывающая и нефтеперерабатывающая промышленность, военная техника, химическое и энергетическое машиностроения, металлургия.
Фирмы	ООО «Битруб Интернэшнл», «Прометей», ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ"

МАТЕРИАЛ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ

4

Экспериментальные образцы многослойных композитов (3 слоя): сталь 20X13-65X13-20X13.

Химический состав: сталь 20X13 и сталь 65X13 в % (ГОСТ 5632- 2014)

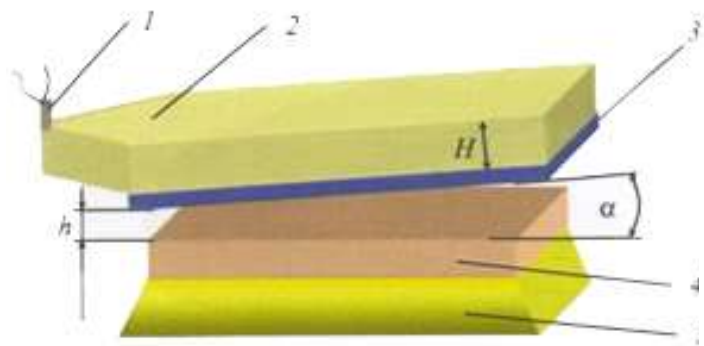
Марки стали	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr
Сталь 20X13	0.16 - 0.25	до 0.6	до 0.6	до 0.6	до 0.025	до 0.03	12 - 14
Сталь 65X13	0.6 - 0.7	0.2 - 0.5	0.25 - 0.8	до 0,5	до 0.025	до 0.03	12 - 14

Механические свойства: сталь 20X13 и сталь 65X13 (ГОСТ 5632- 2014)

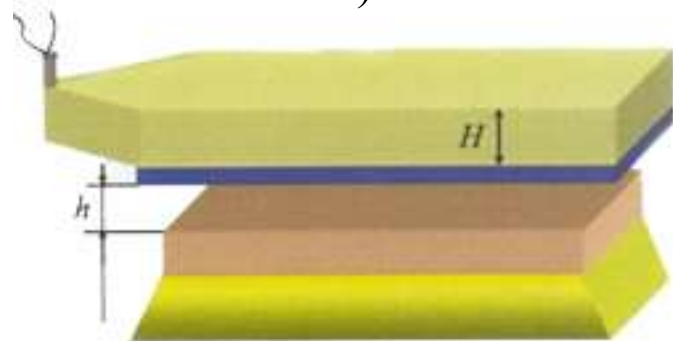
Марки стали	Твердость (закалка + низкий отпуск) HRC	Прочность σ_B , МПа	Предел текучести $\sigma_{0.2}$, МПа	Относительное удлинение, %
Сталь 20X13 (лист)	44...46	650...830	440...635	10...16
Сталь 65X13 (лист)	58...60	1150...1430	870...1150	4...6

Технологические свойства стали 20X13 и 65X13 (ГОСТ 5632- 2014): ограниченно свариваемые.

Склонность к отпускной хрупкости: склонны.

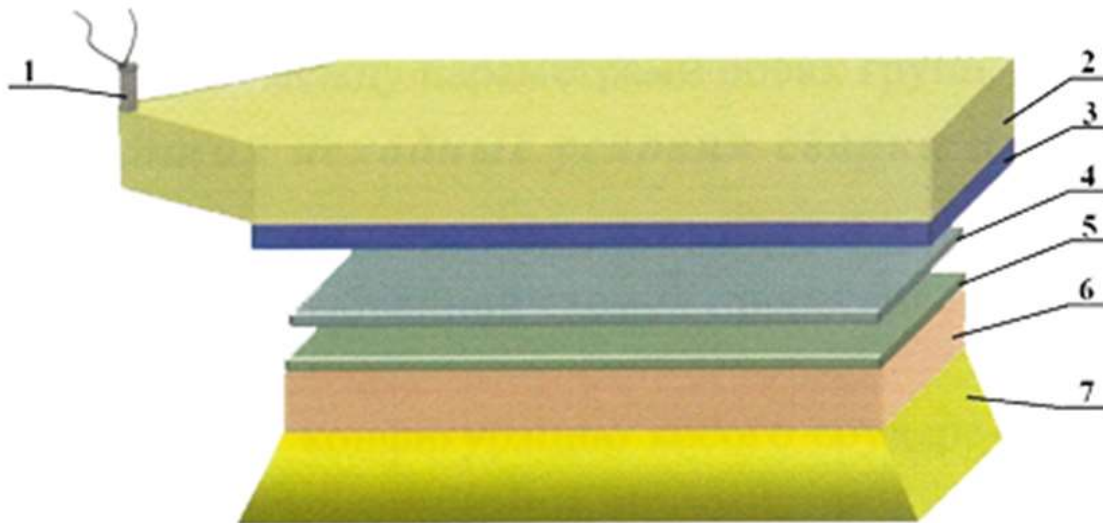


а)



б)

Схема сварки взрывом, состоящая из трех и более слоев



в)

Схемы сварки взрывом плоских заготовок:

а) – угловая; б, в) – параллельная)

1 – электродетонатор, 2 – контейнер с зарядом ВВ, 3 и 4 – метаемая и неподвижная пластины соответственно, 5 – основание схемы (грунт, песок, металлическая плита и т.п.)

1 – электродетонатор, 2 – контейнер с зарядом ВВ, 3 и 4 – метаемая и неподвижная пластины соответственно, 5 – основание схемы (грунт, песок, металлическая плита и т.п.)

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ СВАРКИ ВЗРЫВОМ ОБРАЗЦОВ ИССЛЕДУЕМОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

Режим сварки	Тип взрывчатого вещества	Исходные параметры сварки				Результаты расчета		
		Характеристики взрывчатого вещества			Величина зазора между слоями, мм	V_k , м/с	V_c между слоями, м/с	
		$D_{\text{ВВ}}$, м/с	$H_{\text{ВВ}}$, мм	$\rho_{\text{ВВ}}$, г/см ³			1-2	2-3
1	Игданит	2500,0	70,0	0,75	2	2500,0	540,9	508,8
2	Игданит	2300,0	60,0	0,75	2	2300,0	484,8	449,4
3	Игданит	2100,0	50,0	0,75	2	2100,0	428,6	388,7

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ КОМПОЗИТА

7

Муфельная печь применяется при обработке материалов в воздушной среде до температуры 1250 °С



Общий вид муфельной печи



Терморегулятор ПТ200

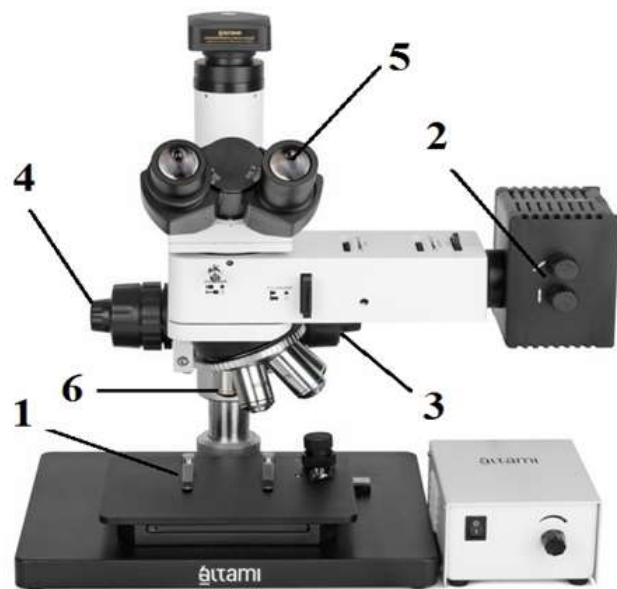


Процесс ТО (нагрев под закалку)
образцов в муфельной печи



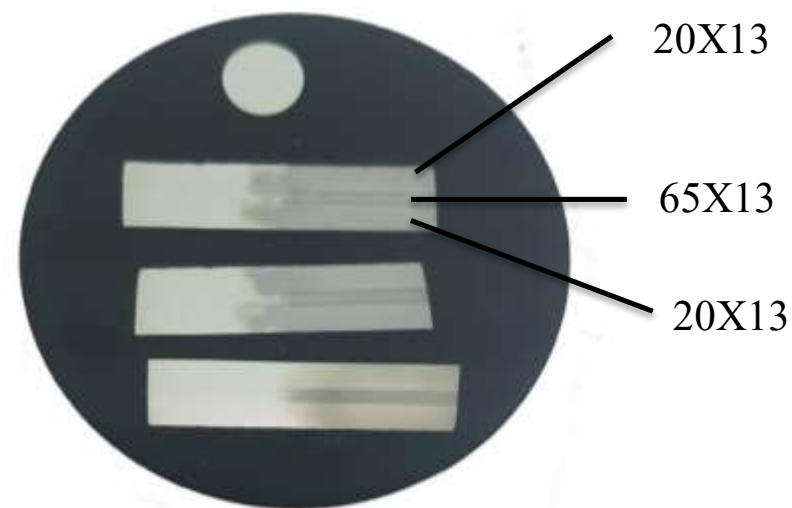
Укладка образцов в муфельной печи

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ КМ НА ОСНОВЕ СТАЛИ



Металлографический микроскоп
АЛЬТАМИ МЕТ 6С

1 – предметный столик; 2 – винты для перемещения предметного столика;
3 – макровинт; 4 – микровинт;
5 – окуляр; 6 – объектив



Микрошлифы образцов трехслойных
композиционных металлических материалов

Исследование микроструктуры проводили на специально подготовленных образцах-микрофотографиях, подготовленных по ГОСТ Р 57180-2016

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОДНООСНОЕ РАСТЯЖЕНИЕ



Разрывная машина
ИР 5145-500



Испытания на одноосное
растяжение
экспериментальных
образцов КМ
(ГОСТ 1497-84)



Экспериментальные образцы
композиционных металлических
материалов

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МИКРОТВЕРДОСТИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ



Твердомер ПМТ-3



Микрошлифы образцов композиционных
металлических материалов 20X13-65X13-20X13

Измерение микротвердости КМ выполнялось по ГОСТ 9450-76

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ КОМПОЗИЦИОННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ СВАРКОЙ ВЗРЫВОМ

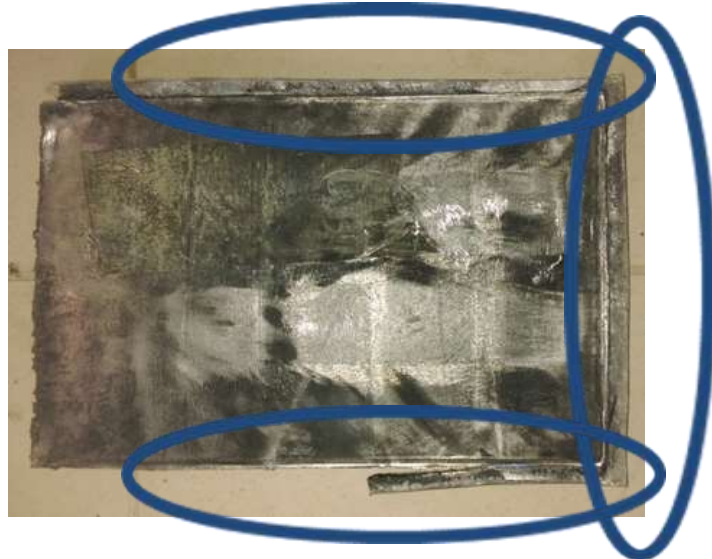
11



Режим 1 (BV = 70 мм);
дефекты (деформация, оплавление)

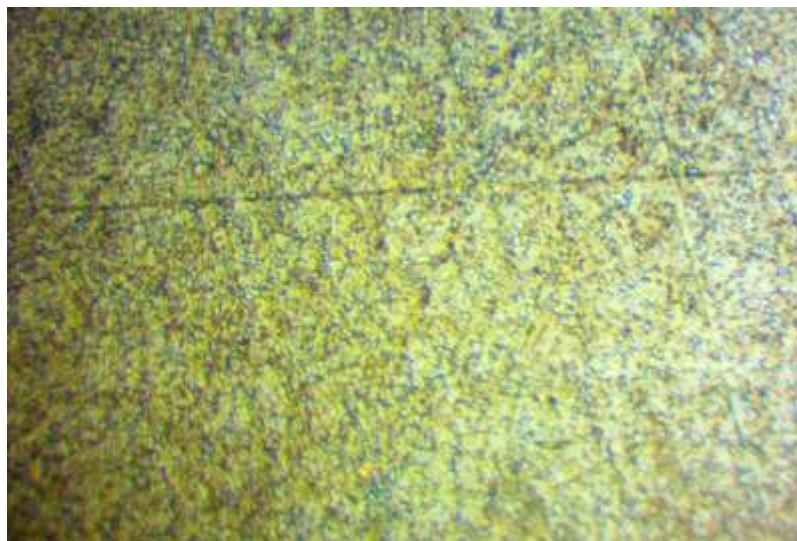


Режим 2 (BV = 60 мм);
без дефектов



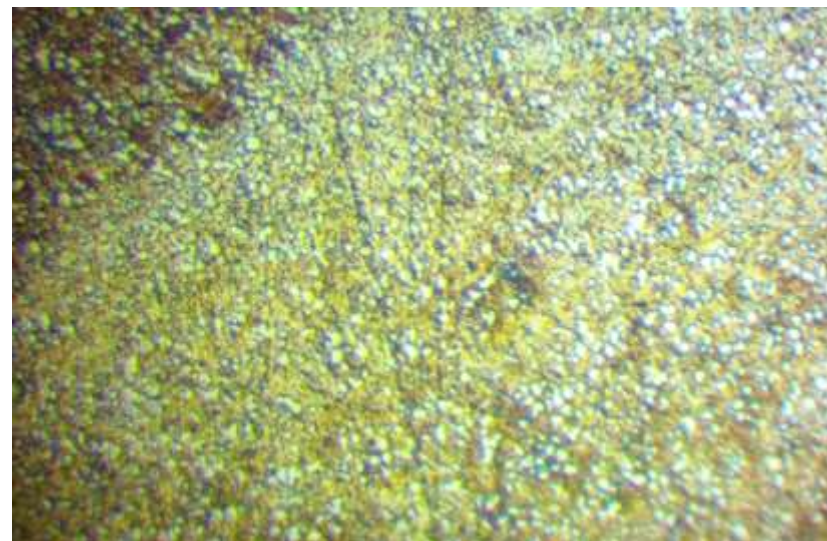
Режим 3 (BV = 50 мм);
дефекты (неполная обрубка, краевые непровары)

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ КОМПОЗИЦИОННОГО МЕТАЛЛИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА



х 20

Микроструктура стали 20X13
после закалки и отпуска

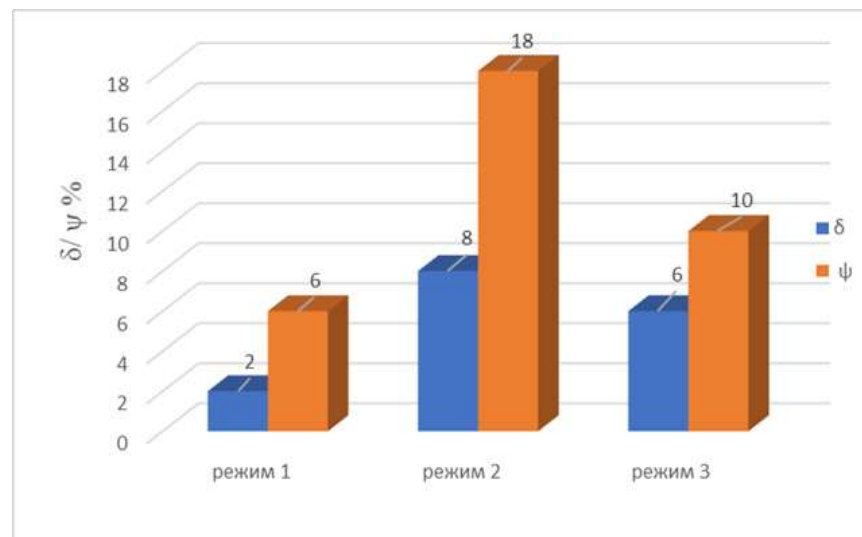
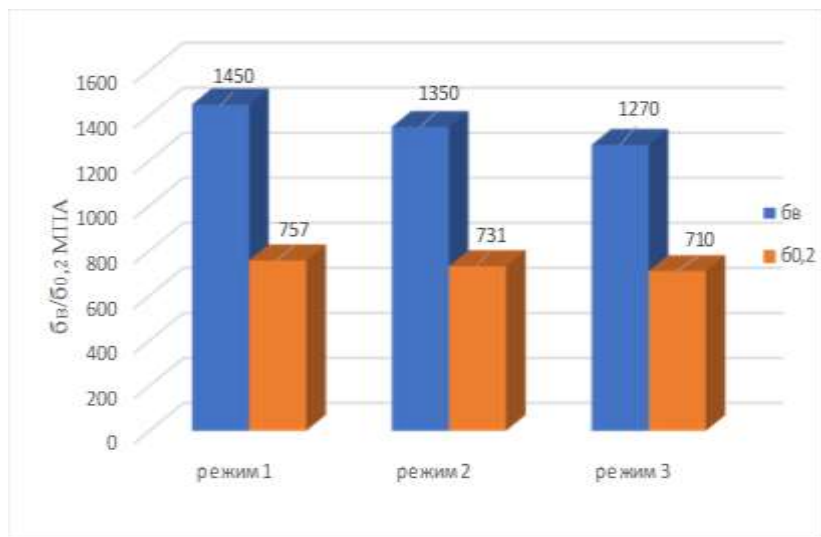


х 20

Микроструктура стали 65X13
после закалки и отпуска

Карбидная составляющая в стали 65X13 занимает около 55-60% от общего объема, в стали 20X13 - около 25-30 %.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ И ПЛАСТИЧНОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ КМ ПОСЛЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ



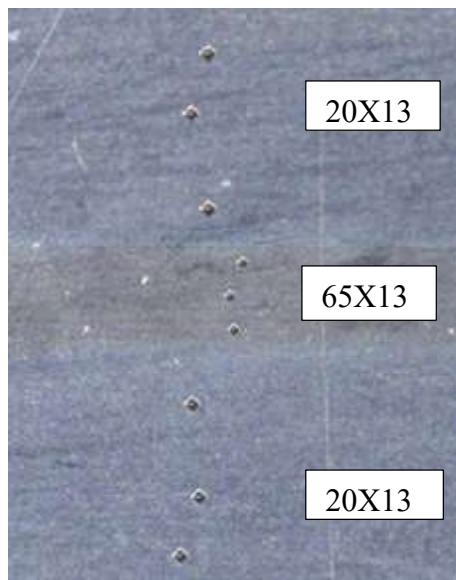
режим 1 – 3+НО; режим 2 – 3+СО; режим 3 – 3+ВО

Прочность образцов композиционных
материалов после термической обработки

Пластичность образцов композиционных
материалов после термической обработки

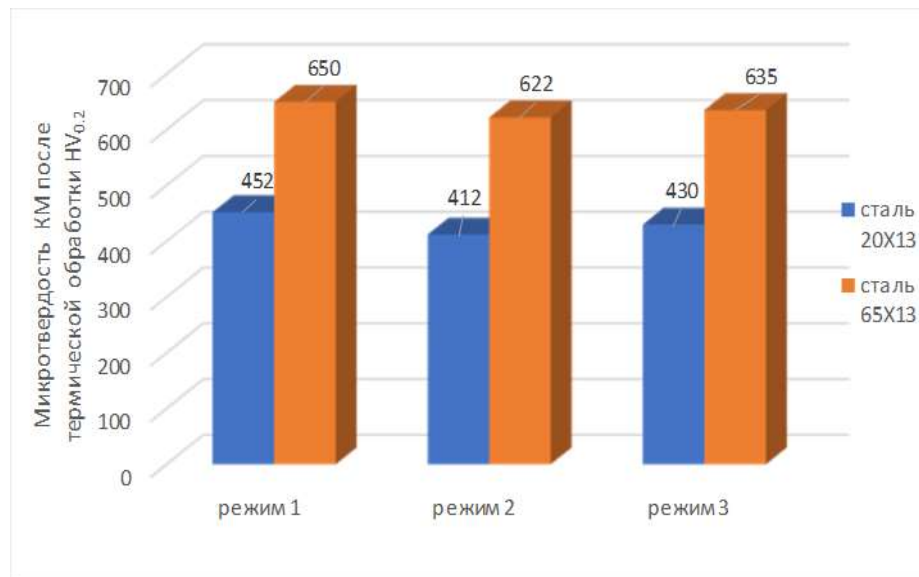
Испытания проводились в соответствии с ГОСТ 1497-84
(ИСО 6892-84, СТ СЭВ 471-88)

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОТВЕРДОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ КМ ПОСЛЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ



х 20

Схема измерений микротвердости
композиционного материала



режим 1 – 3+НО; режим 2 – 3+СО;
режим 3 – 3+ВО

Микротвердость композиционных материалов
после термической обработки

Испытания проводились в соответствии с ГОСТ 9450-76 (СТ СЭВ 1195-78)

В результате выполнения ВКР изучен способ получения композиционных материалов; выполнен литературно-патентный обзор в области сварки взрывом; изучены методики исследований КМ, полученных сваркой взрывом.

Проведены исследования влияния параметров ТО на микроструктуру и механические свойства (прочность, пластичность и микротвердость) разработанных материалов.

Установлено, что в результате увеличения температуры отпуска, наблюдается снижение прочности КМ с 1350...1500 МПа до 1250...1300 МПа, а после высокого отпуска - снижение пластичности в результате отпускной хрупкости.

Исследования микротвердости установили, что максимальная микротвердость ($HV_{0,2}$ 650...670 - 65X13 и $HV_{0,2}$ 450...480 - 20X13) наблюдается у КМ после закалки и низкого отпуска.

Таким образом, **цель ВКР достигнута, все поставленные задачи выполнены в полном объеме.**

Спасибо за внимание