

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

Факультет
промышленных технологий,
электроэнергетики и транспорта
(наименование)

Кафедра
Сварочное, литейное производство
и материаловедение
(наименование)

Направление подготовки

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

Профиль

«Материаловедение и технологии новых
материалов»
(наименование)

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

на тему

«Разработка и исследование свойств

металлического композиционного материала 12X18H10T+M1+12X18H10T»

Студент

Захарова, 10.06.2022
(подпись, дата)

Захарова Полина Ильинична
(фамилия полностью)

Научный руководитель
к.т.н., доцент

Логинов, 20.06.22
(подпись, дата)

Логинов О.Н.
(фамилия, инициалы)

Нормоконтролёр
к.т.н., доцент

Хорин, 20.06.22
(подпись, дата)

Хорин А.В.
(фамилия, инициалы)

Работа допущена к защите (протокол заседания кафедры от 09.06.2022 № 11)

Заведующий кафедрой

Розен, 21.06.22
(подпись, дата)

Розен А.Е.
(фамилия, инициалы)

Работа защищена с отметкой отлично (протокол заседания ГЭК от 21.06.2022 № 2)

Секретарь ГЭК
к.т.н., доцент

Гуськов, 21.06.2022
(подпись, дата)

Гуськов М.С.
(фамилия, инициалы)

Пенза 2022

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

«Утверждено»

Заведующий кафедрой С.П.М.
д.т.н., профессор _____ А.Е. Рубен

« 2 » _____ 2021 г.

ЗАДАНИЕ

на выпускную квалификационную работу

Студенту гр. 18МП1 Факультета промышленных технологий, электроэнергетики и транспорта Политехнического института ЛГУ, очной формы обучения по направлению подготовки 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов»

Заведующий Полине Ильиничне

Научный руководитель работы: к.т.н., доцент Ласинин О.Н.

Время выполнения ВКР: с 07.02.2022 г. по 06.07.2022 г.

Место преддипломной практики: кафедра «Контроль и испытание материалов» ЛГУ.

Тема работы: Разработка и исследование свойств металлического композиционного материала 12X18H9T-M1-12X18H9T.

Тема утверждена приказом ректора ЛГУ № 961а/О от 07.12.2021.

Техническое задание на работу (назначение устройств, условия применения, внешние воздействия, специальные требования и т.п.): выполнить литературное и патентное исследование способов повышения коррозионной стойкости металлических композиционных материалов, провести исследования структуры и механических свойств металлического композиционного материала, полученного сваркой вранжик.

Объём и содержание основной части работы

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

- введение с обоснованием актуальности темы исследования, установлением объекта и предмета, постановкой цели и задач исследования;
- литературно-патентный обзор с выделением патентной и научно-технической информации, исследованием технического уровня и тенденций развития в повышении коррозионной стойкости металлических композиционных материалов;
- рассмотрение основных методов получения металлических композиционных материалов;
- характеристика материалов, используемых для получения металлического композиционного коррозионно-стойкого материала;

- выбор метода получения композиционного материала, расчет его основных параметров;
- определение методов исследования;
- подготовка образцов и определение оборудования для исследования, проведение исследования;
- заключение – выводы и обоснования по теме работы и полученным результатам.

Презентация бакалаврской работы (перечень и содержание плакатов)

- | | |
|--|---------|
| - тема ВКР | 1 л А4; |
| - цели и задачи выпускной работы | 1 л А4; |
| - коррозия | 1 л А4; |
| - коррозионно-стойкий композиционный материал | 1 л А4; |
| - коррозионно-стойкая сталь 12Х18Н10Т (ГОСТ 5632-2014) | 1 л А4; |
| - медный сплав М1 (ГОСТ 859-2001) | 1 л А4; |
| - патентный поиск | 1 л А4; |
| - получение металлического композиционного материала | 1 л А4; |
| - сварка взрывом | 1 л А4; |
| - параметры сварки взрывом | 1 л А4; |
| - исследование структуры | 1 л А4; |
| - испытание на одноосное растяжение | 1 л А4; |
| - механические свойства | 1 л А4; |
| - сравнительная характеристика прочности | 1 л А4; |
| - испытание на статический изгиб | 1 л А4; |
| - результаты испытания на статический изгиб | 1 л А4; |
| - популяризация работы | 1 л А4; |
| - заключение | 1 л А4. |

Рекомендуемая литература:

1. Лысак, В.И. Сварка взрывом [Текст]: монография / В.И. Лысак, С.В. Кузьмин. — М.: Машиностроение, 2005. — 543 с.

2. Конон, Ю.А. Сварка взрывом [Текст]: учеб. для вузов / Ю.А. Конон, Л.Б. Первухин, А.Д. Чудновский — М.: Машиностроение, 1987. — 216 с.

3. Кудинов, В.М. Сварка взрывом [Текст]: учебник / В.М. Кудинов [и др.]. — М.: Металлургия, 1987. — 216 с.

Дата выдачи задания: 07.02.2022 г.

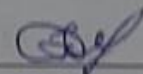
Руководитель ВКР:

к.т.н, доцент

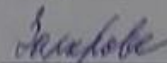
Задание к исполнению принял студент

гр. 18МТ1

07 февраля 2022 г.



О.Н. Логинов



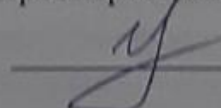
П.И. Захарова

ОПОП освоена в полном объеме.
К государственной итоговой
аттестации допустить

Выпускную квалификационную работу к защите допустить

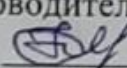
Декан факультета промышленных технологий, электроэнергетики и транспорта

ПИ ПГУ



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  Логинов О.Н.
 подпись
 « 7 » декабря 2021 г.

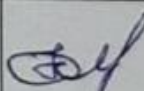
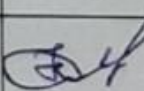
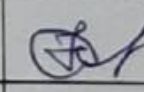
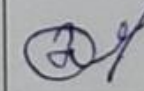
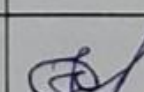
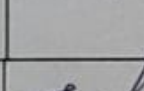
КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

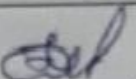
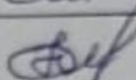
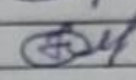
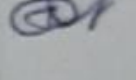
на выпускную квалификационную работу

Студентке гр. 18MT1 Факультета промышленных технологий, электроэнергетики и транспорта Политехнического института ПГУ, очной формы обучения по направлению подготовки 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов»

Захаровой Полине Ильиничне.

Тема работы: Разработка и исследование свойств металлического композиционного материала 12X18H10T-M1-12X18H10T

Наименование этапа работы	Срок исполнения		Отметка о выполнении
	начало	окончание	
1. Получение задания, его уяснение, беседа с руководителем. Подготовка к выполнению ВКР.	07.02.22	13.02.22	
2. Подбор и изучение рекомендованной литературы.	14.02.22	29.02.22	
3. Изучение объекта исследования, постановка цели и задачи работы. Написание введения.	01.03.22	05.03.22	
4. Проведение литературно-патентного обзора. Выбор основных нормативно-технических документов.	06.03.22	15.03.22	
5. Выбор метода получения материала. Расчет его основных параметров. Оформление соответствующего раздела.	16.03.22	31.03.22	
6 Экспериментальный раздел – описание результатов исследования. Написание четвертого раздела.	01.04.22	21.04.22	
7. Завершение оформления пояснительной записки, схем и рисунков.	22.04.22	26.05.22	

8. Представление завершённой ВКР нормоконтролеру.	27.05.22	04.06.22	
9. Представление ВКР руководителю на просмотр и проверку на плагиат.	04.06.22	14.06.22	
10. Предварительная защита ВКР	08.06.22	08.06.22	
11. Полное завершение всех работ и представление зав. кафедрой на подпись пояснительной записки (совместно с графической частью, протоколом проверки на плагиат и отзывом руководителя)	15.06.22	20.06.22	
12. Защита выпускной квалификационной работы	21.06.22	06.07.22	

Прохождение каждого этапа подготовки ВКР подтверждается подписью руководителя.

Студентка учебной группы 18MT1 Захарова Захарова П.И.
 "07" февраля 2022 г.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
ФГБОУ ВО «ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
Кафедра «Сварочное, литейное производство и материаловедение»

ОТЗЫВ

**РУКОВОДИТЕЛЯ О ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
БАКАЛАВРА**

удент: Захарова Полина Ильинична,

ма: Разработка и исследование свойств металлического композиционного
материала 12X18H10T-M1-12X18H10T,

правление подготовки – 22.03.01 «Материаловедение и технологии
материалов», группа 18MT1.

юфиль подготовки – «Материаловедение и технологии новых материалов».

Выпускная квалификационная работа содержит 62 с., 32 рис., 22 табл.,
использованный источник. Приложение состоит из 19 листов.

Предметом работы является: режимы сварки взрывом, структура материала
после сварки взрывом и его механические свойства.

К задачам выпускной квалификационной работы относятся:

- провести литературно-патентный обзор повышения коррозионной
стойкости многослойных металлических композиционных материалов;
- выбрать метод получения композиционного материала;
- проанализировать исходные материалы, используемые для получения
композита;
- выбрать методы исследования свойств металлического
коррозионно-стойкого композиционного материала;
- провести исследование свойств и структуры полученного материала.

В выпускной квалификационной работе проведен расчет параметров
сварки взрывом, получен образец металлического композиционного материала
системы 12X18H10T-M1, исследованы его структура и механические свойства.

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы были решены задачи по выбору способа получения металлического композиционного материала, расчету параметров сварки взрывом, исследованию микроструктуры и механических свойств полученного образца.

Выбранный метод получения металлического композиционного коррозионно-стойкого материала позволяет получить качественные сварные соединения.

Захарова П.И. относится к числу дисциплинированных студентов, умеющих планировать время выполнения работы и способных самостоятельно принимать рациональные инженерные решения.

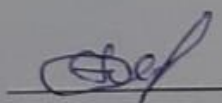
За время выполнения выпускной квалификационной работы Захарова П.И. показал себя технически грамотным студентом, обладающим современными методами решения профессиональных задач.

Выполненная работа соответствует требованиям, предъявляемым к выпускным квалификационным работам.

Считаю, что выпускная квалификационная работа может быть допущена к защите в ГЭК, а ее автор Захарова П.И. заслуживает присвоение квалификации бакалавра по направлению подготовки 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов» и профилю подготовки «Материаловедение и технологии новых материалов».

Отзыв составил

к.т.н., доцент



Логинов О.Н.

Ректору Пензенского государственного
университета

А. Д. Гулякову

от студентки 4 курса ФПТЭТ очной
формы обучения

Захарова Полина Ильинична

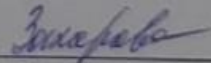
(фамилия, имя, отчество)

ЗАЯВЛЕНИЕ

Я, Захарова Полина Ильинична, студентка 4 курса очной формы обучения направления подготовки 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов», бакалаврская программа «Материаловедение и технологии новых материалов», прошу провести проверку с использованием системы «Антиплагиат» выпускной квалификационной работы на тему: «Разработка и исследование свойств металлического композиционного материала 12X18H10T-M1-12X18H10T», 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 ознакомлена 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.



(подпись студента)

16.06.2022

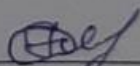
(дата)

ВКР представлена на проверку

16.06.2022

(дата)

Руководитель ВКР



Подпись

И. О. Фамилия

И.О.Фамилия

Протокол

проверки на оригинальность в системе «Антиплагиат.ВУЗ» выпускной квалификационной работы на тему «Разработка и исследование свойств металлического композиционного материала 12X18H10T-M1-12X18H10T».

студентки 4 курса Захаровой Полины Ильиничны

010 Square feet

направления подготовки 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов», профиль «Материаловедение и технологии новых материалов».

Руководитель ВКР Логинов Олег Николаевич к.т.н., доцент каф. «Сварочное, литейное производство и материаловедение»

Результат проверки на плагиат бакалаврской работы Захаровой Полины Ильиничны составляет 56,9 % оригинальности, что соответствует существующим требованиям стандарта СТО ПГУ 3.12-2018. Выпускная квалификационная работа может быть рекомендована к защите.

СКРИНШОТ

отчета о проверке

16.06.2022

(1957)

О.Н. Логинов
(И.О. Фамилия руководителя ИСР)

Аннотация

Выпускная квалификационная работа содержит 62 с., 32 рис., 22 табл., 21 использованный источник.

КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ, СВАРКА ВЗРЫВОМ, СТРУКТУРА, СВОЙСТВА

Объектом исследования является металлический коррозионно-стойкий композиционный материал системы 12X18H10T-M1, полученный методом ударно-волнового нагружения.

Предметом исследования являются режимы сварки взрывом, структура материала после сварки взрывом и его механические свойства.

Целью данной работы является исследование структуры и механических свойств многослойного коррозионно-стойкого материала системы 12X18H10T-M1, полученного сваркой взрывом.

Вклад в работу – проведен микроструктурный анализ, испытания на одноосное растяжение и статический изгиб.

Методы исследования – микроструктурный анализ, испытания на одноосное растяжение (прочность на растяжение) и на статический изгиб.

Область применения – атомная, химическая и нефтегазовая промышленность.

Задачи:

- провести литературно-патентный обзор методов повышения коррозионной стойкости многослойных металлических композиционных материалов;
- выбрать метод получения композиционного материала;
- проанализировать исходные материалы, используемые для получения композита;
- выбрать методы исследования свойств металлического коррозионно-стойкого композиционного материала;
- провести исследование свойств и структуры полученного материала.

Содержание

Введение.....	5
1 Анализ состояния предметной области	6
1.1 Постановка цели и задачи	6
1.2 Методы получения композиционных материалов	7
1.2.1 Твердофазные методы	8
1.2.2 Жидкофазные методы	13
1.2.3 Газофазные методы.....	15
1.3 Патентное исследование	16
2 Характеристика используемых материалов	21
2.1 Сталь 12Х18Н10Т.....	21
2.2 Медный сплав М1	25
2.3 Взаимодействие исходных компонентов	27
2.3.1 Взаимодействие железа и меди	28
2.3.2 Взаимодействие меди и никеля	29
2.3.3 Взаимодействие хрома и меди.....	31
2.3.4 Взаимодействие меди и титана	33
3 Сварка взрывом	36
3.1 Технологические особенности получения листовых полуфабрикатов сваркой взрывом.....	36
3.2 Основные параметры процесса сварки взрывом	38
3.3 Результаты расчета параметров сварки взрывом.....	40
4 Исследование влияния ударно-волнового нагружения на композиционный материала 12Х18Н10Т-М1	44
4.1 Исследование влияния ударно - волнового нагружения на структуру композиционного материала 12Х18Н10Т-М1, полученного сваркой взрывом	44
4.2 Исследование влияния ударно-волнового нагружения на механические свойства композиционного материала системы 12Х18Н10Т-М1, полученного сваркой взрывом.....	47

4.3 Исследование влияния ударно-волнового нагружения на технологические свойства (статический изгиб) композиционного материала 12Х18Н10Т-М1, полученного сваркой взрывом.....	54
Заключение	59
Список использованных источников	60
Приложение	63

Введение

Разработка новой техники, конструкций и усовершенствование уже имеющихся на данный момент разработок требует создания принципиально новых материалов, обладающих необходимым набором свойств. К данному виду относятся материалы, сочетающие в себе тот спектр свойств, который невозможно получить в традиционных материалах [1].

Композиционный материал (КМ) представляет собой неоднородный сплошной материал, состоящий из двух компонентов: армирующих элементов, обеспечивающих необходимые механические характеристики материала, и матрицы (связующего), обеспечивающую совместную работу армирующих элементов [2].

Одной из важнейших проблем, которая затрагивает практически все отрасли промышленности и напрямую влияет на темп их развития в современном мире, является коррозия.

Ежегодное коррозионное воздействие приводит к миллиардным убыткам. Основная часть ущерба заключается не столько в потере металла (20 % металла в год уходит в коррозионные отходы), сколько в доведении дорогостоящих конструкций до неработоспособного состояния (разрушения) [3].

Наиболее опасным видом коррозии является питтинговая. Ей подвержены многие стали и сплавы. Она характерна для пассивирующихся материалов, к которым относятся нержавеющие стали, сплавы титана, алюминия.

Одним из видов ущерба от коррозии являются косвенные потери, включающие в себя простой оборудования во время ремонтных работ, ликвидацию последствий после чрезвычайных ситуаций, нарушение технологических процессов промышленного предприятия.

Одним из способов борьбы с коррозией является разработка новых композиционных материалов, способных оказывать сопротивление воздействию в различных средах [4].

1 Анализ состояния предметной области

1.1 Постановка цели и задачи

В современном мире разрушение металлов вследствие коррозионного воздействия и их защита от коррозии является одной из важнейших экономических и научно-технических проблем.

По оценкам специалистов промышленно развитых стран ущерб от коррозии и затраты на борьбу с ней в Российской Федерации составили около 5 % валового внутреннего продукта, что соответствует 5 трл. руб. в год.

Предлагаемым решением коррозионной проблемы является разработка нового металлического композиционного материала системы 12X18H10T-M1, представляющего собой лист, состоящий из 3 основных слоев, где первый и третий слой – нержавеющая сталь аустенитного класса, второй слой – медный сплав. Схематическое изображение металлического композиционного материала представлено на рисунке 1.

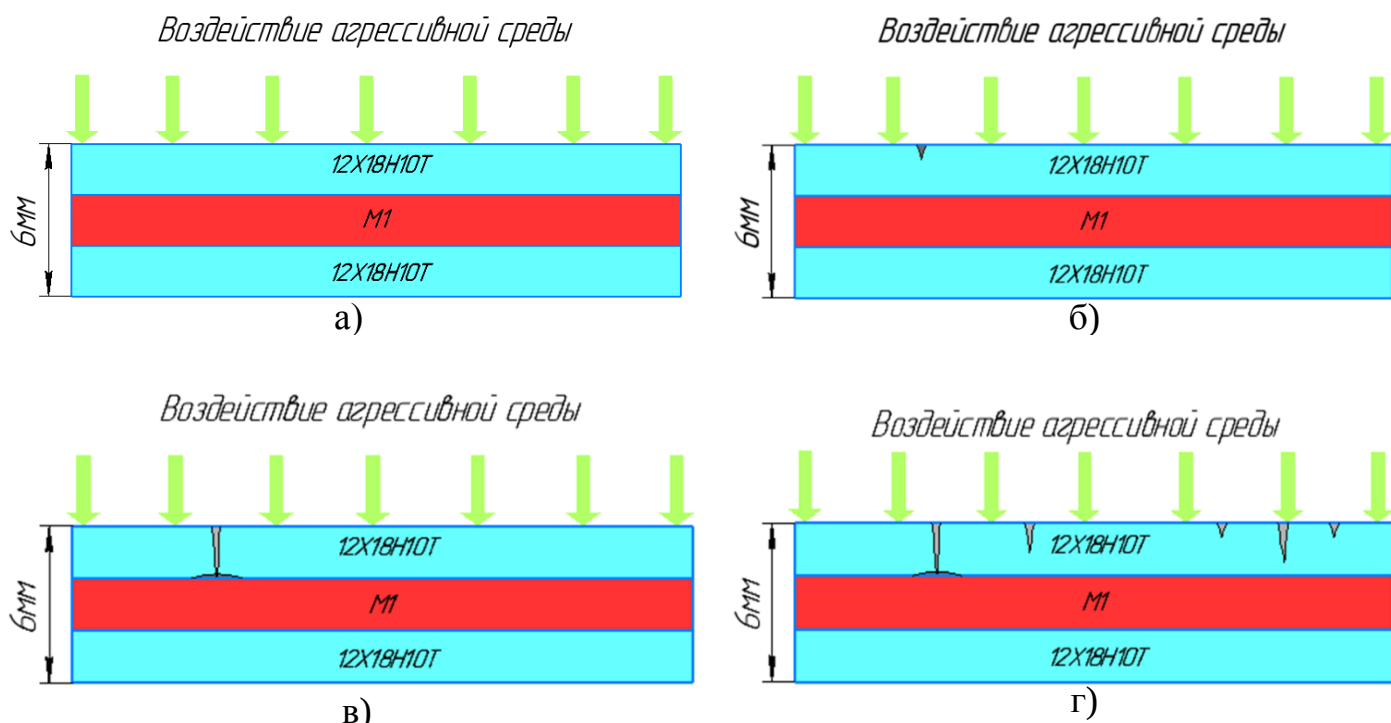


Рисунок 1 – Схема металлического композиционного материала 12X18H10T-M:

а) – исходное состояние; б) – образование питтинга; в) – процесс пассивации питтинга; г) – образование новых питтингов

Механизм защиты от коррозионного воздействия в данном материале основан на полной пассивации процесса питтинговой коррозии (в настоящее время находится на уровне гипотезы).

Целью данной работы является получение трехслойного листового композиционного материала системы 12X18H10T-M1, оценка его структуры и механических и технологических свойств.

Достижение указанной цели осуществлялось путем решения следующих основных задач:

- провести литературно-патентный обзор методов повышения коррозионной стойкости многослойных металлических композиционных материалов;
- выбрать метод получения композиционного материала;
- проанализировать исходные материалы, используемые для получения композита;
- выбрать методы исследования свойств металлического коррозионно-стойкого композиционного материала;
- провести исследование свойств и структуры полученного материала.

1.2 Методы получения композиционных материалов

В настоящее время существует множество способов получения металлических композиционных материалов. Целесообразность применения того или иного способа обуславливается свойствами исходных материалов, формой изготавливаемой металлопродукции, условиями ее эксплуатации и методами обработки изделия.

Методы получения композитов делят следующие виды:

- газофазные;
- жидкофазные;
- твердофазные;
- комбинированные.

Перечисленные методы получения представлены на рисунке 2 [5].



Рисунок 2 – Общая классификация процессов получения и обработки композитов с металлической матрицей

1.2.1 Твердофазные методы

Твердофазные методы предполагают предварительное совмещение (объединение) армированных элементов и матрицы и их последующего компактирования в изделие с помощью таких методов, как горячее прессование, ковка, прокатка, диффузионная сварка, экструзия и других.

Для того, чтобы получить многослойные КМ, которые армированы высокопрочными частицами, непрерывными и фрагментированными волокнами, используют твердофазные способы порошковой металлургии. Методы данной группы способствуют получению композитов с необходимой пористостью.

Основным недостатком данных методов является:

- трудность равномерного распределения армируемой фазы в объеме матрицы на этапе подготовки шихты;

- возможность повреждения волокон при компактировании.

Наиболее производительным и удобным методом твердофазного совмещения является технология непрерывного формования с использованием прокатки или диффузионной сварки.

Совместная прокатка – один из наиболее распространенных способов изготовления слоистых композиционных материалов. Данная технология заключается в совместной прокатке заготовок для получения неразъемного соединения листов по всей площади соприкосновения металлов.

Материалы, используемые в данном способе, могут быть как одного класса (нержавеющая и углеродистая сталь), так и разных (нержавеющая сталь, медь). Схема прокатки представлена на рисунке 3 [5].

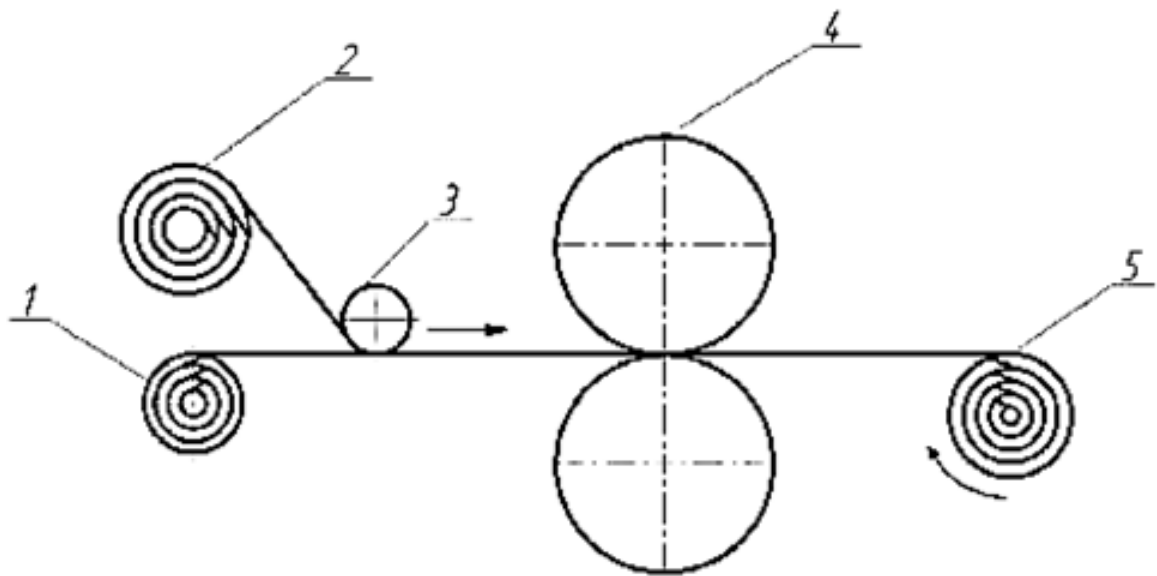


Рисунок 3 – Схема совместной прокатки полос методом холодной прокатки:

- 1 – разматыватель полосы основного слоя; 2 – разматыватель полосы плакирующего слоя; 3 – направляющий ролик; 4 – рабочие валки стана;
5 – моталка с рулоном многослойной полосы

Одной из разновидностей данной технологии, является горячая прокатка. Она осуществляется при температурах 60 % и более от $T_{пл}$ металла. Схема способа представлена на рисунке 4 [5].

Технология горячей прокатки заключается в наложении на металл, который

будет подвержен плакированию, листы другого металла или сплава

В процессе прокатки на границе раздела двух разнородных металлов происходит образование атомно-чистых (ювенильных) поверхностей, инициирующих между соприкасающимися металлическими поверхностями «эффект схватывания», который и обеспечивает их прочное сцепление.

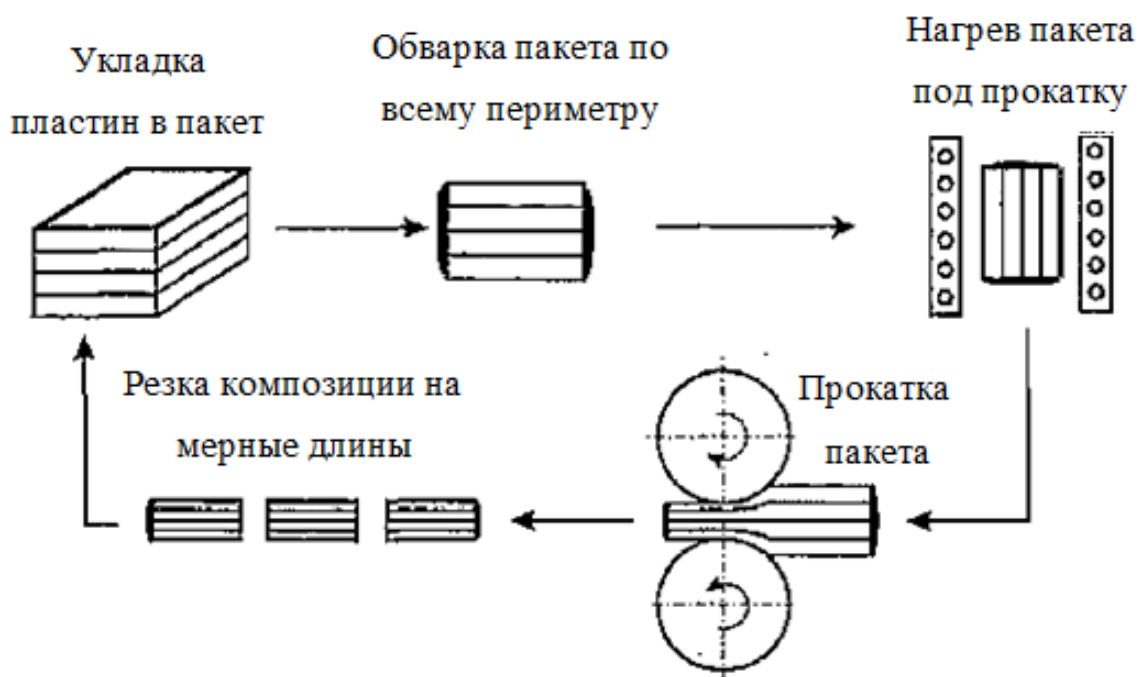


Рисунок 4 – Схема получения слоистых композиционных материалов методом пакетной прокатки

Прессование – это основная операция процесса изготовления композитов по методу диффузионной сварки, поэтому допускается рассматривать их как один метод изготовления композиционных материалов. Схема процесса прессования представлена на рисунке 5 [5].

Процесс прессования заключается в пластической деформации материала матрицы, которая заполняет пространства между волокнами упрочняющей фазы для максимального уплотнения самой матрицы. Между слоями на границе раздела обеспечивается прочная связь за счет диффузионных процессов между слоями либо частицами матрицы. Параллельно обеспечивается необходимый уровень прочности самого композита.

Основными технологическими параметрам данного метода являются:

- давление прессования;
- температура;
- время выдержки;
- среда, в которой происходит процесс.

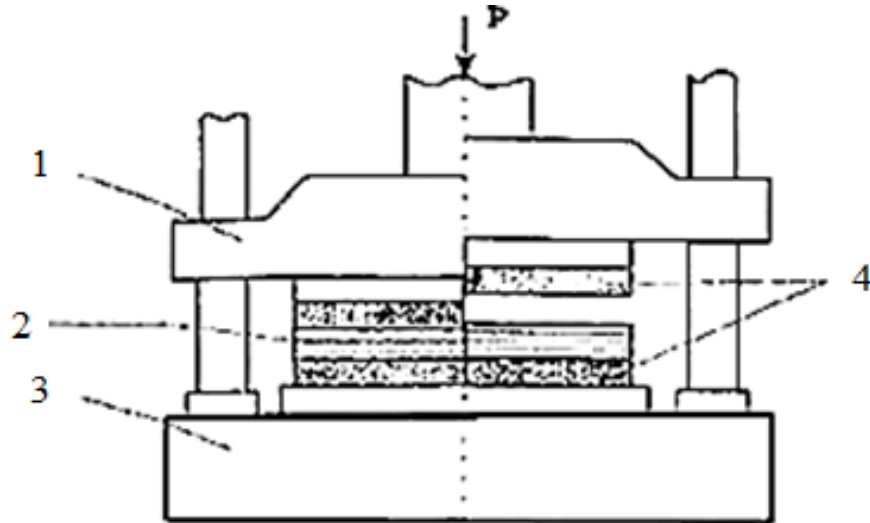


Рисунок 5 – Схема процесса горячего прессования:

1 – верхняя траверса; 2 – пакет; 3 – нижняя траверса; 4 – обогреваемые плиты

Следующим методом получения металлических композиционных материалов в твердом состоянии является диффузионная сварка. Принципиальная схема представлена на рисунке 6 [5].

Технологический процесс представляет собой выдержку прижатых друг к другу листов разнородных металлов, которые предварительно нагреты до необходимой температуры с необходимыми значениями параметров давления и времени выдержки, что обеспечивает массоперенос металлов, вследствие чего формируется слоистый композиционный материал. Процесс диффузионной сварки проходит в специальных вакуумных камерах, которые также могут заполняться инертным газом.

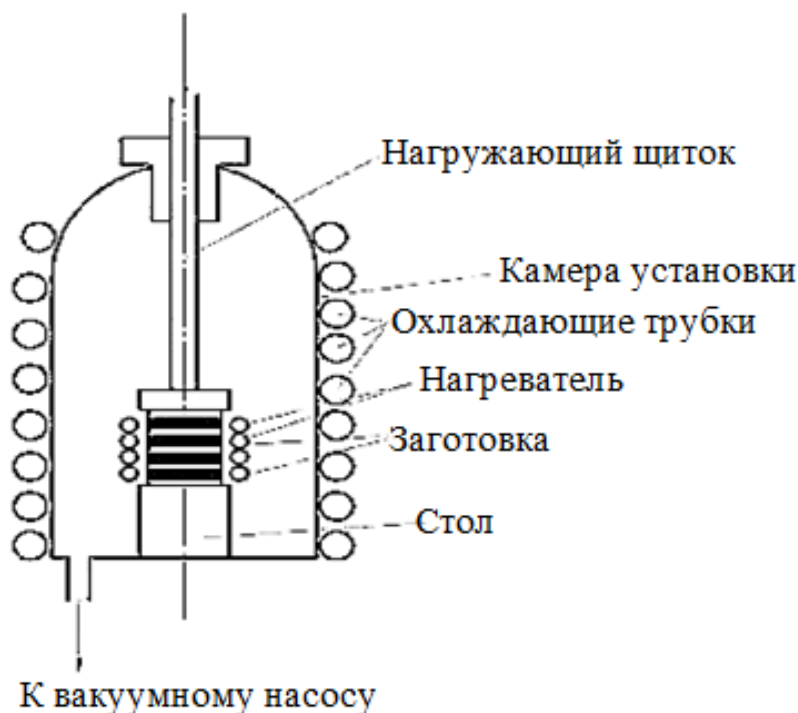


Рисунок 6 – Схема процесса диффузионной сварки

Недостатками этих двух методов являются размер биметалла или композиционного материала, которые ограничены размерами вакуумной камеры, достаточно высокая сложность используемого оборудования, и как следствие перечисленных недостатков, низкая производительность.

К одному из основных способов получения слоистых композиционных материалов в рассматриваемой группе является сварка взрывом.

В результате детонации взрывчатого вещества происходит соударение метаемой пластины и заготовки. Из-за очень высоких скоростей соударения и давления в зоне контакта происходит отчистка поверхностей, их активация и образование прочного сварного соединения.

Особенностью метода сварки взрывом является то, что предварительный нагрев перед деформацией не требуется, что практически не приводит к снижению первоначальной прочности армирующих волокон.

Данный метод применяют для получения многослойных листов, полос, цилиндрических заготовок, изделий из композиционных материалов, армированных волокнами и так далее.

К основным проблемам, которые возникают во время сварки взрывом,

относятся непровары по периметру и растрескивание свариваемых плит, что наиболее характерно при соединении толстолистовых крупногабаритных установок.

1.2.2 Жидкофазные методы

Плавление матрицы для получения композиционного материала без плавления упрочняющих компонентов (частиц, волокон, каркасов и другое) достигается с помощью жидкофазных методов.

Методы данной группы обладают рядом существенных преимуществ, главные из которых:

- возможность изготовления композиционных изделий сложной формы с минимальной последующей механической обработкой либо вообще без нее;
- ограниченное силовое воздействие на хрупкие компоненты;
- широкая номенклатура компонентов, используемых для создания композитов;
- упрощенное аппаратное обеспечение;
- высокая производительность;
- возможность механизации, автоматизации и реализации непрерывных технологических процессов.

Кроме выше перечисленных достоинств рассматриваемыми методами возможно изготовление тех композиций, которые другими методами по ряду причин изготовить либо невозможно, либо нерационально.

Для получения композитов используется две разновидности литейных технологий:

- а) соединение твердой и жидкой фаз;
- б) соединение различных компонентов, находящихся в жидком состоянии.

Процесс соединения твердой и жидкой фаз осуществляется в следующем порядке:

- а) размещение армирующих элементов в полость литейной формы перед заливкой матричным расплавом;
- б) заливка в литейную форму гетерогенного матричного расплава, содержащего армирующие элементы, приготовленного в ковше;

- в) введение армирующих элементов в матричный расплав в процессе заливки его в кристаллизатор или в литейную форму;
- г) сборка (намотка) армирующих элементов в присутствии жидкого матричного сплава.

Схема получения КМ методом литья показана на рисунке 7 [5].

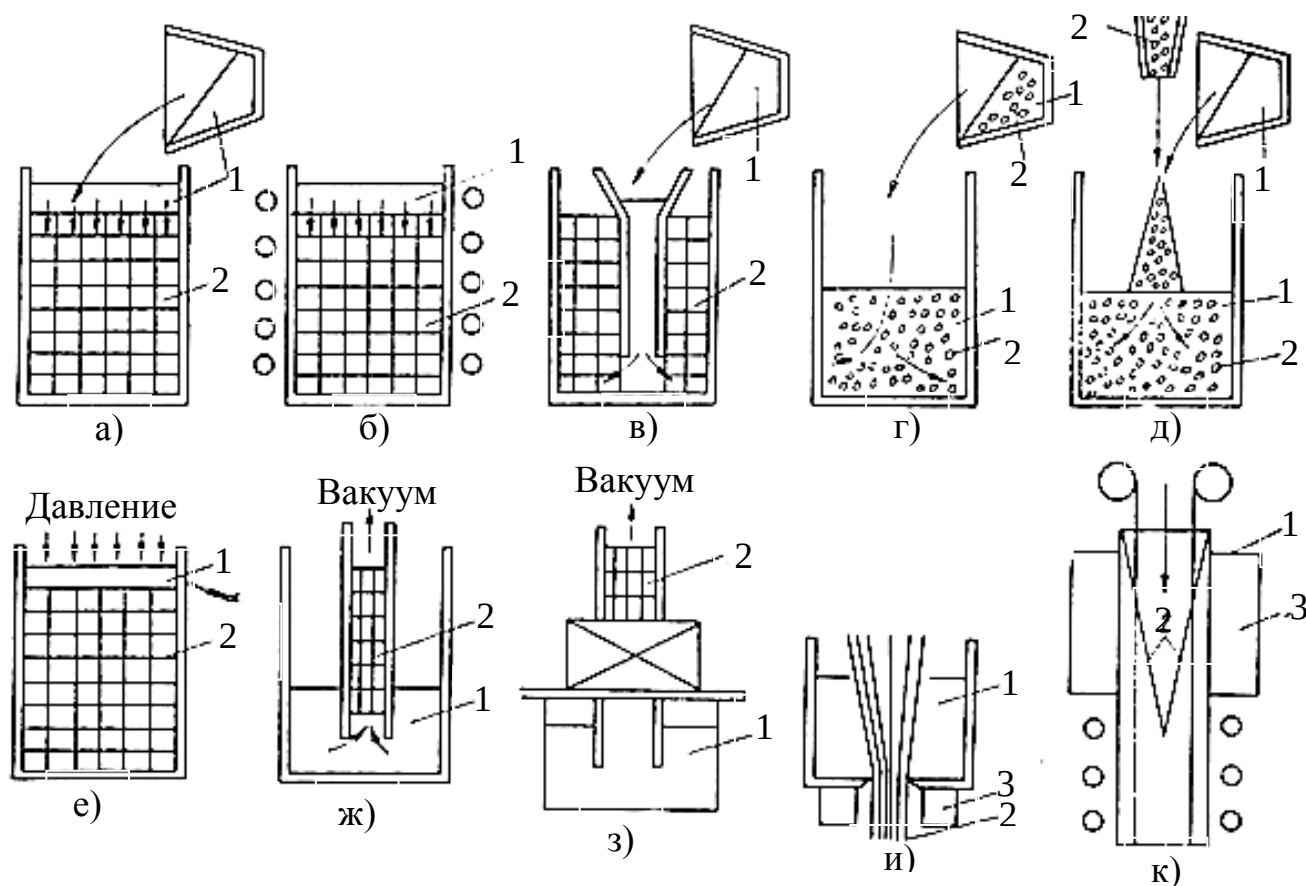


Рисунок 7 – Схема получения изделий из композитов методами литья:

- а) – заливка матричным расплавом литейной формы с предварительно установленной арматурой; б) – изотермическая пропитка; в) – сифонная заливка арматуры матричным расплавом; г) – литьё гетерогенного расплава; д) – суспензионная заливка; е) – литьё под давлением; ж) – литьё вакуумным воздействием; з) – литьё с комплексным электромагнитным и вакуумным воздействием; и) – пропитка способом непрерывного литья; к) – с вводом не расплавляющейся арматуры; 1 – расплав; 2 – армирующие элементы;

3 – кристаллизатор

1.2.3 Газофазные методы

Методы данной группы используются в том случае, когда недопустимо взаимодействие материала матрицы с упрочнителем. Рассматриваемая группа методов основана на газотермическом напылении или осаждении материала из газовой фазы. В большинстве случаев их применяют для получения тонких слоев с особыми свойствами.

Одним из наиболее распространенных способов газотермического напыления является плазменное напыление. Его осуществляют с помощью плазмотронов, а в качестве плазмообразующего газа применяют азот, аргон, гелий, аммиак и смеси газов. Образование слоя плазменного покрытия происходит за счет соударения частиц плазмы с контактной поверхностью. Высокие температуры процесса приводят к соединению частиц плазмы между собой и поверхностью, в результате чего и образуется прочное соединение.

Схема плазменного напыления представлена на рисунке 8 [6].

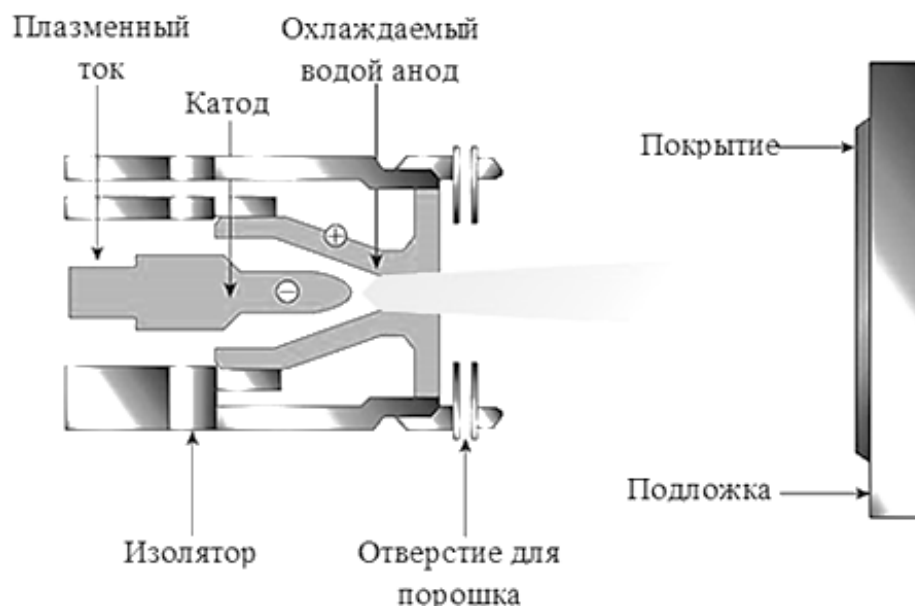


Рисунок 8 – Схема плазменного напыления

Еще к одной разновидности газофазных методов относится осаждение материала из газовой фазы. Технологический процесс состоит в образовании на поверхности изделия покрытия за счет осаждения на нее легколетучих металлов из газовой фазы. Образование покрытия осуществляется в газовой камере.

Поверхность детали предварительно разогревают. Давление в камере может быть как нормальное атмосферное, так и пониженное.

Основное назначение данного метода – нанесение защитных покрытий на поверхность изделий сложной формы из тугоплавких материалов и композиционных материалов из неплавляемых компонентов.

Проанализировав приведенные методы получения композиционных материалов можно сделать вывод, что каждый способ обладает рядом преимуществ и недостатков, однако, для получения слоистого коррозионностойкого материала системы 12X18H10T-M1 наиболее рациональным и эффективным методом является сварка взрывом [6].

1.3 Патентное исследование

Патентные исследования – это исследования технического уровня и тенденций развития объектов техники, их патентоспособности, патентной чистоты, конкурентоспособности на основе патентной и другой информации.

Цель исследования – определение уровня развития и методов повышения коррозионной стойкости аустенитных сталей и биметаллов.

Регламент патентного поиска – это план поиска. Он состоит из определения вида исследований, вида поиска, его глубины и широты. В регламент входит выбор источников информации, по которым будет вестись поиск аналогов объекта, а также индекс МПК (международная патентная классификация). Источники информации выбирают исходя из установленных областей поиска, учитывая при этом реальную доступность этих источников.

Выбранные элементы регламента приведены в таблице 1.1. В ней записаны индексы МПК, в заголовке таблицы регламента указано общее название исследуемого объекта.

Исследуемый объект – коррозионная стойкость классических аустенитных сталей и коррозионно-стойких биметаллов.

Предмет поиска – способы повышения коррозионной стойкости в

аустенитных и биметаллических материалах.

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

Наименование информационной базы (фонда) – Патентные фонды Федерального института промышленной собственности (ФИПС).

Таблица 1.1 – Регламент поиска

Предмет поиска	Индекс МПК	Широта поиска	Глубина поиска	Источник информации
Способ повышения коррозионной стойкости путем изменения взаимодействующих материалов	<i>C22C 38/58</i>	Россия	18 лет	Реестр изобретений РФ ФИПС
Повышение коррозионной стойкости аустенитных сталей за счет изменения процентного содержания химических элементов	<i>C22C 38/58</i> <i>C22C 30/00</i>	Россия	18 лет	Реестр изобретений РФ ФИПС
Повышение коррозионной стойкости за счет использования в качестве плакирующего слоя из хромистой коррозионностойкой стали	<i>B32B 15/18</i> <i>C22C 38/18</i> <i>C22C 38/34</i>	Россия	18 лет	Реестр изобретений РФ ФИПС
Повышение коррозионной стойкости за счет использования в качестве плакирующего слоя коррозионно-стойкой аустенитной стали	<i>C22C 38/38</i> <i>C22C 38/32</i> <i>B32B 15/18</i> <i>B32B 15/01</i>	Россия	18 лет	Реестр изобретений РФ ФИПС
Повышение коррозионной стойкости за счет применения протекторной питтинг-защиты	<i>C23F 13/06</i> <i>B32B 7/02</i>	Россия	18 лет	Реестр изобретений РФ ФИПС

C22C 38/58 – сплавы черных металлов, например легированные стали с более 1,5 % марганца по массе.

C22C 30/00 – сплавы, содержащие менее 50% по массе каждого компонента.

C22C 38/18 – сплавы черных металлов, например легированные стали, содержащие хром.

B32B 15/18 – слоистые материалы, содержащие в основном металл, содержащие чугун или сталь.

C22C 38/34 – сплавы черных металлов, например легированные стали с более 1,5 % кремния по массе.

C22C 38/32 – сплавы черных металлов, например легированные стали с бором.

B32B 15/01 – слоистые материалы, содержащие в основном металл, содержащие слои, состоящие только из металла.

C23F 13/06 – ингибирование коррозии металлов путем анодной или катодной защиты – конструктивные элементы устройств катодной защиты или их сборки.

B32B 7/02 – слоистые изделия, изготовленные из слоев с различными физическими свойствами или отличающиеся взаимосвязанными слоями изделия, изготовленные из слоев с различными физическими свойствами, например из слоев различной твердости.

Результаты патентного обзора приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Результаты патентного обзора

Предмет поиска (объект исследования, его составные части)	Страна выдачи, вид и номер охранного документа. Классификационный индекс МПК	Заявитель (патентообладатель), номер заявки, страна, дата публикации	Название изобретения (полной модели, образца)
1	2	3	4
Коррозионная устойчивость аустенитной нержавеющей стали	Россия, патент, <i>RU 2 618 021 C1</i> <i>C22C 38/58</i>	Ниппон Стил Энд Сумитомо Метал Корпорейшен (<i>JP</i>) КОРПОРЕЙШН (<i>JP</i>) № 2015152343, Япония, 2.05.2017	Аустенитная нержавеющая сталь и способ получения материала из аустенитной нержавеющей стали [7]
Коррозионная стойкость аустенитных сплавов	Россия, патент, <i>RU 2 731 395 C2</i> <i>C22C 38/58</i> <i>C22C 30/00</i>	ЭйТиАй Пропертиз ЭлЭлСи (<i>US</i>) № 2017110659, Америка 2.09.2020	Высокопрочные, коррозионно- устойчивые аустенитные сплавы [8]
Коррозионная стойкость плакированной коррозионно- стойкой стали	Россия, патент, <i>RU 2 225 793</i> <i>B32B 15/18</i> <i>C22C 38/18</i> <i>C22C 38/34</i>	Открытое акционерное общество «Северсталь», Закрытое акционерное общество «Институт биметаллических сплавов» № 2002111391/02, Россия 20.03.2004	Плакированная коррозионностойкая сталь и изделие, выполненное из нее [9]
Устойчивость плакированной коррозионно- стойкой стали к воздействию коррозии в различных средах	Россия, патент, <i>RU 2 627 080 C1</i> <i>C22C 38/38</i> <i>C22C 38/32</i> <i>B32B 15/18</i> <i>B32B 15/01</i>	Федеральное Государственное Унитарное Предприятие «Центральный научно- исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина» № 2016125666, Россия 3.08.2017	Плакированная высокопрочная коррозионно-стойкая сталь [10]

Продолжение таблицы 1.2

Коррозионная стойкость плакированной коррозионно- стойкой стали	Россия, патент, 016878 ЕАПВ <i>C23F 13/06</i> <i>B32B 7/02</i>	Розен Андрей Евгеньевич № 201100552, Россия 13.10.2011	Многослойный материал повышенной коррозионной стойкости (варианты) и способы его получения [11]
---	---	--	--

Вывод по первому разделу

В первом разделе были рассмотрены основные способы получения композиционных материалов: их схемы, технология проведения, преимущества и недостатки. Из рассмотренных методов получения металлических композиционных материалов, в частности многослойных металлических коррозионностойких материалов, стоит отдать предпочтение методу сварки взрывом, обеспечивающим получение качественных сварных соединений.

На основании патентного поиска можно сделать вывод, что многослойные коррозионностойкие материалы в настоящее время являются перспективным направлением в развитии слоистых композиционных материалов. Данный класс представляет высокий интерес для проведения разного рода исследований.

2 Характеристика используемых материалов

2.1 Сталь 12X18H10T

Разработка и получение новых материалов, которые могли бы применяться в различных отраслях промышленности для повышения срока эксплуатации оборудования, является одним из показателей развития цивилизации. Переломный этап в развитии металлургии – создание нержавеющей стали.

На основании ГОСТ 5632 – 14 сталь 12X18H10T относится к хромоникелевым сталям аустенитного класса [12]. Физические свойства данной стали представлены в таблице 2.1 [12].

Таблица 2.1 – Физические свойства стали 12X18H10T

Параметры	T (Град)	Модуль упругости $E \cdot 10^5$ (МПа)	Коэф. лин. расшир $\alpha \cdot 10^6$ (1/Град)	Коэф. теплопр-ти λ (Вт/(м·град))	Плотность ρ (кг/м ³)	Удел. теплоемкость C (Дж/(кг·град))	Удел. электросопротивлен ие $R \cdot 10^9$ (Ом·м)
Значение	20	1,98	–	15,0	7920,0	–	725,0
	100	1,94	16,6	16,0		462,0	792,0

Данный вид является наиболее распространенной группой среди коррозионно-стойких сталей, которые имеют общепринятое название в мире стали типа 18-10. Химический состав стали 12X18H10T представлен в таблице 2.2 [12].

Таблица 2.2 – Химический состав стали 12X18H10T

Химические элементы	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	Ti	Fe
Массовая доля, %	до 0,12	до 0,8	до 2,0	9,0...11,0	до 0,02	до 0,035	17,0...19,0	до 0,3	0,4...1,0	до 67,0

Стали типа 18-10 характеризуются высоким содержанием хрома, достигающим 18 %. Это обеспечивает высокие показатели коррозионных свойств во многих средах окислительного характера в широком диапазоне концентраций и температур, жаростойкость и жаропрочность при умеренных температурах.

Содержание в данных сталях никеля в количестве от 9 до 12 % способствует получению аустенитной структуры. Такая структура характеризуется высокой технологичностью при операциях горячей и холодной деформации и хладостойкостью при криогенных температурах. Наличие углерода в сплаве при температуре выше 900 °С способствует обеспечению аустенитной структуры.

Легирующий элемент – титан, обеспечивает карбидообразующий эффект, что предотвращает образование межкристаллитной коррозии. Кремний служит для удаления нежелательных растворённых газов из стали, увеличивает плотность сплава и его показатель текучести. Однако данный элемент отрицательно влияет на степень пластичности (уменьшается), что вызывает трудности при прокатке холодным способом. Наличие марганца позволяет получать мелкозернистую сталь. Небольшое количество фосфора негативно сказывается на механических качествах состава, что нежелательно для металла, используемого в криогенной технике. При понижении температуры он способен снизить пластичность материала. Структура нержавеющей стали 12X18H10T представлена на рисунке 9 [12].

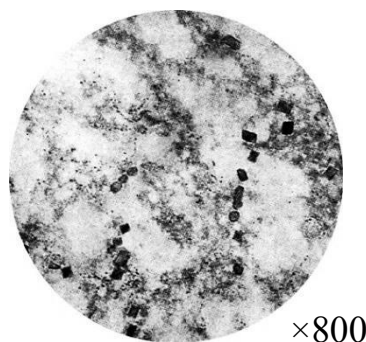


Рисунок 9 – Структура стали аустенитного класса 12X18H10T
(структурные составляющие: аустенит, карбиды)

Заменителями стали являются 08X18Г8Н2Т, 10X14Г14Н4Т, 12X17Г9АН4, 08X22Н6Т, 08X17Т, 15X25Т, 12X18Н9Т.

Коррозионно-стойкая сталь 12X18Н10Т характеризуется отличной свариваемостью, не имеет никаких ограничений, что дает возможность использовать любые сварочные технологии.

Технологические свойства стали представлены в таблице 2.3 [12].

Таблица 2.3 – Технологические свойства

Наименование свойства	Характеристика
Ковка	Температура ковки, °С: начала 1200, конца 850. Сечения до 350 мм охлаждаются на воздухе.
Свариваемость	Сваривается без ограничений. Способы сварки: ручная дуговая сварка, автоматическая дуговая сварка, электрошлаковая сварка, контактная сварка. Рекомендуется последующая термообработка.
Обрабатываемость резанием	При $HB\ 169$ и $\sigma_B=608,0$ МПа: $K_{V\text{ тв.сплав}} = 0,60$ $K_{V\text{ быстрорежущая сталь}} = 0,35$
Флокеночувствительность	Не чувствительна
Жаростойкость	В воздухе при $T = 650\text{ °C}$ 2–3 группа стойкости, при $T = 750\text{ °C}$ 4–5 группа стойкости

С целью обеспечения прочности и надежности швов рекомендуется выполнение термообработки. Ее проведение необходимо того, чтобы швы в процессе эксплуатации из данной стали не были подвержены межкристаллитной коррозии.

Сталь 12X18Н10Т нашла применение во многих отраслях промышленности. За счет своей высокой стойкости к агрессивным средам (кроме серосодержащих) она нашла применение в химической промышленности. Ее используют при производстве сосудов, функционирующих в условиях высокого давления и при температурах до 600 °C , трубопроводов, предназначенных для транспортировки разбавленных растворов фосфорной,

азотной, уксусной кислот, агрессивных оснований и солей, труб для соединения оборудования с повышенной радиацией. Формы поставки материала: обработка металлов давлением, поковки, сортовой и фасонный прокат, листы и полосы, ленты, трубы стальные и соединительные части к ним, проволока стальная легированная, сетки металлические.

Рассматриваемая сталь нашла применение в таких отраслях промышленности, как:

- пищевая;
- химическая;
- топливно-энергетическая;
- автомобильная;
- кораблестроительная
- авиационная и другие.

Кроме того, сталь 12X18H10T нашла применение в криогенной технике при крайне низких температурах – до -269°C , что не мешает ее применению при высоких температурах (как в дуговых печах). Листы 12X18H10T используют в качестве строительного, и отделочного металла. Проволоку используют для сварочных работ. В виде нитей или шнуров сталь подходит для изготовления сеток, пружин, тросов и канатов [13].

Механические свойства стали представлены в таблице 2.4 [12].

Таблица 2.4 – Механические свойства стали 12X18H10T

Параметры	Температура испытаний, $^{\circ}\text{C}$	Предел текучести, $\sigma_{0,2}$, МПа	Временное сопротивление разрыву, σ_b , МПа	Относительное удлинение при разрыве, δ_s , %	Относительное сужение, ψ , %	Ударная вязкость, KCU , Дж/см ²
Значения	20	225,0...315,0	550,0...650,0	46,0...74,0	66,0...80,0	215,0...372,0
	500	135,0...205,0	390,0...440,0	30,0...42,0	60,0...70,0	196,0...353,0

2.2 Медный сплав М1

Сплав М1 производится по ГОСТ 859 – 2001 и содержит в себе 99,9 % меди [14].

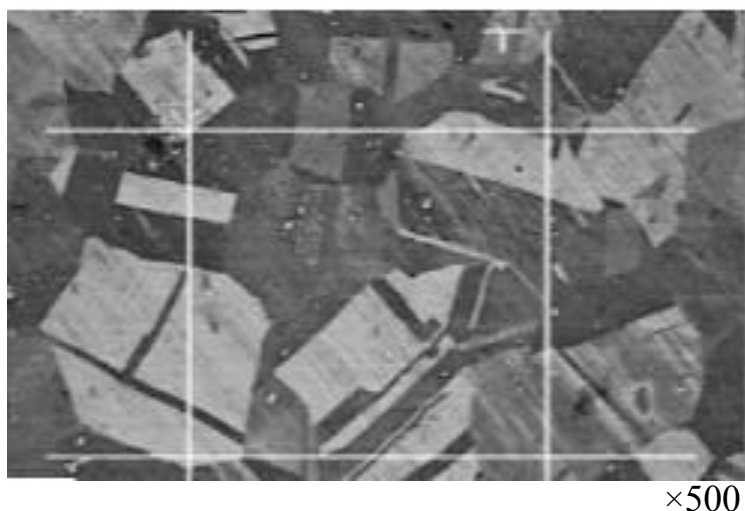


Рисунок 10 – Структура сплава М1

Химический состав медного сплава представлен в таблице 2.5 [14].

Таблица 2.5 – Химический состав сплава М1

Химический состав	Fe	Ni	S	As	Pb	Zn	O	Sb	Bi	Sn	Cu+Ag _{min}
Массовая доля, %	до 0,005	до 0,002	до 0,004	до 0,002	до 0,005	до 0,004	до 0,05	до 0,002	до 0,001	до 0,002	99,9

Медь – это идеальный металл для создания проводников различного сечения, чему также способствует оптимальная для этих целей плотность материала – 8,92 г/см³. По этим и многим другим причинам наиболее распространенным медным прокатом долгое время остается проволока и прутки. При этом промышленные предприятия также активно применяют в работе медные листы, ленты и даже трубы. Литейно-технологические свойства медного сплава М1 представлены в таблице 2.6 [14].

Таблица 2.6 – Литейно-технологические свойства материала М1

Параметры	Значение
Температура плавления, °С	1083
Температура литья, °С	1150,0...1250,0
Линейная усадка, %	2,1

Чистая медь – это материал с высокой электро- и теплопроводностью и малым электросопротивлением (0,0180 мкОм), которые напрямую указывают на марку металла и его химический состав. На эти характеристики могут влиять лишь примеси: повышая долю железа, олова или фосфора в сплаве, можно удешевить готовый материал, но и заметно снизить электропроводность меди.

Для получения медного проката используют две технологии, к которым относятся горячая и холодная деформация. В случае горячей деформации получают тянутую продукцию и прессованную (проволока, прутки, трубы), во втором случае – это холодный прокат (листы, плиты).

Механические свойства сплава представлены в таблице 2.7 [14].

Таблица 2.7 – Механические свойства при $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

Сортамент	Механические свойства	
	Временное сопротивление разрыву, σ_b , МПа	Относительное удлинение при разрыве, δ_s , %
Сплав мягкий холоднокатан., ГОСТ 1173-2006	200,0...260,0	42,0
Сплав твердый холоднокатан., ГОСТ 1173-2006	290,0	6,0

Сплав М1, отличающийся пластичностью, вязкостью и достаточной прочностью, не имеет альтернативы в условиях низких температур [15]. Физические свойства сплава представлены в таблице 2.8 [14].

Таблица 2.9 – Физические свойства сплава

Параметры	T (град)	Модуль упругости $E \times 10^{-5}$ (МПа)	Коэф. лин. расшир $\alpha \times 10^6$ (1/град)	Коэф. теплопр-ти λ (Вт/(м $\times$ град))	Плотность ρ (кг/м ³)	Удел. теплоемкость C (Дж/(кг $\times$ град))	Удел. электросопротивление $R \times 10^9$ (Ом $\times$ м)
Значения	20	1,28	–	387,0	8920,0	390,0	17,8
	100	1,32	16,7	–		–	–

2.3 Взаимодействие исходных компонентов

В данной работе в качестве исходных компонентов для получения металлического композиционного материала использовалась пара медь марки М1 и коррозионностойкая сталь аустенитного класса марки 12Х18Н10Т.

В связи с тем, что информации по соединению пары металлов 12Х18Н10Т и М1 на данном этапе недостаточно для того, чтобы сделать выводы по особенностям поведения свариваемых материалов при совместном ударно-волновом нагружении, для описания процессов, протекающие которых вероятнее всего на границе раздела указанных материалов, необходимо рассмотреть взаимодействие всех химических элементов.

Как правило, наибольшее влияние на микроструктуру зоны соединения оказывают те компоненты, которые находятся в большинстве, – хром, никель и железо, однако взаимодействие с компонентом, находящимся в малом количестве, также будет рассмотрено в данной работе.

Далее вышеуказанные аспекты будут описаны на основе анализа диаграмм состояния Cu-Fe, Cu-Ni и Cr-Cu, Cu-Ti.

Соударение пластин приводит к взаимной диффузии указанных элементов из одного свариваемого материала в другой. Кроме того, вследствие пластического соударения и адиабатического сжатия воздуха в зазоре между пластинами происходит нагрев металла, который также необходимо учитывать. Температура воздуха в зазоре нагревается до температуры 2700 °С и приводит к

нагреванию свариваемых между собой пластин.

2.3.1 Взаимодействие железа и меди

Диаграмма состояния Cu-Fe представлена на рисунке 11 [16].

Диаграмма состояния системы Cu-Fe изучалась многими исследователями. Данные о полной или частичной смешиваемости железа и меди в жидком состоянии противоречивы. Установлено отсутствие расслаивания в системе железо-медь, однако в переохлажденном состоянии (степень переохлаждения 100 °C и больше) оно наблюдается. Область не смешиваемости почти симметрична оси, соответствующей эквиатомному составу, а критическая температура смешивания лежит на 20 °C ниже температуры ликвидус при эквиатомном составе.

В системе существуют три области первичной кристаллизации фаз δ , γ и ϵ , и три превращения (два перитектических и одно эвтектоидное), протекающих при 1480, 1094 и 850 °C.

Растворимость железа в меди при 1025, 900, 800 и 700 °C составляет 2,5, 1,5, 0,9 и 0,5 % (по массе) соответственно. Диаграммы состояния системы построены по расчетным данным; в основном эти диаграммы согласуются с построенными по данным эксперимента.

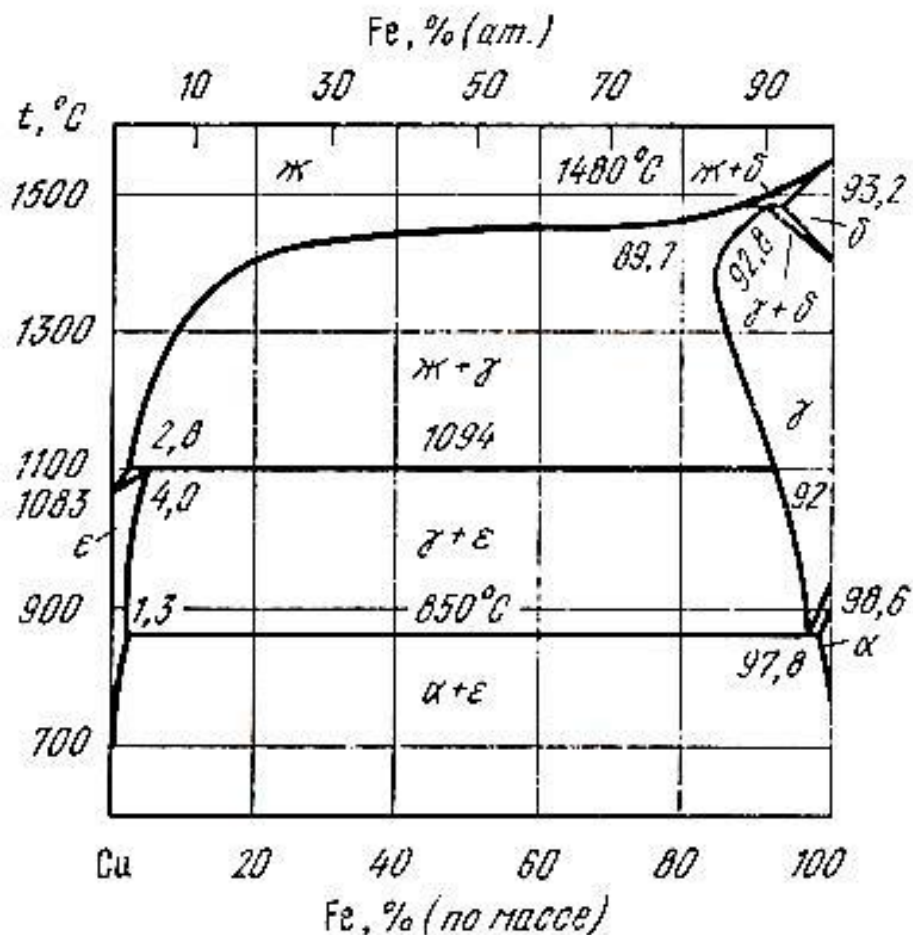


Рисунок 11 – Диаграмма состояния Cu-Fe

2.3.2 Взаимодействие меди и никеля

На рисунке 12 представлена диаграмма состояния Cu-Ni [16].

Диаграмма состояния Cu-Ni характеризуется образованием в процессе кристаллизации непрерывного ряда твердых растворов (Cu, Ni) с гранецентрированной кубической структурой. Установлено равновесие жидкость-газ с азеотропным минимумом при температуре 2500 °C и концентрации от 50 до 60 % Ni; указывается на наличие области расслоения на две фазы (газообразный и жидкий растворы разного состава) при концентрации от 60 до 100 % (ат.) Ni. При концентрациях до 60 % (ат.) Ni область расслоения настолько узка, что практически вырождается в прямую линию.

Выводы по системе Cu-Ni :

- структура сплавов во всем интервале концентраций (от 0 до 100% Ni) представляет собой α -твердый раствор и не зависит от химического состава

сплава;

- фазовый и структурный состав сплавов совпадают;
- кристаллизация в неравновесных условиях приводит к дендритной структуре и развитию дендритной ликвации;
- дендритная ликвация может быть исправлена гомогенизационным (диффузионным) отжигом или холодной пластической деформацией с отжигом, приводящим систему в равновесное состояние с равноосными полиэдрическими зернами.

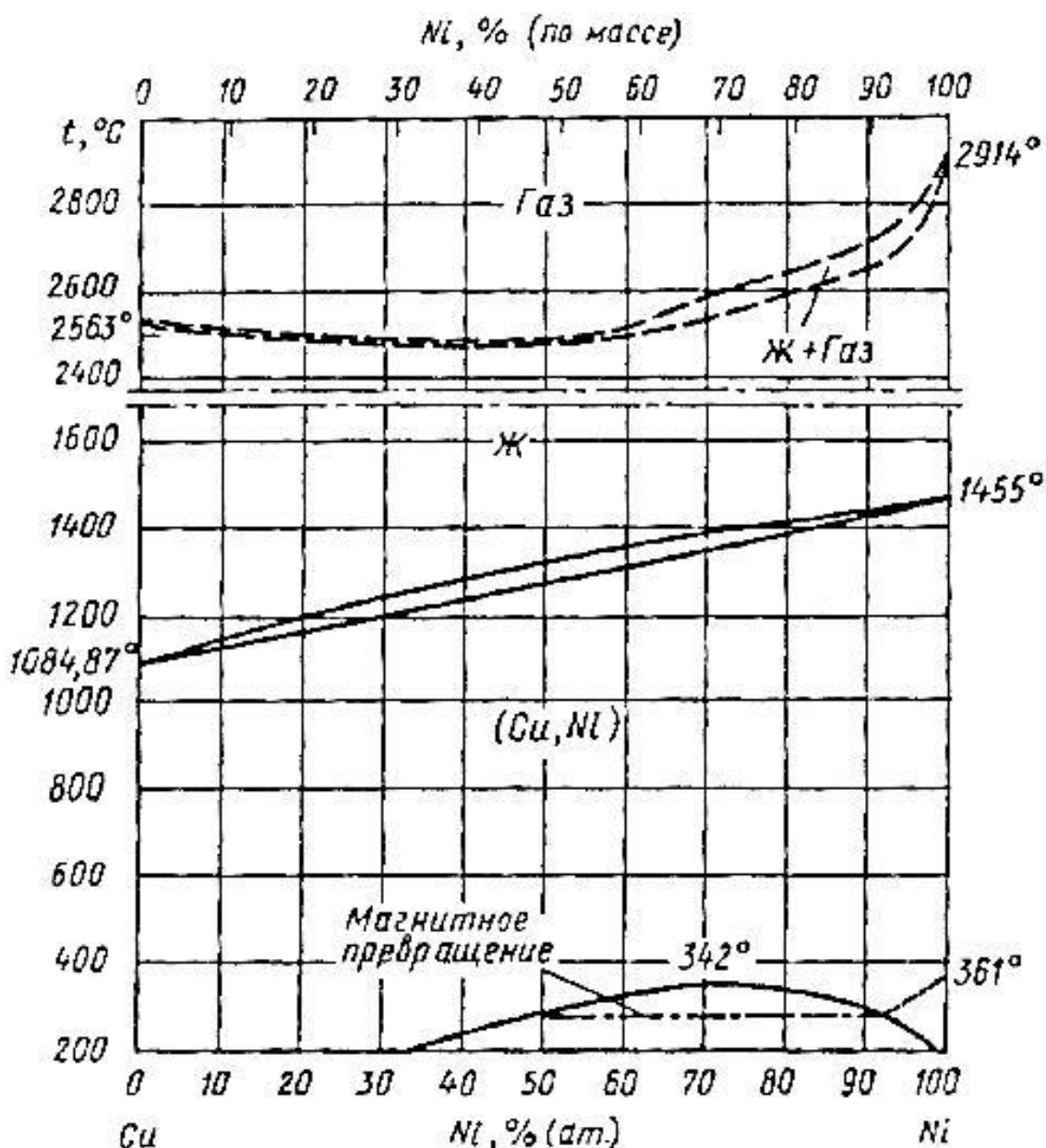


Рисунок 12 – Диаграмма состояния Cu-Ni

2.3.3 Взаимодействие хрома и меди

Диаграмму состояния Cr-Cu иллюстрирует рисунок 13 [16].

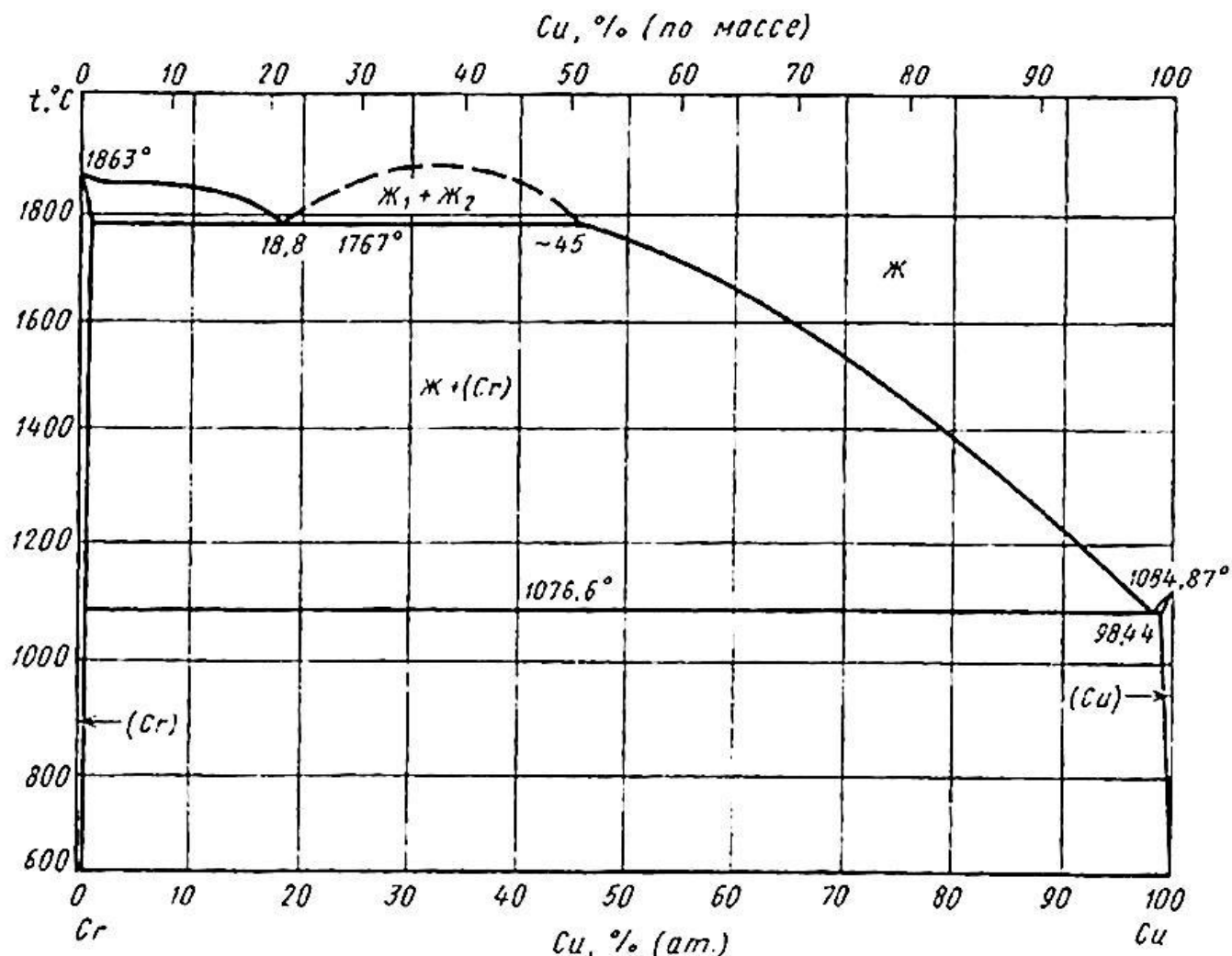


Рисунок 13 – Диаграмма состояния Cr-Cu

Диаграмма состояния Cr-Cu исследована неоднократно. Полученные результаты подтверждают наличие эвтектического равновесия в системе и существование двух твердых растворов на основе Cu и Cr. В сплавах, содержащих от 4 до 45 % Cu, имеет место монотектическое равновесие при температуре $1767 \pm 8^\circ\text{C}$ и концентрации 18,8 % Cu. Область расслоения двух жидкостей Ж_1 и Ж_2 простирается от 18,8 до 45 % Cu в узком интервале температур, верхняя граница которого не превышает 1900°C . Результаты термодинамического исследования сплавов данной системы свидетельствуют о наличии области не смешиваемости в жидком состоянии. Подтверждается

существование двухфазной области Ж + (Cr) в интервале концентраций от 42 до 97 % Cr при температуре 1550 °С. Температура эвтектической реакции Ж ↔ (Cu) + (Cr), равная 1076,6 °С, и концентрация Cu в эвтектике, составляет 98,44 %.

Растворимость хрома в меди представлена в таблице 2.9 [16].

Таблица 2.9 – Растворимость Cr в (Cu)

Температура, °С	Растворимость Cr, % (ат.)
1070	0,76
1030	0,54
1000	0,49
950	0,31
900	0,21
840	0,12
800	0,16
700	0,1
600	0,09
400	0,02

Максимальная растворимость при температуре 1076,6 °С составляет 0,89 % (ат.) Cr.

Растворимость меди в хrome представлена в таблице 2.10 [16].

Таблица 2.10 – Растворимость Cu в (Cr)

Температура, °С	Растворимость Cu, % (ат)
1700	0,35±0,04
1600	0,27±0,03
1500	0,22±0,04
1300	0,16
1150	0,09

2.3.4 Взаимодействие меди и титана

Диаграмма взаимодействия Cu-Ti представлена на рисунке 14 [16].

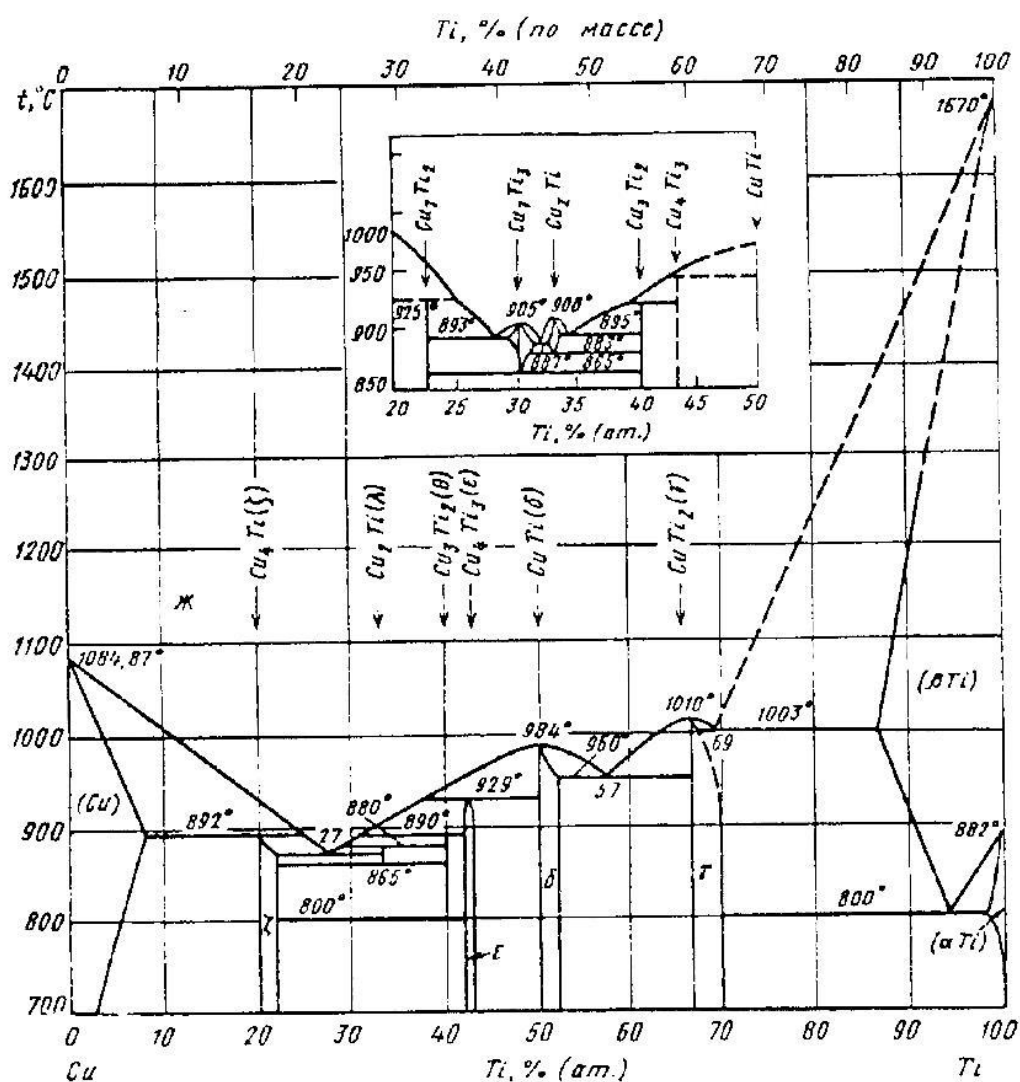


Рисунок 14 – Диаграмма взаимодействия Cu-Ti

Диаграмма состояния Cu-Ti исследовалась многократно, однако до настоящего времени нет единого мнения относительно состава и характера образования промежуточных фаз.

Данная система характеризуется образованием шести соединений, два из которых являются конгруэнтно плавящимися. Температура плавления соединения CuTi_2 (γ) составляет 1005 °C, а температура плавления соединения CuTi (δ) составляет 984 °C. Образование других четырех соединений Cu_4Ti_3 (ϵ), Cu_3Ti_2 (θ), Cu_2Ti (λ), Cu_4Ti (ζ) происходит по перитектическим реакциям.

Соединение Cu_4Ti_3 (ϵ) образуется при взаимодействии жидкой фазы с

δ -фазой CuTi при 925 °C. Образование соединения Cu₃Ti₂ (θ) является результатом взаимодействия жидкой фазы с ε -фазой при 890 °C. Соединение Cu₂Ti (λ) образуется при взаимодействии жидкой фазы с θ -фазой при 870 °C. Образование ζ -фазы Cu₄Ti происходит при температуре 875 °C при взаимодействии жидкой фазы и λ -фазы.

При взаимодействии титана с медью образуется ряд химических интерметаллидных соединений, а именно CuTi, TiCu, Cu₄Ti₃, Cu₃Ti₂, Cu₂Ti, β Cu₄Ti.

Помимо образования интерметаллидных соединений в системе титан-медь при концентрации меди 43 и 73 ат. % образуются две легкоплавкие эвтектики. Температура плавления данных эвтектик составляет 960 °C и 875 °C.

Растворимость меди в титане приведена в таблице 2.11 [16].

Таблица 2.11 – Растворимость Cu в (Ti)

Температура, °C	800	775	600	475	400
Растворимость Cu, % (ат.)	1,13	1,3	0,95	0,03	0,83

Растворимость титана в меди приведена в таблице 2.12 [16].

Таблица 2.12 – Растворимость Ti в (Cu)

Температура, °C	Растворимость Ti, % (ат.)
1000	-
950	4,5
900	6,7
870	9,6
850	7,9
800	5,6
700	3,3
600	2,5
500	2,0
400	1,6
300	1,5

Вывод по второму разделу

Были рассмотрены и проанализированы диаграммы взаимодействия всех компонентов: Cu-Fe, Cu-Ni, Cr-Cu, Cu-Ti. При взаимодействии Fe-Cu максимальная растворимость железа в меди составила 2,5 % при температуре 1025 °C. Диаграмма взаимодействия Cu-Ni во всем интервале концентраций (от 0 до 100% Ni) представляет собой α -твердый раствор и не зависит от химического состава сплава. В диаграмме состояния Cr-Cu присутствует двухфазная область Ж + (Cr) в интервале концентраций от 42 до 97 % Cr при температуре 1550 °C. Максимальная растворимость хрома в меди составляет 0,736 % при температуре 1070 °C, а меди в хrome $0,35 \pm 0,04$ % при температуре 1700 °C. Диаграмма состояния Cu-Ti характеризуется образованием шести интерметаллидных соединений CuTi_2 (γ), CuTi (δ), Cu_4Ti_3 (ϵ), Cu_3Ti_2 (θ), Cu_2Ti (λ), Cu_4Ti (ζ), также при концентрации меди 43 и 73 ат. % образуются две легкоплавкие эвтектики. Максимальная растворимость Cu в (Ti) составляет 1,13 % при температуре 800 °C, Ti в (Cu) 9,6 % при температуре 870 °C.

3 Сварка взрывом

3.1 Технологические особенности получения листовых полуфабрикатов сваркой взрывом

Сварка взрывом – это метод сварки на основе использования энергии взрыва, разновидность обработки металлов взрывом.

Принципиальная схема осуществления сварки взрывом изображена на рисунке 15. Неподвижную пластину 4 и μεταаемую пластину 3 располагают под углом α на заданном расстоянии h от вершины угла. На μεταаемую пластину укладывают заряд 2 взрывчатого вещества. В вершине угла устанавливают детонатор 1. Сварка производится на опоре 5 (металл, песок и так далее). Площадь μεταаемой пластины, как правило, больше площади основной пластины. Нависание μεταаемой пластины над основной необходимо для уменьшения влияния эффекта бокового разлета продуктов взрыва при детонации плоского заряда ВВ.

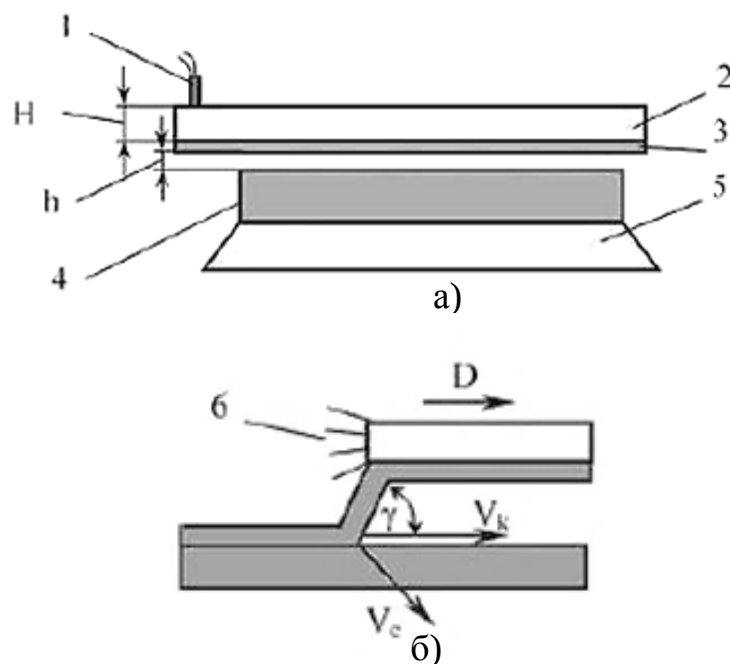


Рисунок 15 – Основная схема сварки взрывом:

а) – исходное состояние; б) – процесс детонации;

1– детонатор; 2 – заряд взрывчатого вещества; 3 – μεταаемая пластина;

4 – основная пластина; 5 – опора

Детонация взрывчатого вещества приводит к соударению метаемой пластины и заготовки. Высокие скорости соударения и давления в зоне контакта приводят к очистке поверхностей и образованию прочного сварного соединения. Соединение обычно имеет волнообразную форму, однако встречаются соединения без волнообразования.

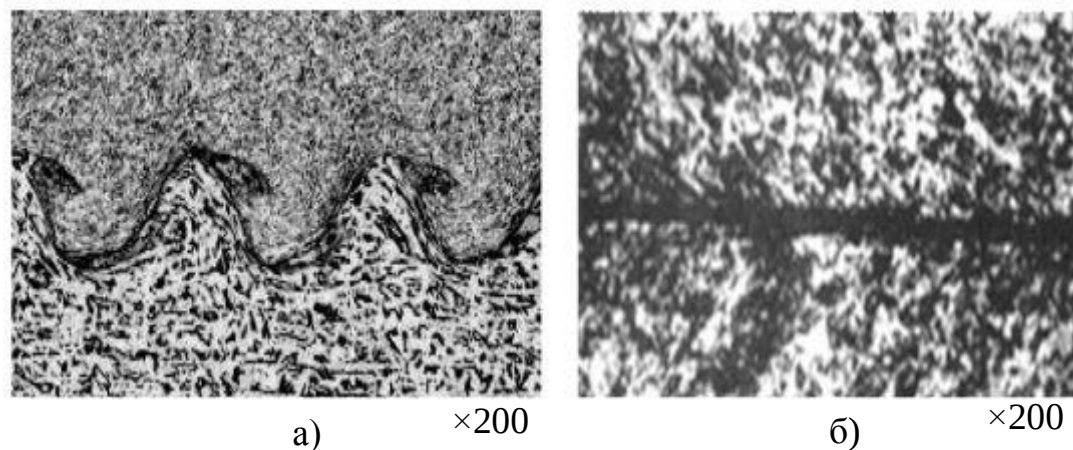


Рисунок 16 – Форма соединений, получаемых при сварке взрывом:

а) – волнообразная; б) – без волн

Из-за высокой скорости протекания процесса объемная диффузия не успевает проходить, не смотря даже на то, что происходит нагрев. Данный факт говорит о том, что химического взаимодействия между металлами не происходит, то есть не происходит образования интерметаллидов, что позволяет, в свою очередь, применять сварку взрывом для разнородных металлов и сплавов.

Достоинствами сварки взрывом являются [17]:

- возможность соединения различных по свойствам материалов;
- высокая производительность;
- способность к плавлению отдельных элементов в композите;
- создание ровного участка заготовок с изогнутыми краями;
- получение изделий дляковки и штамповки.

Отрицательные факторы:

- небезопасность объекта, вследствие волн детонации;

- обязательное подготовительное обучение;
- наличие защитных камер для закладки взрывного вещества;
- отсутствие автоматических и механических устройств;

3.2 Основные параметры процесса сварки взрывом

Физические явления, сопутствующие сварке взрывом, структура и свойства соединений в значительной степени зависят от основных параметров сварки взрывом, которые классифицируют на кинематические (скорость движения точки контакта V_k , угол соударения γ , скорость метания пластины V_0) и физические (давление, длительность соударения, температура соударения). Основные параметры определяют начальные (технологические) параметры процесса:

- скорость детонации D , характеризующую заряд взрывчатого вещества (ВВ);

- безразмерный параметр r – это отношение массы заряда ВВ ($m_{ВВ}$) к массе метаемой пластины ($m_{пл}$); при равенстве площадей заряда к пластине.

Расчет безразмерного показателя осуществляется по формуле [18].

$$r = \frac{m_{ВВ}}{m_{пл}} = \frac{\delta_0 \cdot \rho_0}{\delta_1 \cdot \rho_1}, \quad (1)$$

где δ_0, δ_1 – толщина взрывчатого вещества и метаемой пластины, мм;

ρ_0, ρ_1 – плотность взрывчатого вещества и метаемой пластины, кг/м³.

Скорость движения точки контакта V_k (первый кинетический параметр) характеризует скорость распространения зоны высокого давления по свариваемым поверхностям. При начальном параллельном расположении пластин скорость движения точки контакта равна скорости детонации [18]:

$$V_k = D, \quad (2)$$

где V_k – скорость движения точки контакта, м/с;

D – скорость детонации, м/с.

Угол соударения является, является вторым кинематическим параметром. Для его определения вводят третий кинематический параметр – скорость метания пластины V_0 , который определяется по формуле [18]:

$$V_0 = 1,2 \cdot D \cdot \frac{\sqrt{1+(32/27) \cdot r-1}}{\sqrt{1+(32/27) \cdot r+1}}, \quad (3)$$

где 1,2 – коэффициент, позволяющий получить совпадение экспериментальных и расчетных значений скоростей с точностью порядка 20 %.

В процессе сварки взрывом по плоскопараллельной схеме после соударения метаемой пластины с неподвижной двухслойный пакет имеет возможность продолжать движение со скоростью пакета V_n , определяемой из закона сохранения количества движения по формуле [18]:

$$V_n = \sqrt{\frac{m_1 \cdot V_1^2}{m_1 + m_2}}, \quad (4)$$

где m_1 , m_2 – масса первой и второй метаемых пластин, кг.

Под действием продуктов детонации пластина, первоначально установленная под углом α , поворачивается на угол β , а угол соударения, который складывается из двух рассмотренных углов $\gamma = \alpha + \beta$, определяется по формуле [18]:

$$\gamma = 2 \arcsin \frac{V_0}{2 \cdot D}. \quad (5)$$

Для обеспечения соединения при сварке взрывом необходимо соблюдать условие, приведенное в формуле [18]:

$$V_k < c_0, \quad (6)$$

где c_0 – скорость звука в соединяемых металлах, м/с.

Скорость звука в соединяемых металлах рассчитывается по формуле [18]:

$$c_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (7)$$

где E – модуль Юнга материала, МПа;

ρ – плотность материала, кг/м³.

В случае, если скорость звука в металлах меньше, чем скорость точки контакта, пластическая деформация на поверхностях металлов, необходимая для

их соединения, не успевает развиваться, что приводит к появлению трещин в металле.

3.3 Результаты расчета параметров сварки взрывом

Расчет будет осуществляться для трехслойного композиционного материала системы 12X18H10T-M1 с геометрическими параметрами пластин 300×480 мм, а толщина каждого слоя составляет 2 мм.

Первый и третий слой композиционного материала представляют собой пластины из стали 12X18H10T; второй – из меди М1.

Исходные данные по слоям композита приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Исходные данные по слоям получаемого материала

Параметры	Слой	Материал	Плотность ρ , кг/м ³	Толщина пластины δ , мм
Значения	1,3	12X18H10T	7920,0	2,0
	2	М1	8940,0	2,0

Схема расположения для сварки, а также установочных элементов показана на рисунке 17 [19].

Подложка – это катаные полуфабрикаты листового сортамента из конструкционной стали 09Г2С, имеющей плотность 7850 кг/м³.

В качестве взрывчатого вещества был выбран игданит (смесь гранулированной аммиачной селитры и дизельного топлива) плотностью 740 кг/м³ и высотой 35 мм. Скорость точки контакта, равная скорости детонации, при выбранных параметрах взрывчатого вещества составила 2040 м/с.

Разгон пакета пластин после каждого акта соударения происходит в две стадии:

- начальная, в течение которой происходит передача импульса от метаемой пластины к неподвижной. В ее пределах скорость полета за сравнительно малый

промежуток времени возрастает от нуля до некоторого значения, которое рассчитывается из закона сохранения импульса;

-конечная, в пределах которой ускорение пакета сваренных пластин обусловлено только действием остаточного давления продуктов детонации.

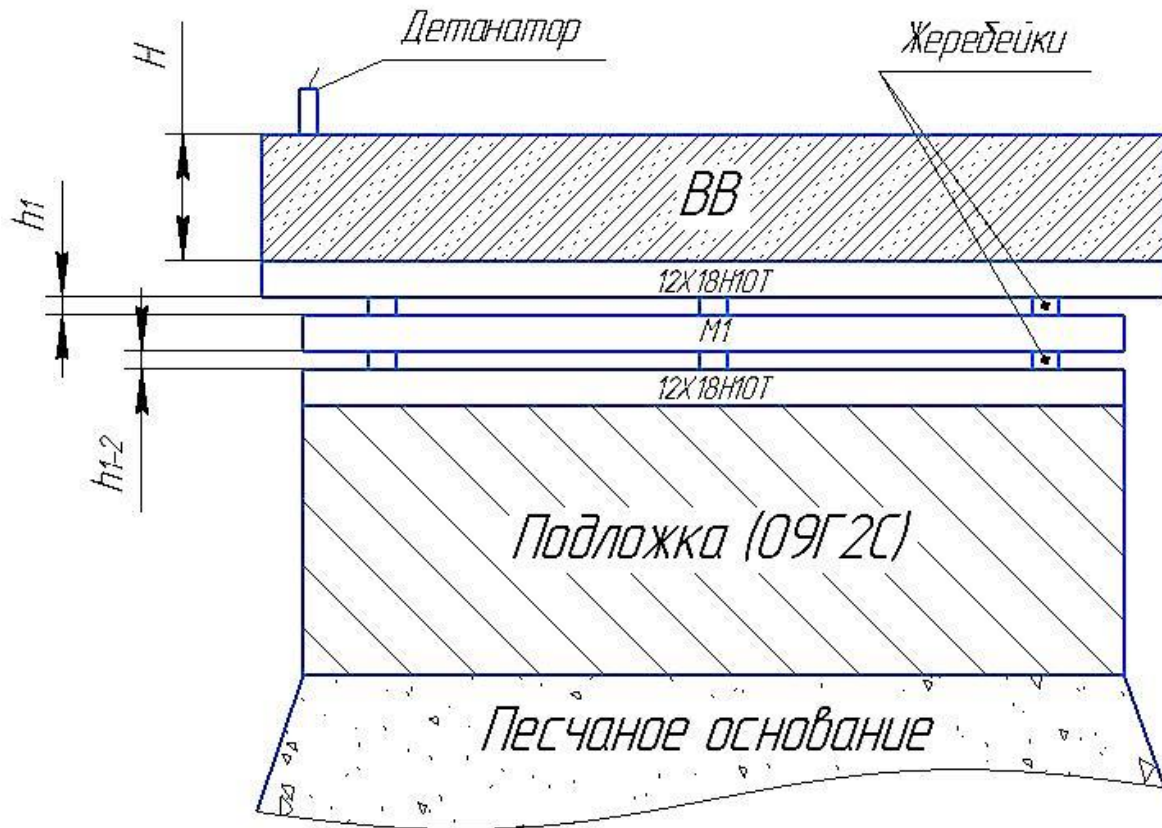


Рисунок 17 – Схема расположения свариваемых листов и вспомогательных установочных элементов: H – высота заряда ВВ, h_1 – зазор между первой и второй пластинами, h_{1-2} – зазор между второй и третьей пластинами.

Расчет основных кинетических показателей:

$$r = \frac{0,035 \cdot 740}{0,002 \cdot 7920} = 1,64,$$

$$V_k = 2040 \text{ м/с},$$

$$V_1 = 1,2 \cdot 2040 \cdot \frac{\sqrt{1 + (32/27) \cdot 1,64 - 1}}{\sqrt{1 + (32/27) \cdot 1,64 + 1}} = 645,2 \text{ м/с},$$

$$\gamma = 2 \arcsin \frac{645,2}{2 \cdot 2040} = 18,42^\circ.$$

Для расчета скорости пакета необходимо найти массу пластин:

$$m_1 = 7920 \cdot 0,74 \cdot 0,002 = 11,72 \text{ кг},$$

$$m_2 = 8940 \cdot 0,74 \cdot 0,002 = 13,23 \text{ кг},$$

$$V_{1,2} = \sqrt{\frac{11,72 \cdot 645,2^2}{11,72 + 13,23}} = 442,2 \text{ м/с},$$

$$\gamma = 2 \arcsin \frac{442,2}{2 \cdot 2040} = 12,62^\circ.$$

Скорость звука в свариваемых металлах:

$$c_0(12X18H10T) = \sqrt{\frac{1,98 \cdot 10^5}{7920}} = 5000 \text{ м/с},$$

$$c_0(M1) = \sqrt{\frac{1,28 \cdot 10^5}{8940}} = 3784 \text{ м/с}.$$

По графику граничных условий существования металлов при сварке взрывом проверяем возможность соединения рассматриваемых металлов в соответствии с полученными значениями. Полученный результат представлен на рисунке 18 [19].

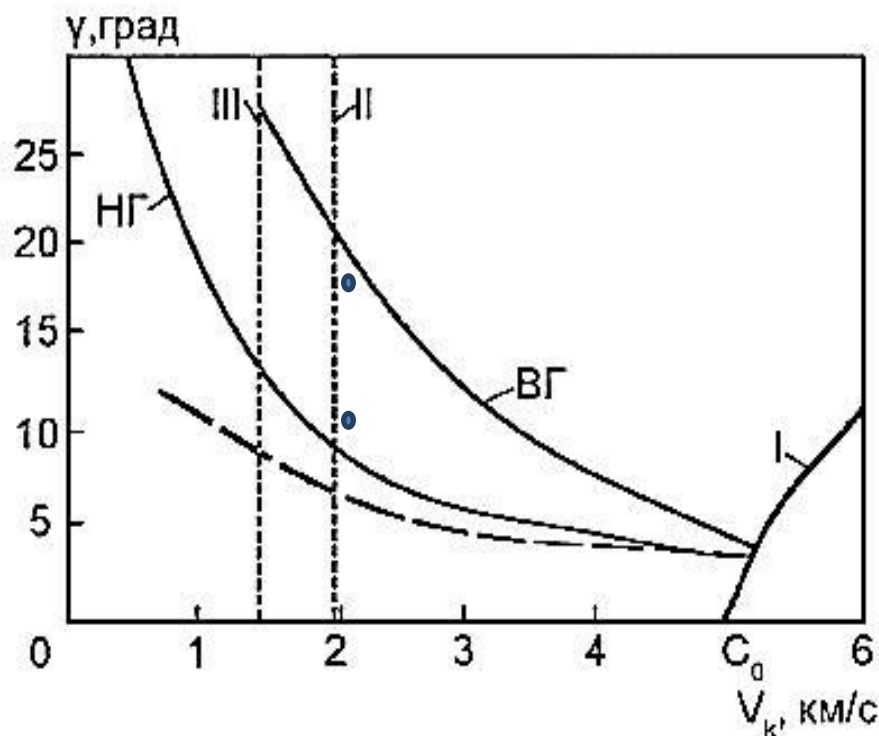


Рисунок 18 – Граничные условия существования соединения металлов при сварке взрывом: НГ – нижняя граница области сварки взрывом; ВГ – верхняя граница области сварки взрывом; 1 – кривая, ограничивающая область сверхзвуковых режимов сварки; 2 – прямая, определяющая критическую скорость движения точки контакта, при которой давление соударения

соизмеримо с теоретической прочностью металлов при сдвиге; 3 – прямая, ограничивающая область пластических деформаций; V_k – скорости точки контакта; γ – угол соударения

На графике граничных условий существования металлов при сварке взрывом видно, что соединения рассматриваемых металлов в соответствии с полученными значениями возможно.

Вывод по третьему разделу

Сварка взрывом является высоко универсальной технологией, которая может использоваться для соединения промышленных металлов практически в любом сочетании, приемлема также для соединения как для одно-, так и разнородных металлов. Сварка взрывом идеально подходит для выполнения плоскостных соединений на больших площадях между металлическими плитами или плит.

В данном разделе были рассчитаны основные параметры сварки взрывом для многослойного коррозионно-стойкого материала системы 12X18H10T-M1, толщина которого составляет 6 мм: $V_k=2040$ м/с, $V_1 = 645,2$ м/с, $\gamma=18,42^\circ$, $V_{1,2}=442,2$ м/с, $\gamma=12,62^\circ$.

4 Исследование влияния ударно-волнового нагружения на композиционный материал 12X18H10T-M1

4.1 Исследование влияния ударно - волнового нагружения на структуру композиционного материала 12X18H10T-M1, полученного сваркой взрывом

Полученные сваркой взрывом многослойные композиты имеют различную форму сварного шва, которая зависит от технологических параметров.

Существует три вида соединений по геометрии сварного шва. Первый тип характеризуется прямой или слабо синусоидальной линией сварного шва, области расплавления отсутствуют. Данное соединение образуется при условиях, близких к нижней границе сварки. Второй вид соединения имеет волнообразную форму. В завихрениях волн присутствуют зоны расплавления с дендритной структурой и усадочными раковинами. Такой тип является наиболее распространенным. Форма сварного шва третьего типа представляет сплошной или практически сплошной слой расплава, в котором образуются трещины, усадочные раковины значительных размеров.

На количество зон оплавления, их размер и структуру влияет также и чистота обработки свариваемых поверхностей. В случае, когда соединяемые материалы содержат элементы, которые обладают взаимной растворимостью, например, железо, никель, хром, химический состав зон оплавления является промежуточным по сравнению с составом сваренных сплавов. Если взаимная растворимость компонентов сплавов отсутствует или очень мала, например, железо, медь, то зоны оплавления содержат механическую смесь указанных компонентов.

По технологической схеме, приведенной на рисунке 17, получена опытная партия многослойного композиционного материала системы 12X18H10T-M1 толщиной 6 мм. Из полученных заготовок были вырезаны образцы в двух направлениях по отношению к распространению детонационной волны: продольном и поперечном.

На микрошлифах исследована структура межслойных границ. Исследования показали, что границы между всеми слоями в полученном материале имеют волнообразный характер.

Подобранные технологические параметры сварки взрывом позволили получить структуру без промежуточной зоны по линии соединения и с минимальным количеством участков расплавления. Полученная структура обладает значительными различиями в геометрии волн. Различия связаны с изменением параметров процесса соударения пластин при распространении ударной волны от верхней к нижней пластине. Происходит увеличение массы и снижение скорости.

Значения периода волны λ были рассчитаны по формуле [19]:

$$\lambda = 32 \cdot (\delta_1 \sin^2 \frac{\beta_1}{2} + \delta_2 \sin^2 \frac{\beta_2}{2}), \quad (8)$$

где δ_1, δ_2 – толщина метаемой и неподвижной пластины, мм;

β_1, β_2 – угол метаемой и неподвижной пластины, °.

При помощи микроскопа марки Альтами МЕТ 6С исследована микроструктура трехслойного образца системы 12Х18Н10Т-М1. Параметры волновой структуры межслойных границ приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Параметры волновой структуры межслойных границ

Параметры	Материал	Межслойная граница	Расчетное значение волны λ , мкм	Период волны λ , мкм	Удвоенная амплитуда $2A$, Мкм
Значения	12Х18Н10Т + М1 + + 12Х18Н10Т	12Х18Н10Т–М1	570,0	320,0...370,0	90,0...100,0
		М1–12Х18Н10Т	741,0	210,0...270,0	80,0...100,0

Микроструктура межслойных границ трёхслойного материала системы 12Х18Н10Т+М1 представлена на рисунке 19. Граница между наружным слоем 12Х18Н10Т и медным сплавом М1 имеет выраженный волновой характер, к гребням волн с обеих сторон примыкают зоны оплавления протяжённостью от 70 до 90 мкм и толщиной от 30 до 50 мкм.



Рисунок 19 –Граница соединения между 12X18H10T и медью М1

В них явно различимы перемешанные слои меди и нержавеющей стали. В гребнях волн отчётливо видно пластическое течение меди.

Нижняя граница между медью М1 и 12X18H10T также имеет явно выраженный волновой характер. На некоторых участках зоны оплавления сливаются в сплошную прослойку. Данное явление представлено на рисунке 20. Размер отдельных участков оплавления составляет протяжённость от 60 до 80 мкм и толщиной от 40 до 50 мкм.

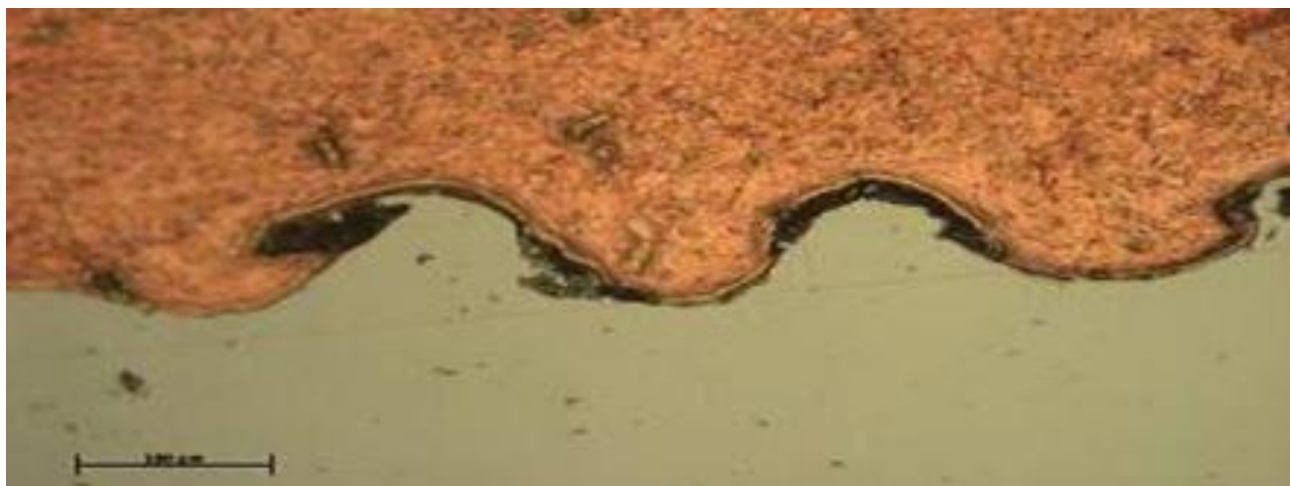


Рисунок 20 – Граница соединения между медью М1 и 12X18H10T

4.2 Исследование влияния ударно-волнового нагружения на механические свойства композиционного материала системы 12X18H10T-M1, полученного сваркой взрывом

Исследование механических свойств экспериментальных образцов композиционного металлического коррозионно-стойкого материала системы 12X18H10T-M1 после сварки взрывом проводили испытанием на одноосное растяжение (прочность на растяжение) при нормальной температуре на разрывной машине модели ИР 5145-500. Испытания проводились согласно ГОСТ 1497 – 84 (ИСО 6892 – 84, СТ СЭВ 471 – 88) [20].

Испытанию подвергали четыре серии образцов: два образца вдоль детонационной волны, два – поперек.

Для проведения испытаний на одноосное растяжение готовились образцы, согласно эскизу, представленному на рисунке 21.

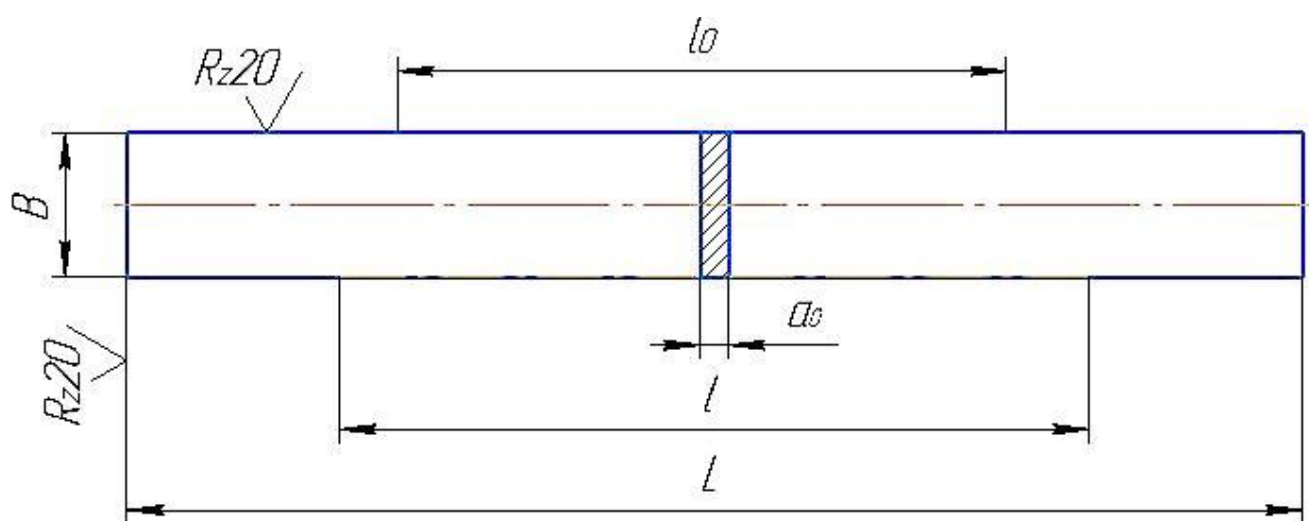


Рисунок 21 – Эскиз образцов для испытания на растяжение: B – начальная ширина образца; L – длина образца; a_0 – начальная толщина образца;

l – рабочая длина образца, l_0 – начальная расчетная длина образца

Исходные геометрические размеры образцов представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Исходные геометрические размеры полученных образцов

Параметры	Образец	Длина L, мм	Ширина В, мм	Толщина а ₀ , мм	Начальная расчетная длина образца l ₀ ,мм	Рабочая длина образца l, мм
Значения	1 р.в.	175,0	22,4	6,0	127,5	120,0
	2 р.в.					
	1 р.п.					
	2 р.п.					

На рисунке 22 представлена фотография экспериментальных образцов металлического композиционного материала до проведения испытания на одноосное растяжение.

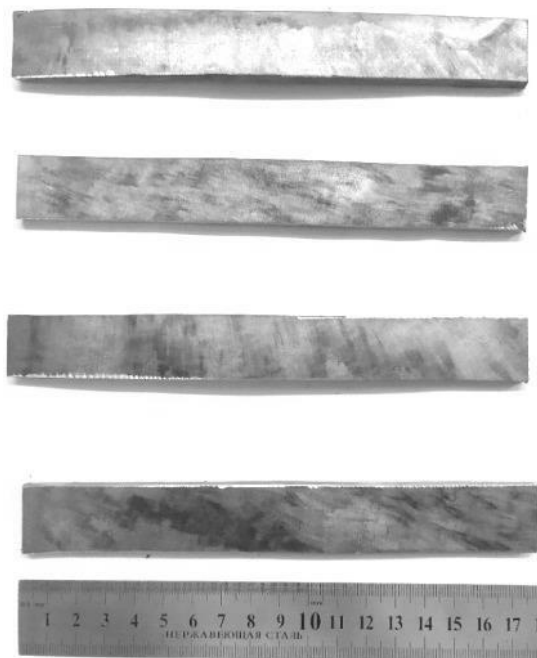


Рисунок 22 – Экспериментальные образцы композиционного металлического материала до проведения испытания

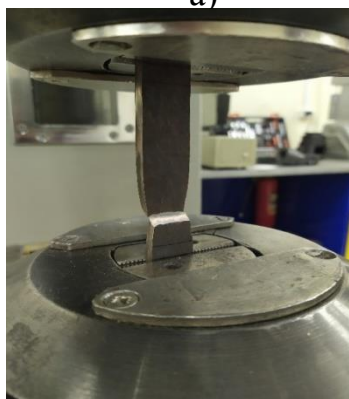
Фото процесса проведения испытаний на одноосное растяжение экспериментальных образцов металлического композиционного коррозионно-стойкого материала системы 12Х18Н10Т-М1 приведены на рисунке 23.



а)



б)



в)



г)

Рисунок 23 – Испытания на одноосное растяжение экспериментальных образцов металлического композиционного материала системы 12X18H10T-M1:

а) – исходное состояние; б) – процесс растяжения; в) – разрыв продольного образца; г) – разрыв поперечного образца

На рисунке 24 представлена фотография образцов металлического КМ после проведения испытания на одноосное растяжение.

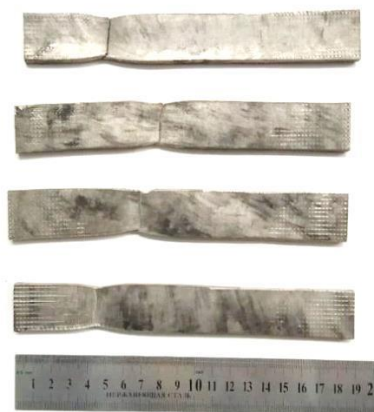


Рисунок 24 – Экспериментальные образцы композиционного металлического материала после проведения испытания

Параметры образцов после проведения испытания представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Параметры образцов после проведения испытания

Параметры	Образец	Начальная расчетная длина образца l_0 , мм	Рабочая длина образца l , мм	Ширина, мм	Минимальная толщина, мм
Значения	1 р.в.	76,0	90,0	19,3	4,1
	2 р.в.	74,0	89,0	19,7	4,2
	1 р.п.	67,0	82,0	18,9	4,5
	2 р.п.	67,0	82,0	18,4	4,4

Механические свойства композиционного материала, полученные в результате испытания, представлены в таблице 4.3

Таблица 4.3 – Механические свойства после проведения испытания

Параметры	Образец	Временное сопротивление разрыву, σ_b , МПа	Предел текучести, $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение при разрыве, δ_s , %	Сужение сечения, Ψ , %
Значения	1 р.в.	667,4	628,4	16,9	41,1
	2 р.в.	645,8	608,1	13,8	38,4
	1 р.п.	664,8	616,8	4,6	36,7
	2 р.п.	700,5	662,7	3,1	39,7

На рисунке 25 представлена диаграмма полученных экспериментальным путем значений временного сопротивления разрыву.

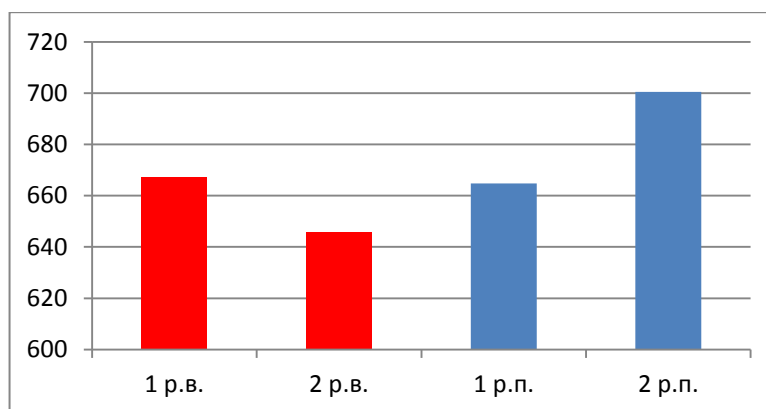


Рисунок 25 – Диаграмма экспериментальной прочности материала

На рисунке 26 приведена диаграмма растяжения одного из образцов.

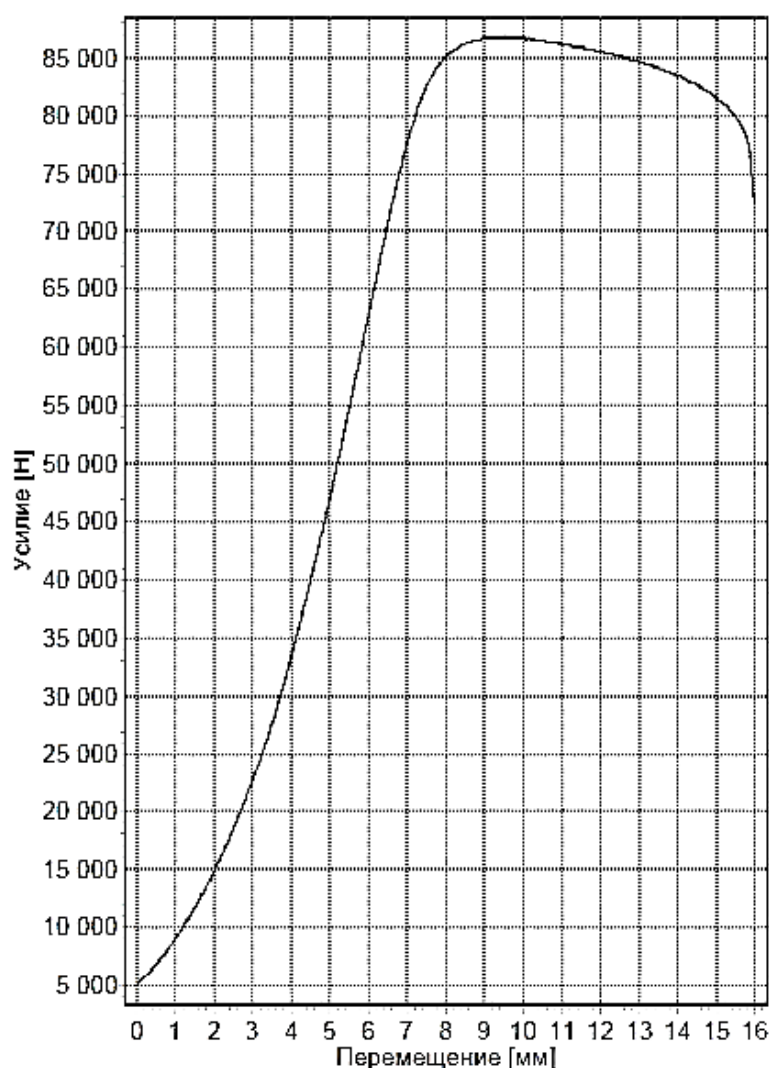


Рисунок 26 – График зависимости напряжения от относительного удлинения при одноосном растяжении образца

Результаты испытаний показывают, что для экспериментальных образцов композиционного металлического коррозионно-стойкого материала величина прочности находится в диапазоне от 645,8 до 700,5 МПа, относительное удлинение от 3,1 до 16,9 %.

Для оценки истинного значения предела прочности металлического коррозионно-стойкого композиционного материала системы 12Х18Н10Т-М1 в заданных условиях был использован расчетный и экспериментальный подход.

В процессе получения рассматриваемого композиционного материала

происходит его нагрев, и как следствие, диффузионные процессы между его слоями. Так как между слоями происходит образование диффузионных зон, композит необходимо рассматривать как трехкомпонентную систему, представленную на рисунке 27 [19].

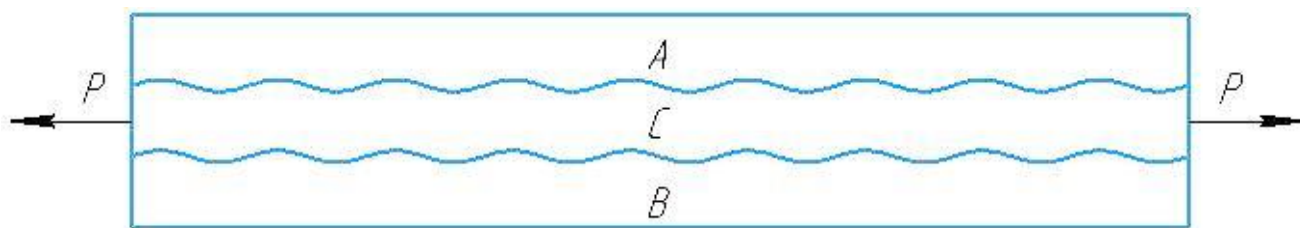


Рисунок 27 – Схема композиционного материала с диффузионной зоной (C) между составляющими (A и B)

В связи с этим расчетный предел прочности композита определяется по аддитивному уравнению [19]:

$$\sigma_k = \sigma_A V_A + \sigma_B V_B + \sigma_C V_C, \quad (9)$$

где $\sigma_A, \sigma_B, \sigma_C$ – прочность составляющих компонентов A и B и диффузионной зоны C;

V_A, V_B, V_C – объемная доля составляющих компонентов A и B и диффузионной зоны C.

Прочность холоднокатанных листов:

$$\sigma_k = 650 \cdot 0,33 + 290 \cdot 0,33 + 650 \cdot 0,33 = 524,7 \text{ МПа.}$$

Прочность в полунагартованном состоянии:

$$\sigma_k = 740 \cdot 0,33 + 290 \cdot 0,33 + 740 \cdot 0,33 = 584,1 \text{ МПа.}$$

Прочность в нагартованном состоянии:

$$\sigma_k = 900 \cdot 0,33 + 330 \cdot 0,33 + 900 \cdot 0,33 = 702,9 \text{ МПа.}$$

На рисунке 28 представлена диаграмма зависимости прочности от состояния материала.

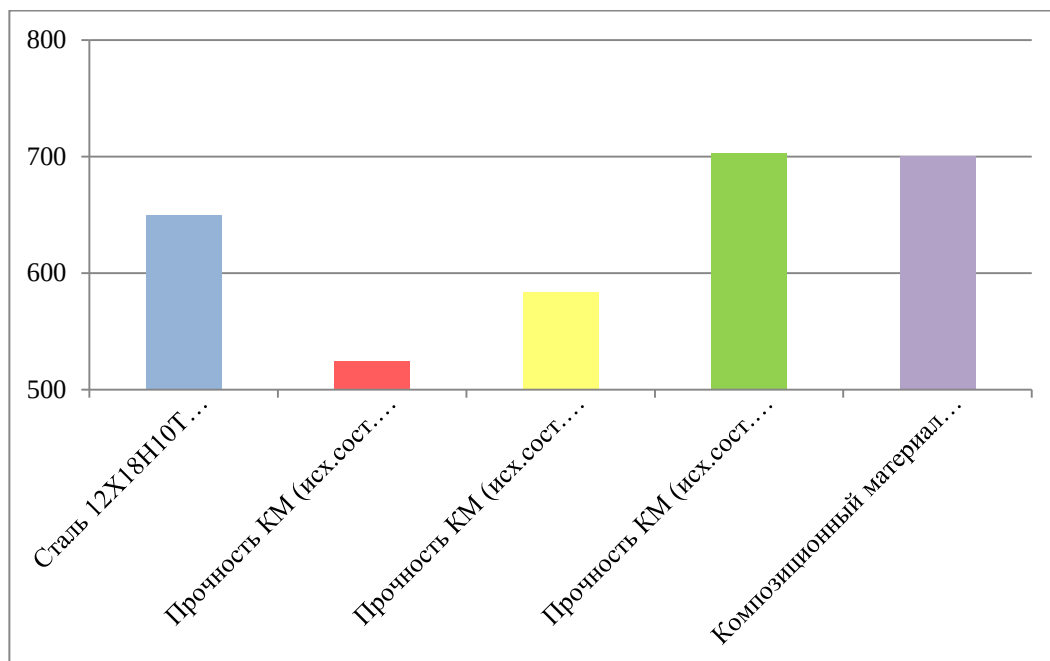


Рисунок 28 – Зависимость прочности от состояния материала

Сравнительная характеристика теоретической, расчетной и экспериментальной прочности представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Сравнительная характеристика прочности

Вид исследования	Теоретическое значение (прочность стали 12X18H10T)	Расчетное значение			Экспериментальное значение
		Исх.сост. компонентов КМ – холоднокатанное	Исх.сост. компонентов КМ – полунагартованное	Исх. сост. компонентов КМ – нагартованное	
Полученные данные, МПа	550,0...650,0	524,7	584,1	702,9	645,8...700,5

Проанализировав расчетные значения прочности и экспериментальные можно предположить, что материал в исходном состоянии находился в нагартованном состоянии.

4.3 Исследование влияния ударно-волнового нагружения на технологические свойства (статический изгиб) композиционного материала 12X18H10T-M1, полученного сваркой взрывом

Исследование технологических свойств экспериментальных образцов композиционного металлического коррозионно-стойкого материала системы 12X18H10T-M1 после сварки взрывом проводили испытанием на статический изгиб при нормальной температуре на разрывной машине универсального назначения ИР 5145-500, у которой диаметр оправки изгибающего устройства составляет 200 мм, расстояние между опорами изгибающего устройства 500 мм. Подготовка образцов и проведение испытаний осуществлялось согласно ГОСТ 14019 – 2003 (ИСО 7438:1985) [21].

Испытанию подвергали четыре серии образцов: два образца вдоль детонационной волны, два – поперек.

Исходные параметры образцов представлены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Исходные геометрические размеры полученных образцов

Параметры	Образец	Длина, мм	Ширина, мм	Толщина, мм
Значение	1 и.в.	200,0	22,4	6,0
	2 и.в.			
	1 и.п.			
	2 и.п.			

На рисунке 29 представлены фотографии экспериментальных образцов металлического композиционного материала 12X18H10T-M1-12X18H10T до проведения испытания на статический изгиб.



Рисунок 29 – Экспериментальные образцы композиционного металлического материала до проведения испытаний на статический изгиб

Фото процесса проведения испытаний на статический изгиб экспериментальных образцов композиционного металлического коррозионно-стойкого материала системы 12X18H10T-M1 приведены на рисунке 30.



а)



б)



в)

Рисунок 30 – Испытания на статический изгиб экспериментальных образцов:
а) – исходное состояние; б) – изгиб до угла больше 130° в) – изгиб до заданного угла

На рисунке 31 представлены фотографии экспериментальных образцов металлического композиционного материала 12X18H10T-M1-12X18H10T после проведения испытания на статический изгиб.



а)



б)

Рисунок 31 – Экспериментальные образцы металлического композиционного материала после проведения испытания на статический изгиб:

а) – после проведения испытаний на статический изгиб до достижения заданного угла изгиба при действии усилия; б) – до соприкосновения сторон образца

Параметры образцов после проведения испытания представлены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Параметры образцов после проведения испытания

Параметры	Образец	Скорость испытания, мм/ мин	Минимальный угол изгиба при толщине не более 20 мм (ГОСТ 34347-2017), °	Статический изгиб до достижения заданного угла, °	До параллельности сторон, °	До соприкосновения сторон, °
Значение	1 и.в.	10,0	100,0	130,0	+	+
	2 и.в.	15,0		130,0	+	+
	1 и.п.			126,0	+	+
	2 и.п.			119,0	145,0	-

На рисунке 32 приведена диаграмма растяжения одного из образцов.



Рисунок 32 – График зависимости напряжения от относительного удлинения при статическом изгибе образца

Все образцы выдержали испытание на изгиб до достижения заданного угла (рисунок 31, а). Трещин, видимых невооруженным взглядом, не обнаружено. При проведении испытания поведение образца 2 и.п. было отлично от других – происходило выгибание в другую сторону.

Испытания на изгиб до параллельности выдержали все образцы, на образце 2 и.п. произошло образование трещины.

Испытания на изгиб до соприкосновения сторон выдержали все образцы, испытание было проведено до появления первых трещин.

Вывод по четвертому разделу

Исследования микроструктуры показали, что граница соединения материала имеет волнообразную форму. Рассчитаны параметры волновой структуры межслойных границ, которые составили 570 мкм и 741 мкм.

В результате испытания на одноосное растяжение проведена оценка механических свойств: прочность образцов вдоль детонационной волны: от 645,8 до 667,4 МПа, поперек – от 664, 8 до 700,5 МПа; относительное удлинение вдоль волны от 13,8 до 16,9 %, поперек – от 3,1 до 4,6 %; сужение сечения вдоль волны от 38,4 % до 41,1 %, поперек от 36,7 до 39,8 %, предел текучести вдоль волны от 608,1 до 628,4 МПа, поперек – от 616,8 до 662,7 МПа. Испытание на статический изгиб прошли все образцы.

Заключение

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы проведен анализ металлического коррозионно-стойкого композиционного материала системы 12X18H10T-M1.

В работе отражена актуальность технологии сварки взрывом для разнородных материалов.

Произведен патентный поиск в области аустенитных, биметаллических и многослойных коррозионно-стойких материалов.

Изучены исходные материалы, из которых бы создан композит, изучены их свойства и области применения.

Проанализированы технологические схемы получения композиционных металлических материалов сваркой взрывом. Выявлены преимущества и недостатки рассмотренных схемных решений. 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.

Выявлены оптимальные параметры сварки взрывом: $V_1 = 645,2$ м/с, $\gamma = 18,42^\circ$, $V_{1,2} = 442,2$ м/с, $\gamma = 12,62^\circ$.

Проведены исследования микроструктуры композитов, испытания на одноосное растяжение и статический изгиб. Исследования микроструктуры выявили сильное волнообразование. Установлены параметры волновой структуры межслойных границ: $\lambda_{12X18H10T-M1} = 570$ мкм, $\lambda_{M1-12X18H10T} = 741$ мкм.

Исследования механических свойств образцов композиционного материала установили, что в ходе сварки взрывом композиты получают значительный наклеп, приводящий к упрочнению.

Прочность композиционного материала вдоль волны составляет 657 МПа, поперек – 683 МПа; пластичность: удлинение вдоль волны 15%, поперек – 4 %; сужение сечения вдоль волны 40 %, поперек – 38 %. Испытание на статический изгиб прошли все образцы.

Все поставленные цели и задачи были выполнены.

Список использованных источников

1 Лим, Е. В. Принципы создания новых материалов с позиции материаловедения и технологического развития [Текст] / Е. В. Лим, В. В. Самойленко, Д. С. Шарапкин // XVI международная научно-техническая Уральская школа-семинар металловедов-молодых ученых. Екатеринбург, 7–11 декабря 2015: сборник научных трудов. – Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2015.–Ч. 2.–С. 284–286.

2 Галинская, О.О. Проектирование элементов конструкций ракетных комплексов из композиционных материалов [Текст]: учеб. пособие / О.О. Галинская – СПб: Балт. гос. техн. ун-т, 2014–95 с.

3 Коррозия и защита металлов от коррозии [Текст]: учеб. пособие для студентов технических специальностей / Ю. П. Перелыгин [и др.] – 2-е изд., доп. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2015–88 с.

4 Иванов М.М. Использование композитов для защиты от коррозионного воздействия [Текст] / М.М. Иванов // VI всероссийской науч. – практ. конф. молодых ученых. – Уфа. : Башкирский ГАУ, 2014. – С. 202-207.

5 Ковтунов, А.И. Слоистые композиционные материалы [Текст]: электронное учебное пособие / А.И. Ковтунов, С.В. Мямин, Т.В. Семистенова. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2017.

6 Батаев, А.А. Композиционные материалы: строение, получение, применение [Текст]: учебное пособие / А.А. Батаев, В.А. Батаев. - Новосибирск: Изд-во «НГТУ», 2002.–384 с.

7 Аустенитная нержавеющая сталь и способ получения материала из аустенитной нержавеющей стали [Электронный ресурс]: пат. 2618021 Рос. Федерация: МПК С22С 38/58/ Уеяма, Масаки; заявитель и патентообладатель Ниппон стил энд метал корпорейшн. – № 2015152343; заявл. 20.06.2012; опубл. 02.05.2017, Бюл. № 13 – 5 с. [сайт]: URL: <https://www1.fips.ru/> (дата обращения: 17.04.2022).

8 Высокопрочные коррозионно-устойчивые аустенитные сплавы [Электронный ресурс]: пат. 2731395 Рос. Федерация: МПК C22C 38/58, C22C 30/00 / Форбз Джоунс, Робин М, Эванс [и др]; заявитель и патентообладатель ЭйТиАй Пропертиз ЭлЭлСи. - № 2017110659; заявл. 28.11.2012; опубл. 02.09.2020, Бюл. № 25–14 с. [сайт]: URL: <https://www1.fips.ru/> (дата обращения: 17.04.2022).

9 Плакированная коррозионностойкая сталь и изделие, выполненные из нее [Электронный ресурс]: пат. 22257393 Рос. Федерация: МПК B32B 15/18, C22C 38/18, C22C 38/34/ Голованов А.В., Скорохватов Н.Б., Глухов В.В., [и др]; заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество «Северсталь», Закрытое акционерное общество «Институт биметаллических сплавов» – № 2002111391/02; заявл. 29.04.2002; опубл. 20.03.2004 , Бюл. № 8–9 с. [сайт]: URL: <https://www1.fips.ru/> (дата обращения: 17.04.2022).

10 Плакированная высокопрочная коррозионно-стойкая сталь [Электронный ресурс]: пат. 2627080 Рос. Федерация: МПК C22C 38/38, C22C 38/32, B32B 15/18, B32B 15/01/ Зайцев А.И., Карамашева Н.А., Павлов А.А. [и др.]; заявитель и патентообладатель Федеральное Государственное Унитарное Предприятие "Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина" (ФГУП "ЦНИИЧермет им. И.П. Бардина") – № 2016125666; заявл. 28.06.2016; опубл. 03.08.2017 , Бюл. № 22–6 с. [сайт]: URL: <https://www1.fips.ru/> (дата обращения: 17.04.2022).

11 Многослойный материал повышенной коррозионной стойкости (варианты) и способы его получения [Электронный ресурс]: евразийский пат. 016878 ЕАПВ: МПК C23F 13/06, B32B 7/02/ Розен А. Е., Лось И. С., Перелыгин Ю. П. и др.]; заявитель и патентообладатель Розен А.Е. - № 016878 ЕАПВ; заявл. 29.06.2008; опубл. 13.10.2011 [сайт]: URL: <https://www1.fips.ru/elektronnye-servisy/internet-resursy/zarubezhnye-bd.php> / (дата обращения: 17.04.2022).

12 Легированные нержавеющие стали и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки [Текст]: ГОСТ 5632 – 2014. – Введ. 2015-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 2014–52 с.: ил.

13 Прикладное материаловедение: Металлы и сплавы [Текст]: учебное пособие / Э. И. Денисова, В. В. Карташов, В. Н. Рычков. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018/ – 216 с.

14 Медь [Текст]: ГОСТ 859 – 2014. – Введ. 2015-07-01. – М.: Изд-во стандартов, 2001–8 с.

15 Логинов, Ю.Н. Медь и деформируемые медные сплавы [Текст]: учебное пособие / Ю.Н.Логинов – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. – 136 с.

16 Лякишев, Н.П. Диаграммы состояния двойных металлических систем [Текст]: справочник: в 3 т. / Н.П. Лякишев [и др.] – М.: Машиностроение, 1997. – Т. 2.–1024 с.

17 Лысак, В.И. Сварка взрывом [Текст]: монография / В.И. Лысак, С.В. Кузьмин. – М.: Машиностроение, 2005.–543 с.

18 Конон, Ю.А. Сварка взрывом [Текст]: учеб. для вузов / Ю.А. Конон, Л.Б. Первухин, А.Д. Чудновский – М.: Машиностроение, 1987.–216 с.

19 Кудинов, В.М. Сварка взрывом [Текст]: учебник / В.М. Кудинов [и др.]. – М.: Металлургия, 1987.–216 с.

20 Металлы. Методы испытаний на растяжение [Текст]: ГОСТ 1497 – 84 (ИСО 6892-84, СТ СЭВ 471 – 88). Введ. 1986.01.01. – М.: Из-во стандартов, 1984–24 с.: ил.

21 Материалы металлические. Метод испытания на изгиб [Текст]: ГОСТ 14019 – 2003 (ИСО 7438:1985). Введ. 2004.09.01. – М.: Из-во стандартов, 2003–11 с.: ил.