

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Факультет

Кафедра

машиностроения 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 влияния режимов ударно-волнового нагружения на
структуру и деформируемость композиционного материала Сталь
20Х13 + Сталь 40Х13 + Сталь 65Х13 + Сталь 40Х13 + Сталь
20Х13, полученного сваркой взрывом после термической
обработки»

Студент

[Подпись] 23.06.2020
(подпись, дата)

Моисеев Андрей Сергеевич
(ф.и.о. полностью)

Научный руководитель
к.т.н., доцент

[Подпись] 23.06.2020
(подпись, дата)

Крюков Д.Б.
(фамилия, инициалы)

Нормоконтролёр
к.т.н., доцент

[Подпись] 23.06.2020
(подпись, дата)

Хорин А.В.
(фамилия, инициалы)

Работа допущена к защите (протокол заседания кафедры от 15.06.2020 № 12)

Заведующий кафедрой

[Подпись] 23.06.2020
(подпись, дата)

Розен А.Е.
(фамилия, инициалы)

Работа защищена с отметкой отлично (протокол заседания ГЭК от 26.06.2020 № 14)

Секретарь ГЭК
к.т.н., доцент

[Подпись] 28.06.2020
(подпись, дата)

Гуськов М.С.
(фамилия, инициалы)

Пенза 2020

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

«Утверждаю»

Заведующий кафедрой СЛПИМ
д.т.н., профессор _____ А.Е. Розен

подпись
«10» апреля 2020 г.

ЗАДАНИЕ
на выпускную квалификационную работу

Студенту гр. 16МТ1 Факультета машиностроения и транспорта Политехнического института ПГУ, очной формы обучения по направлению подготовки 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов»

Моисееву Андрею Сергеевичу.

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

Время выполнения ВКР: с 10.02.2020 г. по 8.07.2020 г.

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

Тема работы: «Исследование влияния режимов ударно-волнового нагружения на структуру и деформируемость композиционного материала Сталь 20Х13 + Сталь 40Х13 + Сталь 65Х13 + Сталь 40Х13 + Сталь 20Х13, полученного сваркой взрывом после термической обработки».

Тема утверждена приказом ректора ПГУ № 1477/О от 30.12.2019.

Техническое задание на работу (назначение устройства, условия применения, внешние воздействия, специальные требования и т.п.): обосновать выбор исходных материалов, выполнить литературное и патентное исследование способов получения многослойных композиционных материалов, провести исследование влияния режимов ударно-волнового нагружения на качество получаемого сваркой взрывом композиционного материала, исследовать структуру и деформируемость композиционного материала после термической обработки.

Объём и содержание основной части работы

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

- введение с обоснованием актуальности темы исследования, установления объекта и предмета, постановкой цели и задач исследования;
- обоснование выбора материалов для композита и анализ технологий его получения;

- исследовательский раздел – исследование влияния режимов ударно-волнового нагружения на качество получаемого композиционного материала, определение рациональных параметров;
- экспериментальный раздел – описание результатов исследования микроструктуры и деформируемости композиционного материала после сварки взрывом и после отжига;
- заключение – выводы и обоснования по теме работы и полученным результатам.

Презентация бакалаврской работы (перечень и содержание плакатов)

- тема ВКР 1л А4;
- цели и задачи выпускной работы 1л А4;
- обоснование выбора исходных материалов для получения композиционного металлического материала заданного состава 1л А4;
- анализ основных способов производства композиционных материалов 2л А4;
- схема получения исследуемого композиционного материала 1л А4;
- режимы ударно-волнового нагружения 1л А4;
- образцы композитов, полученные сваркой взрывом 1л А4;
- оборудование для проведения исследований 1л А4;
- исследование микроструктуры композиционного материала после отжига 3л А4;
- исследование деформируемости на образцах композиционного материала 1л А4;
- результаты испытаний на деформируемость после сварки взрывом 1л А4;
- результаты испытаний на деформируемость после отжига 1л А4;
- внешний вид образцов после испытаний на деформируемость 1л А4;
- основные выводы 1л А4.

Рекомендуемая литература:

1. Карпинос, Д.М. Новые композиционные материалы [Текст]: учеб. пособие / Л.И. Тучинский, Л.Р. Вишняков. – Киев: Высшая школа, 1977. – 312 с.
2. Ковтунов, А.И. Слоистые композиционные материалы [Текст]: учеб. пособие / А.И. Ковтунов. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2017. – 75 с.
3. Васильева, В.В. Композиционные материалы [Текст]: справочник / Под. ред. В.В. Васильева, Ю.М. Тарнопольского. – М.: Машиностроение, 1990. – 512 с.

Дата выдачи задания: 10.02.2020 г.

Руководитель ВКР:

к.т.н, доцент

Задание к исполнению принял студент

гр. 16МТ1

10 февраля 2020 г.

Выпускную квалификационную работу к защите допустить

Декан факультета машиностроения и транспорта

Политехнического института ПГУ

ОПОП освоена в полном объеме,
К государственной итоговой
аттестации допустить

 Д.Б. Крюков

 А.С. Моисеев

_____ С.Ю. Киреев

ФГБОУ ВО «ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ФАКУЛЬТЕТ МАШИНОСТРОЕНИЯ И ТРАНСПОРТА
Кафедра «Сварочное, литейное производство и материаловедение»

«Утверждаю»
Руководитель ВКР
к.т.н., доцент *Д.Б. Крюков*
подпись
«10» февраля 2020 г.

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН
на выпускную квалификационную работу
Студента гр. 16MT1 Факультета машиностроения и транспорта Политехнического института ПГУ, очной формы обучения по направлению подготовки 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов»

Моисеева Андрея Сергеевича

Тема работы: Исследование влияния режимов ударно-волнового нагружения на структуру и деформируемость композиционного материала Сталь 20Х13 + Сталь 40Х13 + Сталь 65Х13 + Сталь 40Х13 + Сталь 20Х13, полученного сваркой взрывом после термической обработки.

Наименование этапа работы	Срок исполнения		Отметка о выполнении
	начало	окончание	
1 Получение задания, его уяснение, беседа с руководителем. Подготовка к выполнению ВКР.	10.02.20	13.02.20	<i>Д.Б. Крюков</i>
2 Подбор и изучение рекомендованной литературы.	14.02.20	29.02.20	<i>Д.Б. Крюков</i>
3 Изучение объекта исследования, постановка цели и задачи работы. Написание введения.	01.03.20	07.03.20	<i>Д.Б. Крюков</i>
4 Обоснование выбранных материалов для получения нужной композиции. Литературный и патентный поиск по технологиям получения нужной композиции. Написание первого раздела работы.	07.02.20	16.03.20	<i>Д.Б. Крюков</i>
5 Обоснование выбора технологии получения многослойного металлического композита из выбранных материалов. Исследование режимов ударно-волнового нагружения, выбор рациональных параметров нагружения. Написание второго раздела работы.	17.03.20	31.03.20	<i>Д.Б. Крюков</i>

6 Экспериментальный раздел – проведение исследований микроструктуры композиционного металлического материала. Проведение исследований деформируемости после сварки взрывом и после отжига на экспериментальных образцах композиционного металлического материала. Написание третьего раздела.	01.04.20	21.04.20	ПК
7 Завершение оформления пояснительной записки, схем и рисунков.	22.04.20	27.05.20	ПК
8 Представление завершённой ВКР нормоконтролеру	28.05.20	05.06.20	ПК
9 Представление ВКР руководителю на просмотр и проверку на плагиат.	05.06.20	14.06.20	ПК
10 Предварительная защита ВКР	08.06.20	12.06.20	ПК
11 Полное завершение всех работ и представление зав. кафедрой на подпись пояснительной записки (совместно с графической частью, протоколом проверки на плагиат и отзывом руководителя)	15.06.20	21.06.20	ПК
12 Защита выпускной квалификационной работы	22.06.20	08.07.20	ПК

Прохождение каждого этапа подготовки ВКР подтверждается подписью руководителя.

Студент учебной группы 16MT1



А.С. Моисеев

"10" февраля 2019 г.

**ОТЗЫВ
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ
РАБОТУ СТУДЕНТА**

Моисеева Андрея Сергеевича

Тема работы:

"Исследование влияния режимов ударно-волнового нагружения на структуру и деформируемость композиционного материала Сталь 20Х13 + Сталь 40Х13 + Сталь 65Х13 + Сталь 40Х13 + Сталь 20Х13, полученного сваркой взрывом после термической обработки"

Выпускная квалификационная работа Моисеева А.С. состоит из расчетно-пояснительной записки и содержит 73 страницы, 25 рисунков, 13 таблиц, 56 источников, 1 приложение. Выпускная квалификационная работа Моисеева А.С. выполнена в соответствии с заданием. Пояснительная записка содержит следующие разделы: аннотацию; литературно-патентный обзор; теоретическую часть; экспериментальную часть; заключение.

Во время подготовки выпускной квалификационной работы Моисеев А.С. проводил свою работу в соответствии с календарным графиком, проявил творческую самостоятельность и высокие научно-технические знания, зарекомендовал себя с положительной стороны. Работа проводилась планомерно, в требуемом объеме, возникающие по работе замечания исправлялись в срок.

При работе над теоретической и экспериментальной частями работы Моисеев А.С. зарекомендовал себя как будущий специалист в области материаловедения, обладающий высокой квалификацией и профессиональными навыками работы с научно-исследовательским оборудованием, умеющий на высоком качественном уровне самостоятельно решать сложные технологические задачи в области материаловедения, использовать техническую и нормативную документацию.

Считаю, что Моисеев А.С. заслуживает присвоения квалификации бакалавра по направлению подготовки 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов», по профилю «Материаловедение и технологии новых материалов».

Руководитель ВКР

к.т.н., доцент каф. "Сварочное, литейное
производство и материаловедение" ПГУ

 Крюков Д.Б.

Ректору Пензенского
государственного университета
А.Д. Гулякову
студента 4 курса Факультета
машиностроения и транспорта

ЗАЯВЛЕНИЕ

Я, Моисеев Андрей Сергеевич,
студент 4 курса ФМТ 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 влияния ударно-волнового нагружения
на структуру и деформируемость композиционного
материала Сталь 20Х13 + Сталь 40Х13 + Сталь 65Х13 +
Сталь 40Х13 + Сталь 20Х13, полученная сваркой взрывом
после термической обработки,
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.

18.06.2020г.

ВКР представлена на проверку 18.06.2020г.

Руководитель ВКР

Крыков Д.В.

Протокол

проверки на оригинальность в системе «Антиплагиат.ВУЗ» выпускной квалификационной работы на тему «Исследование влияния режимов ударно-волнового нагружения на структуру и деформируемость композиционного материала Сталь 20Х13 + Сталь 40Х13 + Сталь 65Х13 + Сталь 40Х13 + Сталь 20Х13, полученного сваркой взрывом после термической обработки».

студента 4 курса Монсеева Андрея Сергеевича

110 佛學叢刊

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

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

Результат проверки на плагиат бакалаврской работы Моисеева Андрея Сергеевича составляет 52 % оригинальности, что соответствует существующим требованиям стандарта СТО ПГУ 3.12-2018. Выпускная квалификационная работа может быть рекомендована к защите.

СКРИНШОТ

отчета о проверке

Отчет о проверке на заимствования №1



Author Manuscript Accepted Manuscript

Проектное задание: Анализ рынка образовательных технологий / ИО: 254

Организация: Пензенский Государственный Университет

ИНФОРМАЦИЯ О ДОКУМЕНТЕ

ИНФОРМАЦИЯ ОБ ОТЧЕТЕ

[illegible]

© 2004 Blackwell Publishing Ltd
Journal of Internal Medicine 255: 101–107

© 2004 Blackwell Publishing Ltd
Journal of Internal Medicine 255: 349–358

5288

Крыков Д.Б.
(И.Ф. Фамилия руководителя ВКР)

Аннотация

Выпускная квалификационная работа содержит 70 с., 34 рис., 13 табл., 58 использованных источников, 1 прил.

КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, СВАРКА ВЗРЫВОМ, МИКРОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ, СТЕПЕНЬ ДЕФОРМАЦИИ, ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Объектом исследования является металлический композиционный материал системы 20Х13 + 40Х13 + 65Х13 + 40Х13 + 20Х13.

Предметом исследования является микроструктурный анализ и механические свойства (деформируемость, микроструктура).

Целью работы является исследование влияния режимов ударно-волнового нагружения на структуру и деформируемость композиционного материала Сталь 20Х13 + Сталь 40Х13 + Сталь 65Х13 + Сталь 40Х13 + Сталь 20Х13, полученного сваркой взрывом после термической обработки.

Методы исследования – исследование механических свойств (определение режимов ударно-волнового нагружения на материал, испытание на статический изгиб), микроструктурный анализ.

Полученные результаты – влияния режимов ударно-волнового нагружения на структуру и деформируемость композиционного материала.

Степень внедрения – частичная.

Область применения – работа выполнена в рамках НИОКР «Композитный режущий инструмент» конкурс СТАРТ–2017 Фонда поддержки малых форм предприятий в научно-технической сфере (проект номер 39147 «Композитный режущий инструмент от 28.02.2018»).

					<i>ПГУ.ВКР.22.03.01.16МТ114.ПЗ</i>		
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			
Разраб.		Моисеев А.С.			Исследование влияния режимов ударно-волнового нагружения на структуру и деформируемость композиционного материала Сталь 20Х13 + Сталь 40Х13 + Сталь 65Х13 + Сталь 40Х13 + Сталь 20Х13, полученного сваркой взрывом после термической обработки	Лит.	Лист
Проб.		Крюков Д.Б.					Листов
							2
							70
						Каф. «СПиМ», гр. 16МТ1	
Н. Контр.		Харин А.В.					
Утверд.		Розен А.Е.					

Содержание

Введение.....	5
1 Анализ состояния предметной области.....	6
1.1 Постановка цели и задачи.....	6
1.2 Обоснование выбора исходных материалов для создания компози-	
онного многослойного металлического материала.....	6
1.3 Классификация методов получения многослойных металлически ко-	
мпозиционных материалов.....	11
1.3.1 Литейное плакирование.....	12
1.3.2 Магнитно-импульсная сварка.....	17
1.3.3 Получение металлических композиционных материалов ме-	
тодом горячей пакетной прокатки.....	19
1.3.4 Сварка взрывом.....	21
1.4 Патентное исследование.....	26
Вывод по первой главе.....	33
2 Теоретическая часть.....	34
2.1 Выбор технологических параметров и схемы процесса ударно-вол-	
нового нагружения для получения сваркой взрывом многослойного компози-	
ционного металлического материала.....	34
2.2 Исследование технологических схем получения сваркой взрывом	
композиционных металлических материалов для изготовления композитного	
режущего инструмента.....	37
2.3 Выбор технологических параметров и схемы процесса ударно-вол-	
нового нагружения для получения сваркой взрывом многослойного компози-	
ционного металлического материала.....	42
2.4 Изготовление экспериментальных образцов композиционного мет-	
аллического материала, полученного сваркой взрывом.....	44
Вывод по второй главе.....	46

3 Проведение исследований микроструктуры и деформируемости на экспериментальных образцах композиционного металлического материала после отжига.....	47
3.1 Проведение отжига на экспериментальных образцах композиционного металлического материала.....	47
3.2 Проведение исследований микроструктуры на экспериментальных образцах композиционного металлического материала.....	48
3.3 Проведение исследований деформируемости на экспериментальных образцах композиционного металлического материала.....	57
Выводы по третьей главе.....	61
Заключение.....	62
Список использованных источников.....	64
Приложение А.....	71

Введение

Основным классом материалов, удовлетворяющих строгим, зачастую противоречащим друг другу требованиям, как предоставление наилучших физико-механических, технологических, коррозионных, эксплуатационных свойств, влияющих на работу в тяжелых условиях нагружения, в том числе при повышенных температурах и в агрессивных средах, являются композиционные материалы [1].

Композиционные материалы – многокомпонентные материалы, состоящие, как правило, из пластичной основы (матрицы), армированной наполнителями, обладающими значительной прочностью, жесткостью, твердостью и так далее. Сочетание разнородных веществ приводит к формированию нового материала, свойства которого количественно и качественно отличаются от свойств любого из его составляющих, что обеспечивает ему уникальные свойства [2].

Композиционные материалы имеют комплекс свойств отличных от классических конструкционных материалов и в совокупности раскрывающих большие возможности, как с целью усовершенствования существующих конструкций самого разного назначения, так и с целью разработки новых конструкций и технологических процессов.

Сочетая объемное содержание компонентов композиционного материала, возможно получение композиционных материалов с требуемыми значениями прочности, твердости, жаропрочности, модуля упругости, износостойкости, абразивной стойкости, а кроме того создание композиции с необходимыми магнитными, диэлектрическими, радиопоглощающими и иными особыми свойствами [3].

1 Анализ состояния предметной области

1.1 Постановка цели и задачи

Целью данной работы является исследование влияния режимов ударно-волнового нагружения на структуру и деформируемость многослойного композиционного материала системы 20X13 + 40X13 + 65X13 + 40X13 + 20X13, полученного сваркой взрывом после термической обработки.

Достижение указанной цели осуществлялось путем решения следующих основных задач:

- обосновать выбор исходных материалов для получения металлического композиционного материала;
- провести обзор методов получения композиционных металлических материалов и обосновать выбор способа получения заданного композиционного материала;
- провести исследование влияния режимов ударно-волнового нагружения на качество получаемого сваркой взрывом композиционного материала;
- исследовать структуру и деформируемость композиционного материала после термической обработки.

Данная выпускная квалификационная работа выполнялась в рамках НИ-ОКР «Композитный режущий инструмент» конкурс СТАРТ–2017 Фонда поддержки малых форм предприятий в научно-технической сфере (проект номер 39147 «Композитный режущий инструмент от 28.02.2018»).

1.2 Обоснование выбора исходных материалов для создания композиционного многослойного металлического материала

Анализ свойств исходных материалов при создании композиционных металлических материалов позволил провести выбор конкретных марок материалов для разработки композитов различного типа, обеспечивающих эффект самозатачивания режущего инструмента. При резании, рубке контактирующие

поверхности инструмента и обрабатываемого материала находятся в тяжелых условиях трения и износа, происходит относительное скольжение при повышенных температурах, скоростях и нормальных контактных нагрузках, достигающих в ряде случаев твердости обрабатываемого материала. При резании для зоны контакта характерны малые габариты, достаточно высокая ювенильность, неравномерность распределения действующих напряжений и температуры, неидентичность условий на рабочих поверхностях инструмента [4].

Основными особенностями условий трения при резании, рубке, особенно в тяжелых условиях работы инструмента (обработка металлов, почвы, твердых пород и прочего) являются значительные контактные напряжения, высокая температура поверхности инструмента, например, за счет перемещения и деформирования обрабатываемого материала, возникновение чрезмерных температурных градиентов, вызывающих термические напряжения в поверхностном слое инструмента, пластическая деформация и наклеп поверхностного слоя инструмента, окисление поверхности инструмента, структурные превращения.

Таким образом, для эффективной работы режущего инструмента, повышения его надежности и срока службы является необходимым обеспечение достаточной остаточной прочности и износостойкости инструмента. В этой связи, при выборе инструментального материала для создания композита были учтены совокупность показателей механических и эксплуатационных свойств материалов его составляющих, а именно прочности и твердости, причём твердости не ниже промежутка от 55 до 64 HRC, износостойкости, коррозионной стойкости [5].

Указанным условиям соответствуют коррозионностойкие легированные стали с различным содержанием углерода и инструментальные стали, которые будут использоваться в проекте для получения композиционных материалов, для изготовления режущего инструмента, обладающего эффектом самозатачивания.

Сталь 20X13, выполняющая роль профилирующего слоя в композите, относится к ферритно-мартенситному классу, жаропрочная до 550 °С, жаростой-

кая до 700 °С, коррозионностойкая. Назначение: детали с повышенной пластичностью, подвергающиеся ударным нагрузкам, например, клапаны гидравлических прессов, предметы домашнего обихода, а также изделия, подвергающиеся действию слабоагрессивных сред, таких как атмосферные осадки, водные растворы солей органических кислот при комнатной температуре и другие. Наибольшая коррозионная стойкость достигается после термической обработки, а именно закалки с отпуском и последующей полировки. Твердость после закалки и низкого отпуска в пределах от 42 до 46 HRC. Сталь 20X13 ограничено свариваемая. К способам сварки можно отнести ручную дуговую сварку, аргонодуговую сварку, контактную сварку. Подогрев и термообработка применяются в зависимости от метода сварки, вида и назначения конструкции. Имеет склонность к отпускной хрупкости [6].

Химический состав стали 20X13 в соответствии с ГОСТ 5632–2014 приведен в таблице 1 [6].

Таблица 1 – Химический состав стали 20X13

Элемент	C	Si	Mn	S	P	Cr
Содержание, %	0,16...0,25	не более 0,6	не более 0,6	не более 0,025	не более 0,03	12,0...14,0

Механические свойства стали 20X13 в соответствии с ГОСТ 5632–2014 приведены в таблице 2 [6].

Таблица 2 – Механические свойства стали 20X13 при температуре 20 °С

Сортамент	НТД	Предел прочности σ_b , МПа, не менее	Предел текучести σ_t , МПа, не менее	Относительное удлинение δ_5 , %, не менее
Лист толстый	ГОСТ 7350–77	509,0	372,0	20,0
Лист тонкий	ГОСТ 5582–75	500,0	–	20,0
Сортовой прокат	ГОСТ 5949–75	600,0	450,0	16,0
Лента	ГОСТ 4986–78	500,0	–	16,0

Температуры критических точек стали 20X13 выглядит следующим образом – для точки A_{c1} температура равна 820 °С, для точки A_{c3} (A_{cm}) температура

равна 950 °С, для точки A_{r1} температура равна 780 °С. Температура закалки стали имеет интервал от 1000 до 1050 °С в воде или масле [7].

Сталь 40X13, выполняющая роль профилирующего слоя в композите, относится к ферритно-мартенситному классу, коррозионностойкая, жаропрочная сталь, применяется для производства – режущего, мерительного инструмента, хирургического инструмента, пружин, подшипников, работающих при температурах не выше интервала от 400 до 450 °С, предметов домашнего обихода, ножей для водолазов, дайверов и рыбаков, она распространена в производстве ножей хозяйственно-бытового назначения, включая складные среднего класса и сувенирных клинков, стойкость режущей кромки удовлетворительная. Данная сталь не сваривается. Она применяется в различных конструкциях после закалки и низкого отпуска со шлифованной и полированной поверхностью, обладает повышенной твердостью. Твердость после закалки и низкого отпуска составляет промежуток от 50 до 52 HRC. Достаточная пластичность этой стали обеспечивают легкую заточку инструмента в отличие от клинков из стали 95X18 [8].

Химический состав стали 40X13 в соответствии с ГОСТ 5632–2014 приведен в таблице 3 [6].

Таблица 3 – Химический состав стали 40X13

Элемент	C	Si	Mn	S	P	Cr
Содержание, %	0,36...0,45	не более 0,8	не более 0,8	не более 0,025	не более 0,030	12,0...14,0

Механические свойства стали 40X13 в соответствии с ГОСТ 5632–2014 приведены в таблице 4 [6].

Таблица 4 – Механические свойства стали 40X13 при температуре 20 °С

Сортамент	НТД	Предел прочности σ_b , МПа, не менее	Предел текучести σ_t , МПа	Относительное удлинение δ_5 , %, не менее	HRC после закалки, не менее
1	2	3	4	5	6
Лист тонкий	ГОСТ 5582–75	550,0	–	15,0	58

Продолжение таблицы 4

1	2	3	4	5	6
Сортамент (калиброванная сталь)	ГОСТ 5949–75	–	–	–	58
Лента δ , 0,2...2 мм	ГОСТ 4986–79	550,0	–	15,0	–

Температуры критических точек стали 40X13 выглядит следующим образом – для точки A_{c1} температура равна 820 °С, для точки A_{c3} температура равна интервалу от 860 до 880 °С. Температура закалки стали 40X13 имеет интервал от 1000 до 1050 °С [8].

Сталь 65X13, выполняющая роль базового режущего слоя, является коррозионностойкой, жаропрочной сталью, применяется для изготовления лезвий безопасных бритв, режущего инструмента, при эксплуатации на износ – кухонных ножей, пил, съемных лезвий и других предметов. Твердость после закалки и низкого отпуска находится в промежутке от 57 до 59 HRC [9].

Химический состав и свойства стали 65X13 в соответствии с ГОСТ 5632–2014 приведён в таблице 5 [6].

Таблица 5 – Химический состав стали 65X13

Элемент	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr
Содержание, %	0,6...0,7	0,2...0,5	0,25...0,8	не более 0,5	не более 0,025	не более 0,03	12,0...14,0

Механические свойства стали 65X13 в соответствии с ГОСТ 5632–2014 приведены в таблице 6 [6].

Температуры критических точек стали 65X13 выглядит следующим образом – для точки A_{c1} температура имеет интервал от 805 до 810 °С, для точки A_{c3} температура равна 880 °С. Температура закалки стали 65X13 имеет интервал от 1040 до 1050 °С [9].

Таблица 6 – Механические свойства стали 65X13 при температуре 20 °С

Сорта- мент	НТД	Предел проч- ности σ_b , МПа	Предел те- кучести σ_T , МПа, не ме- нее	Относи- тельное удлинение δ_5 , %, не менее	HRC после за- калки
Лента 0,1 мм	ТУ 14–1–4105–86 (нагартованное)	888,0...1127,0	–	–	280...320
Лента 0,4 мм	ТУ 14–131–764–88 (нагартованное)	–	–	–	220...280
Подкат 3,0 мм	ТУ 14–1–3918–85 (термическая обра- ботка)	не менее 785,0	–	18,0	не менее 20

Таким образом, проведен выбор исходных материалов для создания многослойных металлических композитов, изучены их свойства и области применения. При выборе исходных материалов учтено требуемое соотношение твердости внешних слоев композита и внутреннего режущего слоя соотношение твердости находится в диапазоне от 1,2 до 2,6, что прогнозируемо обеспечит эффект самозатачивания композитного режущего инструмента. Для дальнейших исследований. После сварки взрывом будут получены композиты следующей системы 20X13 + 40X13 + 65X13 + 40X13 + 20X13.

1.3 Классификация методов получения многослойных металлических композиционных материалов

Существует несколько методов получения многослойных композиционных материалов, основанных на физико-химических процессах:

- а) взаимодействие твёрдых расплавленных металлов;
- б) совместная пластическая деформация;
- в) диффузия при спекании металлов.

Из рассмотренных процессов были выделены следующие методы получения композита: литейное плакирование, магнитно-импульсная сварка, горячая пакетная прокатка и сварка взрывом.

1.3.1 Литейное плакирование

Одними из способов получения композиционных материалов, основанных на взаимодействии твердых расплавленных металлов, являются литейное плакирование, которым получают заготовки, предназначенные для последующей обработки давлением, например, прокаткой на листовых, сортовых и трубных станах, волочения, прессования и других.

Особенностью литейного способа является то, что исходную биметаллическую заготовку получают заливкой стали одного состава в изложницу, в которой установлены одна или две плиты из стали другого состава.

Наиболее простой способ литейного плакирования заключается в заливке жидкого металла в форму из плакируемого металла или непосредственно на плакируемую пластину, к которой приварены бортики из листового металла [10].

Для производства крупногабаритных двухслойных или трехслойных листов исходную заготовку (слиток) получают заливкой жидким металлом одной или двух плит (пластин, листов), установленных в изложницу. При этом тип и размеры биметаллического слитка определяются имеющимся парком изложниц и возможностями прокатного оборудования конкретного производства. Число плит и их расположение в изложнице определяют число слоев в готовом прокате и характер дальнейшей технологии производства. Наиболее эффективно применение этого способа для получения слоистых заготовок, предназначенных для изготовления коррозионностойких и износостойких композитов. В этом случае в изложницу, в которой установлена плита из коррозионностойкой стали, заливают углеродистую сталь как показано на рисунке 1а. Для получения трехслойного листа у противоположных стенок изложницы укрепляют две плиты из коррозионностойкой стали, заливаемые жидким металлом как показано на рисунке 1б. Одним из

вариантов схемы литейного плакирования является получение из одного слитка двух биметаллических листов. Для этого в центр изложницы устанавливают две плиты из металла плакирующего слоя, разделенные огнеупорной прослойкой как показано на рисунке 1в. После прокатки и обрезки кромок раскат разделяют на два двухслойных листа.

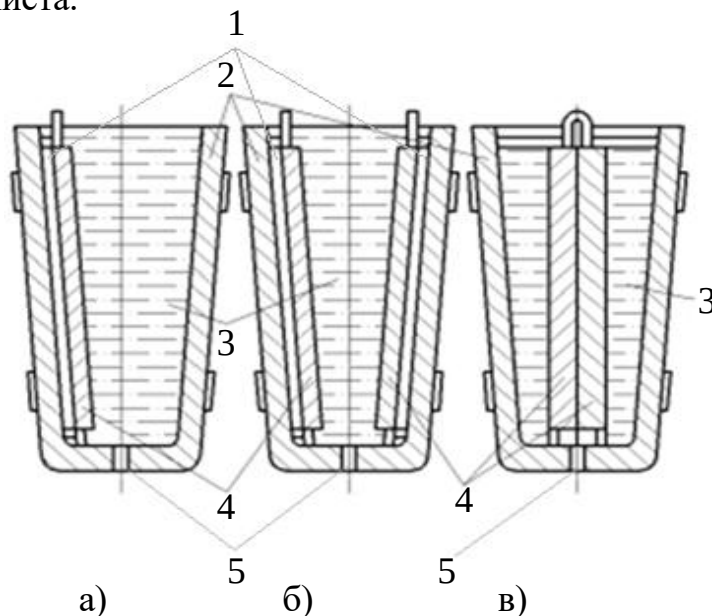


Рисунок 1 – Схемы для получения композитов: а) – двухслойных; б) – трехслойных; в) – двух двухслойных композиционных материалов на которых показаны следующие элементы; 1 – бортики из листового металла, 2 – корпус изложницы, 3 – расплавленный металл, 4 – свариваемые плиты (пластины, листы), 5 – отверстие для слива жидкого металла

При осуществлении литейного способа плиты плакирующего металла изготавливают из катаных слэбов. Поверхностные дефекты и окалину удаляют строжкой по всем граням с последующей зачисткой их абразивными кругами. Длину плит принимают на 100 мм меньше, как и ширину плит принимают на промежуток от 20 до 30 мм соответственно меньше внутренних размеров изложницы. Толщину плит $H_{пл}$ можно определить по формуле [10]:

$$H_{пл} = kh_{пл} \times \frac{(H_{сл} - c)}{100}, \quad (1)$$

где $H_{пл}$ – толщина плит, мм;

k – коэффициент неравномерности деформации слоев слитка при прокатке;

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ПГУ.ВКР.22.03.01.16МТ114.ПЗ

Лист

13

h_m – заданная толщина плакирующего слоя в готовом листе, в процентах от общей толщины биметаллического листа;

$H_{сл}$ – толщина двухслойного слитка, мм;

c – толщина углеродистой стали в зазоре между плитой и стенкой изложницы, мм.

Для листов с плакирующим слоем из стали 12X18H10T величина k имеет значения от 0,60 до 0,82 с плакирующим слоем из стали 08X13 от 0,9 до 1,1 при этом большие значения коэффициента k принимают для толстых листов и меньшие для тонких [11].

Подготовку плит для плакирования проводят следующим образом. После строжки к плитам приваривают специальную арматуру, затем контактную поверхность плиты протирают, обезжиривают, промывают 50 процентным раствором соляной кислоты и покрывают ровным слоем хлористого аммония толщиной от 2 до 2,5 мм. Поверхность плиты со стороны изложницы обезжиривают и наносят обмазку из смеси магнезитового порошка с лаком, предохраняющую эту поверхность от сваривания с углеродистой сталью, заливаемой в зазор между плитой и стенкой изложницы. Затем плиту укрепляют в изложнице, устанавливают прибыльную надставку, сифонным способом заливают жидкую сталь, выдерживают на разливочной площадке от 1,5 до 2 ч и отправляют в стрипперное отделение цеха.

После кристаллизации и «раздевания» биметаллические слитки отправляют в вагоне-термосе в прокатный цех и помещают в нагревательные колодцы. Нагрев слитков осуществляют по режимам, принятым для статей плакирующего слоя. Так, для биметаллического слитка углеродистой стали с коррозионностойкой сталью 12X18H10T температура нагрева составляет интервал от 1260 до 1280 °С, а для слитка с плакирующим слоем из стали 08X13 температура принимает значения от 1240 до 1260 °С.

Прокатку слитков на слябы требуемого размера производят на блюминге или слябинге с обжатием от 20 до 30 мм за проход. После прокатки раскат разрезают на заготовки определенной длины, удаляя при этом донную часть слитка и за

тем охлаждают. Нагрев слябов перед прокаткой на листы требуемого размера осуществляют в методических печах по режимам для сталей плакирующего слоя, продолжительность нагрева устанавливают из расчета, с помощью которого получаем ряд значений от 0,8 до 1,0 мин на 1 мм толщины сляба. Прокатку производят по поперечной схеме с обжатиями за проход до 15 %, обычно плакирующим слоем вниз. В случае, когда коррозионностойкая сталь обладает меньшим сопротивлением деформации, чем сталь основного слоя, прокатку ведут плакирующим слоем вверх [11].

После прокатки биметаллические листы подвергают термической обработке. Листы с плакирующим слоем из аустенитных сталей нормализуют в проходных печах в интервале температур от 900 до 930 °С с выдержкой от 2 до 3 мин на 1 мм толщины листа с последующим охлаждением на воздухе. Листы с плакирующим слоем из ферритных сталей нормализуют с последующим высоким отпусканием в интервале температур от 630 до 650 °С. После термической обработки биметаллические листы правят, режут на требуемый размер, травят, производят отделку и маркировку.

Способ литейного плакирования применяют также для производства листовой износостойкой стали, состоящей из двух твердых наружных слоев и мягкого внутреннего слоя, предназначенной для изготовления отвалов плугов. Толщина каждого наружного слоя должна быть меньше 25 %, а внутреннего меньше 30% от толщины трехслойного листа. В качестве металла плакирующих слоев используют сталь 60, внутреннего слоя используют сталь 10 или сталь 20.

Технология производства износостойкого биметалла осуществляется следующим образом. К пластинам из стали 10 или стали 20 толщиной от 70 до 75 мм приваривают арматуру для последующей их установки и крепления в изложнице. После этого их травят в 10 или 14 % растворе серной кислоты в интервале температур от 60 до 90 °С, за тем промывают горячей и холодной водой, зачищают вращающимися проволочными щетками, вновь промывают и сушат. Пластины покрывают слоем каменноугольного лака, который предохраняет поверх-

ности пластины при заливке от налипания шлака и других неметаллических включений, и устанавливают в изложнице вертикально и строго по центру.

Заливку стали 60 проводят в интервале температур от 1630 до 1670 °С, выдержка слитков в изложнице составляет промежуток от 1 до 2 ч. После кристаллизации трехслойные слитки зачищают и нагревают до температуры, попадающую в интервал от 1170 до 1200 °С. Прокатку слитков осуществляют за несколько проходов, полученные листы подвергают резке на требуемые размеры. Трехслойные листы поставляют заказчикам толщиной от 5 до 7 мм и размерами в плане 370×1675 мм.

Литейным плакированием с последующей прокаткой получают износостойкие двухслойные и трехслойные листы общей толщиной от 2 до 15 мм с относительной толщиной твердого слоя от 10 до 50 %. В качестве основы для этих композитов обычно применяют стали с содержанием углерода от 0,06 до 0,5 %, а для твердого износостойкого слоя используют как высокоуглеродистые инструментальные стали с содержанием углерода от 0,60 до 1,30 %, так и легированные инструментальные и карбидные стали типа 6ХС, 85ХФ, 65Г, 3Х5ВФ, 9Х5В и другие.

Применение слоя твердой стали в сочетании с более мягкой позволяет не только увеличить срок службы изготовленных из износостойких биметаллов изделий, но и придать им новое качество – самозатачивание. Последнее связано с тем, что мягкий слой изнашивается быстрее твердого, который выступает в виде острой кромки [11].

Способы отливки слоистых слитков и заготовок весьма экономичны, однако их применение имеет ряд ограничений, связанных с невозможностью качественного заполнения жидкой сталью узких зазоров между стенками изложницы и пластинами; с расплавлением пластин, если температура плавления их металла ниже температуры жидкого металла. Этим способом затруднительно получать биметаллические заготовки с плакирующим слоем из высоколегированных сталей и сплавов, чувствительных к перегреву и склонных к трещинообразованию при заливке жидкого металла. Кроме того, литейный метод плакирования непригоден для получения слоистых заготовок из составляющих, которые образуют на грани-

це соединения интерметаллические включения и легкоплавкие эвтектики. Несмотря на относительную простоту и дешевизну, способ литейного плакирования вытесняется другими способами производства слоистых композиционных материалов.

1.3.2 Магнитно-импульсная сварка

Магнитно-импульсная сварка представляет собой сварку металлических деталей за счёт соударения. Разгон и метание свариваемых деталей при этом обеспечивается импульсным электромагнитным полем. Магнитно-импульсная сварка используется в машиностроении для сварки трубчатых деталей между собой, а также с другими деталями, для плоских деталей по их наружному и внутреннему контуру. Толщины деталей свариваемых магнитно-импульсной сваркой составляют диапазон от 0,5 до 2,5 мм.

Магнитно-импульсная обработка металлов основывается на электромеханическом взаимодействии между вихревыми токами, наведенными в стенках обрабатываемой детали при пересечении их силовыми магнитными линиями импульсного магнитного поля, и самим магнитным потоком. При этом на проводник с наведенным током (свариваемая деталь) действует сила Лоренца и деталь с большой скоростью вылетает и ударяется с другой свариваемой деталью.

Свариваемые детали могут устанавливаться как под углом, так и параллельно друг к другу. Угловое размещение позволяет обеспечить последовательное перемещение зоны контакта при сварке деталей. Соединение образуется в результате косоугольного удара двух металлических деталей с образованием между ними металлических связей. При параллельном размещении свариваемой пластины распределение давления вдоль образующей свариваемой детали неравномерное. Оно меньше по концам и больше в средней части [12].

Установка для магнитно-импульсной сварки включает в себя генераторы импульсных токов ёмкостного типа с индуктивной нагрузкой. При магнитно-импульсной сварке токи разряда достигают сотен тысяч ампер.

Коммутирующими устройствами установок являются вакуумные разрядники, разрядники под давлением, разрядники при атмосферном давлении и игнитроны.

Индукторы состоят из металлической спирали, как правило, из материала сталь, вольфрам, состоящей из одного или нескольких витков. Форма рабочей поверхности спирали с максимальной точностью повторяет форму заготовки. Схематичный пример магнитно-импульсной сварки представлен на рисунке 2.

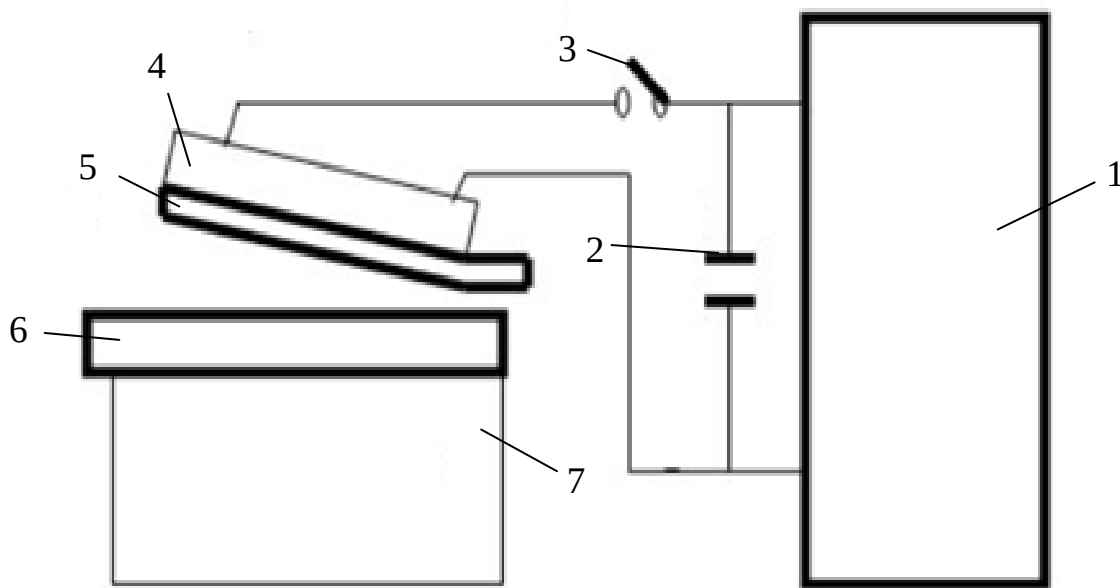


Рисунок 2 – Схема магнитно-импульсной сварки: 1 – зарядное устройство, 2 – конденсатор, 3 – коммутирующее устройство, 4 – индуктор, 5, 6 – свариваемые детали, 7 – опора

Принцип работы основан на возникновении кинетической энергии, передаваемой метаемому свариваемому элементу, который зависит числа витков индуктора, напряжения разряда, ёмкости конденсатора. При получении сильных магнитных полей порядка 15 Тесла индуктор сильно нагревается, поэтому для его охлаждения используется жидкостное охлаждение, например, жидкий азот, гелий и другие подобные жидкости [13].

Данный способ обладает следующими преимуществами:

а) магнитно-импульсным способом можно сваривать практически любые материалы за микросекунды;

б) по сравнению со сваркой взрывом в магнитно-импульсной сварке получают сварные соединения минимальной длины, равнопрочные с основным металлом;

в) допускается сварка деталей в среде с заданными свойствами, например, в вакууме, защитной атмосфере и других подобных средах с помощью удаленного индуктора, отделённого неметаллической оболочкой.

Также у данного способа наблюдается очевидный недостаток:

а) магнитно-импульсную сварку нельзя применять для получения соединений большой площади.

1.3.3 Получение металлических композиционных материалов методом горячей пакетной прокатки

Одним из способов получения металлических композиционных материалов, является способ, основанный на совместной прокатке заготовок. Такой метод получения заготовок считается производительным [14].

С целью исключения окисления поверхностей свариваемых листов может быть произведена сварка пакета по его периметру. Полученный при прокатке многослойный лист разрезается на несколько заготовок, которые вновь собираются в пакет. Пакет обваривается, нагревается и вновь подвергается прокатке. В результате многократного повторения процесса получается слоистый композиционный материал с малой толщиной листов.

Такой метод выгоден для крупносерийного производства заготовок, само производство обладает высокой конкурентоспособностью. Следовательно, организация прокатного производства, ввиду высокой капиталоемкости и низкой, но в, то, же время гарантированной прибыли, рентабельно при отсутствии конкурентов.

Схемы получения двухслойной, трехслойной и пятислойной полос методом холодной прокатки в рулонах представлены на рисунке 3.

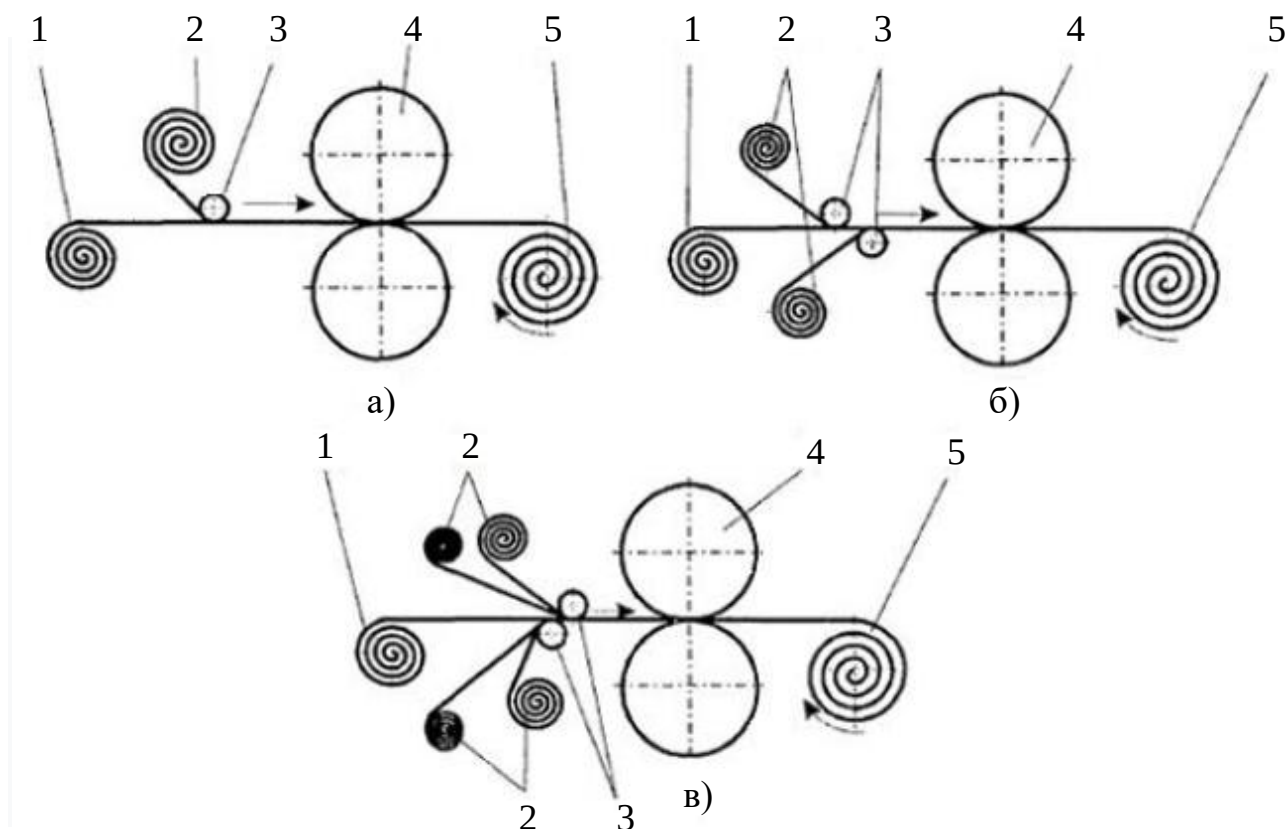


Рисунок 3 – Схемы получения слоистых металлических композиционных материалов: а) – двухслойного; б) – трехслойного; в) – пятислойного композита методом холодной прокатки в рулонах; 1 – разматыватель с рулоном полосы основного слоя, 2 – разматыватель с рулоном полосы плакирующего слоя, 3 – направляющие ролики, 4 – рабочие валки прокатного стана, 5 – моталка с рулоном многослойной полосы

На рисунке 4 представлена схема получения слоистого металлического композиционного материала по технологии пакетной прокатки. Данная методика дает возможность получить композиционный материал с небольшой толщиной слоев до 5 мкм. В соответствии с показанным технологическим процессом листовые заготовки собирают в пакет, нагревают и подвергают прокатке в горячем состоянии. Степень обжатия в валках должна быть достаточной для сварки листов по контактируемым поверхностям [15].

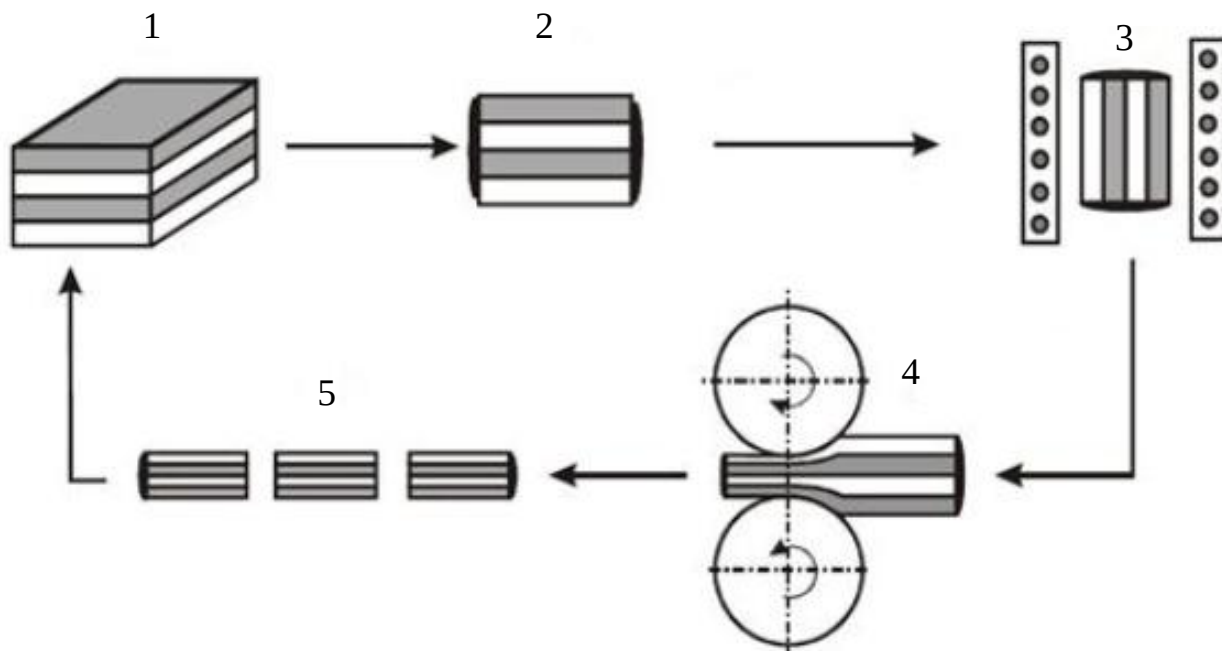


Рисунок 4 – Схема получения слоистых металлических композиционных материалов методом пакетной прокатки: 1 – укладка пластин в пакет, 2 – обварка пакета по всему периметру, 3 – нагрев пакета под прокатку, 4 – прокатка пакета, 5 – разрезка композита на мерные длины

Данный способ получения композиционных материалов обладает рядом преимуществ и недостатков по сравнению с другими. К преимуществам можно отнести следующие особенности:

- а) высокая производительность;
- б) очень широкая номенклатура изделий от обычных листов до многослойных композиционных материалов;
- г) метод поддается автоматизации.

В технологии получения композиционных материалов не обошлось без недостатков, таких как:

- а) высокая капиталоемкость и материалоемкость;
- б) энергоемкость;
- в) поверхность изделия требует механической обработки, так как недостаточно точная и чистая;
- г) требуется термическая обработка изделий;

д) Ещё в данном методе недостатком является то, что при соединении двух разнородных металлов возникают внутренние напряжения вследствие разницы в коэффициентах линейного расширения, которые могут привести к нежелательной деформации композиционного материала [16].

1.3.4 Сварка взрывом

Сварка взрывом, или взрывная сварка довольно известный и актуальный способ сварки по сей день. В основу сварки взрывом входит использование энергии взрыва, являющееся одной из разновидностей обработки металлов.

При сварке взрывом привариваемая (подвижная) деталь располагается под углом к неподвижной детали-мишени (основанию) или параллельно мишени (в большинстве случаев) и приводится в движение контролируемым взрывом, в результате чего с большой скоростью соударяется с ней, соединение образуется за счет совместной пластической деформации поверхностей.

При этом из-за скоротечности процесса не успевает развиваться объемная диффузия, вследствие чего этот вид сварки применим для соединения разнородных металлов и сплавов. Перед сваркой детали должны зачищаться до металлического блеска и быть обезжирены.

Сварка взрывом применяется для соединения деталей из разнородных металлов, в частности для плакирования.

Способ плакирования криволинейных поверхностей сваркой взрывом разработан в Алтайском научно-исследовательском институте технологии машиностроения [17].

В качестве взрывных веществ используются насыпные вещества, например, гранулотол, гранулит, аммониты, аммонал, аммиачная селитра, гексоген.

Сварка взрывом считается сложным технологическим процессом, однако она может применяться для получения самых сложных изделий в том числе и многослойных металлических материалов.

Принципиальная угловая схема, по которой может совершаться сварка, приведена на рисунке 5.

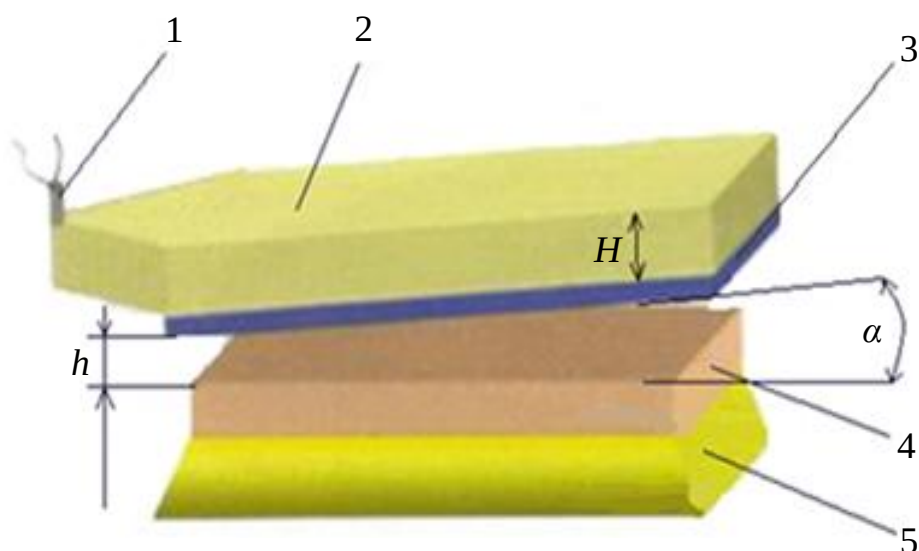


Рисунок 5 – Угловая схема сварки взрывом плоских заготовок: 1 – электродетонатор, 2 – контейнер с зарядом взрывчатого вещества, 3 – метаемая пластина, 4 – неподвижная пластина, 5 – основание схемы (грунт, песок, металлическая плита и тому подобные), h – расстояние между метаемой и неподвижной пластинами, H – высота взрывчатого вещества, α – угол между метаемой и неподвижной пластинами

Распространение фронта детонации D по заряду взрывчатого вещества на угловой схеме показано на рисунке 6.

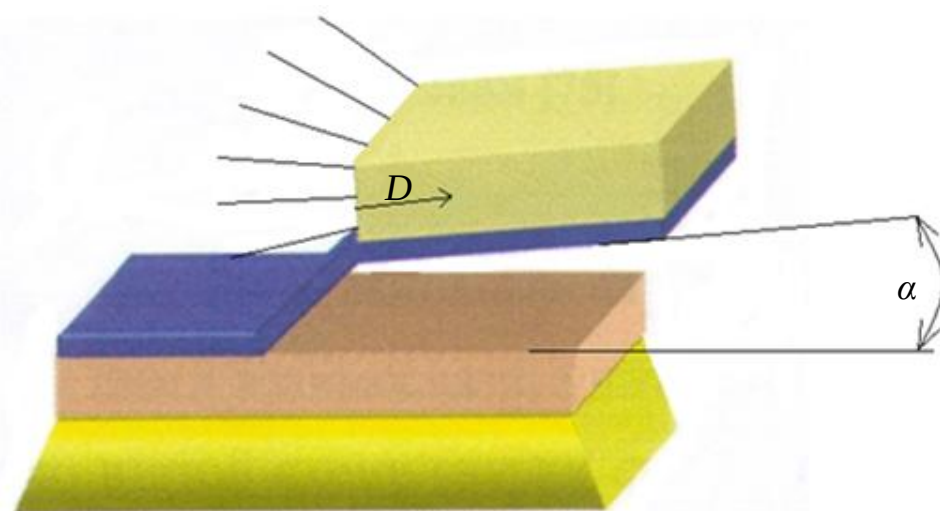


Рисунок 6 – Распространение фронта детонации D по заряду взрывчатого вещества на угловой схеме

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ПГУ.ВКР.22.03.01.16МТ114.ПЗ

Лист

23

Принципиальная параллельная схема, по которой может совершаться сварка, приведена на рисунке 7.

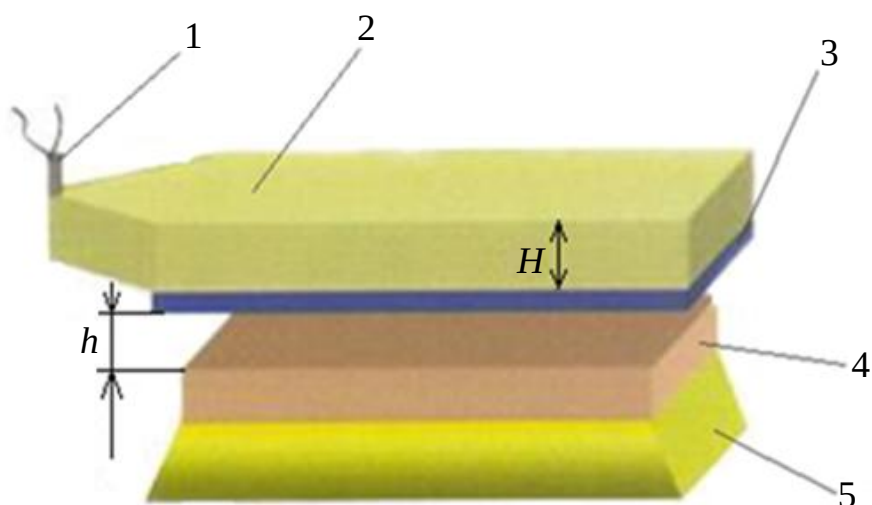


Рисунок 7 – Параллельная схема сварки взрывом плоских заготовок: 1 – электродетонатор, 2 – контейнер с зарядом взрывчатого вещества, 3 – μεταаемая пластина, 4 – неподвижная пластина, 5 – основание схемы (грунт, песок, металлическая плита и тому подобные), h – расстояние между μεταаемой и неподвижной пластинами, H – высота взрывчатого вещества

Распространение фронта детонации D по заряду взрывчатого вещества на параллельной схеме показано на рисунке 8.

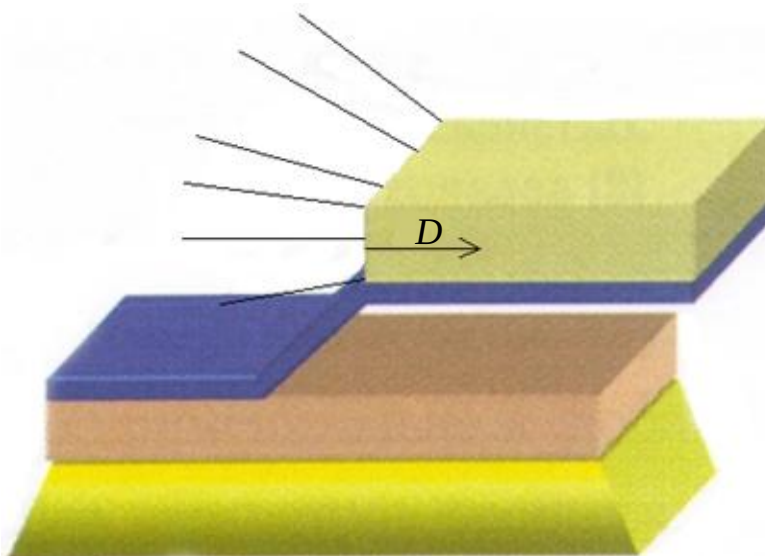


Рисунок 8 – Распространение фронта детонации D по заряду взрывчатого вещества на параллельной схеме

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ПГУ.ВКР.22.03.01.16МТ114.ПЗ

Лист

24

Как и у многих других технологий, у сварки методом взрыва также имеются преимущества и недостатки. К преимуществам можно отнести следующие особенности:

а) Высокая скорость обработки соединяемых элементов. Как ранее было отмечено, на соединение металла требуется всего несколько долей секунды. Однако, на подготовку полигона и самих материалов требуется довольно большое количество времени.

б) Возможно, получить качественные соединения биметалла. Стоит учитывать, что другие технологии не позволяют соединить материалы с различными физико-механическими параметрами.

в) Технология позволяет проводить соединение материалов, которые характеризуются низкой степенью обрабатываемости.

г) Можно создать изделие для дальнейшейковки и штамповки. В последнее время для упрочнения поверхности проводитсяковка и штамповка. Обычный шов характеризуется тем, что не может выдерживать воздействие переменной нагрузки.

д) можно получить изделие со сложной формой углов. Примером можно назвать изделия с изгибами.

Имеется и несколько серьезных недостатков:

а) Низкая степень безопасности при проведении взрыва. Это связано с тем, что контролировать взрывную волну достаточно сложно.

б) Для того чтобы предоставлять рассматриваемые услуги нужно пройти специальное обучение и получить на это допуск. Несоблюдение технологии приводит к тому, что заготовка может быть повреждена.

в) Работа может проводиться только при условии наличия специальной защитной камеры или полигона.

г) Автоматизировать рассматриваемый процесс практически невозможно. Именно поэтому к каждому процессу соединения изделий приходится тщательно подготавливаться [15–19].

1.4 Патентное исследование

Слоистый материал – это конструкционный материал, у которого входящие в него компоненты (стали, сплавы) нанесены в виде слоев. Может быть, как однородного состава, так и разнородного с чередующимися слоями различного состава. Данный тип материала относится к классу композитов.

По функциональным признакам все производимые в настоящее время слоистые композиты подразделяются на следующие виды:

- а) коррозионностойкие;
- б) антифрикционные;
- в) электротехнические (проводниковые и контактные);
- г) инструментальные;
- д) износостойкие;
- е) термобиметаллы;
- ж) биметаллы.

Изготовление многослойных материалов может быть синтезировано следующими способами:

- а) посредством пластической деформации;
- б) наплавкой;
- в) пайкой;
- г) совместной заливкой;
- д) сваркой взрывом.

Слоистые металлические материалы с высокими физико-механическими свойствами обеспечивают работоспособность в условиях высоких температур, до 750 °С. Дальнейшее изготовление изделий допускает применения таких технологических операций:

- а) штамповки;
- б) гибки и вальцовки;
- в) механической и термомеханической обработок;
- г) скрутки.

Патентное исследование (патентно-информационный поиск, патентный поиск) – это исследование технического уровня и тенденций развития объектов техники, их патентоспособности и патентной чистоты, а также уровня компетентности фирмы или частного лица в данной области.

Цель исследования – определение технического уровня и тенденций развития в получения композиционных металлических материалов, с целью поиска патентной и научно-технической информации, а также провести патентный и научно-технический информационный поиск позволяющий исследовать технический уровень и технологию получения пятислойных композиционных материалов с высокими механическими свойствами.

Регламент патентного поиска – это план поиска. Он состоит из определения вида исследований, вида поиска, его глубины или ретроспективности (количества лет) и его широты (перечень стран, которыми ограничивают объём поиска). 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 глубины и широты поиска, учитывая при этом реальную доступность этих источников.

Исследуемый объект – многослойные композиционные материалы, полученные сваркой взрывом.

Предмет поиска – технологии получения многослойных композиционных материалов с повышенными механическими свойствами, композиционные материалы с градиентными свойствами, материалы с эффектом самозатачивания.

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

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

Выбранные элементы регламента приведены в таблице 7. В ней записаны индексы МПК, в заголовке таблицы регламента указано общее название исследуемого объекта.

Таблица 7 – Регламент поиска

Предмет поиска	Индекс МПК	Широта поиска	Глубина поиска	Источник информации
Технологии получения многослойных композиционных материалов с повышенными механическими свойствами	B23K20/08, B32B7/04, B32B15/01, B32B15/02, C22C47/20, C22C49/06, C22C21/08	Россия	15 лет	Реестр изобретений РФ ФИПС
Материалы с эффектом самозатачивания	C23C4/12, B26D7/12, B27B33/08, A01B15/04, B23K9/04, B23P6/00, B23H9/00	Россия	15 лет	Реестр изобретений РФ ФИПС
Многослойный материал	B22F7/04, B32B18/00	Россия	10 лет	Реестр изобретений РФ ФИПС

B23K20/08 – неэлектрические способы сварки с использованием ударного или другого давления с применением нагрева или без него, например нанесение покрытий или плакировка с использованием импульсов высокой мощности, например магнитной энергии сварка взрывом.

B32B7/04 – слоистые изделия, изготовленные из слоев с различными физическими свойствами или отличающиеся взаимосвязанными слоями изделия, отличающиеся способом соединения слоев.

B32B15/01 – слоистые изделия, содержащие в основном металл содержащие слои, состоящие только из металла.

B32B15/02 – слоистые изделия, содержащие в основном металл в форме, отличной от листа, например в форме проволоки, отдельных частиц.

C22C47/20 – производства сплавов, содержащих металлические или неметаллические волокна или нити путем воздействия давления и тепла на комплект, состоящий, по крайней мере, из одного слоя или листа металла и одного слоя волокон или нитей.

C22C49/06 – сплавы, содержащие металлические или неметаллические волокна или нити алюминий.

C22C21/08 – сплавы на основе алюминия с кремнием.

C23C4/12 – способы покрытия путем распыления материала в расплавленном состоянии, например пламенное, плазменное или дуговое напыление, характеризующиеся способом распыления.

B26D7/12 – конструктивные элементы устройств, предназначенных для резки, перфорирования, пробивки, вырубки или разделения материалов без резания заточкой режущих элементов.

B27B33/08 – пильные полотна для лесопильных рам, пильных станков и прочих устройств, предназначенных для распиловки дисковых пил.

A01B15/04 – узлы, рабочие органы и детали плугов, лемеха.

B23K9/04 – электродуговая сварка или резка (электрошлаковая сварка; сварочные трансформаторы; сварочные генераторы) для иных целей, чем соединение, например с целью наплавки.

B23P6/00 – восстановление или ремонт изделий (правка или восстановление формы листовых металлов, металлических стержней, металлических труб, металлических профилей или специфических изделий, восстановление дефектных или поврежденных изделий путем наплавки; способы или устройства, отнесенные к одному из других подклассов).

B23H9/00 – обработка специальных металлических объектов или для получения специального эффекта или результата на металлических объектах (термообработка тлеющим разрядом).

B22F7/04 – Изготовление составных слоистых материалов, заготовок или изделий с использованием металлических порошков путем спекания порошка с одновременным уплотнением или без него составных слоистых материалов с

одним или несколькими слоями, выполненными не из порошка, например, выполненными из сплошного металла.

B82Y40/00 – изготовление или обработка наноструктур.

B32B18/00 – слоистые изделия, содержащие в основном керамику, например огнеупорные материалы.

B23K20/04 – неэлектрические способы сварки с использованием ударного или другого давления с применением нагрева или без него, например нанесение покрытий или плакировка на прокатных станах.

Результаты патентного обзора представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Результаты патентного обзора

Предмет поиска (объект исследования, его составные части)	Страна выдачи, номер охранного документа. Классификационный индекс МПК	Заявитель (патентообладатель) номер заявки, страна, дата публикации	Название изобретения (полной модели, образца)
1	2	3	4
Технологии получения композиционных материалов с повышенными механическими свойствами	Россия, <i>RU 2397850, C1, B23K20/08</i>	Закрытое акционерное общество «Энергометалл» (<i>RU</i>), № 2009123391/02, Россия, 27.08.2010	Способ изготовления сваркой взрывом плоской биметаллической заготовки [20]
Материалы с эффектом самозатачивания	Россия, <i>RU 2601520, C2, C23C4/12</i>	Васильев Евгений Викторович (<i>RU</i>), № 2015108808/02, Россия, 10.11.2016	Способ упрочнения режущего инструмента [21]
Многослойный материал	Россия, <i>RU 167 018 U1, B22F7/04</i>	Огнева Т.С., и др., № 2016137956/05, 20.12.2016	Слоистый композиционный материал [22]

Продолжение таблицы 8

1	2	3	4
Технологии получения многослойных композиционных материалов с повышенными механическими свойствами	Россия, <i>RU 2463139, C1,</i> <i>B23K20/08,</i> <i>B32B7/04, B32B15/01</i>	Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования ВолгГТУ (RU), № 2011114484/02, Россия, 10.10.2012	Способ получения композиционного материала титан – сталь [23]
Материалы с эффектом самозатачивания	Россия, <i>RU 2433033, C1,</i> <i>B26D7/12,</i> <i>B27B33/08</i>	Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Воронежская государственная лесотехническая академия» (RU), № 2010106741/02, Россия, 10.11.2011	Самозатачивающийся режущий инструмент для древесины мягких пород [24]
Композиционные материалы на основе легированных нержавеющей сталей с содержанием углерода от 2,02 до 0,7 %	Россия, <i>RU 2562279,</i> <i>C1,</i> <i>B32B15/01,</i> <i>C22C1/08,</i> <i>B22F3/18</i>	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тольяттинский государственный университет» (RU), № 2014118005/05, Россия 05.05.2014	Способ получения слоистых композиционных материалов [25]

Продолжение таблицы 8

1	2	3	4
Материалы с эффектом самозатачивания	Россия, <i>RU</i> 2607680, <i>C1</i> , <i>A01B15/04</i> , <i>B23P6/00</i> , <i>B23H9/00</i>	Федеральное государственное бюджетное Научное учреждение «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ) (<i>RU</i>), № 2015128509, Россия, 10.01.2017	Способ упрочнения лемеха плуга [26]
Технологии получения многослойных композиционных материалов с повышенными механическими свойствами	Россия, патент, <i>RU</i> 2407640, <i>C2</i> , <i>B32K15/02</i> , <i>C22C47/20</i> , <i>B23K20/08</i>	Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Федерального агентства по образованию Пензенский Государственный Университет (<i>RU</i>), № 2008131359/02, Россия, 27.12.2010	Способ получения композиционного материала [27]
Композиционные материалы на основе легированных нержавеющей сталей с содержанием углерода от 2,02 до 0,7 %	Россия, <i>RU</i> 2006371, <i>C1</i> , <i>B32B15/18</i> , <i>B22D19/02</i> , <i>C22C38/02</i> , <i>C22C38/56</i>	Румянцев А.В., Волынова Т.Ф., Воронин А.В. (<i>RU</i>), № 5028627/02, Россия 21.01.1992	Многослойный композиционный материал, способ его изготовления и изделие, полученное из этого материала [28]

Выводы по первой главе

В данном разделе были рассмотрены процессы и технологии получения многослойных металлических композиционных материалов. Были выделены наиболее подходящие способы получения, а именно наплавка, магнитно-импульсная сварка, горячая пакетная прокатка и варка взрывом, которые выбирались на основании следующих факторов:

- а) производительность;
- б) доступность метода получения;
- в) качество, полученного композита.

Для конструкционных многослойных композиционных материалов с металлической матрицей наибольшее развитие получил методы совместной пластической деформации, в нашем случае это сварка взрывом.

На основании проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

а) Большое внимание уделяется вопросам получения композиционных материалов с градиентными по структуре свойствами. Это подчеркивается наличием множества патентов в данной области исследования патентной информации.

б) Современный технологический уровень технологии сварки взрывом, постоянно совершенствуется как сама технология, так и расширяется номенклатура обрабатываемых материалов.

в) За совершенствованием технологии сварки взрывом следует значительное увеличение характеристик и свойств получаемых композиционных материалов, что позволяет их внедрять в различных отраслях промышленности.

Были проанализированы методы получения многослойных металлических композиционных материалов, выявлены и достоинства и недостатки. Был проведен патентный поиск.

2 Теоретическая часть

2.1 Выбор технологических параметров и схемы процесса ударно-волнового нагружения для получения сваркой взрывом многослойного композиционного металлического материала

Сварка взрывом – процесс получения прочного соединения двух или нескольких металлических тел, происходящих при их соударении. Ускорение соударяющихся тел осуществляется, как правило, под действием энергии взрыва, выделяющейся при детонации зарядов взрывчатого вещества.

Сварку взрывом используют для изготовления многослойных листов, полос, цилиндрических изделий, композиционных материалов волокнистого строения из разнообразных металлов и сплавов, в том числе и тех, сварка которых другими способами затруднена. Свариваемые тела, заряд взрывчатого вещества и система его инициирования, а также основания и опоры, на котором все это располагается, образуют взрывное устройство. Для получения качественного соединения необходимо правильно выбрать конструктивные характеристики и параметры взрывного устройства [30].

Характерной особенностью процесса сварки взрывом является волнообразный профиль зоны соединения металлов. В специфических условиях сварки взрывом, когда граница раздела свариваемых материалов является контактным разрывом, одной из наиболее выгодных условий является превращение кинетической энергии метаемой пластины в работу пластических деформаций, в ходе которых происходит процесс волнообразования, характеризующийся строгой периодичностью и регулярностью остаточных деформаций.

Основой процесса сварки взрывом является образование кумулятивной струи, возникающей в условиях высокоскоростного соударения двух металлов. Соударение с образованием кумулятивной струи понимается как соударение двух наклонных друг к другу поверхностей, при котором в точке соприкосновения возникает направленный поток металлических, движущихся с большой

скоростью в зазоре и образующих волнистую поверхность. Схема наклонного соударения показана на рисунке 9.

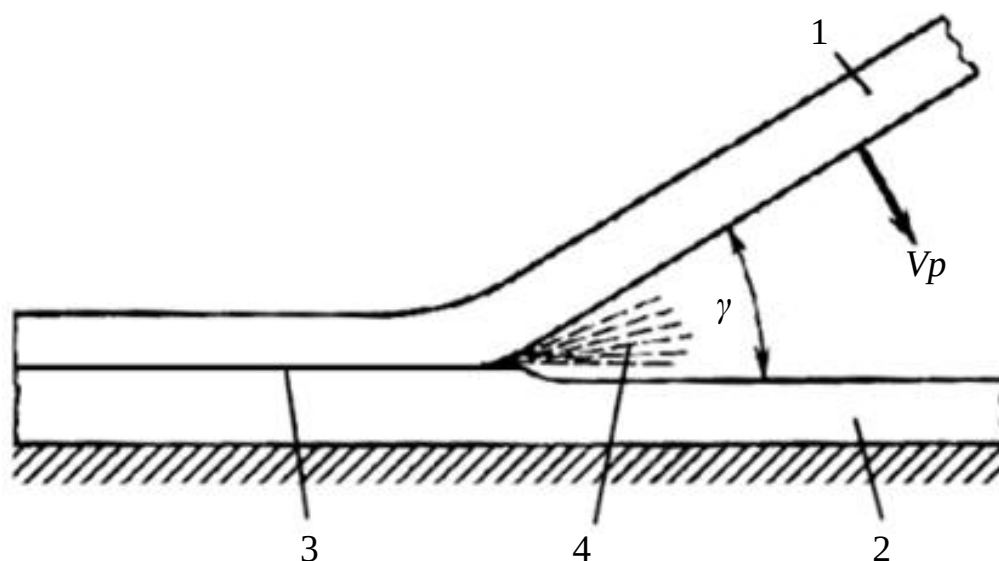


Рисунок 9 – Схема соударения при сварке: 1 – метаемая пластина, 2 – неподвижная пластина, 3 – поверхность контакта, 4 – кумулятивная струя, V_p – скорость метаемой пластины, γ – угол соударения

Кумулятивная струя металла, образующаяся при сварке взрывом, разрушает и удаляет поверхностную пленку. Очищенные поверхности металла в точке соударения под действием высокого давления вступают друг с другом в тесный контакт, благодаря чему образуется металлическая связь во всей поверхности соединения. Таким образом, процесс сварки взрывом следует рассматривать как процесс, состоящий из двух стадий – первая – образование кумулятивной струи, разрушение и удаление поверхностного слоя, вторая – высокое давление приводит к такому контакту поверхностей, при котором устанавливается межатомная связь [31].

Перед сваркой взрывом поверхности соединяемых изделий должны быть очищены от загрязнений (масляных пленок, краски, ржавчины и других), потому что при скоростях детонации в диапазоне от 2000 до 2500 м/с с поверхностей удаляются только пленки, толщиной до 12 мкм. Кроме того, свариваемые поверхности не должны иметь дефектов (пор, раковин, различных инородных включений), иначе, при сварке возможно разрушение.

Более распространена схема сварки взрывом, если угол равен 0° , так называемая, параллельная схема, которая показана на рисунке 10. В качестве заготовок в этом случае применяются объекты в виде пластин.

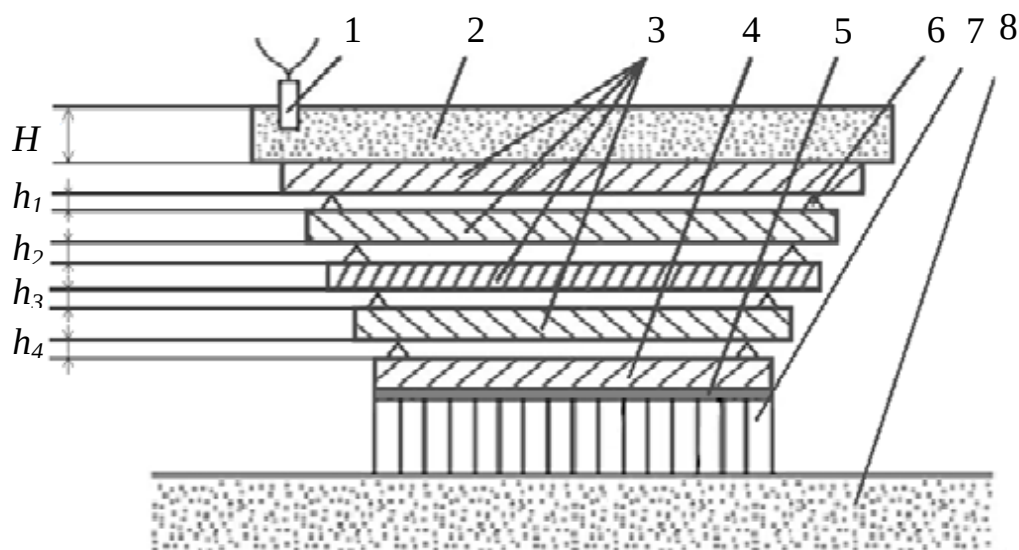


Рисунок 10 – Технологическая схема параллельной схемы сварки взрывом: H – толщина заряда взрывчатого вещества, h_1, h_2, h_3, h_4 – технологические зазоры, 1 – детонатор, 2 – заряд взрывчатого вещества, 3 – метаемые элементы, 4 – неподвижный элемент, 5 – слой инертного материала (скотч), 6 – технологические опоры (жеребейки), 7 – стальное основание, 8 – грунт

В ходе взрыва по заряду взрывчатого вещества распространяется детонационная волна. Под воздействием данной волны метаемая пластинка обретает скорость порядка некоторых сотен метров в одну секунду и совершается ее соударение с неподвижной пластинкой под определенным углом [32].

Вокруг точки соударения появляется значительное давление, что в десять раз превосходит предел прочности материалов. Под воздействием подобного давления свариваемые материалы текут аналогично жидкостям. Их течение обуславливается углом соударения и скоростью точки контакта [33].

В ходе соударения сварные плоскости самоочищаются и формируются условия для их сближения под воздействием значительного давления и совместного пластического течения. Весь процесс продолжается порядка 10^{-6} с, по этой причине взаимная диффузия никак не успевает перейти на значительную глубину.

2.2 Исследование технологических схем получения сваркой взрывом композиционного металлического материала для изготовления композитного режущего инструмента

Весь комплекс физических явлений, сопровождающих процесс сварки взрывом, структура и свойства получаемых композиционных материалов в значительной мере определяются ее основными параметрами, которые подразделяют на технологические, кинематические и физические [34].

К группе технологических параметров процесса сварки взрывом относят – скорость детонации D взрывчатого вещества и его плотность, безразмерный параметр r , характеризующий отношение массы заряда взрывчатого вещества к массе метаемой пластины, вычисляемые по следующей формуле [34]:

$$r = \frac{\delta_0 \times \rho_0}{\delta_1 \times \rho_1}, \quad (2)$$

где ρ_0 – плотность заряда взрывчатого вещества, г/см³;

δ_0 – толщина заряда взрывчатого вещества, мм;

ρ_1 – плотность метаемой пластины, г/см³;

δ_1 – толщина метаемой пластины, мм;

h – сварочный зазор или первоначальное расстояние между пластинами, определяющее скорость разгона метаемой пластины, мм.

В группу кинематических параметров процесса сварки взрывом входят:

- скорость детонации взрывчатого вещества D , м/с;
- метаемая пластина, первоначально установленная под углом α , град за тем повернутая под углом β , град;
- скорость соударения пластины V_c , м/с;
- угол соударения γ , град;
- скорость точки контакта V_k , м/с.

Схема кинематических параметров соударения пластин при сварке взрывом представлены на рисунке 11.

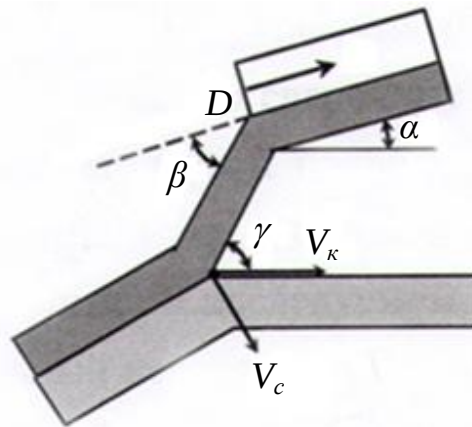


Рисунок 11 – Кинематическая схема соударения свариваемых пластин при сварке взрывом: D – детонация взрывчатого вещества, α – угол изначально установленной пластины, β – угол деформированной пластины, γ – угол соударения, V_k – скорость точки контакта, V_c – скорость соударения пластины

В группу физических параметров процесса сварки взрывом включают – величину давления в зоне соударения свариваемых элементов, температуру взаимодействующих слоев в точке их соударения, величину степени пластического деформирования контактирующих металлических слоев, время формирования неразъемного соединения в зоне соударения, начальную температуру слоев свариваемых металлов [34].

В ряде работ выделяется также группа энергетических параметров процесса сварки взрывом – удельная кинетическая энергия системы сваренных пластин, удельная энергия, затрачиваемая на пластическую деформацию металла в зоне соединения свариваемых элементов, удельная кинетическая энергия системы свариваемых элементов, удельная энергия, затрачиваемая на кумулятивный унос металла из вершины угла встречи соударяющихся пластин.

Скорость соударения метаемой пластины для смесевых взрывчатых веществ рассчитывают по следующей формуле [34]:

$$V_c = 1,2 \times D \times \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{32}{27}\right)^{r-1}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{32}{27}\right)^{r+1}}}, \quad (3)$$

где V_c – скорость соударения пластины, м/с;

D – скорость детонации взрывчатого вещества, м/с.

Под действием продуктов детонации метаемая пластина, первоначально установленная под углом α , поворачивается на угол β , а угол соударения γ равен сумме α плюс β и определяется как [34]:

$$\gamma = \alpha + 2 \times \arcsin\left(\frac{V_c}{2 \times D}\right), \quad (4)$$

где γ – угол соударения, град;

α – угол изначально установленной пластины, град.

Откуда можно определить скорость точки контакта [34]:

$$V_k = D \times \frac{\sin(\gamma - \alpha)}{\sin \gamma}, \quad (5)$$

где V_k – скорость точки контакта, м/с.

С практической точки зрения очевидным недостатком угловой схемы сварки взрывом является то, что по мере удаления от точки инициирования заряда взрывчатого вещества зазор h между свариваемыми элементами увеличивается, приводя к соответствующему изменению условий соударения пластин, что в свою очередь влияет на характер свойств получаемого композита [36].

По сравнению с угловой схемой сварки взрывом, в параллельной схеме угол α равен нулю, в этом случае создаются условия при некоторых допущениях для квазистационарного протекания процесса с постоянными величинами – γ , V_c , V_k , что позволяет применять ее для реализации большинства практических задач.

В схеме с параллельным расположением свариваемых пластин скорость движения точки контакта, показывающая скорость распространения зоны высокого давления по свариваемой поверхности принимается равной скорости детонации взрывчатого вещества [34]:

$$V_k = D \quad (6)$$

При нормальном соударении метаемых элементов их скорость может быть рассчитана путем совместного решения системы уравнений [35]:

$$V_0 = D \times \left[1 + \frac{\theta - 1}{\theta \times \eta} - \frac{\delta_0}{D \times t} \times \theta \right], \quad (7)$$

где V_0 – скорость при нормальном соударении, м/с;

η – приведённая масса, кг;

t – время полёта пластины, с.

$$X = D \times t \times \left[1 + \frac{\theta - 1}{\theta \times \eta} \right] - \delta_0, \quad (8)$$

где X – элементарное перемещение метаемого элемента, мм;

θ – приведенное время, с;

$$\eta = \frac{16}{27} \times \frac{\delta_0 \times \rho_0}{\delta_1 \times \rho_1}, \quad (9)$$

$$\theta = \left[1 + 2 \times \eta \times \left(1 - \frac{\delta_0}{D \times t} \right) \right]^{-1/2}, \quad (10)$$

При решении системы вышеуказанных уравнений получается ряд значений скорости метаемого элемента и его перемещений для определенных моментов времени, которые с достаточной степенью точности могут быть использованы для оценки процесса сварки взрывом [36].

К физическим параметрам относят величину давления, время его действия и температуру в зоне соударения. Для оценки верхней границы давления лучше всего использовать случай нормального соударения, при котором в момент удара пластины соприкасаются по всей площади одновременно и от контактной поверхности распространяются плоские ударные волны.

Расчет параметров сварки взрывом осесимметричных заготовок значительно сложнее вышеизложенного (для плоских металлических листов). Расчет ведут с учетом поправочных коэффициентов, учитывающих конфигурацию соударяющихся поверхностей и сопротивление металла, действующему на него давлению. Основные же закономерности образования сварного соединения плоских металлических листов сохраняются и при сварке осесимметричных заготовок [37].

На основе рассмотренных выше угловой и параллельной схем сварки взрывом основано все многообразие технологических решений, разработанных в области сварки взрывом конкретных композиционных материалов. Так, например, получение биметалла из пластин равной толщины можно реализовать по симметричной схеме, представленной на рисунке 12.

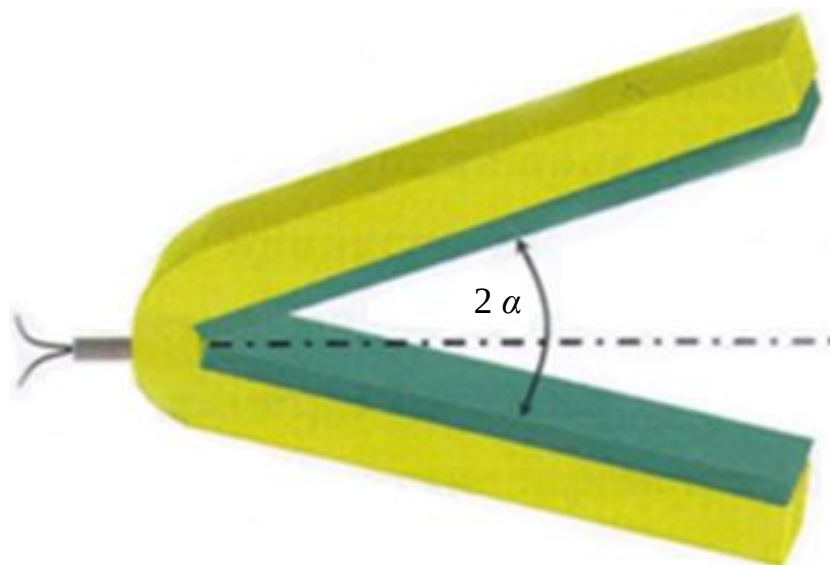


Рисунок 12 – Симметричная схема сварки взрывом плоских заготовок

При изготовлении сваркой взрывом многослойных композитов, параллельная схема трансформируется в одновременную схему сварки, в которой соединение трех и более металлических листов осуществляется за счет энергии, выделяющейся при детонации одного заряда [38, 39].

С учетом вышеизложенного при получения сваркой взрывом многослойных композиционных металлических материалов для изготовления композитного режущего инструмента, состоящего из трех, пяти и более слоев, следует использовать одновременную (параллельную) схему сварки взрывом плоских заготовок. Параллельное расположение свариваемых поверхностей получило большее распространение. Условия сварки одинаковы почти на всей площади свариваемой поверхности, поэтому размер заготовок не ограничивается. На опоре, которая может находиться на грунте, бетоне или стальном основании располагают неподвижную пластину, которая является основой, затем на некотором расстоянии параллельно размещают μεταаемую пластину.

2.3 Выбор технологических параметров и схемы процесса ударно-волнового нагружения для получения сваркой взрывом многослойного композиционного металлического материала

На основе проведенного исследования технологических схем получения сваркой взрывом композиционных металлических материалов для изготовления композитного режущего инструмента, состоящего из трех, пяти и более слоев было предложено использовать одновременную схему сварки взрывом плоских заготовок, приведенную на рисунке 13.

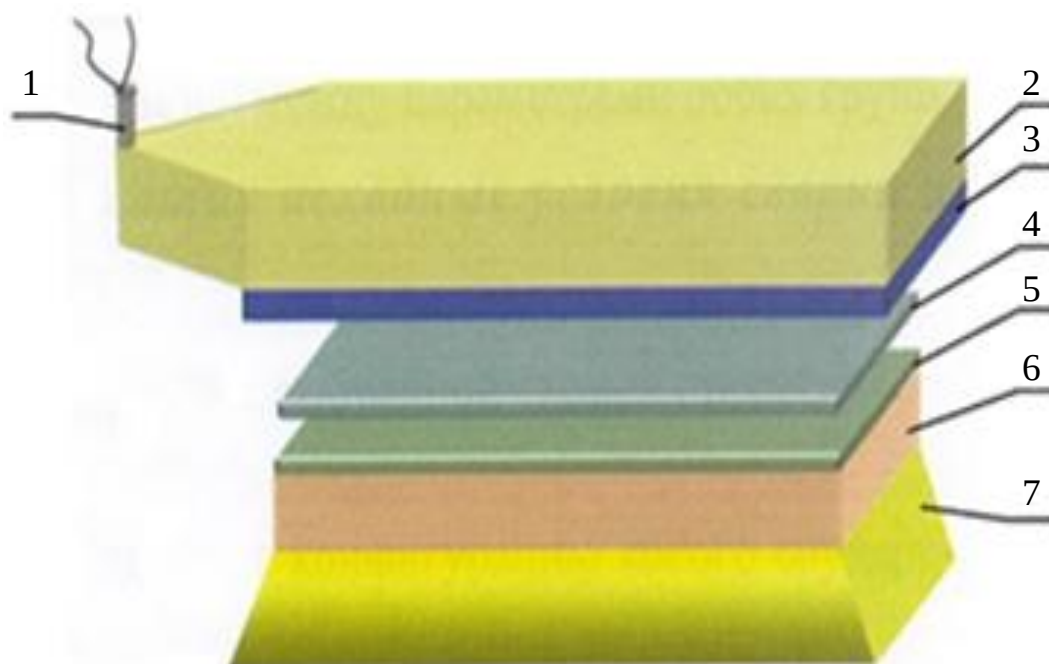


Рисунок 13 – Одновременная схема сварки взрывом плоских заготовок: 1 – электрический детонатор, 2 – контейнер, содержащий взрывчатое вещество, 3 – пластина (метаемая), 4 – пластина (промежуточная), 5 – пластина (неподвижная), 6 – пластина (основание), 7 – песчаное основание

Имеющиеся опытные данные по сварке взрывом аналогичных типов материалов, позволили определить ориентировочные диапазоны характеристик взрывчатого вещества для сварки соответствующих типов композитов, перекрывающие весь диапазон области свариваемости от минимального значения до максимального значения [40–44].

Расчет основных технологических параметров ударно-волновой обработки и последующая сварка на них образцов композиционного материала, позволит установить их рациональные значения.

В таблице 9 представлены режимы с исходными параметрами основных технологических параметров ударно-волновой обработки образцов композиционного материала.

Таблица 9 – режимы с исходными параметрами основных технологических параметров ударно-волновой обработки образцов композиционного материала

Режим сварки	Тип взрывчатого вещества	Исходные параметры сварки						
		Характеристики взрывчатого вещества			Величина зазора между слоями, мм			
		$D_{вв},$ м/с	$H_{вв},$ мм	$\rho_{вв},$ г/см ³	1–2	2–3	3–4	4–5
1	Игданит	2700,0	80,0	0,75	1,0	3,0	4,0	5,0
2	Игданит	2600,0	75,0	0,75	1,0	3,0	4,0	5,0
3	Игданит	2500,0	70,0	0,75	1,0	3,0	4,0	5,0

В таблице 10 представлены режимы с результатами основных технологических параметров ударно-волновой обработки образцов композиционного материала.

Таблица 10 – режимы с результатами основных технологических параметров ударно-волновой обработки образцов композиционного материала

Режим сварки	Тип взрывчатого вещества	Результаты расчёта					
		$V_k, \text{ м/с}$	V_c между слоями, м/с				
			1–2	2–3	3–4	4–5	
1	Игданит	2700,0	471,0	484,2	508,5	436,1	
2	Игданит	2600,0	447,8	457,9	477,9	406,8	
3	Игданит	2500,0	430,8	432,0	447,3	377,5	

Таким образом, определены предварительные диапазоны технологических параметров ударно-волнового нагружения и схема сварки взрывом многослойного композиционного металлического материала.

2.4 Изготовление экспериментальных образцов композиционного металлического материала, полученного сваркой взрывом

Для дальнейших исследований были получены экспериментальные образцы композиционного металлического материала системы 20X13 + 40X13 + 65X13 + 40X13 + 20X13, в котором слои из 20X13 выполняют роль профилирующих углов заточки, слои из 40X13 также выполняют профилирующие углы заточки и базовым режущим слоем является 65X13 [45–47].

Толщины свариваемых материалов составляли для стали 20X13 – 2 мм, для стали 40X13 – 2,5 мм, для стали 65X13 – 1,2 мм. Размеры образцов свариваемых материалов составляли 330×230 мм. Количество образцов каждого полученного композита около 10 штук.

В основу разработки композиционного материала заложено получение качественного соединения отдельных слоев металлов композита, что обеспечит не только требуемую прочность формируемого материала, но и возможностью дальнейшего взаимодействия исходных материалов в процессе последующей термической обработки для обеспечения требуемых свойств композита.

В ходе проведения полигонных работ были получены экспериментальные образцы композиционного металлического материала системы 20X13 + 40X13 + 65X13 + 40X13 + 20X13 [48].

Последующий визуально-измерительный контроль выявил наличие зон непроваров, прилегающих к местам неполной обрубки композита, который был сварен на нерациональных параметрах два и три, что являются недопустимыми дефектами и композит признается бракованным. Установлено, что рациональными технологическими параметрами для сварки композита является первый режим [49, 50].

При визуальном осмотре образцов композита из сталей 20X13 + 40X13 + 65X13 + 40X13 + 20X13 после сварки взрывом на режимах, указанных в таблицах 9 и 10 установлено, что на режимах два и три происходит неполная обрубка металла по краям композита, как показано на рисунке 14.



Рисунок 14 – Композиционный материал при сварке на нерациональных режимах два и три, на котором красным цветом выделены участки неполной обрубки металла по краям композита

При сварке на данном режиме и при визуальном осмотре поверхности композитов появление поверхностных дефектов не установлено, поверхность композита имеет наилучший товарный вид, дефектов не выявлено, пример композита приведён на рисунке 15.

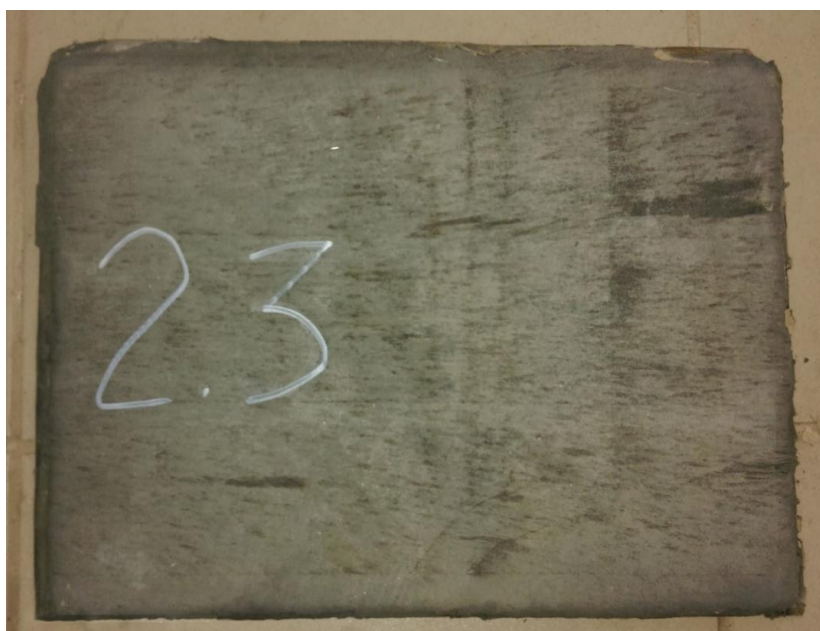


Рисунок 15 – Листовой полуфабрикат композиционного материала (без дефектов) при сварке на рациональном режиме

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ПГУ.ВКР.22.03.01.16МТ114.ПЗ

Лист

45

Выводы по второй главе

Таким образом, после проведения теоретических исследований определены предварительные диапазоны технологических параметров ударно-волнового нагружения и схема сварки взрывом многослойного композиционного металлического материала. Изготовлены экспериментальные образцы композиционного металлического материала, полученного сваркой взрывом, следующей системы сталей 20Х13 + 40Х13 + 65Х13 + 40Х13 + 20Х13. Выполнен визуально-измерительный контроль на наличие поверхностных дефектов полученного композиционного материала. На основе результатов визуально-измерительного контроля определены рациональные технологические параметры и схема сварки взрывом, обеспечивающие получение качественного образца композита.

					ПГУ.ВКР.22.03.01.16МТ114.ПЗ	Лист
						46
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

3 Проведение исследований микроструктуры и деформируемости на экспериментальных образцах композиционного металлического материала после отжига

3.1 Проведение отжига на экспериментальных образцах композиционного металлического материала

Термическая обработка композиционного материала включает в себя рекристаллизационный отжиг, обеспечивающий рекристаллизацию и разупрочнение материала, вызванное наклепом в результате пластической деформации после сварки взрывом. При нагреве композита обязательным условием является выбор требуемой температуры, обеспечивающей полную рекристаллизацию всех слоев материала. За счет рациональных режимов отжига, зерна материала восстанавливают исходную форму, и композит восстанавливает исходный уровень свойств [51]. После термической обработки пластичность увеличивается, твердость снижается, потому что происходит рекристаллизация и снятие наклепа. Для композитов рациональная температура отжига составляет интервал от 880 до 900 °С, с последующим охлаждением в печи СНОЛ 12/16 которая представлена на рисунке 16.



Рисунок 16 – Внешний вид печи СНОЛ 12/16

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ПГУ.ВКР.22.03.01.16МТ114.ПЗ

Лист

47

Характеристики печи представлены в таблице 11.

Таблица 11 – Основные характеристики печи

Параметры	Рабочая камера, мм	Максимальная температура, °С	Габариты, мм	Вес, кг	Рабочая среда	Мощность, кВт
Значения	200,0×300,0×200,0	1650,0	550×700×850	100,0	Воздух	8,0

3.2 Проведение исследований микроструктуры на экспериментальных образцах композиционного металлического материала

Исследование микроструктуры экспериментального образца композиционного металлического материала проводили на прямом металлографическом микроскопе модульной конструкции с цифровой камерой, с планахроматической оптикой на бесконечность АЛЬТАМИ МЕТ 6С, который представлен на рисунке 17.



Рисунок 17 – Металлографический микроскоп АЛЬТАМИ МЕТ 6С

Микроскоп укомплектован программным обеспечением «AltamiStudio» для управления цифровыми камерами, проведения измерений и автоматического анализа изображений [52].

Технические характеристики металлографического микроскопа АЛЬТАМИ МЕТ 6С представлены в таблице 12.

Таблица 12 – Технические характеристики металлографического микроскопа АЛЬТАМИ МЕТ 6С

Методы исследований	В отраженном свете: светлое поле и поляризация
Увеличения, крат	25, 50, 62,5, 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, как называемых микрошлифах. Для выявления особенностей микроструктуры выполняли химическое травление микрошлифов с применением реактивов на основе концентрированных азотной HNO_3 от 65 до 68 % масс и соляной кислоты HCl от 32 до 35 % масс. Кислоты, взятые в соотношении один к трём по объёму, имеют массовое соотношение один к двум по объёму в пересчёте на чистые вещества [53].

Внешний вид обоймы с протравленным микрошлифом многослойного металлического композиционного материала приведен на рисунке 18.



Рисунок 18 – Внешний вид обоймы протравленного композита

Фотография рабочего места для проведения исследований микроструктуры экспериментальных образцов композиционных металлических материалов приведена на рисунке 19.

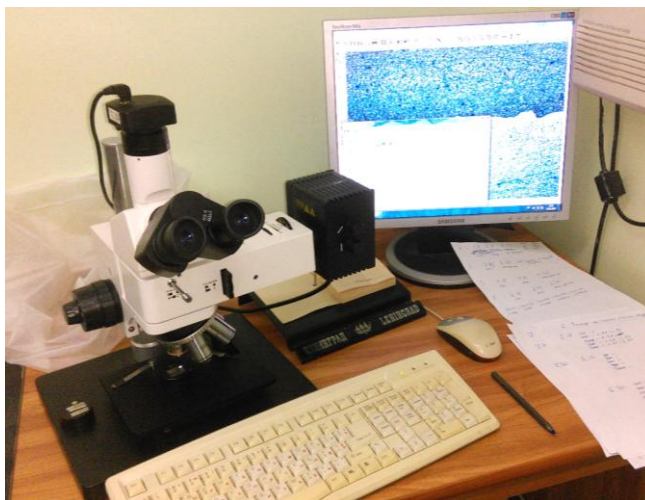


Рисунок 19 – Исследование микроструктуры экспериментальных образцов композиционных металлических материалов

Дальнейшее исследование микроструктуры экспериментального образца проводилось только по пятислойному металлическому композиционному материалу после отжига. Микроструктура композиционного материала следующей системы сталей 20X13 + 40X13 + 65X13 + 40X13 + 20X13 рассматривалась сверху вниз, как показано на рисунке 20.

Анализ микроструктуры экспериментального образца композиционного металлического материала под увеличением $\times 200$ показал микроструктуру и характер сварных швов в ходе ударно-волнового нагружения между слоями.

Микроструктура стали 20X13 в верхней части композита показана на рисунке 21. Сварной шов между верхними слоями из 20X13 и 40X13, которые располагаются непосредственно под зарядом взрывчатого вещества, имеет ярко выраженный волновой характер, как показано на рисунке 22. Микроструктура стали 40X13 в верхней части композита показана на рисунке 23. Следующий сварной шов между верхними слоями из 40X13 и 65X13 для образца композиционного металлического материала тоже имеет ярко выраженный волновой характер, как показано на рисунке 24. Микроструктура стали 65X13 в средней

части композита показана на рисунке 25. Следующий сварной шов между нижними слоями из 65Х13 и 40Х13 имеет безволновой характер, как показано на рисунке 26. Микроструктура стали 40Х13 в нижней части композита показана на рисунке 27. Сварной шов между нижними слоями из 40Х13 и 20Х13 имеет ярко выраженный волновой характер, как показано на рисунке 28. Микроструктура стали 20Х13 в нижней части композита показана на рисунке 29.

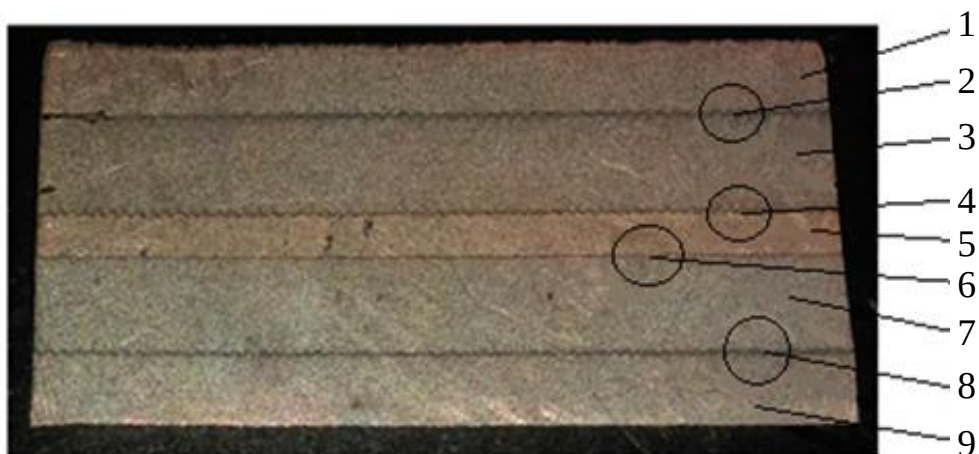
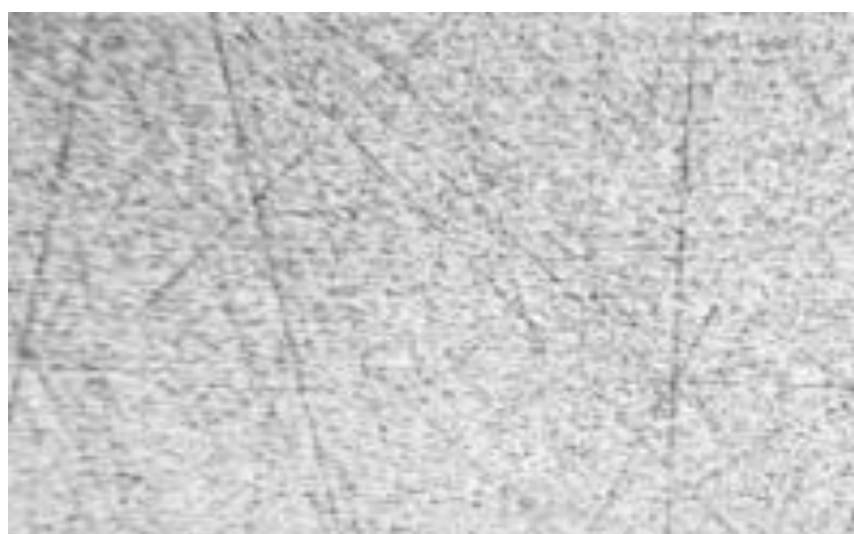


Рисунок 20 – Общее изображение композиционного материала системы сталей 20Х13 – 40Х13 – 65Х13 – 40Х13 – 20Х13: 1 – сталь 20Х13, 2 – сварной шов между сталями 20Х13 и 40Х13, 3 – сталь 40Х13, 4 – сварной шов между сталями 40Х13 и 65Х13, 5 – сталь 65Х13, 6 – сварной шов между сталями 65Х13 и 40Х13, 7 – сталь 40Х13, 8 – сварной шов между сталями 40Х13 и 20Х13, 9 – сталь 20Х13



×200

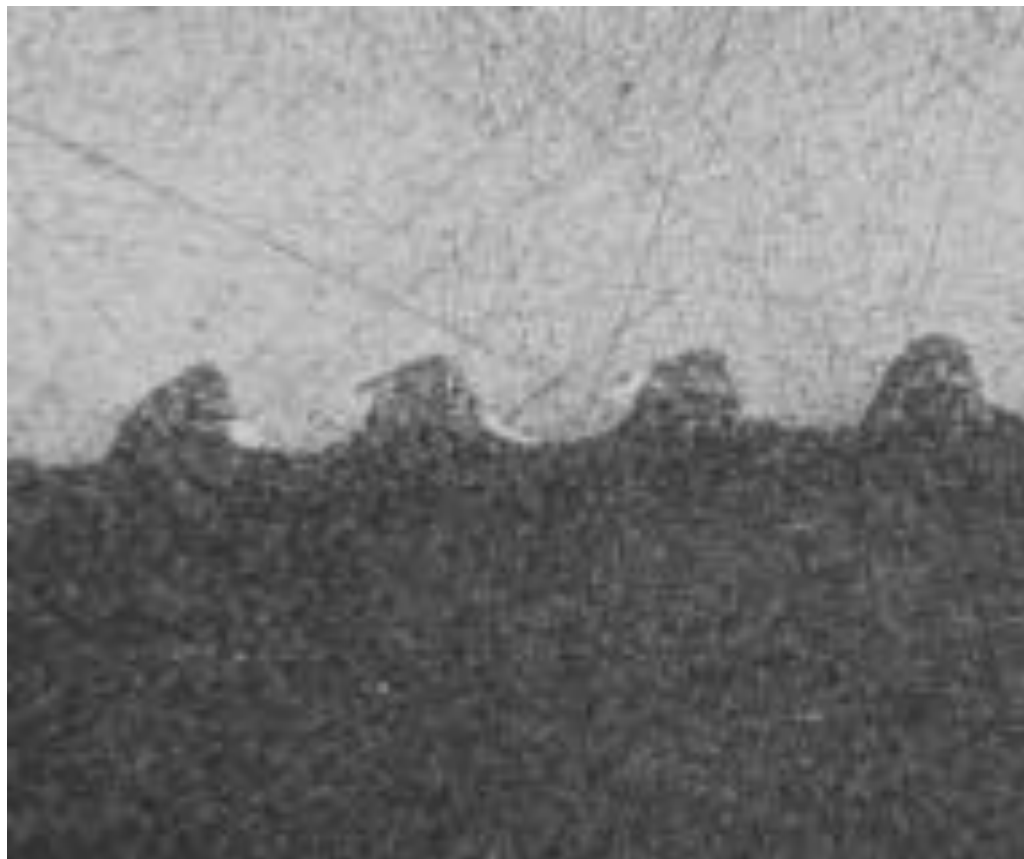
Рисунок 21 – Микроструктура стали 20Х13

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ПГУ.ВКР.22.03.01.16МТ114.ПЗ

Лист

51

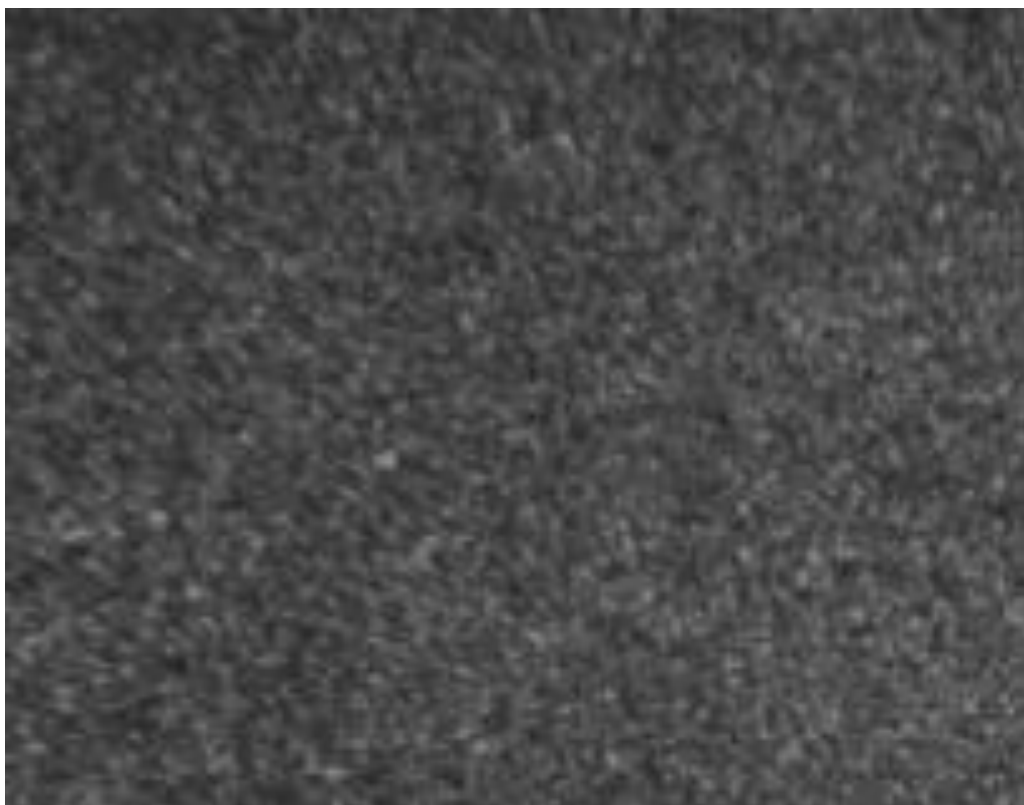


20X13

40X13

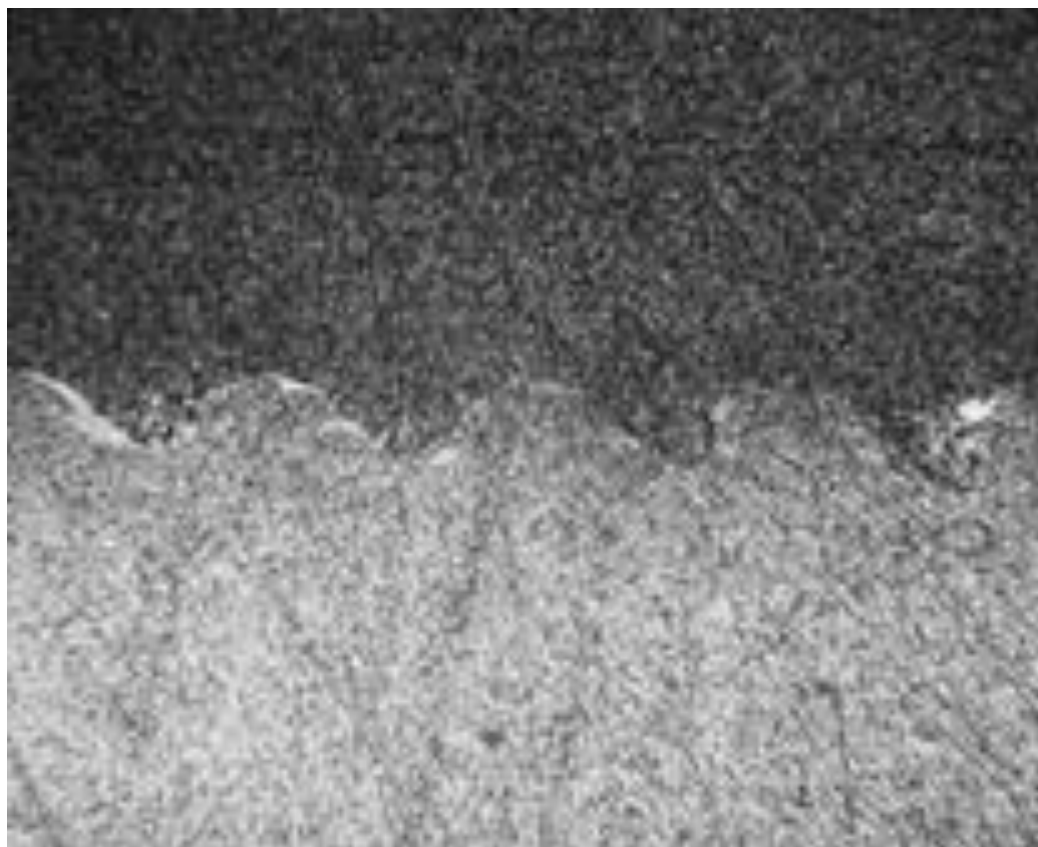
×200

Рисунок 22 – Сварной шов между сталями 20X13 и 40X13



×200

Рисунок 23 – Микроструктура 40X13



40X13

65X13

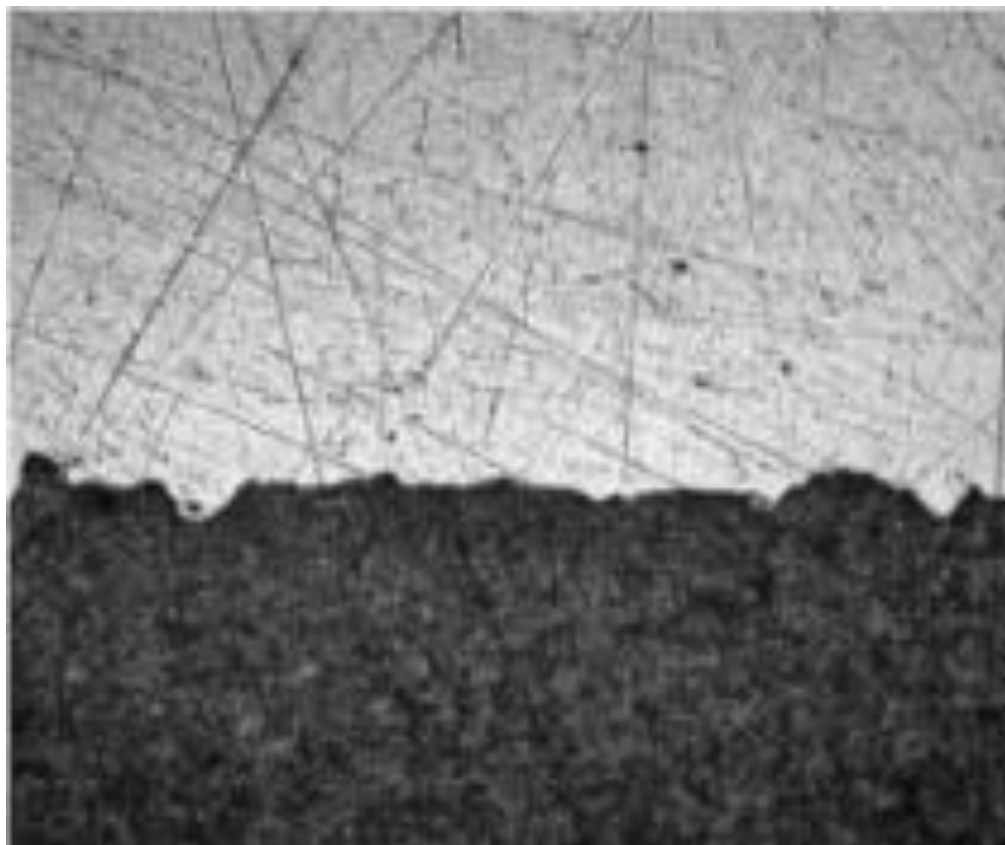
×200

Рисунок 24 – Сварной шов между сталями 40X13 и 65X13



×200

Рисунок 25 – Микроструктура 65X13

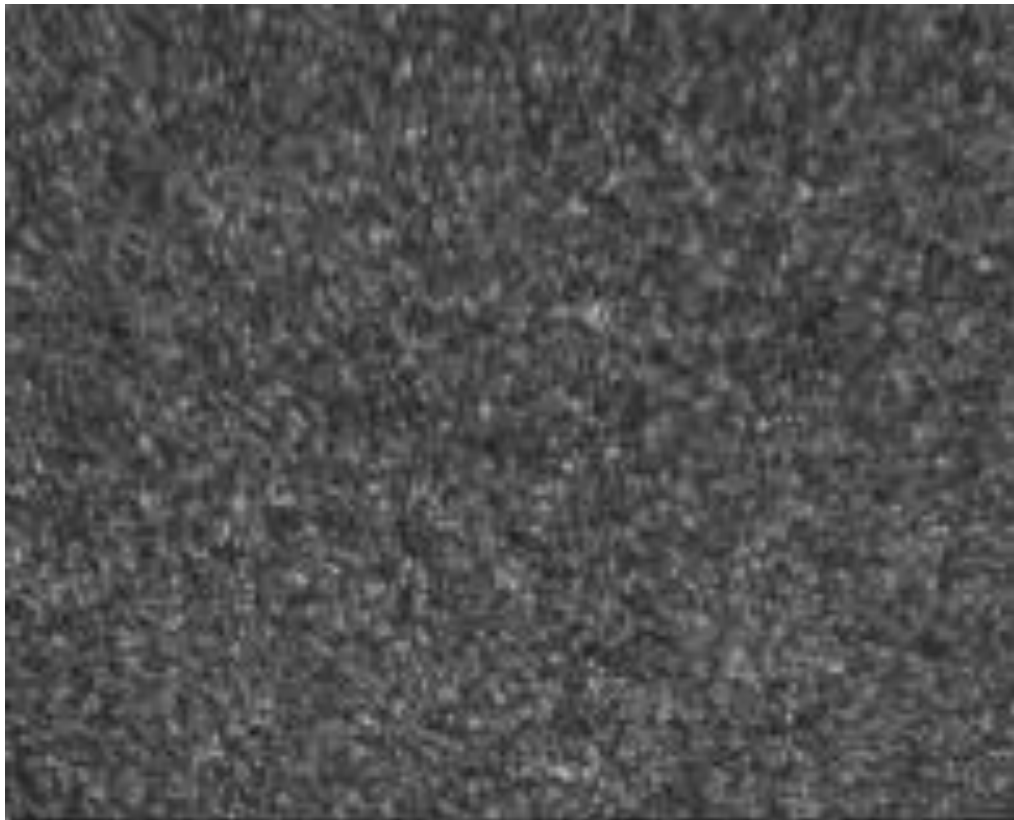


65X13

40X13

×200

Рисунок 26 – Сварной шов между сталями 65X13 и 40X13



×200

Рисунок 27 – Микроструктура 40X13

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ПГУ.ВКР.22.03.01.16МТ114.ПЗ

Лист

54

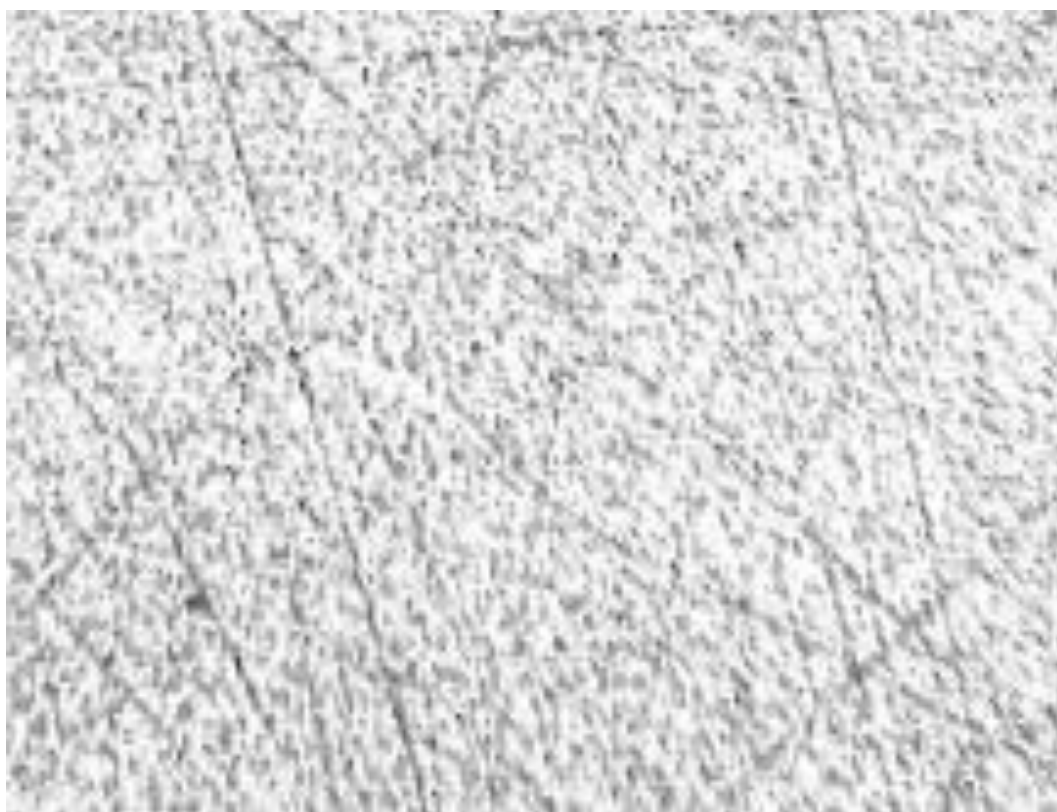


40X13

20X13

×200

Рисунок 28 – Сварной шов между сталями 40X13 и 20X13



×200

Рисунок 29 – Микроструктура 20X13

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ПГУ.ВКР.22.03.01.16МТ114.ПЗ

Лист

55

Исследование показало, что для слоев композита из сталей марок 20X13, 40X13 и 65X13 характерна структура на основе зернистого перлита с крупными и мелкими частицами карбидов. В структуре сталей также присутствуют карбиды округлой и пластинчатой формы. Основа металлической матрицы материала ферритная. Объемное содержание перлитной фазы в структуре сталей возрастает с увеличением содержания в них углерода [54].

В состоянии после сварки взрывом для экспериментального образца композиционного металлического материала характерно изменение формы кристаллических зерен, вызванное внешним ударно-волновым нагружением в ходе процесса сварки взрывом. Степень пластической деформации и вытянутости кристаллических зерен максимальна в листах композита, располагавшихся непосредственно под зарядом взрывчатого вещества. Результаты исследования микроструктуры экспериментального образца композиционного материала, позволяют сделать вывод, что в ходе сварки взрывом композит получает значительный наклёп, приводящий к изменению его физико-механических свойств, что подтверждается результатами исследования прочности, пластичности и ударной вязкости.

Технология получения композиционного материала, обладающего эффектом самозатачиваения, предусматривает дальнейший технологический передел полуфабриката, заключающийся в его механической правке после сварки взрывом с целью подготовки к последующим операциям формообразования. Для повышения пластичности и обрабатываемости композиционного материала сваренного взрывом требуется проведение последующей термической обработки в виде отжига.

Исследование микроструктуры экспериментального образца композиционного металлического материала после отжига показало, что вытянутость формы кристаллических зерен, вызванное внешним ударно-волновым нагружением в ходе процесса сварки взрывом, устранена. Кристаллические зерна всех слоев композита имеют округлую равноосную форму.

3.3 Проведение исследований деформируемости на экспериментальных образцах композиционного металлического материала

Оценку на деформируемость проводили испытанием на статический изгиб для образца композиционного металлического материала после сварки взрывом и после отжига при нормальной температуре на разрывной машине модели ИР 5145–500, внешний вид которой представлен на рисунке 30.



Рисунок 30 – Внешний вид разрывной машины ИР 5145–500–11

Машина модели ИР 5145–500–11 позволяет дополнительно программными методами определить – предел текучести условный, физический, а модуль упругости и предел пропорциональности с помощью ИДН–0,5/50.

Машины выдают протокол результатов испытаний. Сертификат ГОССТАНДАРТА РОССИИ № 8656. Разрывные машины ИР 5145–500 внесены в Госреестр РФ под номером 20229–00. Характеристики разрывной машины ИР 5145–500 приведены в таблице 13.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ПГУ.ВКР.22.03.01.16МТ114.ПЗ

Лист

57

Таблица 13 – Характеристики разрывной машины ИР 5145–500

Параметры	Значение
Наибольшая предельная нагрузка, кН	500,0
Пределы допускаемой погрешности измерения нагрузки, % (в диапазоне нагрузок, кН)	$\pm 1,0$ (20,0...500,0)
Скорость перемещения активного захвата, мм/мин	0,5...200,0
Номинальная цена единицы наименьшего разряда: при индикации нагрузки, Н	10,0
При измерении перемещения активного захвата, мм	0,01
Ход подвижной траверсы без захватов, мм	800,0
Ширина рабочего пространства, мм	750,0
Максимальная мощность разрывной машины ИР 5145-500-1, кВт (питание)	5,3 (3N, 380,0В, 50,0 Гц)
Габаритные размеры (ширина х длина х высота), мм установка испытательная стойка приборная	1340,0×1175,0×2710,0 1500,0×750,0×895,0
Масса, кг установка испытательная стойка приборная	1840,0 260,0

Испытания проводились согласно методике ГОСТ 14019–2003 (СТ СЭВ 474–38, ИСО 7438–85) [55].

Критерием прохождения является угол изгиба не менее 120 град без расслоения в месте изгиба, приведённый в НТД ТУ 27.81.09.009 – 2005 и ТУ 27.32.09.010–2005 [57, 58].

На рисунке 31 представлена фотография экспериментального образца композиционного металлического материала до проведения испытаний на статический изгиб.



Рисунок 31 – Экспериментальный образец композиционного металлического материала до проведения испытаний на статический изгиб

На рисунке 32 представлена фотография экспериментального образца композиционного металлического материала после проведения испытаний на статический изгиб.



Рисунок 32 – Экспериментальный образец композиционного металлического материала после проведения испытаний на статический изгиб

Испытания на статический изгиб проводились несколько раз на нескольких образцах одного вида композиционного материала [56].

Фотография после проведения испытаний на статический изгиб экспериментальных образцов одного вида композиционного металлического материала видом сверху показаны на рисунке 33а, видом сбоку показаны на рисунке 33б.

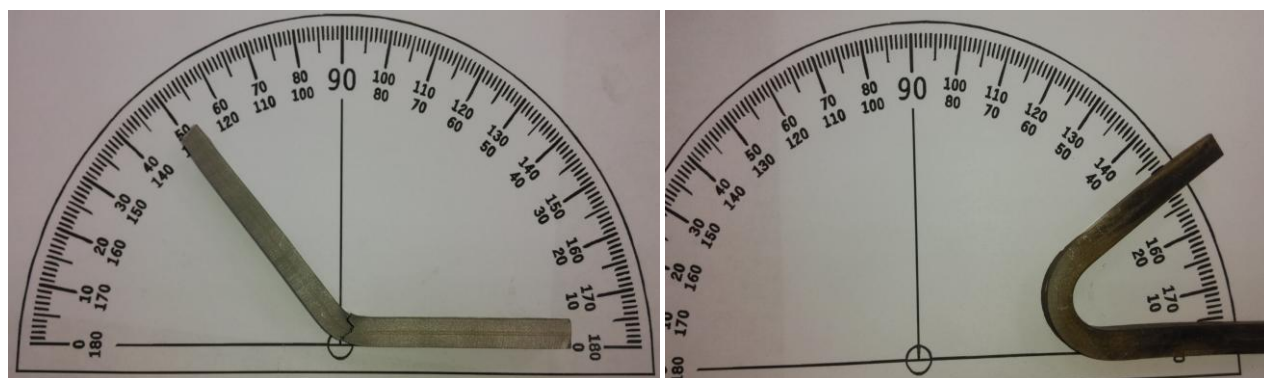


а)

б)

Рисунок 33 – Образцы одного вида композиционного материала после испытания на статический изгиб: а) – вид сверху; б) – вид сбоку

Для экспериментальных образцов одного вида композиционного металлического материала в состоянии после сварки взрывом величина угла фактического изгиба находится в диапазоне от 40 до 50 град, как показано на рисунке 34а. В состоянии после отжига величина угла фактического изгиба составляет 150 град, как показано на рисунке 34б.



а)

б)

Рисунок 34 – Величина углов композиционного материала после испытания на статический изгиб: а) – после сварки взрывом; б) – после отжига

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ПГУ.ВКР.22.03.01.16МТ114.ПЗ

Лист

60

Выводы по третьей главе

Таким образом, комплексные исследования и испытания на деформируемость нескольких композитов одного вида в состоянии после сварки взрывом и отжига выявили необходимость проведения отжига материала перед последующим формообразованием и механической обработкой. Отжиг композиционного металлического материала обеспечивает повышение пластичности, снижение хрупкости материала и как следствие улучшение деформируемости и его обрабатываемости.

В результате выполнения практических исследований были определены рациональные технологические схемы сварки взрывом, режимы ударно-волнового нагружения на структуру и деформируемости композиционного материала, что обеспечивает получение качественных образцов пятислойного композита системы сталей 20Х13 + 40Х13 + 65Х13 + 40Х13 + 20Х13.

Заключение

Проведен выбор исходных материалов для создания композита, изучены их свойства и области применения. При выборе исходных материалов учтено требуемое соотношение твердости внешних слоев композита и внутреннего режущего слоя (соотношение твердости находится в диапазоне от 1,2 до 2,6), что прогнозируемо обеспечит эффект самозатачивания композитного режущего инструмента.

С помощью сварки взрывом изготовлены экспериментальные образцы композиционного пятислойного металлического материала из сталей 20X13 + 40X13 + 65X13 + 40X13 + 20X13.

Исследовано влияние режимов сварки взрывом на образование поверхностных дефектов и непроваров композиционного материала показало, что наилучшее качество пятислойного композиционного материала было получено на взрывчатом веществе с высотой заряда $H_{\text{вв}}$ 80 мм, на остальных зарядах высотой 70 мм и 75 мм наблюдались непровары и обрубленные части композита.

Определены рациональные технологические параметры ударно-волнового нагружения:

- скорость детонации взрывчатого вещества $D_{\text{вв}}$ составляет 2700 м/с;
- величина зазора между первым из 20X13 и вторым из 40X13 слоями составляет 1 мм, между вторым из 40X13 и третьим из 65X13 слоями составляет 3 мм, между третьим из 65X13 и четвертым из 40X13 слоями составляет 4 мм, между четвертым из 40X13 и пятым из 20X13 слоями составляет 5 мм;
- скорость точки контакта $V_{\text{к}}$ составляет 2700 м/с;
- скорость соударения $V_{\text{с}}$ между первым из 20X13 и вторым из 40X13 слоями составляет 471 м/с, между вторым из 40X13 и третьим из 65X13 слоями составляет 484,2 м/с, между третьим из 65X13 и четвертым из 40X13 слоями составляет 508,5 м/с, между четвертым из 40X13 и пятым из 20X13 слоями составляет 436,1 м/с.

Проведены исследования микроструктуры и деформируемости экспериментальных образцов композиционных металлических материалов после отжига.

Для композитов рациональная температура отжига составляет интервал от 880 до 900 °С, с последующим охлаждением в печи. После отжига происходит рекристаллизация материала. Структура феррита и перлита преобразуется в округлую форму, что приводит к снижению твердости (разупрочнению) композита и как следствие к улучшению его обрабатываемости.

Для экспериментальных образцов одного вида композиционного металлического материала в состоянии после сварки взрывом величина угла фактического изгиба находится в диапазоне от 40 до 50 град. В состоянии после отжига величина угла фактического изгиба составляет 150 град.

Заложенные в проекте научно-технические решения, позволили разработать технологические основы изготовления композиционных металлических материалов для режущего инструмента с применением сварки взрывом, обеспечивающие получение качественных образцов материалов в сравнении с лучшими достижениями в области изготовления композита. Результаты исследования в текущей НИОКР защищены путем регистрации в режиме ноу-хау (номер государственной регистрации РИД: АААА–Г18–618112190004–3 от 29.11.2018 г.).

					ПГУ.ВКР.22.03.01.16МТ114.ПЗ	Лист
						63
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Список использованных источников

1. **Васильев, В.В. Композиционные материалы** [Текст]: справочник / В.В. Васильев [и др.] // под общ. ред. В.В. Васильева, Ю.М. Тарнопольского. М.: Машиностроение, 1990. – 512 с.
2. **Крейдер, К. Композиционные материалы с металлической матрицей** [Текст] / под ред. К. Крейдер; пер. с англ. под ред. К.И. Портного. – М.: Машиностроение, 1978. – 502 с.
3. **Кудинов, М.К. Сварка взрывом в металлургии** [Текст]: учеб. для вузов / В.М. Кудинов, А.Я. Коротеев. – М.: Металлургия, 1987. – 168 с.
4. **Сталь толстолистовая коррозионностойкая, жаростойкая и жаропрочная. Технические условия** [Текст]: ГОСТ 7350–77. – Введ. 1979–01–01. – М.: Изд-во стандартов ИПК, 2002. – III, 11 с.
5. **Сталь сортовая и калиброванная коррозионностойкая, жаростойкая и жаропрочная. Технические условия** [Текст]: ГОСТ Р 5949–75. – Введ. 1977–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 2004. – 23 с.
6. **Легированные нержавеющие стали и сплавы коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки** [Текст]: ГОСТ 5632–2014. – Введ. 2015–01–01. – М.: Стандартинформ, 2015. 48 с.
7. **Сталь 20X13 и её особенности, характеристики и использование** [Электронный ресурс] / Сталь: [сайт]. URL: <https://prompriem.ru/stal/20x13.html> (дата обращения 03.03.2020).
8. **Сталь 40X13 и её особенности, характеристики и использование** [Электронный ресурс] / Сталь: [сайт]. URL: <https://prompriem.ru/stati/stal-40na13.html> (дата обращения 03.03.2020).
9. **Сталь 65X13** [Электронный ресурс] / Нержавеющие стали: [сайт]. URL: <https://prompriem.ru/stati/stal-65x13.html> (дата обращения: 05.03.2020).
10. **Тучинский, Л.И. Новые композиционные материалы** [Текст]: учеб. пособие / Л.И. Тучинский, Л.Р. Вишняков. – Киев: Высшая школа, 1977. – 312 с.

11. **Ковтунов, А.И. Слоистые композиционные материалы** [Текст]: учеб. пособие / А.И. Ковтунов. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2017. – 75 с.
12. **Шишкин, Т.А. Комбинированный метод изготовления биметалла (сварка взрывом и горячая пакетная прокатка)** [Текст] / Т.А. Шишкин, О.Л. Первухина, Л.Б. Первухин // Научно-технический прогресс в черной металлургии. – Череповец: Изд-во Череповецкого гос. ун-та, 2015. – 152 с.
13. **Батаев, А.А. Композиционные материалы: строение, получение, применение** [Текст]: учеб. для вузов / А.А. Батаев, В.А. Батаев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 384 с.
14. **Прокат тонколистовой коррозионностойкий, жаростойкий и жаропрочный. Технические условия** [Текст]: ГОСТ Р 5582–75. – Введ. 01–01–1977. – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 11 с.
15. **Ольшанский, Н.А. Специальные методы сварки** [Текст]: учеб. для вузов / Н.А. Ольшанский, Г.А. Николаев. – М.: Машиностроение, 1999. – 232 с.
16. **Слоистые композиционные материалы** [Электронный ресурс] / Композиционные материалы: [сайт]. URL: <http://metal-archive.ru/litye-materialy/105-sloistye-kompozicionnye-materialy.html> (дата обращения: 18.03.2020)
17. **Мальцева, Л.А. Материаловедение** [Текст]: учебное пособие / Л.А. Мальцева, М.А. Гервасьев. – Екб: ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2007. – 339 с.
18. **Захаренко, И.Д. Сварка металлов взрывом** [Текст]: науч. издание / И.Д. Захаренко. – М.: Наука и техника, 1990. – 205 с.
19. **Первухин, Л.Б. Новые композиционные материалы и высокоэнергетические технологии их создания** [Текст] / Л.Б. Первухин // Сб. науч. Статей Международной дистанционной научной конференции «Современная наука: актуальные проблемы и пути их решения». Под ред. М.Ю. Левина. – Липецк, 2014. С. 7.
20. **Способ изготовления сваркой взрывом плоской биметаллической заготовки** [Текст]: пат. 2397850 рос. Федерация: МПК В23К20/08/ Вакин В.С.; патентообладатели Санкт–Петербург, ЗАО «Энергометалл», Вакин В.С. – № 2009123391/02; заявл. 11.06.2009; опубл. 27.08.2010, Бюл. № 24.

21. **Способ упрочнения режущего инструмента** [Текст]: пат. 2601520 Рос. Федерация: МПК C23C4/12/ Васильев Е.В.; патентообладатель Тольятти, Васильев Е.В. – № 2015108808/02; заявл. 12.03.2015; опубл. 10.11.2016, Бюл. № 27.

22. **Слоистый композиционный материал** [Текст]: пат. 1 670 182 Рос. Федерация: МПК B22F7/04, B32B15/00 / Огнева Т.С.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет». – № 2016137956/05; заявл. 23.09.16; опубл. 20.12.16, Бюл. № 35. – 7 с: ил.

23. **Способ получения композиционного материала титан – сталь** [Текст]: пат. 2463139 Рос. Федерация: МПК B23K20/08, B32B7/04, B32B15/01/ Трыков Ю.П.; патентообладатель Волгоград, Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования ВолГТУ – № 2011114484/02; заявл. 13.04.2011; опубл. 10.10.2012, Бюл. № 28.

24. **Самозатачивающийся режущий инструмент для древесины мягких пород** [Текст]: пат. 2433033 Рос. Федерация: МПК B27B33/08, B26D7/12/ Свиридов Л.Т.; патентообладатель Воронеж, Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Воронежская государственная лесотехническая академия» – № 2010106741/02; заявл. 24.02.2010; опубл. 10.11.2011, Бюл. № 31.

25. **Способ получения слоистых композиционных материалов** [Текст]: пат. 2562279 Рос. Федерация: МПК B32B15/01, C22C1/08, B22F3/18. Способ получения слоистых композиционных материалов / А. И Ковтунов; заявитель и патентообладатель Тольятти, гос. ун-т.– № 2014118005/05; заявл. 05.05.2014; опубл. 10.09.2015, Бюл. № 25.

26. **Способ упрочнения лемеха плуга** [Текст]: пат. 2607680 Рос. Федерация: МПК B23P6/00, A01B15/04, B23H9/00/ Гришко Д.А.; патентообладатель Москва, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» – № 2015128509; заявл. 15.07.2017; опубл. 10.01.2017, Бюл. № 1.

27. **Способ получения композиционного материала** [Текст]: пат. 2407640 Рос. Федерация: МПК В32В15/02, С22С47/20, В23К20/08/ Розен А.Е., Лось И.С., Крюков Д.Б. [и др.]; патентообладатели Пенза, Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Федерального агентства по образованию Пензенский Государственный Университет, институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения, РАН, Пензенский региональный научно–технический центр по сварочному производству и промышленной безопасности «СУРА». – № 2008131359/02; заявл. 29.07.2008; опубл. 27.12.2010, Бюл. № 36.

28. **Многослойный композиционный материал, способ его изготовления изделие, полученное из этого материала** [Текст]: пат. 2006371 Рос. Федерация: МПК В32В15/18, В22Д19/02, С22С38/02, С22С38/56. Многослойный композиционный материал, способ его изготовления и изделие, полученное из этого материала/ А.В. Румянцев; заявитель и патентообладатель А.В. Румянцев. – № 5028627/02; заяв. 21.01.1992; опубл. 30.01.1994, Бюл. № 25.

29. **Официальный сайт учреждения «Федеральный институт промышленной собственности»** [сайт]. URL: <http://new.fips.ru> (дата обращения: 17.05.2020).

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

31. **Конева, Н.А. Природа стадий пластической деформации** [Текст] / Н.А. Конева // Соросовский образовательный журнал. – 1998. – № 10. – С. 99–105.

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

33. **Лысак, В.И. Основные схемы и параметры сварки взрывом слоистых композиционных материалов** [Текст] / В.И. Лысак, С.В. Кузьмин // Межвузовский сборник научных трудов: Сварка взрывом и свойства сварных соединений. – Волгоград: Изд-во ВолгГТУ, 1998. – С. 3–28.

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

35. **Седых, В.С. Классификация, оценка и связь основных параметров сварки взрывом** [Текст] / В.С. Седых // Межвузовский сборник научных трудов: Сварка взрывом и свойства сварных соединений. – Волгоград: Изд-во ВолгГТУ, 1985. – С.3–30.

36. **Орленко, Л.П. Физика взрыва** [Текст] / Под ред. Л.П. Орленко. – Изд. 3-е, испр. – В 2 т. Т. 2. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 656 с.

37. **Мейерса, М.А. Ударные волны и явления высокоскоростной деформации металлов** [Текст] / Под ред. Мейерса М.А. [и др.]: Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1984. – 512 с.

38. **Рыбин, В.В. Большие пластические деформации и разрушение металлов** [Текст]: монография / В.В. Рыбин. – М.: Металлургия, 1986. – 224 с.

39. **Баум, Ф.А. Физика взрыва** [Текст] / Ф.А. Баум, К.П. Станюкович, Б.И. Шехтер. – М.: Изд-во физико-математической литературы, 1959. – 800 с.

40. **Крюков, Д.Б. Математическая модель и программа расчета параметров ударно-волнового нагружения плоских и цилиндрических элементов** [Текст] / Д.Б. Крюков, М.С. Гуськов // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе: сб. тр. III Всерос. науч.-практ. конф. студентов и молодых ученых. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2013. – С. 145.

41. **Крюков, Д.Б. Использование программного продукта *Solid Works* для получения механических характеристик упрочненных композиционных материалов системы титан-алюминий** [Текст] / Д.Б. Крюков, М.С. Гуськов // Новые перспективные материалы и технологии их получения (НПМ–2014): сб. науч. тр. VI Междунар. конф. – Волгоград, 2014. – С. 119–120.

42. **Сварка разнородных материалов взрывом и программа расчета основных технологических параметров** [Текст] / Э.С. Атрощенко [и др.] // Технические средства охраны, комплексы охранной сигнализации и системы управления доступом: тез. докл. третьей Всерос. науч.-практ. конф. – Пенза, 2000. – С.142–144.

43. **Специализированный программный модуль автоматизированного проектирования технологии сварки взрывом многослойных композиционных материалов** [Текст] / А.Е. Розен [и др.] // Современные проблемы повышения эффективности сварочного производства: сб. материалов Всерос. заочной научно-технич. конф. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2011. – С. 341–346.

44. **Программа автоматизированного проектирования технологического процесса сварки взрывом многослойных композиционных материалов** [Текст] / Д.Б. Крюков [и др.] // «Инновационные технологии в машиностроительном комплексе»: сб. тр. I Междунар. науч.–практ. конф. под ред. В.З. Зверовщикова, М.В. Белашова. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2012. – 360 с. – С. 323–326.

45. **Мейерс, М.А. Ударные волны и явления высокоскоростной деформации металлов** [Текст] / Пер. с англ. М.А. Мейерс, Л.Е. Мурр. Под ред. М.А. Мейерса. – М.: Металлургия. – 1984. – 511 с.

46. **Захаренко, И.Д. Тепловые эффекты в зоне соединения при сварке взрывом** [Текст] / Захаренко И.Д., Соболенко Т.М. // Физика горения и взрыва. – Новосибирск: СО РАН, 1971. – Т.7. – № 3. – С. 433–436.

47. **Ионов, В.Н. Динамика разрушения деформируемого тела** [Текст]: учеб. пособие / В.Н. Ионов, В.В. Селиванов. – М.: Машиностроение. – 1987. – 272 с.

48. **Крупин, А.В. Деформация металлов взрывом** [Текст] учеб. пособие / А.В. Крупин, В.Я. Соловьев, А.Г. Кобелев. – М.: Металлургия. – 1975. – 416 с.

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

50. **Унифицированные методики. Визуальный и измерительный контроль** [Текст]: ГОСТ Р 50.05.08–2018. – Введ. 2018–12–28. – М.: – Стандартинформ. 2018. – 45с: ил.

51. **Бернштейн, М.Л. Металловедение и термическая обработка стали** [Текст]: справочник / М.Л. Бернштейна, А.Г. Рахштадта. – М.: Металлургия, – 1983. – 352 с.

52. **Альтами МЕТ 6С** [Электронный ресурс] / Альтами: [сайт]. URL: http://altami.ru/microscopes/metallurgical/digi/altami_met6s/ (дата обращения: 21.05.2020).

53. **Беккерт, М. Справочник по металлографическому травлению** [Текст]: справочник / Беккерт М., Клемм Х. – М.: Металлургия, – 1979. – 336 с.

54. **Мурр, Л.Е. Микроструктура и механические свойства металлов и сплавов после нагружения ударными волнами** [Текст]: монография / М.А. Мейерса, Л.Е. Мурр. – М.: Металлургия. – 1985. – 241 с.

55. **Материалы металлические. Метод испытания на изгиб** [Текст]: ГОСТ 14019–2003. – Введ. 2004–01–09. – М.: Изд-во стандартов ИПК, 2004. – 7 с.

56. **Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатных и повышенных температурах** [Текст]: ГОСТ Р 9454–78. – Введ. 1979–01–01. – М.: Изд-во стандартов, 1994. – 42 с.: ил.

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

58. **Сталь листовая двухслойная коррозионностойкая, изготовленная методом сварки взрывом** [Текст]: ТУ 27.32.09.010 – Введ. 2005–04–05. – М.: ООО Институт биметаллических сплавов, 2005. – 22 с.

Приложение А

					ПГУ.ВКР.22.03.01.16МТ114.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		71

Министерство образования и науки РФ
ФГБОУ ВПО «Пензенский Государственный Университет»
Кафедра «Сварочное, литейное производство и материаловедение»

Выпускная квалификационная работа

На тему:

«Исследование влияния режимов ударно-волнового нагружения на структуру и деформируемость композиционного материала Сталь 20Х13 + Сталь 40Х13 + Сталь 65Х13 + Сталь 40Х13 + Сталь 20Х13, полученного сваркой взрывом после термической обработки»

Выполнил: студент гр. 16МТ1
Моисеев А.С.
Руководитель: к.т.н., доцент
Крюков Д.Б.

Пенза, 2020

Рисунок А1 – Слайд 1

Цели и задачи исследования	2						
Цель работы: Исследовать влияние режимов ударно-волнового нагружения на структуру и деформируемость композиционного материала Сталь 20Х13 + Сталь 40Х13 + Сталь 65Х13 + Сталь 40Х13 + Сталь 20Х13, полученного сваркой взрывом после термической обработки. Для достижения указанной цели поставлены следующие задачи: ➤Обосновать выбор исходных материалов для получения металлического композиционного материала; ➤Провести обзор методов получения композиционных металлических материалов и обосновать выбор способа получения заданного композиционного материала; ➤Провести исследование влияния режимов ударно-волнового нагружения на качество получаемого сваркой взрывом композиционного материала; ➤Исследовать структуру и деформируемость композиционного материала после термической обработки. Актуальность работы: работа выполнена в рамках НИОКР «Композитный режущий инструмент» конкурс СТАРТ–2017 Фонда поддержки малых форм предприятий в научно-технической сфере (проект номер 39147 «Композитный режущий инструмент от 28.02.2018»).							
<table border="1"> <tr> <td>Разработал</td> <td>Моисеев А.С.</td> <td>Каф. «СПиМ»</td> </tr> <tr> <td>Руководитель</td> <td>Крюков Д.Б.</td> <td>гр. 16МТ1</td> </tr> </table>	Разработал	Моисеев А.С.	Каф. «СПиМ»	Руководитель	Крюков Д.Б.	гр. 16МТ1	
Разработал	Моисеев А.С.	Каф. «СПиМ»					
Руководитель	Крюков Д.Б.	гр. 16МТ1					

Рисунок А1 – Слайд 2

Обоснование выбора исходных материалов для получения композиционного 3 металлического материала заданного состава

Выбор данных марок сталей 20X13, 40X13, 65X13 для получения композита осуществлялся по интервалу температур термических операций и по физико-механическим свойствам, а именно твёрдости (*HRC*) каждой стали, которые войдут в состав многослойного композита и значения которых в последующем должны обеспечивать эффект самозатачивания.

Таблица 1 – Твёрдость после закалки и низкого отпуска

Марка стали	Твёрдость, <i>HRC</i>
20X13	42...46
40X13	50...52
65X13	57...59

Таблица 2 – Интервал температур термических операций

Марка стали	Отжиг, °C	Закалка, °C	Отпуск, °C
20X13	880...900	1000...1050	270...320
40X13			
65X13			

Разработал Моисеев А.С. Каф. «СЛПМ»
Руководитель Крюков Д.Б. гр. 16МТ1

Рисунок А1 – Слайд 3

Анализ основных способов производства композиционных материалов 4

Таблица 3 – Способы производства композиционных материалов

Способ получения	Преимущества	Недостатки
1	2	3
Пакетная прокатка (ПП)	- возможность получать заготовки любого профиля; - высокопроизводительный процесс; - энергоэкономный процесс (30-35 кВт.ч/м²); - ширина переходной зоны составляет 0,4...0,7 мм	- необходимо устанавливать промежуточные разделительные слои (никель, меди, кобальта и др.) с применением технологий ГТН, либо ЭО для исключения диффузионных процессов при горячей прокатке; - необходимость вакуумирования пакета перед прокаткой - не более пяти слоёв; - толщина базового слоя не более 30 мм.
Сварка взрывом (СВ) с последующей правкой и термической обработкой	- высокая прочность сцепления слоёв; - энергоэкономный процесс (3-4 кВт.ч/м²); - высокопроизводительный процесс; - ширина переходной зоны менее 0,1 мм; - возможность сваривать разнородные материалы сильно отличающиеся по химическому составу и свойствам; - площадь заготовок до 20 м² - возможность получения многослойных материалов за один технологический цикл.	- высокие требования по безопасности взрывных работ; - наличие волновой поверхности на межслойных границах; - возможность получать заготовки только простого профиля (лист, труба, цилиндр); - межслойные границы могут иметь волнообразный вид (амплитуда до 0,4 мм); - по количеству слоёв нет ограничений; - суммарная толщина плакируемых слоёв не более 20 мм

Разработал Моисеев А.С. Каф. «СЛПМ»
Руководитель Крюков Д.Б. гр. 16МТ1

Рисунок А1 – Слайд 4

Продолжение таблицы 3

1	2	3
Магнитно-импульсная сварка	- можно сваривать практически любые материалы за микросекунды; - по сравнению со сваркой взрывом в магнитно-импульсной сварке получают сварные соединения минимальной длины, равнопрочные с основным металлом; - допускается сварка деталей в среде с заданными свойствами, например, в вакууме, защитной атмосфере и других подобных средах с помощью удаленного индуктора, отделённого неметаллической оболочкой.	- магнитно-импульсную сварку нельзя применять для получения соединений большой площади
Литейное плакирование	- относительно недорогой способ - простота технологии	- низкая плотность соединения слоёв - невозможность получать многослойные (четырёхслойные и более) композиции - метод плакирования непригоден для получения слоистых заготовок из составляющих, которые образуют на границе соединения интерметаллические включения и легкоплавкие эвтектики - требует применения прокатки для упрочнения соединения между слоями

Разработал	Моисеев А.С.	Каф. «СППМ»
Руководитель	Крюков Д.Б.	гр. 16МП1

Рисунок А1 – Слайд 5

Схема получения исследуемого композиционного материала

6



H – толщина заряда ВВ;
 h_1, h_2, h_3, h_4 – технологические зазоры;
 1 – электродетонатор;
 2 – заряд ВВ;
 3 – перемещаемые пластины;
 4 – неподвижная пластина;
 5 – прослойка, предотвращающая сваривание со стальным основанием (скотч);
 6 – технологические опоры (жерёбейки);
 7 – стальное основание;
 8 – грунт

Рисунок 1 – схема сварки взрывом композиционного материала

Разработал	Моисеев А.С.	Каф. «СППМ»
Руководитель	Крюков Д.Б.	гр. 16МП1

Рисунок А1 – Слайд 6

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ПГУ.ВКР.22.03.01.16МП114.ПЗ

Лист

74

Таблица 4 – Характеристики режимов ударно-волнового нагружения

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	3-4	4-5		1-2	2-3	3-4	4-5
1	Игданит	2700	80	0,75	1	3	4	5	2700	471,0	484,2	508,5	436,1
2	Игданит	2600	75	0,75	1	3	4	5	2600	447,8	457,9	477,9	406,8
3	Игданит	2500	70	0,75	1	3	4	5	2500	430,8	432,0	447,3	377,5

Разработал: Моисеев А.С.
Руководитель: Крюков Д.Б.
Каф. «СПиМ»
гр. 16МТ1

Рисунок А1 – Слайд 7

Образцы композитов, полученные сваркой взрывом



Рисунок 2 – внешний вид полученного композиционного материала на нерациональных параметрах ударно-волнового нагружения



Рисунок 3 – внешний вид полученного композиционного материала на рациональных параметрах ударно-волнового нагружения

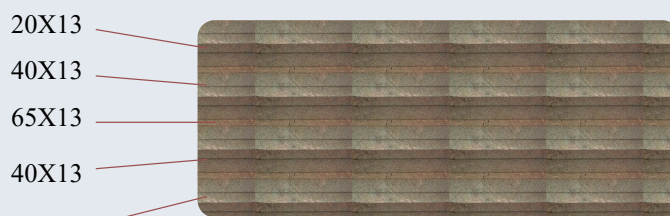


Рисунок 4 – вид в разрезе полученного композиционного материала после сварки взрывом

Разработал: Моисеев А.С.
Руководитель: Крюков Д.Б.
Каф. «СПиМ»
гр. 16МТ1

Рисунок А1 – Слайд 8



Рисунок 5 – печь СНОЛ 12/16

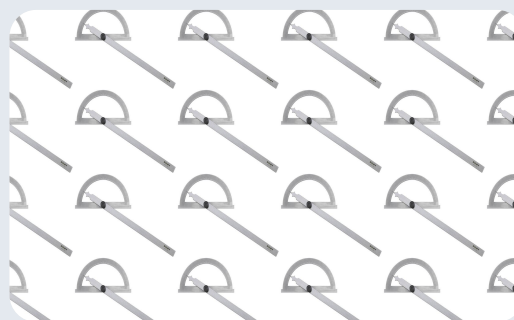


Рисунок 7 – универсальный угломер SOLA

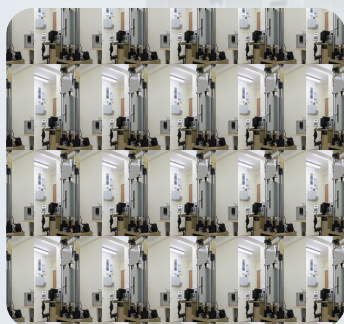


Рисунок 6 – разрывная машина ИР 5145-500

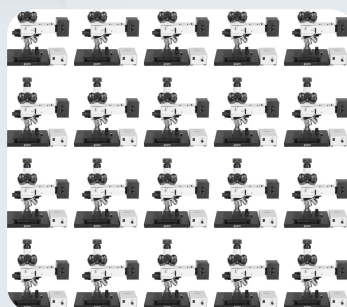


Рисунок 8 – микроскоп Альтами МЕТ 6 С

Разработал	Моисеев А.С.	Каф. «С/ПтиМ»
Руководитель	Крюков Д.Б.	гр. 16МТ1

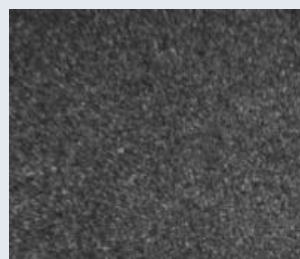
Рисунок А1 – Слайд 9

Исследование микроструктуры композиционного материала после отжига 10



20X13

а) × 200



40X13

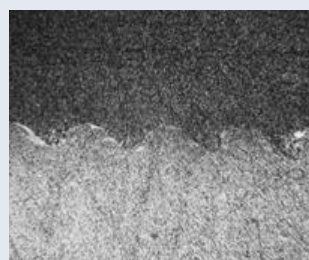
в) × 200



20X13

40X13

б) × 200



40X13

65X13

г) × 200

Рисунок 13 – микроструктура образцов после сварки взрывом:

а) – Микроструктура стали 20X13

б) – Сварной шов между сталями 20X13 и 40X13 в верхней области композита

в) – Микроструктура стали 40 X13

г) – Сварной шов между 40X13 и 65X13 в верхней области композита

Разработал	Моисеев А.С.	Каф. «С/ПтиМ»
Руководитель	Крюков Д.Б.	гр. 16МТ1

Рисунок А1 – Слайд 10

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

Исследование микроструктуры композиционного материала после отжига 11

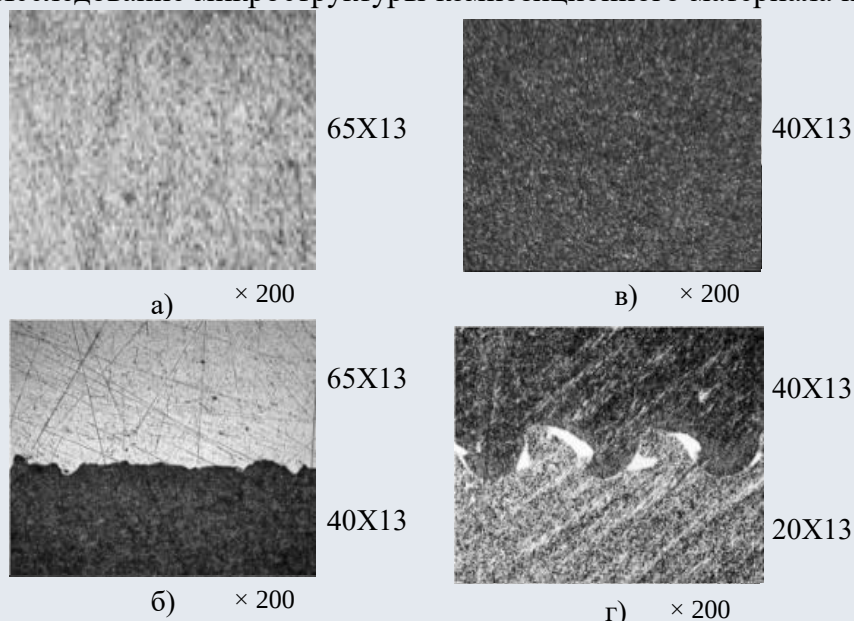


Рисунок 14 – микроструктура образцов после сварки взрывом:

- а) – Микроструктура стали 65X13
- б) – Сварной шов между сталями 65X13 и 40X13 в нижней области композита
- в) – Микроструктура стали 40 X13
- г) – Сварной шов между 40X13 и 20X13 в нижней области композита

Разработал	Моисеев А.С.	Каф. «СПиМ»
Руководитель	Крюков Д.Б.	гр. 16МТ1

Рисунок А1 – Слайд 11

Исследование микроструктуры композиционного материала после отжига 12

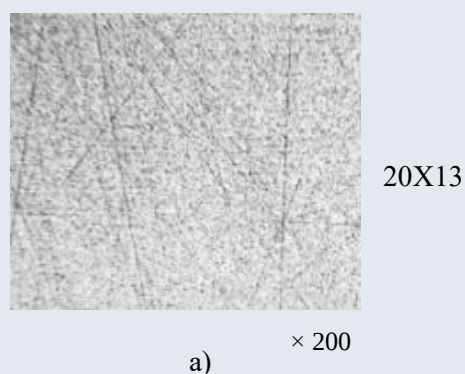


Рисунок 15 – микроструктура образцов после сварки взрывом:

- а) – Микроструктура стали 20X13

Разработал	Моисеев А.С.	Каф. «СПиМ»
Руководитель	Крюков Д.Б.	гр. 16МТ1

Рисунок А1 – Слайд 12

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ПГУ.ВКР.22.03.01.16МТ114.ПЗ

Лист

77

Исследование деформируемости на образцах композиционного материала 13

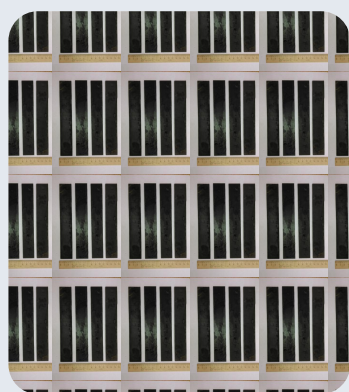


Рисунок 9 – раскрой исследуемого композиционного материала

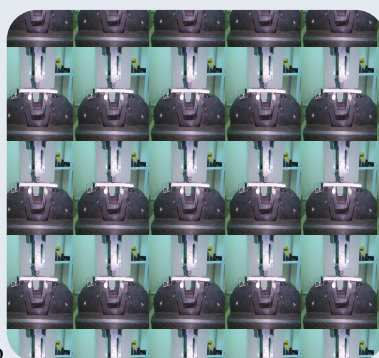


Рисунок 11 – установка образца на опоры

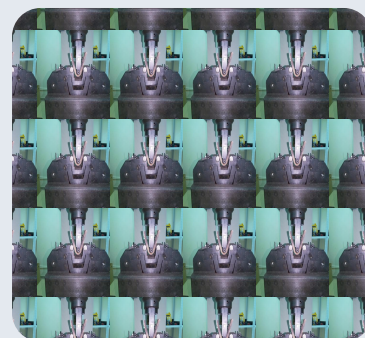


Рисунок 10 – проведение испытаний

Разработал	Моисеев А.С.	Каф. «СПиМ»
Руководитель	Крюков Д.Б.	гр. 16МТ1

Рисунок А1 – Слайд 13

Результаты испытаний на деформируемость после сварки взрывом 14

Таблица 5 – результаты деформируемости после сварки взрывом

Номер образца	Марка основного материала	Направление изгиба	Угол фактического изгиба, град	Оценка результатов испытаний
1	20X13+40X13+65X13+40X13+20X13	Перпендикулярно направлению сварки	48	Не годен
2	20X13+40X13+65X13+40X13+20X13	Перпендикулярно направлению сварки	51	Не годен
3	20X13+40X13+65X13+40X13+20X13	Перпендикулярно направлению сварки	47	Не годен
4	20X13+40X13+65X13+40X13+20X13	Перпендикулярно направлению сварки	50	Не годен
5	20X13+40X13+65X13+40X13+20X13	Перпендикулярно направлению сварки	49	Не годен

Разработал	Моисеев А.С.	Каф. «СПиМ»
Руководитель	Крюков Д.Б.	гр. 16МТ1

Рисунок А1 – Слайд 14

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ПГУ.ВКР.22.03.01.16МТ114.ПЗ

Лист

78

Таблица 6 – результаты деформируемости после отжига

Номер образца	Марка основного материала	Направление изгиба	Угол фактического изгиба, град	Оценка результатов испытаний
1	20X13+40X13+65X13+40X13+20X13	Перпендикулярно направлению сварки	151	Годен
2	20X13+40X13+65X13+40X13+20X13	Перпендикулярно направлению сварки	149	Годен
3	20X13+40X13+65X13+40X13+20X13	Перпендикулярно направлению сварки	153	Годен
4	20X13+40X13+65X13+40X13+20X13	Перпендикулярно направлению сварки	150	Годен
5	20X13+40X13+65X13+40X13+20X13	Перпендикулярно направлению сварки	152	Годен

Разработал	Моисеев А.С.	Каф. «СЛПМ» гр. 16МТ1
Руководитель	Крюков Д.Б.	

Рисунок А1 – Слайд 15

Внешний вид образцов после испытаний на деформируемость



а)



в)



б)



г)

Рисунок 12 – Композиционный материал после испытаний: а) – вид сверху; б) – вид сбоку; в) – угол изгиба после сварки взрывом; г) – угол изгиба после отжига

Разработал	Моисеев А.С.	Каф. «СЛПМ» гр. 16МТ1
Руководитель	Крюков Д.Б.	

Рисунок А1 – Слайд 16

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

- Обоснован выбор исходных материалов для получения металлического композиционного материала 20Х13 + 40Х13 + 65Х13 + 40Х13 + 20Х13;
- Проведен обзор методов получения композиционных металлических материалов и обоснован выбор сварки взрывом в качестве способа получения заданного композиционного материала;
- Проведено исследование влияния режимов ударно-волнового нагружения на качество получаемого сваркой взрывом композиционного материала. Определены рациональные параметры процесса ударно-волнового нагружения.
- Исследована структура и деформируемость композиционного материала после термической обработки. Показано, что в состоянии после отжига происходит рекристаллизация материала с соответствующими изменениями структуры и свойств композита.
- Исследование деформируемости композиционного материала после сварки взрывом и последующей термической обработки, позволяет говорить о существенном увеличении обрабатываемости композиционного материала.

На основании вышеизложенного можно говорить о том, что поставленная в данной работе цель - исследование влияния режимов ударно-волнового нагружения на структуру и деформируемость композиционного материала Сталь 20Х13 + Сталь 40Х13 + Сталь 65Х13 + Сталь 40Х13 + Сталь 20Х13, полученного сваркой взрывом после термической обработки была достигнута и основные задачи выполнены.

Результаты исследования были защищены путем регистрации в режиме ноу-хау (номер государственной регистрации РИД: АААА-Г18-618112190004-3 от 29.11.2018 г.).

Разработал	Моисеев А.С.	Каф. «СПиМ»
Руководитель	Крюков Д.Б.	гр. 16МТ1

Рисунок А1 – Слайд 17