

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

«ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Факультет
Промышленных технологий,
электроэнергетики и транспорта
(наименование)

Кафедра
Сварочное, литейное производство
и материаловедение
(наименование)

Направление подготовки

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

Профиль

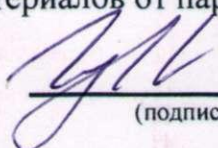
«Материаловедение и технологии новых
материалов»
(наименование)
На правах рукописи

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему:

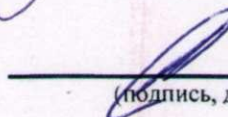
«Исследование зависимости структуры и свойств гетерогенных
металлических материалов от параметров термической обработки»

Студент

 23.06.2025
(подпись, дата)

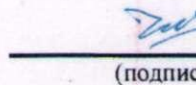
Чугунов Сергей Николаевич
(ФИО полностью)

Научный руководитель
к.т.н., доцент

 23.06.25
(подпись, дата)

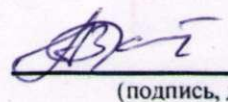
Кривенков А.О.
(фамилия, инициалы)

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

 23.06.25
(подпись, дата)

Чижова Е.В.
(фамилия, инициалы)

Нормоконтролёр
к.т.н., доцент

 24.06.25
(подпись, дата)

Хорин А.В.
(фамилия, инициалы)

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

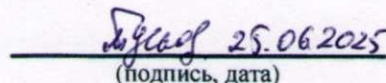
Заведующий кафедрой

 24.06.25
(подпись, дата)

Розен А.Е.
(фамилия, инициалы)

Работы защищена с отметкой отлично (протокол заседания ГЭК от 25.06.2025 № 6)

Секретарь ГЭК
к.т.н., доцент

 25.06.2025
(подпись, дата)

Гуськов М.С.
(фамилия, инициалы)

Пенза 2025

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

«Утверждаю»

Заведующий кафедрой СЛПиМ
д.т.н., профессор А.Е. Розен
подпись

«02» октября 2023 г.

ЗАДАНИЕ
на выпускную квалификационную работу

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

Чугунову Сергею Николаевичу

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

Время выполнения ВКР: с 02.10.2023 г. по 04.07.2025 г.

Место преддипломной практики: ООО «НТЦ «СУРА».

Тема работы: Исследование зависимости структуры и свойств гетерогенных металлических материалов от параметров термической обработки.

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

Техническое задание на работу (назначение устройства, условия применения, внешние воздействия, специальные требования и т.п.): *выполнить литературное и патентное исследование способов изготовления гетерогенных металлических материалов, провести исследования влияния режимов термической обработки на структуру и механические свойства.*

Объём и содержание основной части работы

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

- введение с обоснованием актуальности темы исследования, установления объекта и предмета, постановкой цели и задач исследования;
- литературно-патентный обзор с выявлением патентной и научно-технической информации, методов получения гетерогенных металлических материалов;
- рассмотрение и выбор материалов для создания гетерогенного металлического материала;
- определение методик испытаний механических свойств композиционных материалов и подбор оборудования;
- выполнение экспериментальных работ по созданию образцов гетерогенного металлического материала с применением сварки взрывом и термической обработки;
- исследование влияния технологических режимов процесса термической обработки на структуру и свойства гетерогенных металлических материалов;
- заключение – выводы и обоснования по теме работы и полученным результатам.

Презентация магистерской диссертации (перечень и содержание плакатов)

- | | |
|---|--------|
| - Тема магистерской диссертации | 1л А4; |
| - Актуальность работы | 1л А4; |
| - Цели и задачи магистерской диссертации | 1л А4; |
| - Получение композиционных материалов | 1л А4; |
| - Обоснование выбора материалов | 1л А4; |
| - Обоснование выбора методов исследования | 2л А4; |

- Получение композита
- Термическая обработка
- Результаты исследования микротвердости
- Результаты исследования ударной вязкости
- Поперечное сечение инструмента
- Публикации по теме магистерской диссертации
- Выводы по работе

1л А4;
1л А4;
3л А4;
1л А4
1л А4;
1л А4;
1л А4.

Рекомендуемая литература:

1. Материаловедение: учебное пособие. 3-е изд. перераб. и дополн. / Л.А. Мальцева, М.А. Гервасьев. – Екатеринбург: УрФУ, 2012. – 344 с.

2. Батаев, А. А. Композиционные материалы: строение, получение, применение: учеб. / А. А. Батаев, В. А. Батаев. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2002. – 383 с.

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

Дата выдачи задания: 02.10.2023 г.

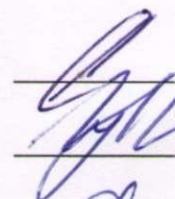
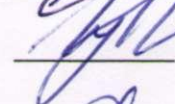
Руководитель ВКР:

к.т.н, доцент

Задание к исполнению принял студент

гр. 23МТм1

02 октября 2023 г.

 А.О. Кривенков
 С.Н. Чугунов

Выпускную квалификационную работу к защите допустить

Декан факультета промышленных технологий,

электроэнергетики и транспорта ПИ ПГУ

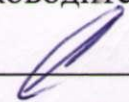
 С.Ю. Киреев

ОПОП освоена в полном объеме.
К государственной итоговой
аттестации допустить

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

«Утверждаю»

Руководитель ВКР

к.т.н., доцент  А.О. Кривенков

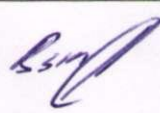
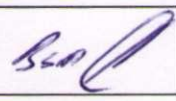
«02» октября 2023 г.

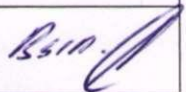
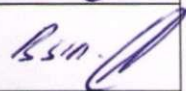
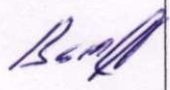
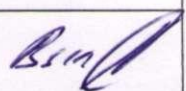
КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН
на магистерскую диссертацию

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

Чугунову Сергею Николаевичу

Тема работы: «Исследование зависимости структуры и свойств гетерогенных металлических материалов от параметров термической обработки».

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

4. Выполнение литературно-патентного обзора в области получения и изучения гетерогенных металлических материалов.	16.12.23	19.02.24	
5. Рассмотрение и выбор материалов для создания гетерогенного металлического материала. Определение методик испытаний механических свойств композиционных материалов и подбор оборудования.	20.02.24	25.04.24	
6. Экспериментальная часть работы. Созданию образцов гетерогенного металлического материала с применением сварки взрывом и термической обработки. Исследование влияния технологических режимов процесса термической обработки на структуру и свойства гетерогенных металлических материалов.	20.02.24	25.04.25	
7. Завершение оформления пояснительной записки, таблиц, рисунков, схем.	26.04.25	05.06.25	
8. Предварительная защита магистерской диссертации.	06.06.25	06.06.25	
9. Предоставление завершенной магистерской диссертации нормоконтролеру.	07.06.25	11.06.25	
10. Представление магистерской диссертации руководителю на просмотр и проверку на плагиат.	11.06.25	11.06.25	
11. Полное завершение всех работ и представление зав. кафедрой на подпись пояснительной записки (совместно с графической частью, протоколом проверки на плагиат и отзывом руководителя).	12.06.25	24.06.25	
12. Защита магистерской диссертации.	25.06.25	04.07.25	

Прохождение каждого этапа подготовки магистерской диссертации подтверждается подписью руководителя.

Студент учебной группы 23МТм1



Чугунов С.Н.

«02» октября 2023 г.

Ректору Пензенского государственного
университета

А. Д. Гулякову

от студента 2 курса магистратуры ФПТЭТ
очной формы обучения

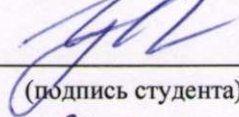
Чугунова Сергея Николаевича

ЗАЯВЛЕНИЕ

Я, Чугунов Сергей Николаевич, студент 2 курса очной формы обучения направления 22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов», профиль «Материаловедение и технологии новых материалов», прошу провести проверку с использованием системы «Антиплагиат» магистерской диссертации на тему «Исследование зависимости структуры и свойств гетерогенных металлических материалов от параметров термической обработки», выполненной мной самостоятельно, на содержание элементов антиплагиата.

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

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



(подпись студента)
24.06.2025

(дата)

Диссертация представлена на проверку _____
24.06.2025
(дата)

Руководитель



Подпись

А.О. Кривенков
И.О.Фамилия

Протокол

проверки на оригинальность в системе «Антиплагиат.ВУЗ» магистерской диссертации на тему «Исследование зависимости структуры и свойств гетерогенных металлических материалов от параметров термической обработки» студента 2 курса магистратуры **Чугунова Сергея Николаевича** направления подготовки 22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов», профиля подготовки «Материаловедение и технологии новых материалов».

Руководитель ВКР: **Кривенков Алексей Олегович, к.т.н., доцент каф. «Сварочное, литейное производство и материаловедение».**

Результат проверки на плагиат магистерской диссертации **Чугунова Сергея Николаевича**, составляет 71,05 % оригинальности с учетом самоцитирования, что соответствует существующим требованиям стандарта СТО ПГУ 3.12-2018. Магистерская диссертация может быть рекомендована к защите.



СПРАВКА

о результатах проверки текстового документа
на наличие заимствований

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

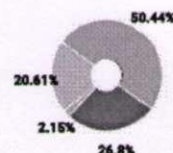
ПРОВЕРКА ВЫПОЛНЕНА В СИСТЕМЕ АНТИПЛАГИАТ.ВУЗ

Автор работы: Чугунов Сергей Николаевич
Самоцитирование
рассчитано для: Чугунов Сергей Николаевич
Название работы: МагД_Чугунов_С.Н.
Тип работы: Магистерская диссертация
Подразделение: кафедра "Сварочное, литейное производство и материаловедение"

РЕЗУЛЬТАТЫ

СОВПАДЕНИЯ	26.8%
ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	50.44%
ЦИТИРОВАНИЕ	2.15%
САМОЦИТИРОВАНИЕ	20.61%

ДАТА ПОСЛЕДНЕЙ ПРОВЕРКИ: 24.06.2025



Структура
документа:
Модуль поиска:

Проверенные разделы: основная часть с.2, 13-27, 31-64, содержание с.3-4, введение с.5-13, выводы с.28-31
Перепарафразирования по коллекции IEEE; Цитирование; ИПС Адилет; Шаблонные фразы; Коллекция НБУ; Переводные заимствования по коллекции Гарант: аналитика; Переводные заимствования; IEEE; Патенты СССР, РФ, СНГ; Перепарафразированные заимствования по коллекции Интернет в английском сегменте; СМИ России и СНГ; Интернет Плюс; Кольцо вузов; Публикации eLIBRARY; Переводные заимствования IEEE; Публикации РГБ (переводы и перепарафразирования); Публикации eLIBRARY (переводы и перепарафразирования); Диссертации НББ; Публикации РГБ; Сводная коллекция ЭБС; Медицина; Переводные заимствования по коллекции Интернет в русском сегменте; Кольцо вузов (переводы и перепарафразирования); СПС ГАРАНТ: аналитика; Перепарафразированные заимствования по коллекции Интернет в русском сегменте; Переводные...

Работу проверил: Кривенков А.О.

ФИО проверяющего

Дата подписи:

24.06.2025

Подпись проверяющего



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

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

Руководитель ВКР

/А. О. Кривенков/

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

ОТЗЫВ
РУКОВОДИТЕЛЯ О МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ МАГИСТРА

Студент: Чугунов Сергей Николаевич

Тема: «Исследование зависимости структуры и свойств гетерогенных металлических материалов от параметров термической обработки».

Направление подготовки – 22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов».

Профиль подготовки – «Материаловедение и технологии новых материалов».

Магистерская диссертация содержит 65 с., 30 рис., 12 табл., 39 источников литературы, 1 приложение, презентацию из 16 с.

Целью магистерской диссертации является исследование влияния режимов термической обработки на структуру и механические свойства гетерогенных металлических материалов системы 20Х13 – 40Х13 – 65Х13 – 40Х13 – 20Х13, полученных сваркой взрывом.

Задачами магистерской диссертации являются:

- провести анализ получения композиционных металлических слоистых материалов; обосновать выбор способа сварки взрывом;
- провести патентное исследование;
- обосновать выбор исходных материалов для получения композиционного материала и методов исследования механических свойств;
- получить образцы композиционных материалов сваркой взрывом;
- обосновать выбор режимов термической обработки;
- провести анализ полученных результатов.

Для увеличения надежности и срока службы режущего инструмента необходимыми требованиями являются повышенная твердость, износостойкость и коррозионная стойкость. Возможным решением данной

проблемы может быть, получение композиционного материала с эффектом самозатачивания.

С целью получения композиционного материала с эффектом самозатачивания использованы стали системы X13 с различным содержанием углерода: 0,2%, 0,4 и 0,65% . Эффект самозатачивания обеспечивается за счет более интенсивного износа поверхностных слоев.

В магистерской диссертации, в соответствии с исходными требованиями: выполнен литературно-патентный обзор; выбраны материалы для получения композиционного материала и методов исследования механических свойств, определены значения микротвердости и ударной вязкости композиционных материалов.

Чугунов С.Н. относится к числу дисциплинированных студентов, умеющих планировать время выполнения работы и способных самостоятельно принимать рациональные инженерные решения. Отличается спокойным и уравновешенным характером, пользуется уважением среди одногруппников и преподавателей.

За время выполнения магистерской диссертации Чугунов С.Н. показал себя технически грамотным студентом, обладающим современными методами решения профессиональных задач.

Выполненная работа соответствует требованиям, предъявляемым к магистерским диссертациям.

Считаю, что магистерская диссертация может быть допущена к защите в ГАК, а ее автор Чугунов С.Н., заслуживает присвоения степени магистра по направлению 22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов» и профилю подготовки «Материаловедение и технологии новых материалов».

Отзыв составил доцент каф «СЛПиМ»

ФГБОУ ВО «ПГУ» к.т.н., доцент



Кривенков А.О.

РЕЦЕНЗИЯ

на магистерскую диссертацию студентки группы 23МТм1

ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет»

Чугунову Сергею Николаевичу

Тема магистерской диссертации: «Исследование зависимости структуры и свойств гетерогенных металлических материалов от параметров термической обработки».

Пояснительная записка Чугунова С.Н. выполнена в соответствии с заданием на магистерскую диссертацию и содержит следующие разделы: введение, методы получения металлических композиционных материалов, такие как метод прокатки, прессования, метод сварки взрывом; обоснование выбора метода сварки взрывом для получения многослойного композиционного материала; патентное исследование; обоснование выбора материалов и методов исследования металлических композиционных материалов (определение микротвердости и испытание на ударный изгиб), описано оборудование, используемое при исследованиях; получение композиционного материала, которое включает в себя технологическую схему получения композита и обоснование выбора режимов термической обработки; описание результатов экспериментальных данных.

Для эффективной работы режущего инструмента, повышения его износостойкости и срока службы необходимым условием является обеспечение достаточной прочности и износостойкости. Помимо этого, актуальной задачей является увеличение его срока службы от момента заточки до потери режущих свойств. В настоящее время предложено достаточное количество способов увеличения ресурса режущего инструмента, таких как ультразвуковая поверхностная обработка, химико-термическая обработка, алмазное выглаживание и др. Следует учитывать, что вышеперечисленные методы требуют использования дорогостоящего

оборудования и не избавляют от необходимости периодической правки в процессе эксплуатации. Получение материалов с эффектом самозатачивания может быть перспективным методом увеличения срока службы режущего инструмента.

Пояснительная записка и презентация выполнены в соответствии с ГОСТ и ЕСКД. В презентации магистерской диссертации автор приводит: тему магистерской диссертации; актуальность работы; цель и задачи исследования; получение композиционных материалов; патентное исследование; обоснование выбора материалов, обоснование выбора методов исследования; получение композита; результаты исследования микротвердости; результаты исследования ударной вязкости; выводы по работе.

Замечания по магистерской диссертации: для полноты картины процессов, происходящих при термической обработке композиционных материалов, было бы целесообразно исследовать механические свойства не только твердость и ударную вязкость, но и прочностные характеристики композиционных материалов.

Магистерская диссертация Чугунова С.Н. выполнена на требуемом уровне, соответствует заданию, содержит необходимый наглядный материал по выбранной теме. Считаю, что магистерская диссертация может быть допущена к защите ГАК, а ее автор Чугунов С.Н. заслуживает присвоения степени магистра по направлению 22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов» и профилю подготовки «Материаловедение и технологии новых материалов».

К.т.н., инженер-технолог

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

(подпись, дата)

Чижова Е.В.



Оглавление

Введение	4
1 Получение гетерогенных металлических материалов.....	6
1.1 Метод прокатки.....	6
1.2 Метод прессования.....	8
1.3 Анализ способа сварки взрывом.....	9
1.3.1 Процесс сварки взрывом.....	9
1.3.2 Параметры сварки взрывом.....	12
1.3.3 Волнообразование.....	16
1.4 Патентное исследование	18
1.5 Выводы по 1 главе.....	26
2 Обоснование выбора материалов и методов исследования.....	28
2.1 Выбор основных материалов для создания гетерогенного металличе- го материала.....	28
2.2 Методы исследования механических свойств.....	36
2.2.1 Определение микротвердости.....	36
2.2.2 Испытание на ударный изгиб.....	40
2.2.3 Оборудование для проведения экспериментов.....	42
2.3 Выводы по 2 главе.....	45
3 Получение гетерогенных металлических материалов	46
3.1 Технологическая схема получения гетерогенного металлического мате- риала.....	46
3.2 Термическая обработка гетерогенных металлических материалов.....	48
3.3 Выводы по 3 главе	51
4 Результаты исследований структуры и свойств гетерогенных металлических материалов, полученных сваркой взрывом.....	52
4.1 Исследование структуры.....	52
4.2 Исследование микротвердости.....	52
4.3 Исследование ударной вязкости	54

4.4 Выводы по 4 главе.....	55
Заключение.....	57
Список литературы.....	59
Приложение А	64

Введение

Основными особенностями условий лезвийной обработки при резании, рубке, особенно в тяжелых условиях работы инструмента (обработка металлов, почвы, твердых пород и т.д.) являются значительные контактные напряжения, высокая температура поверхности инструмента за счет перемещения и деформирования обрабатываемого материала, возникновение чрезмерных температурных градиентов, вызывающих термические напряжения в поверхностном слое инструмента, его окисление, структурные превращения.

В этой связи, для эффективной работы режущего инструмента, повышения его надежности и срока службы необходимым условием является обеспечение достаточной остаточной прочности и износостойкости. Помимо этого, актуальной задачей является увеличение его срока работы от момента заточки до потери режущих свойств.

В настоящее время предложено достаточное количество способов увеличения ресурса режущего инструмента, таких как ультразвуковая поверхностная обработка, химико-термическая обработка, алмазное выглаживание, нанесение износостойких покрытий и их наплавка и т.д. При этом, следует учитывать, что все выше перечисленные методы требуют использования дорогостоящего технологического оборудования и не избавляют, в конечном счете, от необходимости периодической правки в процессе эксплуатации.

Возможным решением данной проблемы может явиться применение многослойных материалов с эффектом самозатачивания. Этого возможно достичь получением многослойного металлического слоистого композиционного материала. Эффект самозатачивания обеспечивается за счет более интенсивного износа поверхностных слоев, что дает возможность сохранять постоянным заданный изначально угол заточки инструмента на протяжении всего цикла эксплуатации [1].

Тема магистерской диссертации: исследование влияния режимов термической обработки на структуру и механические свойства гетерогенных металличе-

ских материалов системы 20Х13 – 40Х13 – 65Х13 – 40Х13 – 20Х13, полученных сваркой взрывом.

Целью магистерской диссертации является исследование влияния режимов термической обработки на структуру и механические свойства гетерогенных металлических материалов системы 20Х13 – 40Х13 – 65Х13 – 40Х13 – 20Х13, полученных сваркой взрывом.

Объект исследования: композиционный материал системы 20Х13 – 40Х13 – 65Х13 – 40Х13 – 20Х13.

Предмет исследования: механические свойства (микротвердость, ударная вязкость).

Область применения: работа выполнена при поддержке «Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» (Проект № 3254ГС2/39147 от в рамках реализации инновационного проекта «Композитный режущий инструмент»).

Исходя из цели работы, необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ получения композиционных металлических слоистых материалов; обосновать выбор способа сварки взрывом;
- провести патентное исследование;
- обосновать выбор исходных материалов для получения композиционного материала и методов исследования механических свойств;
- получить образцы композиционных материалов сваркой взрывом;
- обосновать выбор режимов термической обработки;
- провести анализ полученных результатов.

1 Получение гетерогенных металлических материалов

1.1 Метод прокатки

Выбор метода получения композиционного материала из различных сочетаний матрицы и армирующего волокна зависит от следующих факторов:

- размера, профиля и природы исходных материалов матрицы и упрочнителя;
- возможности создания прочной связи на границе раздела матрица – упрочнитель;
- получения равномерного распределения волокон в матрице;
- экономичности процесса.

При производстве композиционного материала с металлической матрицей наибольшее распространение получили твердофазные, жидкофазные, газопарофазные, химические и электрохимические методы получения [2].

В данной работе композиционная система будет изготавливаться из металлических листовых материалов, поэтому будет использоваться твердофазный метод получения композиционных материалов. Твердофазный метод получения композиционных материалов представляет собой метод, в котором в качестве материала матрицы используются листы, фольги или порошок. Основными способами твердофазного получения композиционных материалов являются: прокатка, прессование, сварка взрывом.

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

На рисунке 1 представлена схема получения гетерогенного металлического материала по технологии пакетной прокатки.

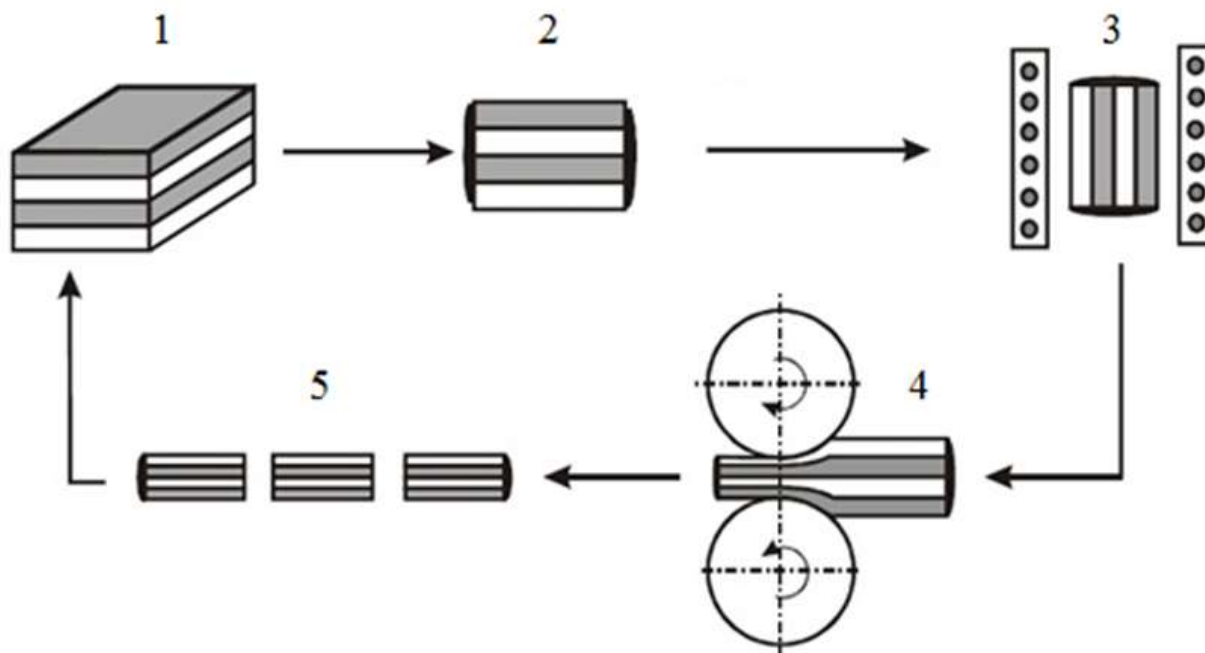


Рисунок 1 – Схема получения гетерогенных металлических материалов методом пакетной прокатки: 1 – укладка пластин в пакет; 2 – обварка пакета по всему периметру; 3 – нагрев пакета под прокатку; 4 – прокатка пакета; 5 – разрезка композита на мерные длины

Основными технологическими параметрами процесса прокатки являются степень деформации и температура нагрева [3]. Недостатком данного метода 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 [4].

1.2 Метод прессования

Прессование, как правило, осуществляется в горячем состоянии. Это необходимо для снижения сопротивления деформации и повышения пластических свойств прессуемого металла. При прессовании могут возникать такие дефекты как, утяжины, трещины, ерши и т.д. [3].

К основным недостаткам процесса прессования можно отнести:

- значительно большая величина потерь на отходах металла,;
- большая неравномерность механических свойств по длине и поперечному сечению заготовки;
- небольшая производительность процесса [5].

1.3 Анализ способа сварки взрывом

1.3.1 Процесс сварки взрывом

Сварка взрывом – это процесс твердофазной сварки, в котором детонация бризантных взрывчатых веществ используется для сближения сварных поверхностей при высокоскоростном косом соударении, которое создает сильный, но локализованный пластический поток на взаимодействующих поверхностях. В то время как процесс обычно описывается как холодный метод, означающий, что никакое внешнее тепло не используется для содействия склеиванию, высокие локализованные температуры обычно генерируются на границе раздела сварных швов из-за динамики процесса. Сочетание давления, тепла и потока может привести к образованию межфазной связи, имеющей прочность, равную или большую, у исходного металла. Хотя этот процесс может быть использован для сварки двух или более слоев одного и того же металла, его основной промышленный потенциал заключается в том, что он может быть использован для сварки комбинаций различных металлов, многие из которых невозможны никакими другими способами [6].

На рисунке 2 показана принципиальная схема сварки взрывом. [7]. Для объяснения процесса сварки взрывом на ранних стадиях развития были предложены различные механизмы. Некоторые считали, что это по существу процесс сварки плавлением, который опирается на диссипацию кинетической энергии на границе раздела в качестве источника тепла, достаточного для того, чтобы вызвать двустороннее плавление через границу раздела и диффузию внутри расплавленных

слоев. Такая диффузия жидкости привела бы к постепенному переходу от одного металла к другому. Однако при сварке взрывом обычно наблюдается довольно резкий переход, даже в тех случаях, когда локально появляются очаги или слои затвердевшего расплава, определяемые зернистой структурой. Они образуют четко определенные границы с исходными металлическими материалами. Другие ранние исследователи рассматривали его как операцию сварки под давлением, которая опирается на большую пластическую деформацию на границе раздела, позволяющую формировать чистые поверхности и осуществлять процесс диффузии твердого тела при условии поддержания высокого уровня давления в течение достаточного периода времени. Однако это не относится к сварке взрывом, где пиковые давления поддерживаются только в течение нескольких микросекунд, а коэффициент диффузии мал. Кроме того, часто присутствующие межфазные волны, вихри или очаги расплава не могут быть объяснены ни сваркой под давлением, ни механизмом чистого плавления. Межфазная деформация зерна и волнообразование предполагают, что механизм должен быть связан с проточным процессом.

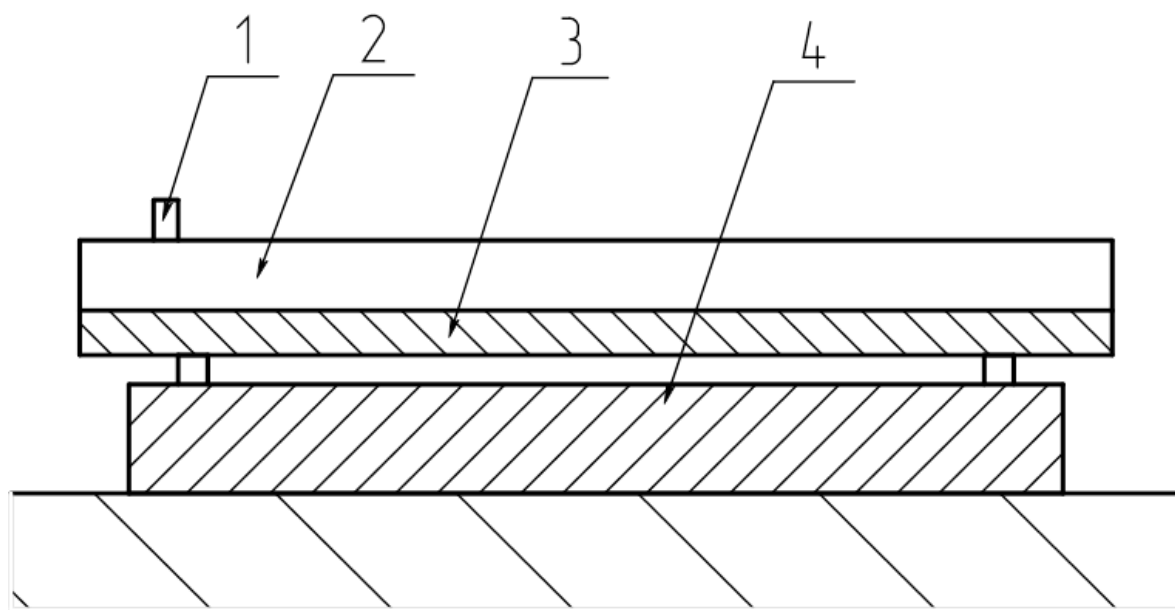


Рисунок 2 – Схема параллельной сварки взрывом: 1 – детонатор, 2 – взрывчатое вещество, 3 – метаемая пластина, 4 – неподвижная пластина

Большинство обсуждаемых исследований проводилось с использованием микроскопии СЭМ (сканирующий электронный микроскоп) и ТЭМ (трансмиссион-

онная (просвечивающая) электронная микроскопия), которая ограничена по степени разрешающей способности используемой методики подготовки. Однако позже стало известно об усовершенствованной методики в связи с анализом ТЭМ, которая позволила исследовать переходную зону на границе раздела с гораздо более высоким разрешением, чем это было возможно ранее.

Эти испытания показали, что на границе раздела образуется очень тонкий слой расплава, большая часть которого выбрасывается из системы струей. Расчетная скорость охлаждения остатка – за счет контакта с относительно большим объемом свариваемых деталей – составляет 105 К/с. Такая высокая скорость охлаждения приводит к образованию ультрадисперсных зерен произвольной ориентации и толщиной около 2 мкм. Существование этого аморфного слоя в зоне склеивания наблюдалось в различных сочетаниях металлов, и интерпретируется авторами, как основной механизм сварки взрывом. Именно благодаря струе образуются химически чистые поверхности сопряжения, свободные от пленок и загрязнений, которые позволяют атомам двух материалов встречаться на межатомных расстояниях при воздействии взрывоопасных волн давления. Таким образом, высокое давление соударения может создать состояние, которое «открывает» электронные среды свариваемых металлов и создает связь на границе раздела.

Рассматривая общую схему сварки взрывом, показанную на рисунке 2, процесс сварки взрывом можно разделить на 3 этапа:

- детонация заряда ВВ;
- деформация и ускорение метаемой пластины;
- столкновение между компонентами композита.

Детонация заряда взрывчатого вещества заключается в обеспечении энергии, необходимой для деформации и ускорения метаемой пластины. Во время следующей стадии элемент метаемой пластины приобретает импульс и скорость в точке столкновения с неподвижным компонентом, где рассеивается кинетическая энергия и происходит сварка. В случае множественных столкновений, как и при сварке многослойных композитов, этот процесс повторяется на каждой границе раздела при межслойном ударе за счет прогрессивного увеличения ускоренной

массы. В некоторых случаях для защиты верхней поверхности от повреждения продуктами детонации используется дополнительный буфер.

Таким образом, параметры сварки, влияющие как на конечные условия в области столкновения, так и на режим диссипации энергии, определяются тремя стадиями процесса. Величины этих параметров можно варьировать, манипулируя геометрией системы, типом заряда, скоростью детонации. [6].

1.3.2 Параметры сварки взрывом

Физические явления, сопутствующие сварке взрывом, структура и свойства соединений в значительной степени зависят от основных параметров сварки взрывом, которые классифицируют на кинематические (скорость метаемой пластины (v_0), скорость точки контакта (v_k), угол соударения (γ)) и физические (давление, длительность соударения, температура в зоне соударения). Эти параметры, в свою очередь, определяются конструктивными характеристиками взрывного устройства, физико-механическими, теплофизическими и энергетическими свойствами используемых материалов и начальными (технологическими) параметрами процесса:

- характеристиками заряда взрывчатого вещества: скорость детонации (D), плотность заряда (ρ_0), масса заряда (m_0), толщина слоя взрывчатого вещества (δ_0);
- свойствами свариваемых материалов: физико-механические характеристики (прочность, твердость, вязкость и др.), теплофизические (теплоемкость, теплопроводность, температура плавления), микрорельеф свариваемых поверхностей, начальная температура;
- безразмерным параметром r – это отношение массы заряда к массе метаемой пластины, что показано в формуле (4);
- сварочным зазором h – первоначальным расстоянием между пластинами.

Скорость точки контакта характеризует скорость распространения зоны высокого давления по свариваемым поверхностям. При начальном параллельном расположении пластин скорость точки контакта равна скорости детонации [7]:

$$V_k = |D| \quad (1)$$

где V_k – скорость точки контакта, м/с;

D – скорость детонации, м/с.

Для обеспечения сварки взрывом необходимо соблюдение условия $v_k < c_0$, где c_0 – скорость звука в соединяемых металлах.

При параллельном расположении пластины угол соударения рассчитывается по формуле [7]:

$$\gamma = 2 \cdot \arcsin \cdot \left(\frac{V_c}{2 \cdot D} \right) \quad (2)$$

где γ – угол соударения.

Скорость соударения в основном рассчитывают по формуле [7]:

$$V_c = \frac{1.2 \cdot D \cdot \left(\sqrt{1 + \left(\frac{32}{27} \right) \cdot r - 1} \right)}{\sqrt{1 + \left(\frac{32}{27} \right) \cdot r + 1}} \quad (3)$$

где V_c – скорость соударения, м/с

r – безразмерный параметр.

Безразмерный параметр определяется по формуле [7]:

(4)

где $H_{\text{вв}}$ – высота взрывчатого вещества, см;

$\rho_{\text{вв}}$ – плотность взрывчатого вещества, г/см³;

δ_1 – толщина метаемой пластины, см;

ρ_1 – плотность материала метаемой пластины, г/см³.

Эта формула была получена решением одномерной газодинамической задачи при использовании модели метания Гарни для случая мгновенной детонации. Для смесевых взрывчатых веществ, обычно используемых при сварке взрывом, правую часть формулы умножают на эмпирический коэффициент 1,2, что позволяет получить совпадение экспериментальных и расчетных значений скоростей с точностью порядка 20%, что показано в формуле 3.

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

Площадь метаемой пластины, как правило, больше площади основной пластины. Нависание метаемой пластины над основной необходимо для того, чтобы уменьшить влияние эффекта бокового разлета продуктов взрыва при детонации плоского заряда взрывчатого вещества, однако этот прием не всегда устраняет расслоение по периметру биметаллических пластин, называемое краевым непроваром.

В начале соударения вблизи точки инициирования заряда соединение свариваемых пластин также может быть некачественным. Этот участок принято называть начальным непроваром.

Независимо от вида свариваемых металлов следует различать 3 типа соединений, получаемых при различных значениях основных параметров процесса. Первый из них характеризуется прямой или синусоидальной границей раздела без образования участков литой или кристаллизационной структуры. Этот тип соединений характерен для не очень высоких скоростей соударения и напоминает соединения, получаемые холодной сваркой.

Наиболее распространен второй тип соединений с ярко выраженным волнообразованием и наличием вихревых зон. В этих зонах обычно наблюдаются участки закристаллизовавшегося расплава с дендритной структурой и усадочными трещинами, рыхлостями, пустотами. При соединении разнородных металлов в вихревых зонах происходит перемешивание металлов.

При форсированных режимах (увеличение скорости точки контакта и угла соударения) зоны расплавов расширяются до образования непрерывного слоя

вдоль всей границы контактирования. Соединение с непрерывным слоем расплава относится к третьему типу.

Общим свойством всех соединений, полученных сваркой, является заметное упрочнение металлов вблизи контактных поверхностей. Упрочнение материала в приконтактных областях вызвано действием высоких давлений, значительными деформациями в зоне волнообразования или фазовыми и химическими превращениями. При сварке разнородных металлов в зоне перемешивания металлов обычно наблюдается существенное повышение твердости. В прилегающих к этим зонам участках часто можно зафиксировать уменьшение твердости, которое связывается с рекристаллизацией под действием высоких температур и больших деформаций. Существенное снижение твердости может быть в местах локализации расплавов при сварке и однородных металлов.

Следствием значительного упрочнения металлов является некоторое повышение предела прочности сварных соединений при испытании на статическое растяжение. Разрушение таких образцов обычно происходит по менее прочному металлу на некотором расстоянии от зоны соединения.

Необходимо также учитывать, что значительное упрочнение металлов в зоне соединения способствует повышению хрупкости и снижению их ударной вязкости. При сварке взрывом могут появиться остаточные напряжения растяжения как в зоне соединения, так и на поверхности плакирующего слоя небольшой толщины за счет неравномерной деформации по его сечению в момент соударения. Это может существенно снизить усталостную прочность биметалла. Действие таких отрицательных явлений удастся снизить с помощью термической обработки изделий [8].

1.3.3 Волнообразование

Сварка металлов взрывом представляет собой сложное физическое явление. Подобно другим способам сварки давлением ее механизм определяется главным образом процессом пластической деформации металлов в зоне соединения. Одна-

ко сварка взрывом имеет ряд специфических особенностей, являющихся следствием высокой интенсивности пластического течения и кратковременности действия высоких давлений и температур в приконтактных слоях соударяющихся пластин. Процесс волнообразования, характеризующийся строгой периодичностью и регулярностью остаточных деформаций, представлен на рисунке 3.

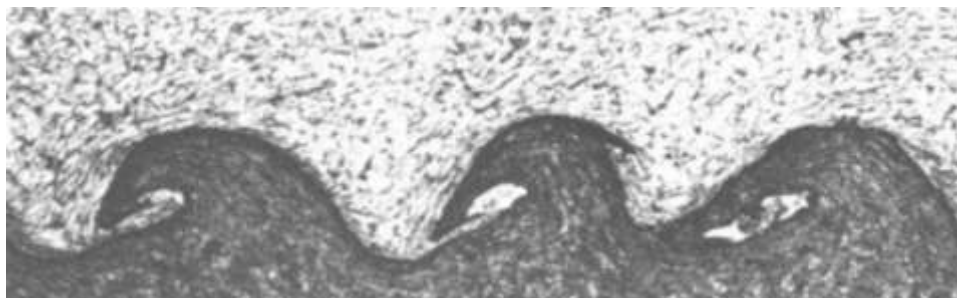


Рисунок 3 – Волнообразование на границе двух слоев после сварки взрывом

Для каждого фиксированного значения начального угла существует критическое значение скорости движения метаемой пластины, ниже которой волна не образуется. Это значение возрастает с увеличением начального угла между пластинами. Независимо от значений начального угла для сочетаний металлов существует некоторое критическое значение скорости точки контакта, ниже которой волны вообще не образуются. Существует также минимальное значение скорости движения метаемой пластины, ниже которого соударение является упругим.

Расчеты скорости точки контакта в опытах по соударению пластин, метаемых зарядом из гексогена ($D = 6,2$ км/с), позволили установить, что волнообразование происходит в случае, когда скорость точки контакта меньше скорости звука в металлах. Если заряд гексогена имеет прямоугольную форму, то при параллельном расположении пластин волнообразования нет. Если же заряд имеет форму усеченной прямоугольной трапеции, то волнообразование наблюдается на определенной части длины пластины.

Наиболее заметное влияние на процесс волнообразования оказывает изменение начального угла расположения пластин (α). Увеличение этого угла при сохранении параметров заряда взрывчатого вещества и $r = \text{const}$, $h_0 = \text{const}$ приводит

к увеличению длины волны. В диапазоне углов $15^\circ \dots 30^\circ$ длина волн увеличивается.

В зависимости от угла α изменяется также и форма волн. При небольших углах волны имеют синусоидальную форму с симметрично расположенными вихревыми зонами. С увеличением угла гребни волн деформируются в направлении распространения детонации, а картина вихревых зон становится ассиметричной.

Именно в вихревых зонах происходит локальное расплавление и образование зоны перемешивания металлов. При сварке взрывом металлов, склонных к образованию интерметаллидов, в этих зонах наблюдаются хрупкие фазы, резко снижающие прочность соединения.

Вихревые зоны формируются из поверхностных слоев, которые приобретают более высокую скорость и почти полностью выносятся из области впадины за вершину волны. В случае форсированных режимов при внедрении бугра деформации в противоположную пластину происходит его растекание с образованием двух струй – так называемых усов. В случае достаточно сильного соударения при нормальном попадании струи ширина обоих усов одинакова. При косом падении ширина уса, направленного навстречу струе, меньше. Теория бронепробивания допускает образование пустот между кумулятивной струей и усами. Это означает, что при волнообразовании вновь формирующийся бугор деформации может быть отнесен от предшествующего из-за появления уса из материала последнего с образованием свободного пространства между обоими буграми. В последующие моменты времени в результате соударения бугра с пластиной это пространство должно заполниться в основном материала уса и тем самым завершится образование нижней вихревой зоны [8].

1.4 Патентное исследование

Цель исследования – определение технического уровня и тенденций развития получения материалов с эффектом самозатачиваия, с целью поиска патентной и научно-технической информации.

Регламент, наименование информационной базы и предмет патентного поиска приведен в таблице 1. Исследуемый объект – материалы с эффектом самозатачивания, композиционный материал.

Таблица 1 – Регламент поиска

Предмет поиска	Индекс МПК	Широта поиска	Глубина поиска	Источник информации
1	2	3	4	5
Технология получения изделий с эффектом самозатачивания	<i>B26D7/12, B27B33/08, C21D1/04, C21D1/42, C21D9/18, C21D9/22, C21D9/24, C23C8/32</i>	Россия	26 лет	Реестр изобретений РФ ФИПС
Материалы, обладающие эффектом самозатачивания	<i>B24D3/22, B24D3/20, B24D3/26, B24D18/00, B22D27/04</i>			
Получение композиционных материалов сваркой взрывом	<i>B22F3/08, B23K20/08, B32B7/04, B32B15/01</i>			
Способ получения слоистых композиционных материалов	<i>B22F7/04, B23K20/04, B32B15/00, B32B15/01, B32B15/18, B32B15/20</i>			

B26D7/12 – конструктивные элементы устройств 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 для распиловки, дисковых пил.

C21D1/04 – общие способы или устройства для термообработки, например отжига, закалки или отпуска с одновременным использованием ультразвука, магнитных или электрических полей.

C21D1/42 – общие способы или устройства для термообработки, например отжига, закалки или отпуска, индукционный нагрев.

C21D9/18 – термообработка, например отжиг, закалка, отпуск, специальных изделий, ножей, кос, ножниц и подобных ручных режущих инструментов.

C21D9/22 – термообработка, например, отжиг, закалка, отпуск, специальных изделий, сверл, фрез, резцов для металлорежущих станков.

C21D9/24 – термообработка, например отжиг, закалка, отпуск, специальных изделий, пильных полотен.

C23C8/32 – диффузия в твердом состоянии только неметаллических элементов в металлическую поверхность; химическая обработка поверхности металлического материала путем взаимодействия поверхности с реакционным газом, причем продукты реакции поверхностного материала остаются в покрытии стальных поверхностей.

B24D3/22 – физические свойства абразивных тел или листов, например абразивных поверхностей особого рода; абразивные тела или листы, характеризующиеся по всей структуре на основе каучуков.

B24D3/20 – физические свойства абразивных тел или листов, например абразивных поверхностей особого рода; абразивные тела или листы, характеризующиеся по всей структуре органических.

B24D3/26 – физические свойства абразивных тел или листов, например абразивных поверхностей особого рода; абразивные тела или листы, характеризующиеся по всей структуре для пористой или ячеистой структуры.

B24D18/00 – изготовление шлифовальных инструментов, например кругов, не отнесенных к другим рубрикам.

B22D27/04 – обработка металлов (расплава) в жидком или вязком состоянии в литейных формах путем изменения температуры металла, например, нагревом или охлаждением литейной формы.

B22F3/08 – Изготовление заготовок или изделий из металлических порошков, характеризующееся методом уплотнения или спекания; устройства, специально предназначенные для этого с использованием силы взрыва.

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

B32B7/04 – слоистые изделия, характеризующиеся связями между слоями; слоистые изделия, характеризующиеся взаимной ориентацией конструктивных признаков между слоями, т.е. изделия содержащие слом, имеющие различные физические, химические или физико-химические свойства; слоистые изделия, характеризующиеся взаимосвязями слоев.

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

B22F7/04 – изготовление составных слоистых материалов, заготовок или изделий с использованием металлических порошков путем спекания порошка с одновременным уплотнением или без него, с одним или несколькими слоями, выполненными не из порошка, например выполненными из сплошного металла.

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

B32B15/00 – слоистые изделия, содержащие в основном металл.

B32B15/18 – слоистые изделия, содержащие в основном металл, содержащие чугун и сталь.

B32B15/20 – слоистые изделия, содержащие в основном металл, содержащие алюминий и медь.

Результаты патентного обзора представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты патентного обзора

Предмет поиска (объект исследования, его составные части)	Страна выдачи, вид и номер охранного документа. Классификационный индекс МПК	Заявитель (патентообладатель) номер заявки, страна, дата публикации	Название изобретения (полной модели, образца)
1	2	3	4
Технологии получения изделий с эффектом самозатачивания	Россия, патент, <i>RU 2339704 C1, C21D1/04, C21D9/22</i>	ГОУ ВО «АлтГТУ» (RU), № 2007105490/02, Россия, 27.11.2008	Способ комбинированной магнитоимпульсной обработки поверхностей инструментов и деталей машин [9]
Технологии получения изделий с эффектом самозатачивания	Россия, патент, <i>RU 2690386 C1, C21D1/42, C21D9/18, C21D9/24</i>	ФГБОУ «Алтайский государственный аграрный университет» (RU), № 2018118900, Россия, 22.05.2018	Способ закалки деталей из низкоуглеродистой борсодержащей стали [10]
Технологии получения изделий с эффектом самозатачивания	Россия, патент, <i>RU 2131468 C1, C21D9/18, C23C8/32</i>	Комбинат «Электрохимприбор» (RU), № 97120523/02, Россия, 10.06.1999	Способ упрочнения режущих деталей машин и инструментов [11]
Технологии получения изделий с эффектом самозатачивания	Россия, патент, <i>RU 2433033 C1, C23C4/12</i>	ГОУ ВО «ВлГТУ» (RU), № 2010106741/02, Россия, 10.11.2011	Самозатачивающийся режущий инструмент для древесины мягких пород [12]
Материалы, обладающие эффектом самозатачивания	Россия, патент, <i>RU 2435878 C1, B24D3/26</i>	ООО Торговый дом «Абразивные заводы Урала» (RU), № 2007117075/02, Россия, 10.02.2009	Масса для изготовления абразивного инструмента [13]

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4
Материалы, обладающие эффектом самозатачивания	Россия, патент, <i>RU 2140347 C1, B24D3/22</i>	Открытое акционерное общество «Абразивы и шлифование» (<i>RU</i>), № 98105115/02, Россия, 27.10.1999	Абразивно-полимерная композиция для шлифовально-полировального инструмента [14]
Материалы, обладающие эффектом самозатачивания	Россия, патент, <i>RU 2234408 C2, B24D3/20, B24D18/00</i>	Смоленское государственное унитарное предприятие «ПО «Кристалл» (<i>RU</i>), № 2002108211/02, Россия, 20.08.2004	Связка для изготовления алмазно-абразивного инструмента [15]
Материалы, обладающие эффектом самозатачивания	Россия, патент, <i>RU 2743682 C2, B22D27/04</i>	Общество с ограниченной ответственностью «АЛИ-ГОН» (<i>RU</i>), № 2019117018, Россия, 24.02.2021	Способ получения износостойких и упругих структур рабочих органов почвообрабатывающих машин [16]
Получения композиционных материалов сваркой взрывом	Россия, патент, <i>RU 2453409 C2, B23K20/08, B32B7/04</i>	Открытое акционерное Общество «Государственный научно-исследовательский институт машиностроения им. В.В. Бахирева» (<i>RU</i>), № 2010134455/02, Россия, 20.06.2012	Способ получения крупногабаритных листов композиционного материала сваркой взрывом [17]
Получения композиционных материалов сваркой взрывом	Россия, патент, <i>RU 2522505 C1, B32B7/04, B32B15/01, B23K20/08</i>	Общество с ограниченной ответственностью Инженерно-Технологический центр «Сварка»(<i>RU</i>), № 2013119389/02, Россия, 20.07.2014	Способ получения композиционного материала [18]

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4
Получения композиционных материалов сваркой взрывом	Россия, патент, <i>RU 2240205 C1</i> , <i>B22F3/08</i> , <i>B23K20/08</i>	Волгоградский государственный технический университет (<i>RU</i>), № 2003117242/02, Россия, 20.11.2004	Способ получения композиционных сверхпроводящих изделий из порошка [19]
Получения композиционных материалов сваркой взрывом	Россия, патент, <i>RU 2010134455 A</i> , <i>B23K20/08</i>	АО «Государственный научно-исследовательский институт машиностроения им. В.В. Бахирева»(<i>RU</i>) № 2010134455/02, Россия, 27.02.2012	Способ получения крупногабаритных листов композиционного материала сваркой взрывом [20]
Способ получения слоистых композиционных материалов	Россия, патент, <i>RU 167018 U1</i> , <i>B22F7/04</i> , <i>B32B15/00</i>	ФГОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет» (<i>RU</i>), № 2016137956/05, Россия, 20.12.2016	Слоистый композиционный материал [21]
Способ получения слоистых композиционных материалов	Россия, патент, <i>RU 2435671 C1</i> , <i>B32B15/01</i> , <i>B32B15/18</i> , <i>B32B15/20</i>	ООО «Слоистый композит» (<i>RU</i>), № 2010121037/05, Россия, 10.12.2011	Способ получения слоистых композиционных материалов сталь – алюминий [22]
Способ получения слоистых композиционных материалов	Россия, патент, <i>RU 2030293 C1</i> , <i>B32B15/01</i> , <i>B22F7/04</i>	Научно-производственное объединение «Композит» (<i>RU</i>), № 4871501/02, Россия, 10.03.1995	Многослойный композиционный материал и способ его изготовления [23]

Продолжение таблицы 2

Способ получения слоистых композиционных материалов	Россия, патент, <i>RU 2572955 C2</i> , <i>B32B15/01</i> , <i>B23K20/04</i>	ФГБОУ ВПО «МАТИ» – Российский государственный технологический университет имени К.Э. Циолковского (<i>RU</i>), № 2014119538/02, Россия, 20.01.2016	Способ получения микроструктурных многослойных композиционных материалов из разнородных металлов или сплавов [24]
---	--	--	---

На основании проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

- теоретические сведения об эффекте самозатачивания хорошо изучены и широко применяются в машиностроении, сельском хозяйстве, деревообрабатывающей промышленности и других областях;
- эффект самозатачивания используется при изготовлении режущего инструмента, режущих деталей машин, алмазно-абразивного инструмента, рабочих органов сельскохозяйственных машин повышает требования по износостойкости изделий и повышает срок службы изделий;
- перспективным способом получения композиционных материалов является способ сварки взрывом, его используют при изготовлении крупногабаритных многослойных металлических конструкций, при получении сверхпроводящих изделий, при получении композиционных материалов с высокими значениями предела прочности и модуля упругости и других изделий;
- в приведенных патентах слоистые композиционные материалы получают горячим прессованием, обработкой давлением и искровым плазменным спеканием;
- большое число патентов принадлежит образовательным учреждениям, что говорит о том, что данные области являются перспективными и постоянно развиваются.

Выводы по 1 главе

Проанализированы методы получения композиционных материалов, такие как, метод прокатки, метод прессования и метод сварки взрывом. Сварка взрывом обладает такими достоинствами как:

- прочность сцепления при сварке взрывом не меньше наименее прочного компонента;
- широкая номенклатура малоуглеродистых, высоколегированных сталей и цветных сплавов (сталь и титан, сталь и медь, сталь и латунь);
- процесс сварки взрывом производят без использования сложного оборудования;
- высокая скорость (несколько микросекунд) соединения;
- изготовление заготовок для штамповки иковки;
- возможность изготовления прямолинейных и криволинейных заготовок площадью от нескольких квадратных сантиметров до десятков квадратных метров [25].

На основе проведенного анализа для получения композиционных материалов выбран метод сварки взрывом. Главное преимущество сварки взрывом по сравнению с другими методами сварки заключается в том, что она не страдает от ограничений, налагаемых на другие сварочные процессы их специфическими характеристиками. Например, при сварке плавлением необходимо плавление двух свариваемых металлов на границе раздела, а при сварке давлением требуется большая пластическая деформация. Поэтому оба процесса ограничены металлами, которые имеют сопоставимые температуры плавления и пластические напряжения течения соответственно. Практические проблемы возникают также в случае металлов и сплавов с высокой температурой плавления (например, вольфрам) или с высокой механической прочностью. Ни плавление, ни чрезмерное пластическое течение не являются существенными проблемами для успеха сварки взрывом, хотя они могут наблюдаться при определенных условиях, и поэтому никакие серьезные ограничения не налагаются большими различиями в свойствах

металла, отвечающего требованиям. Использование взрывчатых веществ, тем не менее, накладывает ограничение с точки зрения правил безопасности [6]. Сварки взрывом имеет ряд недостатков описанных в [26].

2 Обоснование выбора материалов и методов исследования

2.1 Выбор основных материалов для создания гетерогенного металлического материала

Для получения материала с эффектом самозатачивания, необходимо получить композиционный материал, состоящий из пяти слоев. Основными требованиями, предъявляемыми к свойствам таких материалов, являются твердость, износостойкость и коррозионная стойкость. Внутренний слой композита должен быть изготовлен из стали, которая имеет более высокие значения твердости, по сравнению с внешними слоями. Внутренний слой обеспечивает режущие характеристики композиционного материала на протяжении всего цикла эксплуатации инструмента. Величина твердости внешних слоев композита должна быть в 1,2...2,6 раза ниже твердости внутреннего режущего слоя в зависимости от условий работы инструмента [1].

Для получения требуемых свойств были выбраны стали с различным содержанием углерода: 20X13, 40X13 и 65X13. Была получена система 20X13–40X13–65X13–40X13–20X13.

Сталь 20X13 является коррозионностойкой, жаропрочной, жаростойкой класса. Относится к ферритно-мартенситному классу. Применяется для изготовления деталей, которые должны обладать повышенной пластичностью, подвергающимся ударным нагрузкам (клапаны гидравлических прессов, предметы домашнего обихода), а также для изготовления изделий, которые подвергаются действию агрессивных сред (атмосферным осадкам, водным растворам солей органических кислот при комнатной температуре и т.д.).

Химический состав стали 20X13 регулирует ГОСТ 5632–2014 [27] и представлен в таблице 3.

Таблица 3 – Химический состав стали 20X13

Химический элемент	C	Si	Mn	S	P	Cr	Fe
Содержание, %	0,16...0,25	Не более 0,8	Не более 0,8	Не более 0,025	Не более 0,025	12,0...14,0	Осн.

Механические свойства стали 20X13 при $T=20^{\circ}\text{C}$ в соответствии с ГОСТ 5632-2014 [27] представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Механические свойства стали 20X13

Сортамент	ГОСТ	Предел прочности σ_B , МПа	Предел текучести σ_T , МПа	Относительное удлинение, δ_5 , %
Лист толстый	7350-77	510	375	20
Лист тонкий	5582-75	490	-	20
Сортовой прокат	5949-75	650	440	16
Лента	4986-78	490	-	16

Температура критической точки стали A_{c1} равна 820°C , точки A_{c3} (A_{cm}) равна 950°C , точки A_{r1} равна 780°C .

Структура стали в состоянии поставки показана на рисунке 4 с увеличением $\times 500$ и на рисунке 5 с увеличением $\times 1000$ и представляет собой феррит, перлит и карбиды.

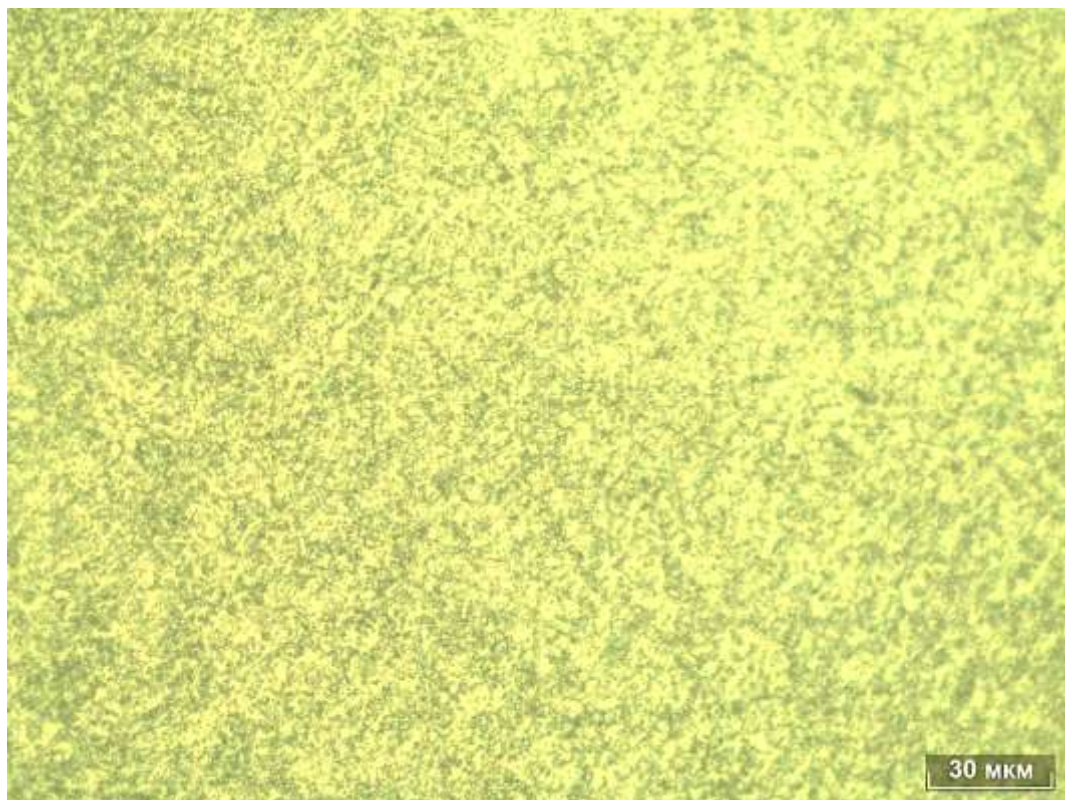


Рисунок 4 – Структура стали 20X13

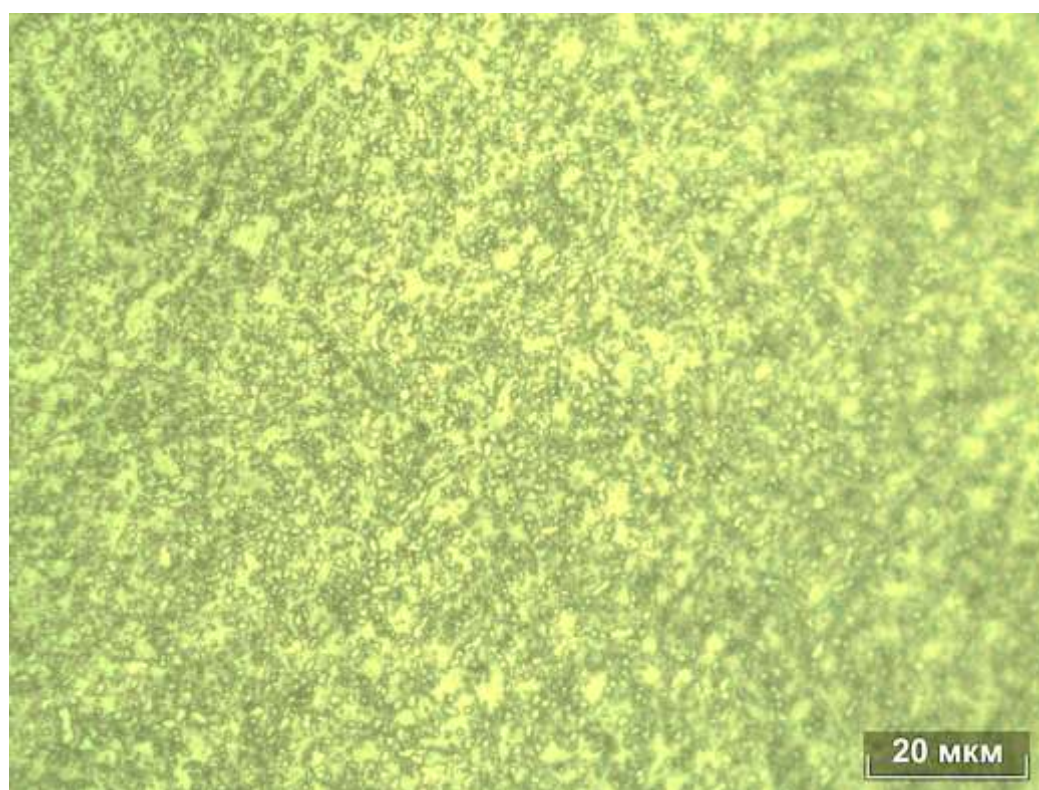


Рисунок 5 – Структура стали 20X13

Сталь 40X13 представляет собой коррозионностойкую, жаропрочную сталь. Относится ферритно-мартенситному классу. Сталь применяется для изготовления режущего, мерительного, хирургического инструмента, пружин, подшипников (работающих при температурах не выше 400...450°C), предметов домашнего обихода, сталь распространена при производстве ножей хозяйственно-бытового назначения среднего класс.

Химический состав стали 40X13 в соответствии с ГОСТ 5632-2014 [27] представлен в таблице 5.

Таблица 5 – Химический состав стали 40X13

Химический элемент	C	Si	Mn	S	P	Cr	Fe
Содержание, %	0,36... 0,55	Не более 0,8	Не более 0,8	Не более 0,025	Не более 0,025	12,0...14,0	Осн.

Механические свойства стали 40X13 при $T = 20^{\circ}\text{C}$ в соответствии с ГОСТ 5632-2014 [27] представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Механические свойства стали 40X13

Сортамент	ГОСТ	Предел прочности σ_b , МПа	Относительное удлинение δ_5 , %	HRC после закалки
Лист	5582-75	550	15	58

Температура критической точки $A_{c1} = 800^{\circ}\text{C}$, точки $A_{r1} = 780^{\circ}\text{C}$.

Структура стали в состоянии поставки показана на рисунке 6 с увеличением $\times 500$ и на рисунке 7 с увеличением $\times 1000$ и представляет собой феррит, перлит и карбиды.

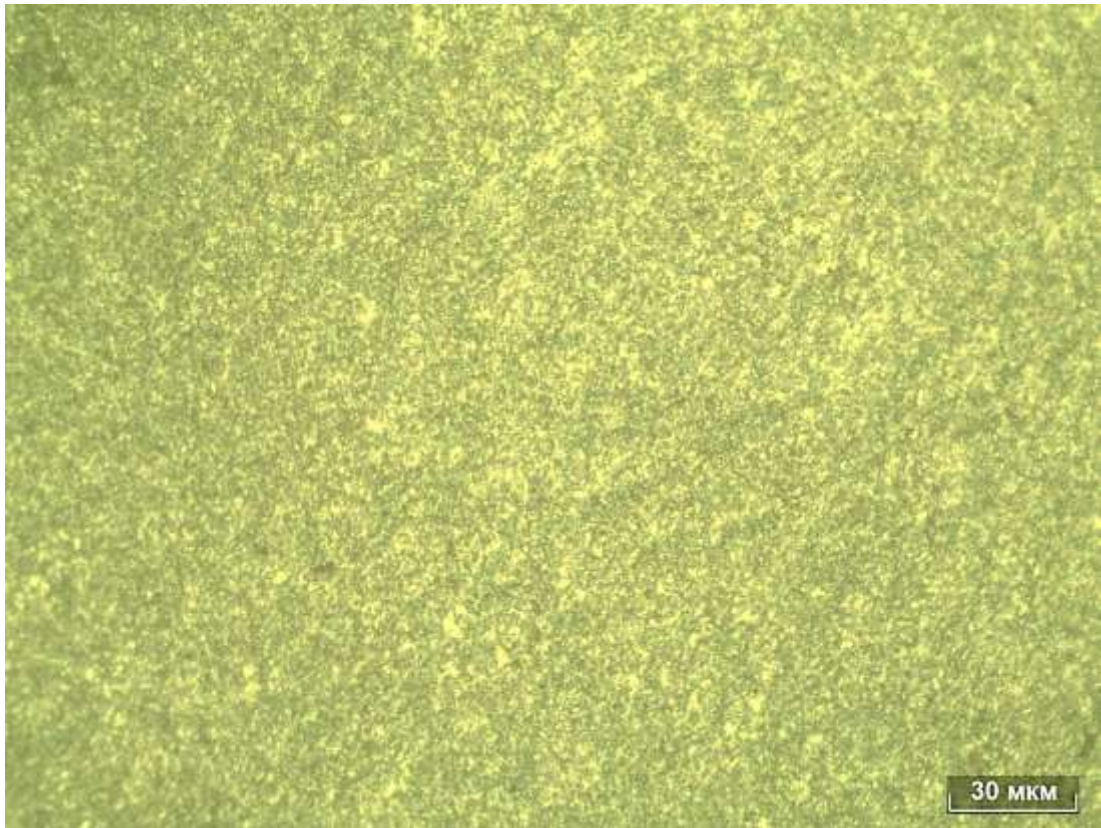


Рисунок 6 – Структура стали 40X13

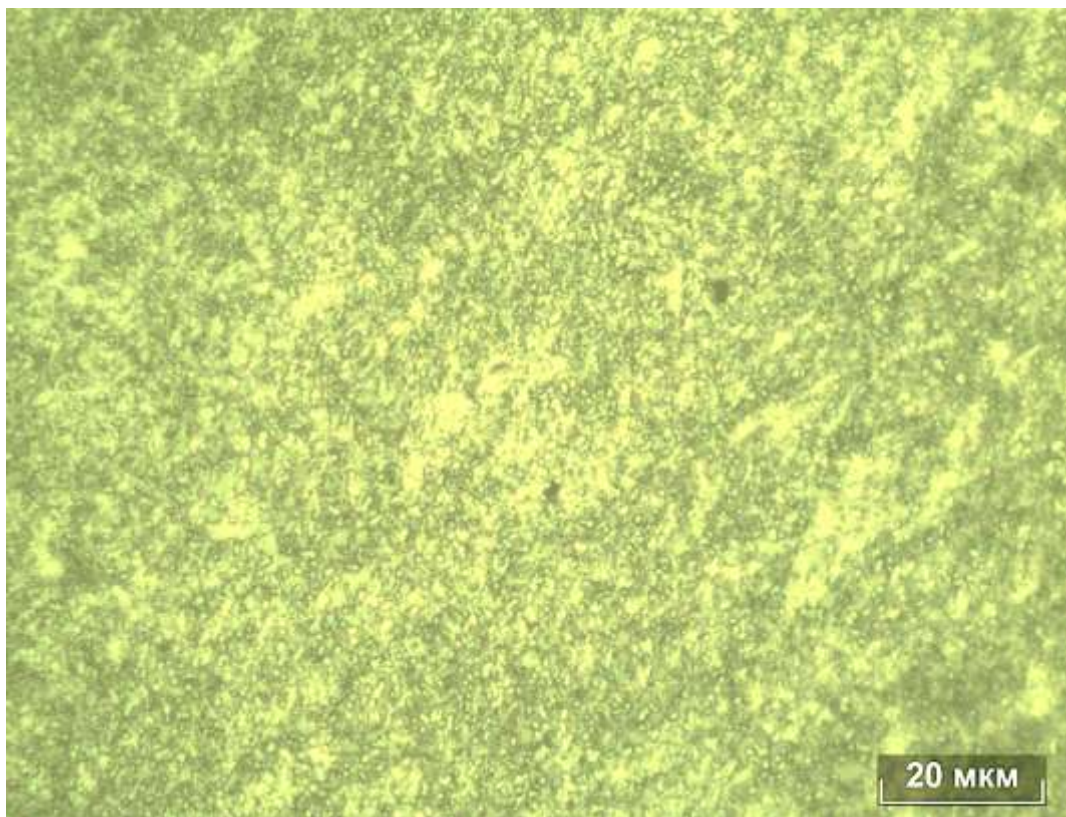


Рисунок 7 – Структура стали 40X13

Сталь 65X13 является коррозионностойкой, жаропрочной сталью. Применяется для производства лезвий безопасных бритв, режущего инструмента, при эксплуатации на износ: кухонных ножей, пил, съемных лезвий и т.д. Химический состав стали 65x13 в соответствии с ГОСТ 5632-2014 [27] представлен в таблице 7.

Таблица 7 – Химический состав стали 65X13

Химический элемент	C	Si	Mn	S	P	Cr	Fe
Содержание, %	0,6...0,7	Не более 0,8	Не более 0,8	Не более 0,025	Не более 0,025	12,0...14,0	Осн.

Механические свойства стали 65X13 при $T = 20^{\circ}\text{C}$ в соответствии с ГОСТ 5632-2014 [27] представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Механические свойства стали 65X13

Сортамент	ТУ	Предел прочности σ_b , МПа	Относительное удлинение, δ_5 , %	Твердость HV
Лента 0,1 мм	ТУ 14-1-4105-86 (нагартованное)	888...1127	-	280...320
Лента 0,4 мм	ТУ 14-131-764-88 (нагартованное)	-	-	220...280
Лента 3мм	ТУ 14-1-3918-85 (термически обработанное)	<785	<18	<97HRB

Критическая точка стали 65X13 $A_{c1} = 805...810^{\circ}\text{C}$, точка $A_{c3} = 880^{\circ}\text{C}$, точка $M_H = 200^{\circ}\text{C}$.

Структура стали в состоянии поставки показана на рисунке 8 с увеличением $\times 500$ и на рисунке 9 с увеличением $\times 1000$ и представляет собой феррит, перлит и карбиды.

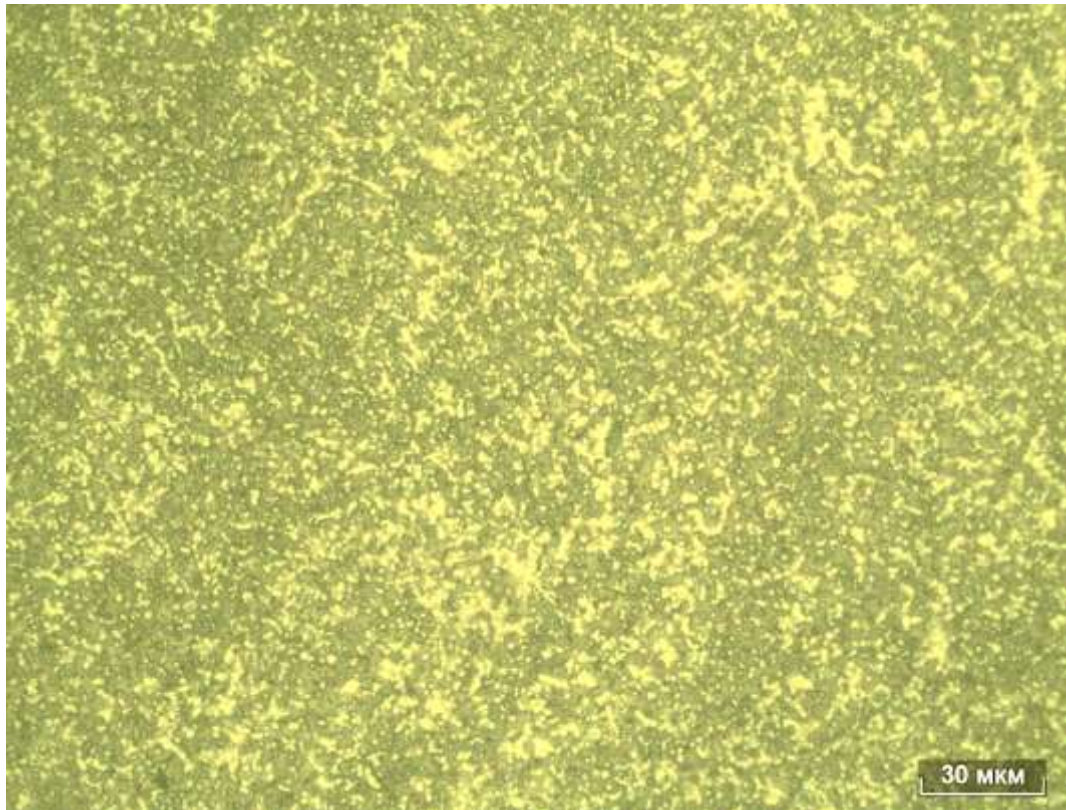


Рисунок 8 – Структура стали 65X13

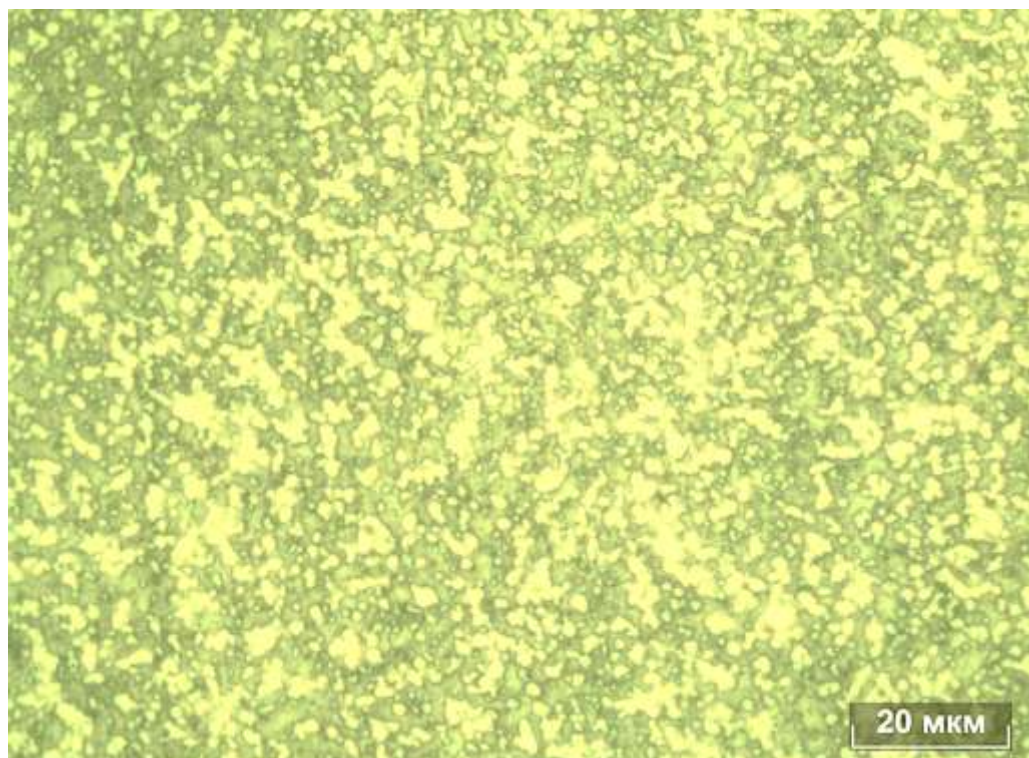


Рисунок 9 – Структура стали 65X13

Диаграмма состояния системы железо–хром–углерод с содержанием хрома 13 %, исходя из которой назначают режимы термической обработки, представлена на рисунке 10.

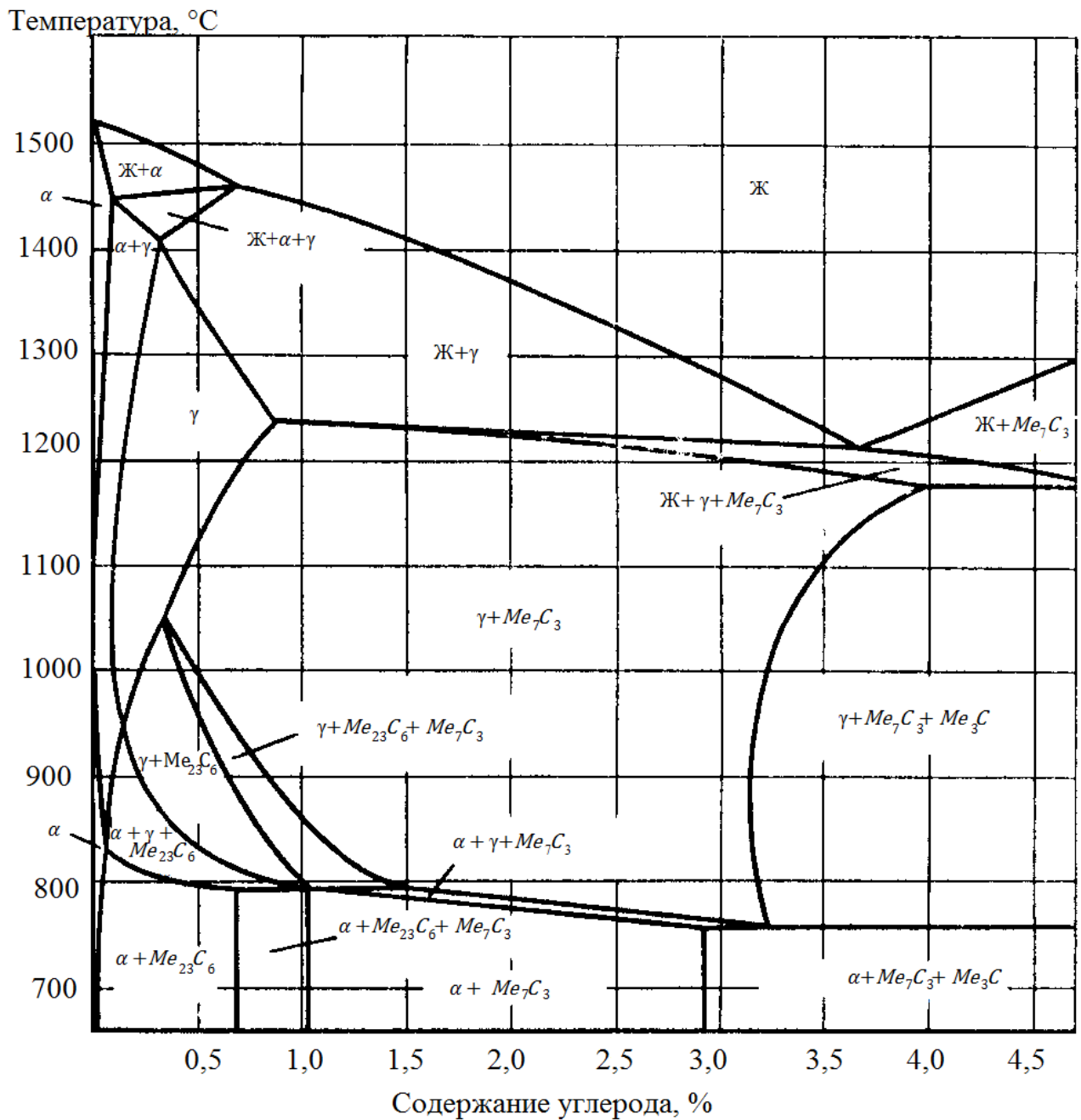


Рисунок 10 – Диаграмма состояния системы железо–хром–углерод с содержанием хрома 13 %

С увеличением содержания углерода величина карбидов увеличивается и увеличивается доля перлитной составляющей [28].

2.2 Методы исследования механических свойств

2.2.1 Определение микротвердости

Требованиями к материалам для режущих инструментов являются: твердость, износостойкость и коррозионная стойкость. Для определения твердости в слоях композиционного материала используется метод определения микротвердости.

Так как режущий инструмент подвергается динамическим нагрузкам, абразивному износу, надежность инструмента зависит от сопротивления материала ударным нагрузкам. Для определения сопротивления материала к динамическим, ударным нагрузкам необходимо проводить испытание на ударную вязкость.

Определение микротвердости – это один из статических методов определения твердости путем вдавливания. Микротвердость измеряется вдавливанием алмазной пирамиды под нагрузкой менее 2 Н [29].

Измерение микротвердости производят в соответствии с требованиями ГОСТ 9450–76 [30]. Для измерения микротвердости подготавливается металлографический шлиф [31]. Измерение микротвердости по диагоналям отпечатка представлено на рисунке 11.

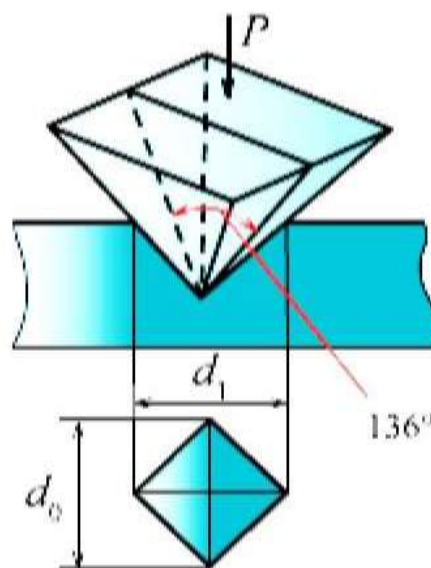


Рисунок 11 – Измерение микротвердости: P – нагрузка; d_0 – диаметр отпечатка 1; d_1 – диаметр отпечатка 2

Число микротвердости определяют делением приложенной к алмазному наконечнику нормальной нагрузки на условную площадь боковой поверхности полученного отпечатка.

Для четырехгранной пирамиды с квадратным основанием, если нагрузка выражена в ньютонах число микротвердости вычисляют по формуле [30]:

$$HV = \frac{F}{S} = \frac{0.102 \cdot 2 \cdot F \cdot \sin\left(\frac{d}{2}\right)}{d^2} = \frac{0.189 \cdot F}{d^2} \quad (4)$$

где HV – значение микротвердости;

F – нормальная нагрузка, приложенная к алмазному наконечнику, H ;

S – условная площадь боковой поверхности полученного отпечатка, мм^2 ;

d – среднее арифметическое длин обеих диагоналей квадратного отпечатка, мм .

Для проведения исследования микротвердости готовились микрошлифы, один из которых представлен на рисунке 12. Подготовка микрошлифа для металлографических исследований состоит из следующих стадий:

- вырезка и подготовка образца;
- шлифование;
- полирование;
- травление.

Образцы для микроскопического изучения могут иметь разную конфигурацию, определяемую характером изделия и вопросами изучения. После вырезки образцы для удобства заливают пластмассами либо прессуют в холодную заливку.

Абразивная подготовка микрошлифов (шлифование) представляет собой срезание неровностей поверхности абразивными частицами. При шлифовке и полировке необходимо поворачивать образец на 90° для образования зеркальной поверхности.

Мокрое шлифование предоставляет наилучшие результаты, так как, омывая поверхность шкурки и шлифа, влага уносит частицы срезанного металла.

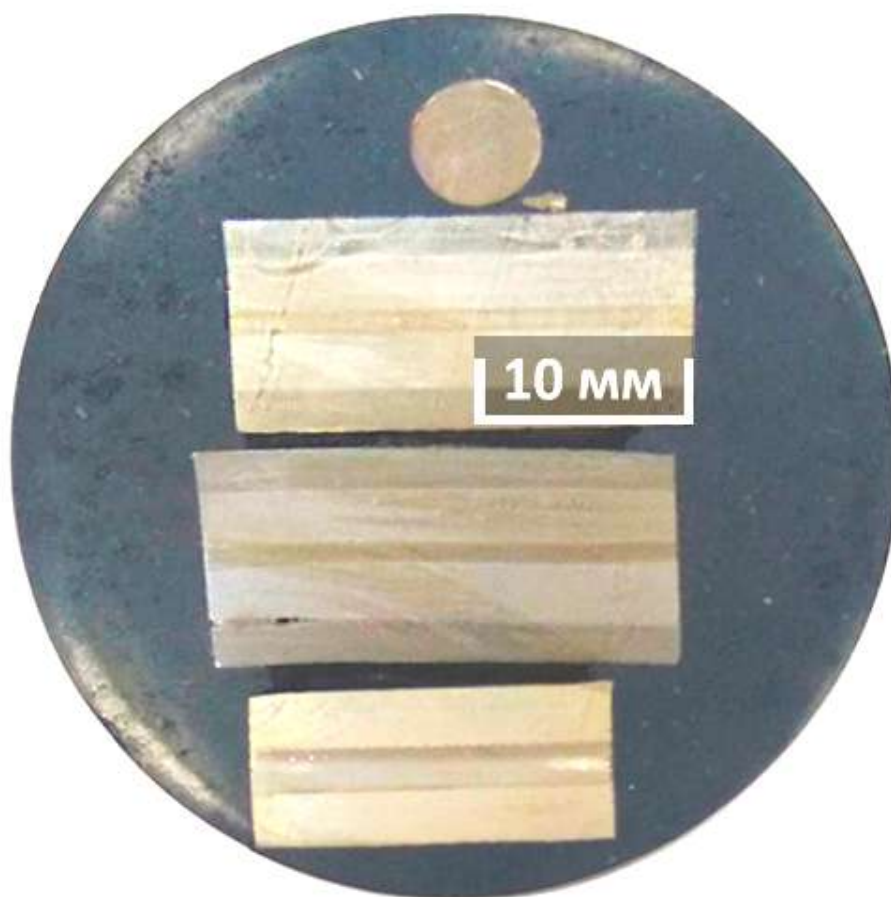
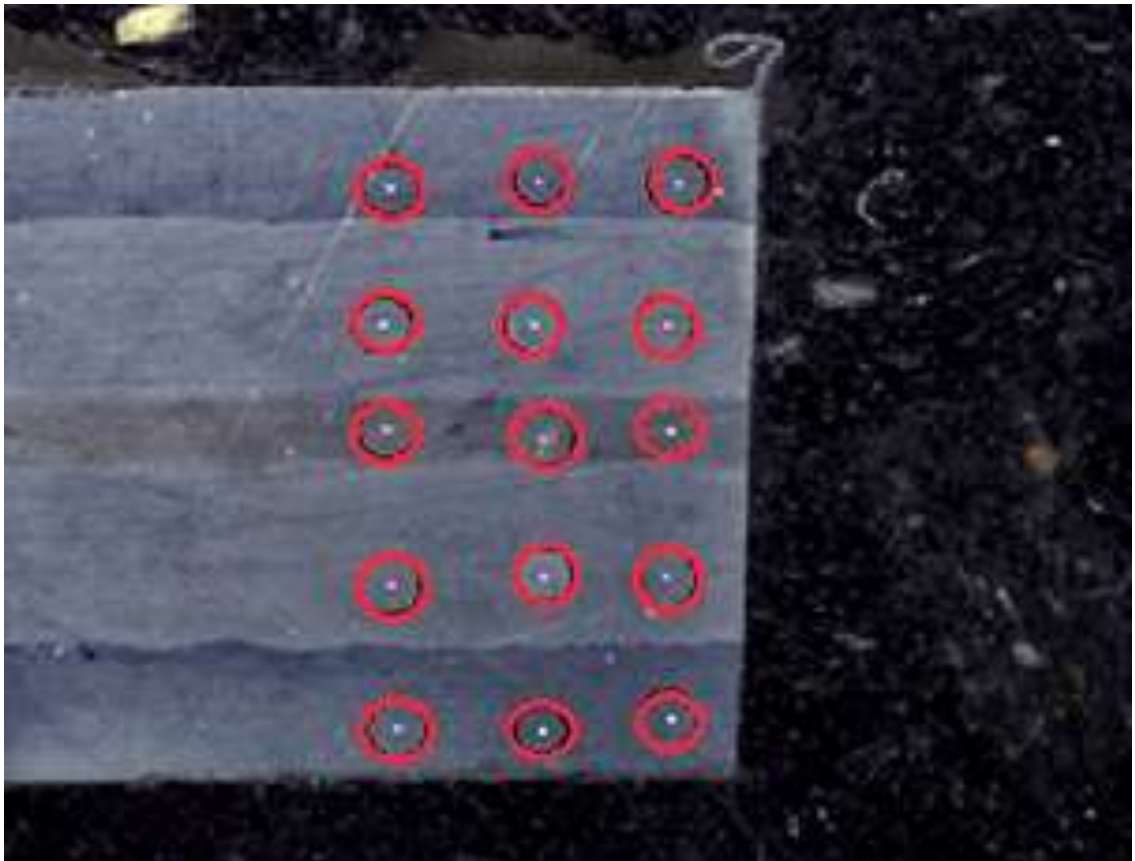


Рисунок 12 – Внешний вид микрошлифа

Для выявления микроструктуры подготовленные шлифы подвергают травлению, состав реактива зависит от поставленных задач микроструктурного исследования [32].

Приготовленный микрошлиф ставят на рабочее место микротвердомера и проводят замеры. Схема замера микротвердости представлена на рисунках 13, 14.



×10

Рисунок 13 – Схема замера твердости



×100

Рисунок 14 – Отпечатки индентора при определении твердости по Виккерсу

По отпечаткам определяют значения микротвердости либо с помощью формулы (4), либо по справочным таблицам. Есть твердомеры, которые после замера величины отпечатка выдают значение микротвердости на экране устройства.

2.2.2 Испытание на ударный изгиб

Основным типом динамических испытаний считается ударное испытание надрезанных образцов в маятниковых копрах, основным образом на изгиб. Подобные испытания выполняют при первоначальной скорости удара от 3 до 6 м/с.

Ударный изгиб образцов с надрезом – наиболее простое и менее сложное из всех механических испытаний [33].

Метод испытания на ударный изгиб проводится в соответствии с ГОСТ 9454–78 [34] и он основан на разрушении образца с концентратором посередине одним ударом маятникового копра, концы образца располагаются в опорах. В результате испытания определяют полную работу, затраченную при ударе, или ударную вязкость. Под ударной вязкостью (KC) понимают работу удара, отнесенную к начальной площади поперечного сечения образца в месте концентратора. Ударная вязкость определяется по формуле [33]:

$$KC = \frac{K}{A_0} \quad (5)$$

где KC – ударная вязкость, Дж/см²;

K – работа, затраченная при ударе, Дж;

A_0 – начальная площадь поперечного сечения образца, см².

ГОСТ 9454–78 предусматривает образцы с концентраторами трех видов: T – образный усталостной трещиной, U – образный и V – образный с. В данном исследовании образцы имели концентратор типа U согласно эскизу, показанному на рисунке 15.

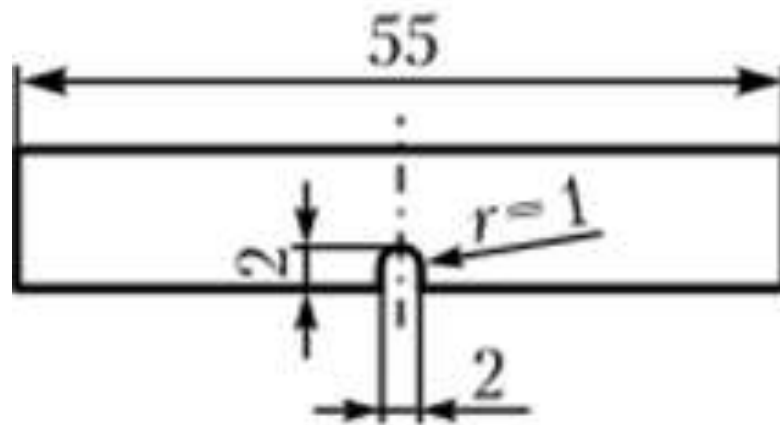
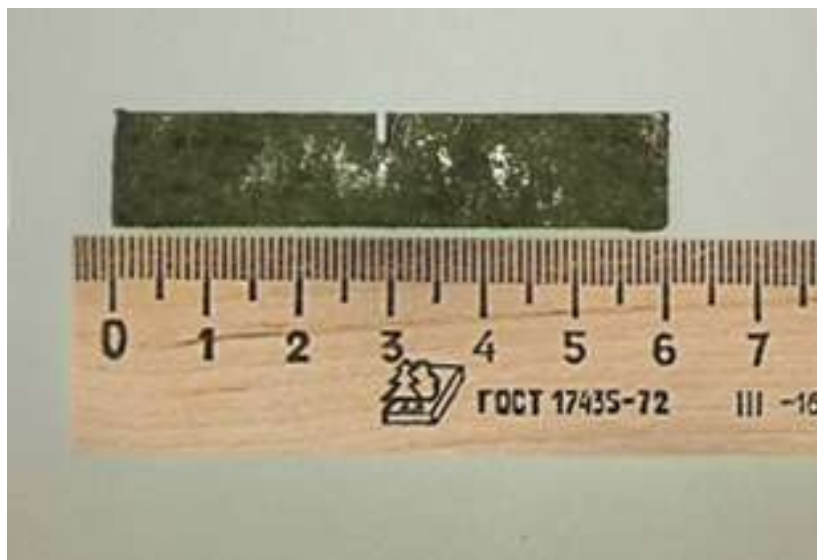


Рисунок 15 – Эскиз образца с концентратором типа *U*

На рисунке 16 изображены подготовленные образцы для испытания на ударную вязкость.



а)



б)

Рисунок 16 – Образцы для испытания на ударную вязкость: а) – вид сверху; б) – вид с торца

Испытания проводятся при комнатной температуре. Образец должен свободно лежать на опорах копра. Установка образца проводится в соответствии с шаблоном, который обеспечивает симметричное расположение концентратора относительно опор. При испытании удар копра проводится со стороны, противоположной стороне с концентратором.

2.2.3 Оборудование для проведения экспериментов

Определение микротвердости проходит на твердомере ПМТ-3, представленном на рисунке 17.

Исследование ударной вязкости проводилось при нормальной температуре воздуха на маятниковом копре модели ИО 5003-0,3-11, представленном на рисунке 18.



Рисунок 17 – Микротвердомер ПМТ-3

Технические характеристики твердомера ПМТ-3 представлены в таблице 9 [35].

Таблица 9 – Технические характеристики ИО-5003-0,3-11

Параметр	Значение параметра
1	2
Увеличение микроскопа	130 ^x и 487 ^x
Алмазная пирамида: – угол при вершине – острие при вершине – пределы нагрузки	136° не более 1 мк 2-200 г
Пределы измерения диагоналей отпечатков	0,05-0,25 мм
Предметный столик: – пределы угла поворота – пределы продольного перемещения – пределы поперечного перемещения – цена деления шкалы микрометрической подачи	~0-180° 0-10 мм 0-10 мм 0,01 мм



Рисунок 18 – Маятниковый копер ИО-5003-0,3-11

Технические характеристики маятникового копра ИО-5003-0,3-11 представлены в таблице 10 [36].

Таблица 10 – Технические характеристики ИО-5003-0,3-11

Параметр	Значение параметра
Наибольший запас потенциальной энергии, Дж	300
Запас потенциальной энергии маятника, Дж	300
Диапазон измерения энергии, Дж	30...240
Цена деления аналогового отсчетного устройства, Дж	1,0
Дискретность цифрового отсчетного устройства, Дж	0,1
Скорость движения маятника в момент удара, м/с	$5 \pm 0,5$
Максимальная мощность, кВт (питание)	0,38 (3N, 380 В, 50 Гц)

Результат испытания (величин энергии, затраченной на разрушение образца) фиксируется по аналоговой шкале.

Выводы по 2 главе

Проведен выбор материалов для получения композиционного материала. Для получение композиционного материала сваркой взрывом выбраны стали 20Х13, 40Х13 и 65Х13 с различным содержанием углерода. Рассмотрено влияние химического состава на структуру, показаны механические свойства сталей.

Обоснован выбор испытаний механических свойств. Выбраны такие методы как: определение микротвердости и испытание на ударный изгиб. Описана методика исследования каждого метода. Показано оборудование, которое используется при исследовании и приведены их технические характеристики.

3 Получение гетерогенных металлических материалов

3.1 Технологическая схема получения гетерогенного металлического материала

Сварку взрывом выполняли на полигоне. При сварке использовали схему с параллельным расположением пластин, представленную на рисунке 19.

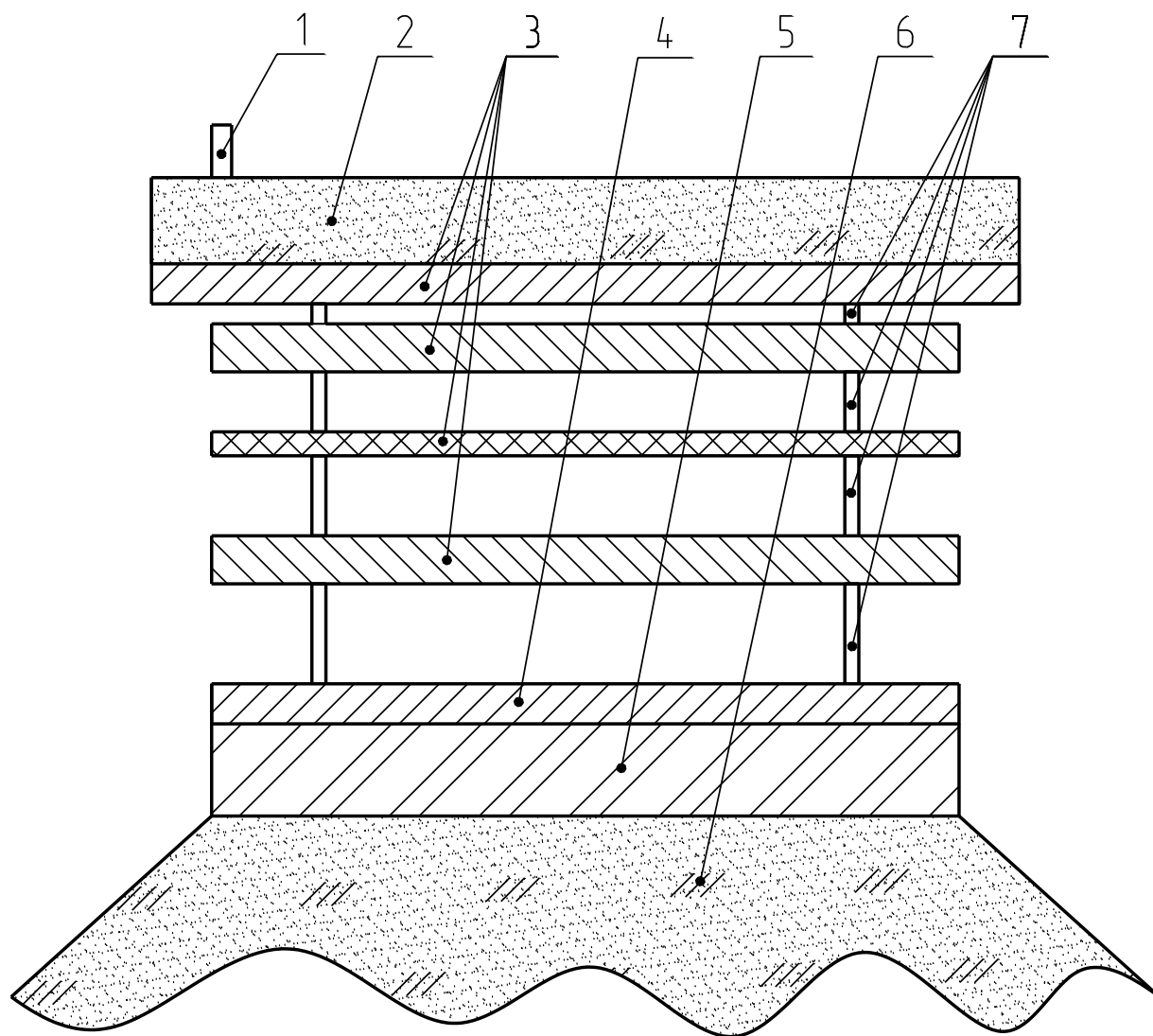


Рисунок 19 – Схема сварки взрывом: 1 – детонатор, 2 – взрывчатое вещество, 3 – метаемые пластины, 4 – неподвижная пластина, 5 – подложка, 6 – песчаное основание, 7 – технологические опоры

Подготовка схем к сварке взрывом включает в себя:

- подготовку песчаного основания для расположения пакета композиционного материала;
- установку заданного зазора между свариваемыми пластинами;
- сборку технологических пакетов для сварки взрывом;
- сварку взрывом материалов;
- контроль полученного композиционного материала;
- предварительная термическая обработка композиционного материала.

Рациональный режим сварки взрывом представлен в таблице 11. Взрывчатое вещество, используемое при сварке взрывом, игданит.

Таблица 11 – Исходные параметры сварки взрывом

Характеристики взрывчатого вещества	$D_{\text{ВВ}}$, м/с	2700
	$H_{\text{ВВ}}$, мм	80
	$\rho_{\text{ВВ}}$, г/см ³	0,75
Величина зазора между пластинами, мм	1-2	1
	2-3	3
	3-4	4
	4-5	5

После сварки взрывом заготовки подвергались визуально-измерительному контролю. Им контролировались торцевые непровары и обрубка.

Заготовка после сварки взрывом представлены на рисунке 20. Размеры заготовок 280×180 мм.



Рисунок 10 – Заготовка после сварки взрывом (лицевая и оборотная стороны)

После сварки взрывом был проведен отжиг, он был проведен с целью снятия внутренних напряжений и устранения наклепа после пластической деформации, полученных после сварки взрывом. Для снятия наклепа полученного в результате пластической деформации прибегают к использованию рекристаллизационного отжига для возвращения стали в исходное состояние. Температура рекристаллизационного отжига для стали 20X13 в соответствии с диаграммой состояния, составляет 70 % от температуры плавления ($T_{пл}=1220^{\circ}\text{C}$) и равна 854°C , для стали 40X13 и 65X13 – 826°C ($T_{пл}=1180^{\circ}\text{C}$). Температура рекристаллизационного отжига заготовок после сварки взрывом составляет $840\dots 860^{\circ}\text{C}$, выдержка 2...3 часов, охлаждение в печи.

3.2 Термическая обработка гетерогенных металлических материалов

Основными требованиями для материалов с эффектом самозатачивания, предназначенных для изготовления режущего инструмента, особенностями эксплуатации которых, являются: трение при резании, работа в тяжелых условиях (обработка металлов, почвы, твердых пород), высокая температура поверхности инструмента, значительные контактные напряжения являются твердость, износостойкость и коррозионная стойкость. Необходимым условием для получения та-

ких свойств является проведение термической обработки, которая предоставит изделиям достаточную твердость, износостойкость и коррозионную стойкость.

Режим термической обработки для получения требуемых свойств композиционного материала представляет собой закалку и отпуск. С целью исследования влияния режима отпуска на свойства композиционных материалов, полученных сваркой взрывом, режимы термической обработки были следующие:

- закалка до температур 1040...1060°C с последующим охлаждением в масле и низкий отпуск, заключающийся в нагреве до температуры 200...250°C, выдержке в печи в течении 2-х часов с последующим охлаждением в масле;

- закалка до температур 1040...1060°C с последующим охлаждением в масле и средний отпуск, заключающийся в нагреве до температуры 350...500°C, выдержке в печи в течении 2-х часов с последующим охлаждением в масле;

- закалку до температуры 1040...1060°C с последующим охлаждением в масле и высокий отпуск, заключающийся в нагреве до температуры 500...650°C, выдержке в печи в течении 2-х часов с последующим охлаждением в масле.

Присутствие легирующих элементов в стали вносит некоторые изменения и в практику проведения отпуска. В сталях, легированных карбидообразующими элементами (в данном случае хромом), при отпуске 400...450°C образуются специальные карбиды. Эти карбиды дисперсны и являются эффективным препятствием для движущихся дислокаций, и как следствие, их выделение приводит к упрочнению стали. Но одновременно должно происходить и ее разупрочнение, связанное с распадом мартенсита. Интенсивность действия этих двух процессов в итоге определяет характер изменения прочностных характеристик при высоком отпуске. Эффект повышения твердости и прочности при отпуске в результате выделения специальных карбидов называется вторичным твердением, а стали с таким эффектом – вторичнотвердеющими. Интенсивность действия различных карбидообразующих элементов на механические характеристики возрастает с увеличением их карбидообразующей способности. В сталях, в которых содержатся элементы с большой карбидообразующей способностью, пик вторичного твердения смещается в сторону более высоких температур, а разупрочнение, связанное с

укрупнением карбидов, происходит медленнее. Такую характеристику можно проследить, сравнивая характер влияния хрома на изменение твердости при отпуске закаленной на мартенсит стали с содержанием углерода 0,4%, что изображено на рисунке 21.

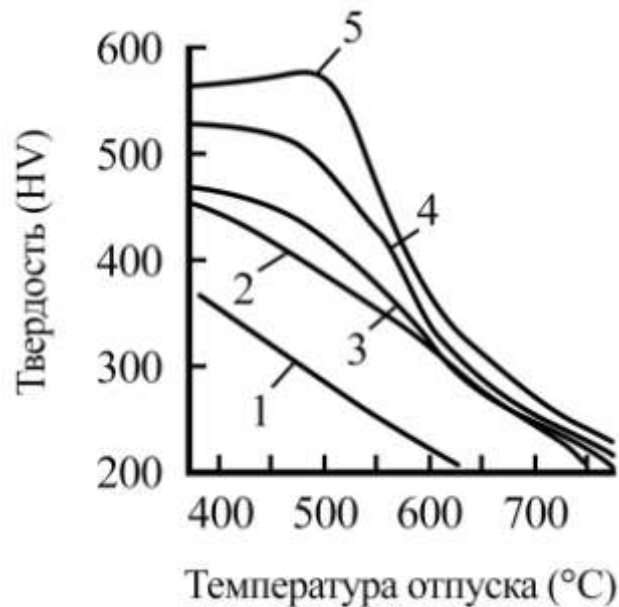


Рисунок 21 – Влияние хрома на изменение твердости среднеуглеродистой стали при отпуске: 1 – без хрома, 2 – 2,0%, 3 – 4,0%, 4 – 6,0%, 5 – 10,0%

Из рисунка видно, что заметный пик вторичного твердения может быть получен при содержании хрома 6% при отпуске 500°C.

Вторичное твердение при отпуске сопровождается охрупчиванием, что проявляется в снижении пластичности, ударной вязкости и вязкости разрушения. Так, отпуск при 250...400°C вызывает появление необратимой отпускной хрупкости, а при 450...600°C – обратимой отпускной хрупкости.

Необратимая отпускная хрупкость свойственна всем углеродистым и легированным сталям, отпущенным в интервале 250...400°C, это явление невозможно устранить.

Обратимая отпускная хрупкость возникает при замедленном охлаждении легированных хромом, марганцем, никелем сталей, отпущенных при температурах выше 450°C.

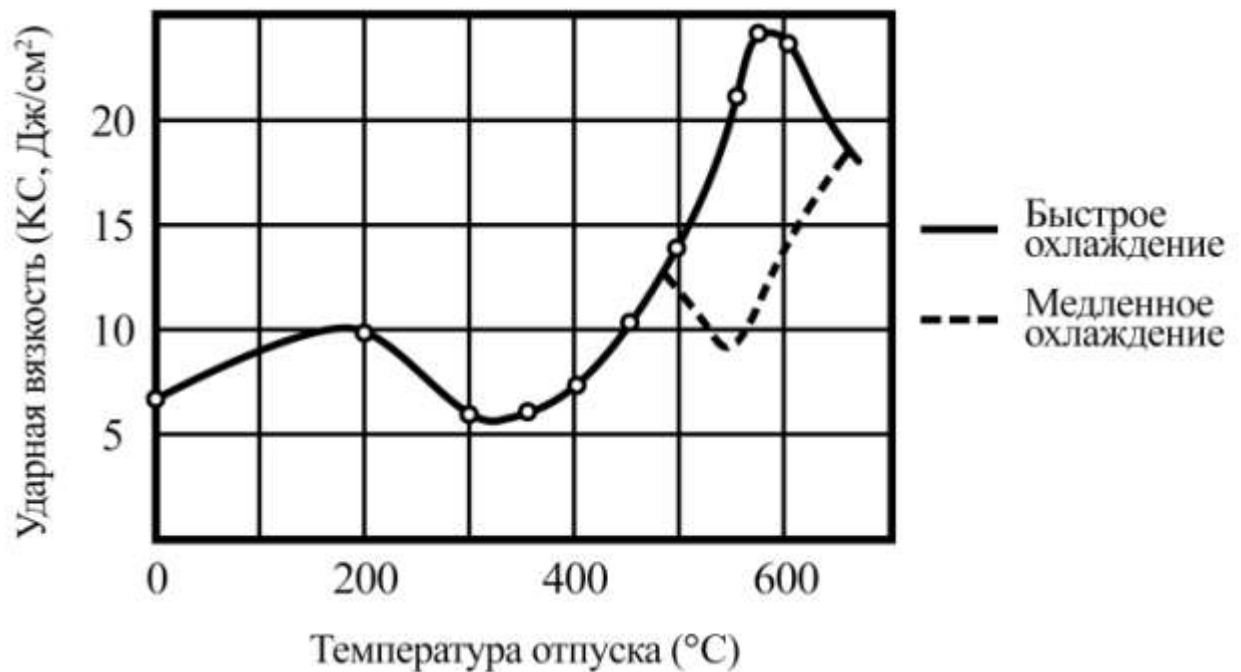


Рисунок 22 – Изменение ударной вязкости легированной стали в зависимости от температуры отпуска: 1 – процесс охлаждения осуществляется с большой скоростью, 2 – процесс охлаждения проводят постепенно, с небольшой скоростью.

Чтобы подавить развитие обратной хрупкости, применяют повторный отпуск с охлаждением в масле, при этом скорость охлаждения должна быть выше, чем была, что показано на рисунке 22 [37].

Выводы по 3 главе

В данном разделе был рассмотрен первый этап экспериментальной части. Рассмотрена технологическая схема получения композиционного материала сваркой взрывом. Приведен режим сварки взрывом, который включает в себя взрывчатое вещество, его скорость детонации и плотность, величины зазоров между свариваемыми пластинами.

Проанализированы режимы термической обработки, которые заключаются в отжиге, закалке и отпуске. С целью выявления оптимального режима термической обработки рассматривается 3 вида отпуска (низкий, средний и высокий).

4 Результаты исследований свойств гетерогенных металлических материалов, полученных сваркой взрывом

4.1 Исследование структуры

Исследование микроструктуры композиционных материалов проводили на металлографическом микроскопе АЛЬТАМИ МЕТ 6С, представленном на рисунке 23, с программным обеспечением «AltamiStudio».



Рисунок 23 – Металлографический цифровой микроскоп *Altami MET 6C*

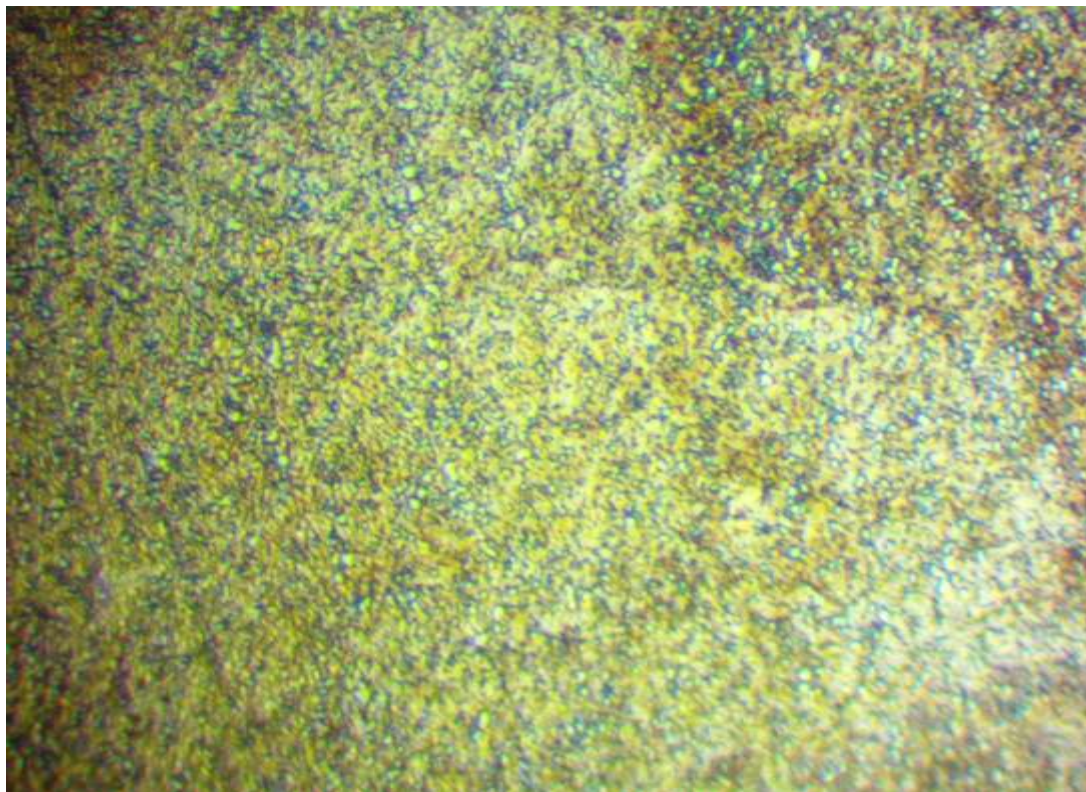
Исследование микроструктуры проводилось на подготовленных образцах – микрошлифах, в соответствии с ГОСТ Р 57180-2016 [38].

Приготовление образцов включает в себя: вырезку образцов, шлифование (в несколько проходов понижая величину абразивных частиц), полировку (по окончании полирования на микрошлифах не допускаются заусенцы, острые кромки,

завалы, выбоины, царапины), промывку в спирте и высушивание на фильтровальной бумаге.

Для выявления микроструктуры провели химическое травление с применением реактивов на основе концентрированных азотной и соляной кислот.

Микроструктура стали 65Х13 после термической обработки представлена на рисунках 24-26.



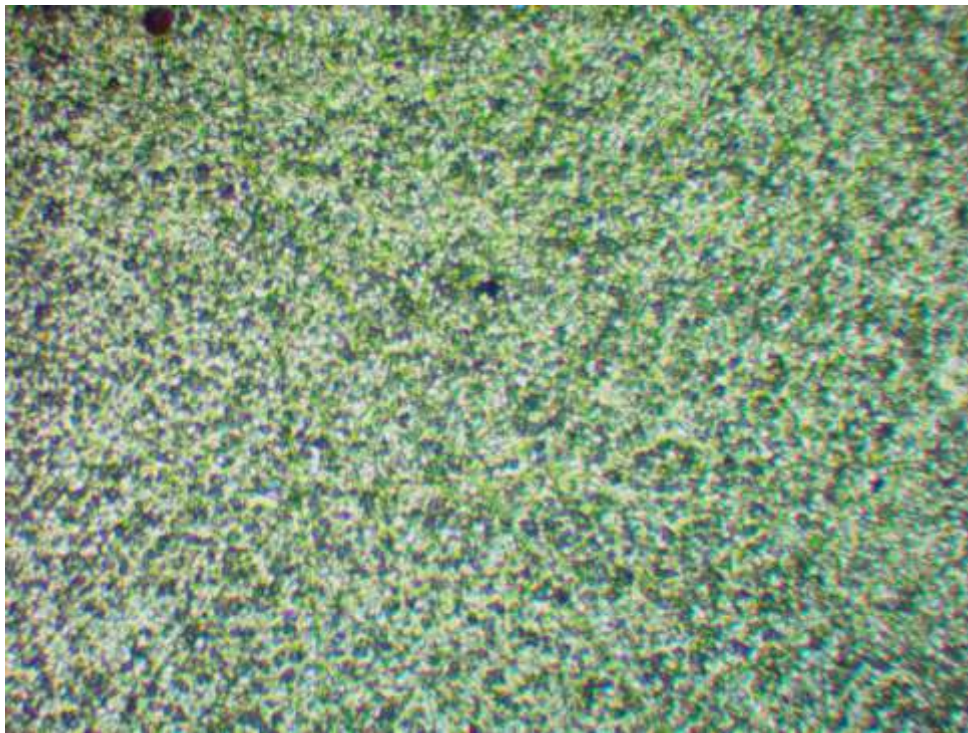
×1000

Рисунок 24 – Микроструктура стали 65Х13 (режущий слой) – после закалки и низкого отпуска



×1000

Рисунок 25 – Микроструктура стали 65X13 (режущий слой) после закалки и среднего отпуска



×1000

Рисунок 26 – Микроструктура стали 65X13(режущий слой) после закалки и высокого отпуска

Полученные результаты исследования микроструктуры свидетельствуют о том, что основными составляющими структуры слоев композиционного материала являются мартенсит и зерна карбидов.

4.2 Исследование микротвердости

Результаты исследования микротвердости представлены в таблице 12 и на рисунке 27. В данной таблице указаны средние значения результатов, с целью построения и выявления зависимости.

Таблица 12 – Результаты исследования микротвердости

Параметр	Микротвердость <i>HV</i>				
Слой	1	2	3	4	5
Состояние образца					
После сварки взрывом	268	265	266	287	284
После отжига	187	190	176	169	180
После закалки и низкого отпуска	465	539	663	539	464
После закалки и среднего отпуска	421	517	631	518	422
После закалки и высокого отпуска	437	528	644	527	438

После сварки взрывом микротвердость слоев незначительно увеличивается к нижнему слою. Вследствие отжига твердость композиционного материала снижается примерно на 100 единиц. Для получения требуемых свойств (повышенной твердости) проводится закалка с последующим отпуском. Для определения оптимального режима термической обработки (наилучших механических свойств) проводится 3 режима закалки и отпуска. Значения микротвердости после закалки и отпуска представлены на рисунке 28.

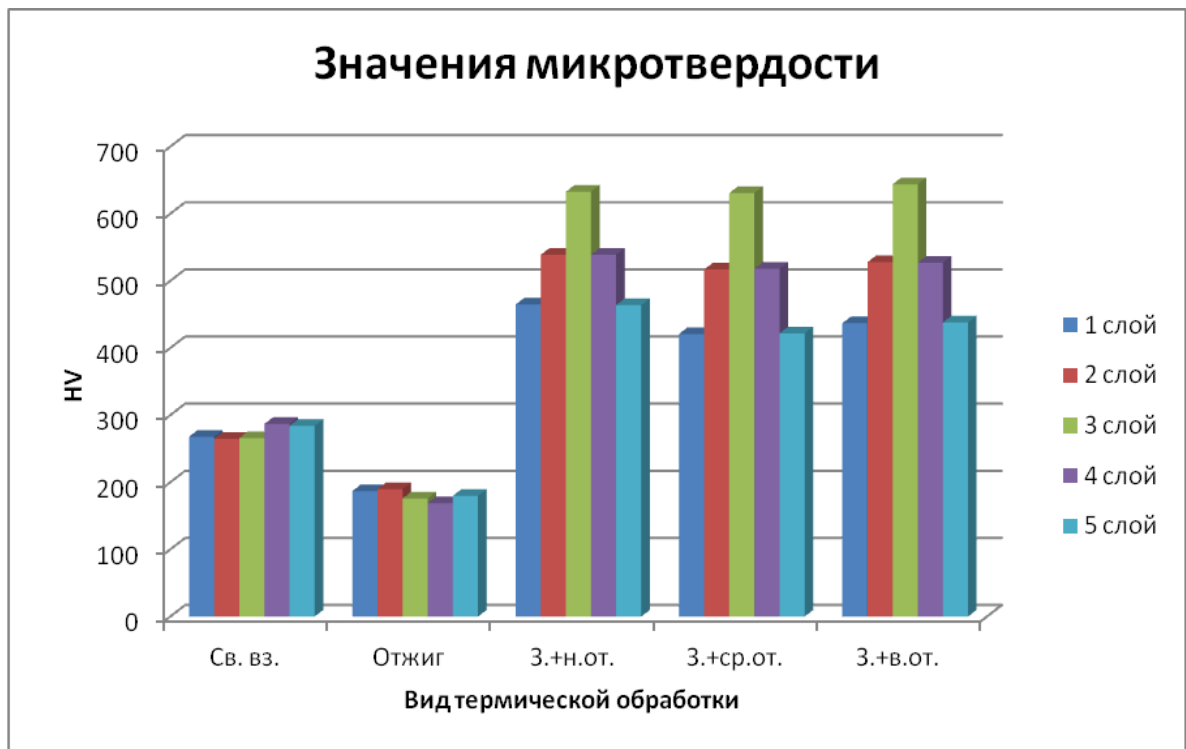


Рисунок 27 – Значения микротвердости

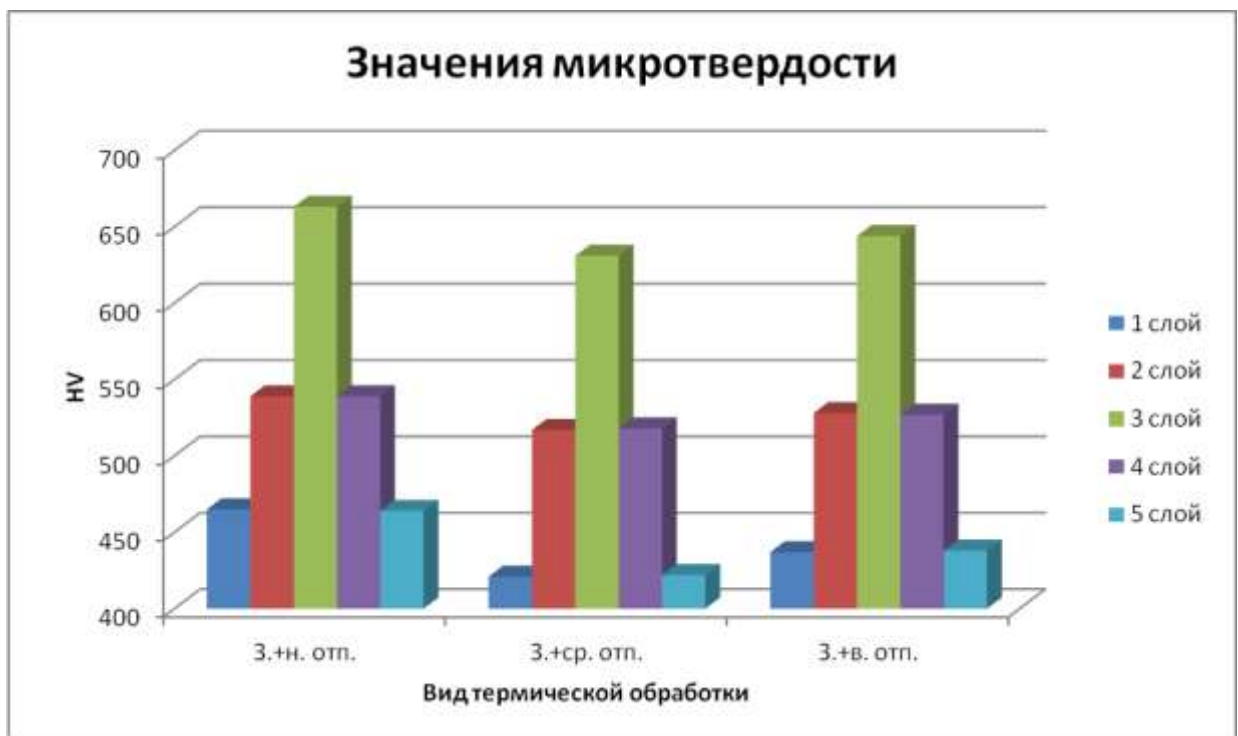


Рисунок 28 – Значения микротвердости после закалки и отпуска

Максимальные значения микротвердости наблюдаются у композиционного материала после закалки и низкого отпуска. Минимальные значения наблюдаются

у композиционного материала после закалки и среднего отпуска. При значительном легировании стали карбидообразующими элементами (Cr, W, Mo, V) возможно образование специальных карбидов, которые значительно дисперснее цемента, поэтому выделение их является главной причиной образования вторичной твердости при высоком отпуске. В данном случае увеличение микротвердости композиционного материала с температурой отпуска до 650°C сопровождается выделением карбидов, что объясняется явлением вторичной твердостью. Но наряду с увеличением твердости происходит уменьшение ударной вязкости, что показано в таблице 10, что приводит к охрупчиванию металла.

4.3 Исследование ударной вязкости

Результаты исследования ударной вязкости представлены в таблице 12 и на рисунке 29.

Таблица 12 – Результаты исследования ударной вязкости

Вид термической обработки	Значение ударной вязкости KCU , Дж/см ²
После сварки взрывом	23,4
После отжига	79,6
После закалки и низкого отпуска	9,2
После закалки и среднего отпуска	11
После закалки и высокого отпуска	9,1

После сварки взрывом композиционный материал имеет ударную вязкость 23,4 Дж/см². После отжига ударная вязкость сильно возросла на 56 единиц. После закалки и отпуска ударная вязкость резко снизилась на порядка 70 единиц.

Ударная вязкость у композиционного материала после закалки и низкого отпуска 9,2 Дж/см². Максимальное значение ударной вязкости (по сравнению с другими режимами закалки и отпуска) у композиционного материала после закалки и среднего отпуска (11 Дж/см²). Уменьшение ударной вязкости объясняется явлением отпускной хрупкости. Данное явления возникает при замедленном охлаждении сталей, легированных Cr, Mg и Ni, которые отпускаются при темпе-

ратурах выше 500°C. Причиной отпускной хрупкости является выделение и диффузное перераспределение карбидов.

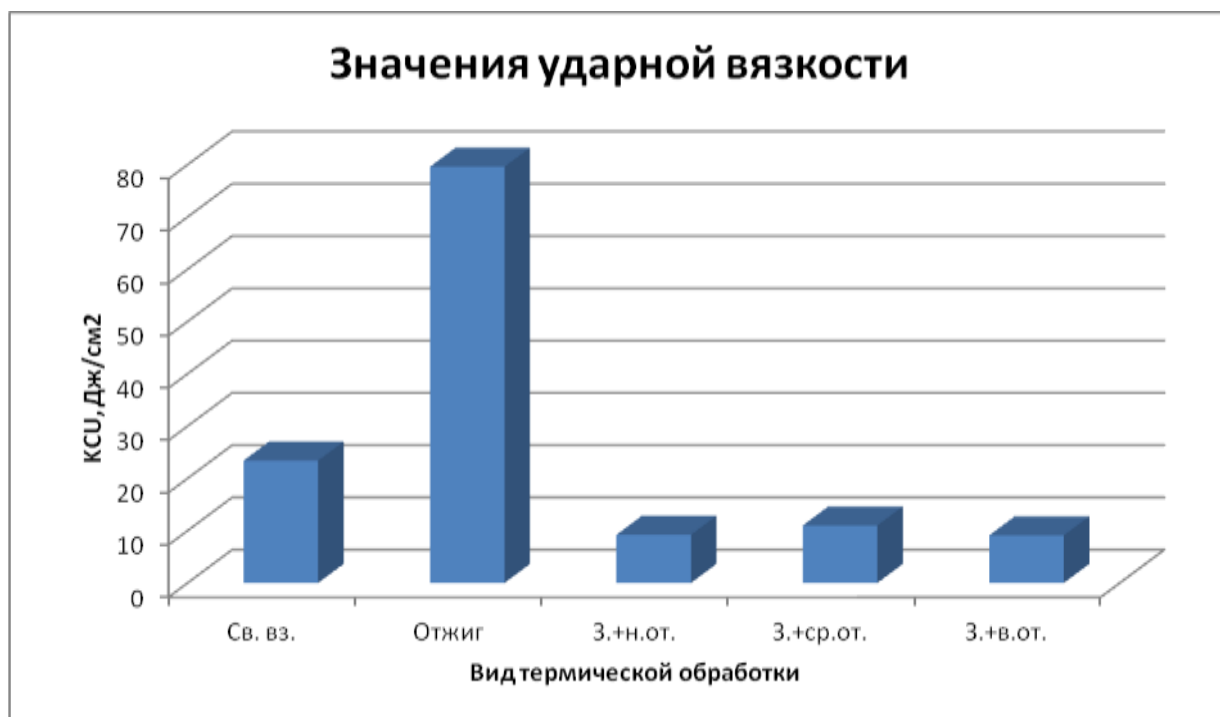


Рисунок 29 – Значения ударной вязкости

При режиме термической обработки закалке и высоком отпуске происходит явление вторичной твердости и отпускной хрупкости, что недопустимо для сталей, у которых главными требованиями являются высокая твердость, износостойкость и коррозионная стойкость. Таким образом, оптимальным режимом термической обработки для композиционного материала является закалки и низкий отпуск, обеспечивающим высокую твердость и достаточную ударную вязкость.

Выводы по 4 главе

В данной главе проанализированы результаты испытаний механических свойств, таких как микротвердость и ударная вязкость.

Самая наименьшая микротвердость наблюдается у композиционного материала после закалки и среднего отпуска (631 *HRC* у режущего слоя), самая наибольшая микротвердость после закалки и низкого отпуска (663 *HRC* у режущего слоя). У композиционного материала после закалки и высокого отпуска наблюдается явление вторичной твердости, что объясняется увеличением твердости до 644 *HRC*.

Результаты исследования ударной вязкости: у композиционного материала после закалки и низкого отпуска ударная вязкость составляет 9,2 Дж/см², максимальное значение ударной вязкости наблюдается у композиционного материала после закалки и среднего отпуска (11 Дж/см²). Дальнейшее уменьшение ударной вязкости после закалки и высокого отпуска объясняется явлением отпускной хрупкости и ударная вязкость составляет 9,1 Дж/см².

Заключение

Приведен обзор методов получения гетерогенных металлических материалов. Проведен обзор метода получения гетерогенных металлических материалов сваркой взрывом. Дана характеристика данного метода (рассмотрен процесс сварки взрывом, перечислены параметры и рассмотрено явление волнообразования).

Выполнен патентный поиск, в результате которого было найдено 16 патентов по таким предметам поиска как: технологии получения изделий с эффектом самозатачивания; материалы, обладающие эффектом самозатачивания; получение композиционных материалов сваркой взрывом и способы получения слоистых композиционных материалов.

Для исследований были выбраны такие стали как, 20X13, 40X13 и 65X13 и получена система 20X13 – 45X13 – 65X13 – 40X13 – 20X13. Приведена характеристика данных сталей, химический состав и механические свойства.

Для проведения экспериментов были выбраны такие методы исследования механических свойств как, определение микротвердости и испытание на ударный изгиб. Рассмотрена их методика и описано используемое оборудование.

Приведена технологическая схема получения композиционного материала и режим сварки взрывом. Для достижения требуемых механических свойств необходимо проведение термической обработки, которая заключается в закалке и отпуске.

Результаты исследования микротвердости: наименьшая микротвердость у композиционного материала после закалки и среднего отпуска (631 *HRC* у режущего слоя), наибольшая микротвердость после закалки и низкого отпуска (663 *HV* у режущего слоя). У композиционного материала после закалки и высокого отпуска наблюдается явление вторичной твердости, что объясняется увеличением твердости (644 *HRC* у режущего слоя).

Результаты исследования ударной вязкости: максимальное значение ударной вязкости у композиционного материала после закалки и среднего отпуска; у композиционного материала после закалки и низкого отпуска ударная вязкость составляет 9.2 Дж/см². Дальнейшее уменьшение ударной вязкости после закалки и

высокого отпуска объясняется явлением отпускной хрупкости и ударная вязкость составляет 9,1 Дж/см².

Таким образом, рациональным режимом термической обработки для ножей бытового назначения, где важны высокие показатели твердости и износостойкости композита является закалка и низкий отпуск.

Для ножей и режущего инструмента промышленного назначения, где важно сочетание высокой твердости, коррозионной стойкости достаточных показателей пластичности и вязкости композита рациональным режимом термической обработки является закалка и средний отпуск.

Таким образом, цель магистерской диссертации достигнута, все поставленные задачи выполнены в полном объеме.

По результатам выполнения магистерской диссертации были опубликованы статьи входящие в РИНЦ:

- «Практика выбора режимов термической обработки для упрочнения жаропрочной хромистой стали 20Х13» в сборнике «Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации»;
- «Гетерогенные металлические материалы нового поколения» в сборнике «Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации»;
- «Технологические аспекты применения способа сварки взрывом при изготовлении гетерогенных металлических материалов нового поколения» в сборнике «Достижения науки и технологий-ДНиТ-11-2023. Сборник научных статей по материалам II Всероссийской научной конференции»;
- «Перспективы применения технологии сварки взрывом при производстве гетерогенных материалов нового поколения» в сборнике «Автоматизированное проектирование в машиностроении».

Часть результатов работы была апробирована с докладом на университетской научно-практической конференции «Актуальные проблемы науки и образования», работа «Многослойные металлические материалы полученные сваркой взрывом».

Список литературы

- 1 Крюков, Д.Б. Композиционный материал с эффектом самозатачивания [Текст] /Д.Б. Крюков, А.О. Кривенков, С.Н. Чугунов // Новые материалы и технологии в машиностроении, Брянский гос. ин-техн. ун-т, 2020. – Вып. 32 – С. 38-42.
- 2 Материаловедение [Текст]: учебное пособие. 3-е изд. перераб. И дополн. / Л.А. Мальцева, М.А. Гервасьев. – Екатеринбург: УрФУ, 2012. –344 с.
- 3 Батаев, А.А. Композиционные материалы: строение, получение, применение [Текст]: учебник / А.А. Батаев, В.А. Батаев - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. - 384 с.
- 4 Композиционные материалы с металлической матрицей [Текст] / под ред. К. Крейдер ; пер. с англ. под ред. К.И. Портного. - Москва : Машиностроение, 1978. - 502 с.
- 5 Основы процесса прессования [Электронный ресурс] / Современные способы прессования: [сайт]. URL: https://vuzlit.ru/86449/osnovy_protsessa_pressovaniya_dostoinstva_nedostatki (дата обращения: 14.10.2020).
- 6 Blazynski T.Z. *Explosive welding, forming, and compaction* – Ripple Road, Barking, Essex, England: Applied Science Publishers LTD, 1983. – 402 p
- 7 Сварка взрывом [Текст] / Ю.А. Конон, Л.Б. Первухин, А.Д. Чудновский; Под ред. В.М. Кудинова. – М.: Машиностроение, 1987. – 216 с.
- 8 Петушков В.Г, Применение взрыва в сварочной технике [Текст] / под ред. Б.Е, Патона. - Киев: Наукова думка, 2005. – 754 с.
- 9 Способ комбинированной магнито-импульсной обработки поверхностей инструментов и деталей машин [Текст]: пат. 2339704 Рос. Федерация: МКП C21D1/04, C21D9/22 / Овчаренко А.Г.; заявитель и патентообладатель Бийск, Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «АлтГТУ». – № 2007105490/02; заявл. 13.02.2007; опубл. 27.11.2008; Бюл. № 33.
- 10 Способ закалки деталей из низкоуглеродистой борсодержащей стали [Текст]: пат. 2690386 Рос. Федерация: МПК C21D1/42, C21D9/18, C21D9/24 / Иш-

ков А.В.; заявитель и патентообладатель Барнаул, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ». - № 2018118900; заявл. 22.05.2018; опубл. 03.06.2019; Бюл. № 16.

11 Способ упрочнения режущих деталей машин и инструментов [Текст]: пат. 2131468 Рос. Федерация: МПК *C21D9/18, C23C8/32* / Карпов Л.П.; заявитель и патентообладатель Лесной, Комбинат «Электрохимприбор» - № 97120523/02; заявл. 10.12.1997.

12 Самозатачивающийся режущий инструмент для древесины мягких пород [Текст]: пат. 2515732 Рос. Федерация: МПК *C23C4/12* / Свиридов Л.Т.; заявитель и патентообладатель Воронеж, «Воронежская государственная лесотехническая академия». - № 2010106741/02; заявл. 24.02.2010; опубл. 10.11.2011; Бюл. № 31.

13 Масса для изготовления абразивного инструмента [Текст]: пат. 2435878 Рос. Федерация: МПК *B24D3/26* / Морозова А.Г.; заявитель и патентообладатель Челябинск, Общество с ограниченной ответственностью Торговый дом «Абразивные заводы Урала». - № 2007117075/02; заявл. 07.05.2007; опубл. 10.02.2009; Бюл. № 4.

14 Абразивно-полимерная композиция для шлифовально-полировального инструмента [Текст]: пат. 2140347 Рос. Федерация: МПК *B24D3/22* / Агич А.А.; заявитель и патентообладатель Санкт-Петербург, Открытое акционерное общество «Абразивы и шлифование». - № 98105115/02; заявл. 23.03.1998; опубл. 27.10.1999.

15 Связка для изготовления алмазно-абразивного инструмента [Текст]: пат. 2234408 Рос. Федерация: МПК *B24D3/20, B24D18/00* / Ребрик Ю.Н.; заявитель и патентообладатель Смоленск, Смоленское государственное унитарное предприятие «ПО «Кристалл». - № 2002108211/02; заявл. 01.04.2002; опубл. 20.08.2004; Бюл. № 32.

16 Способ получения износостойких и упругих структур рабочих органов почвообрабатывающих машин [Текст]: пат. 2743682 Рос. Федерация: МПК *B22D27/04* / Володин А.И.; заявитель и патентообладатель Липецк, Общество с

ограниченной ответственностью «АЛИГОН». - № 2019117018; заявл. 01.06.2019; опубл. 24.02.2021; Бюл. № 34..

17 Способ получения крупногабаритных листов композиционного материала сваркой взрывом [Текст]: пат. 2453409 Рос. Федерация: МПК *B23K20/08*, *B32B7/04* / Авенян В.А.; заявитель и патентообладатель Дзержинск, Открытое акционерное Общество «Государственный научно-исследовательский институт машиностроения им. В.В. Бахирева». - № 2010134455/02; заявл. 17.08.2010; опубл. 20.06.2012; Бюл. № 6.

18 Способ получения композиционного материала [Текст]: пат. 2522505 Рос. Федерация: МПК *B32B7/04*, *B32B15/01*, *B23K20/08* / Розен А.Е.; заявитель и патентообладатель Пенза, Общество с ограниченной ответственностью Инженерно-Технологический центр «Сварка». - № 2013119389/02; заявл. 26.04.2013; опубл. 20.07.2014; Бюл. № 20.

19 Способ получения композиционных сверхпроводящих изделий из порошка [Текст]: пат. 2240205 Рос. Федерация: МПК *B22F3/08*, *B23K20/08* / Писарев С.П.; заявитель и патентообладатель Волгоград, Волгоградский государственный технический университет. - № 2003117242/02; заявл. 09.03.2003; опубл. 20.11.2004; Бюл. № 32.

20 Способ получения крупногабаритных листов композиционного материала сваркой взрывом [Текст]: пат. 2010134455 Рос. Федерация: МПК *B23K20/08* / Авенян Владимир Амбарцумович.; заявитель и патентообладатель Дзержинск, Открытое акционерное общество «Государственный научно-исследовательский институт машиностроения им. В.В. Бахирева». - № 2010134455/02; заявл. 17.08.2010; опубл. 27.02.2012; Бюл. № 6.

21 Слоистый композиционный материал [Текст]: пат. 167018 Рос. Федерация: МПК *B22F7/04*, *B32B15/00* / Огнева Т.С.; заявитель и патентообладатель Новосибирск, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет». - № 2016137956/05; заявл. 23.09.2016; опубл. 20.12.2016; Бюл. № 35.

22 Способ получения слоистых композиционных материалов сталь – алюминий [Текст]: пат. 2435671 Рос. Федерация: МПК В32В15/01, В32В15/18, В32В15/20 / Кофтунов А.И.; заявитель и патентообладатель Тольятти, Общество с ограниченной ответственностью «Слоистый композит». - № 2010121037/05; заявл. 24.05.2010; опубл. 10.12.2011; Бюл. № 34.

23 Многослойный композиционный материал и способ его изготовления [Текст]: пат. 2030293 Рос. Федерация: МПК В32В15/01, В22F7/04 / Моргунов С.В.; заявитель и патентообладатель, Научно-производственное объединение «Композит». - № 4871501/02; заявл. 05.07.1990; опубл. 10.03.1995.

24 Способ получения микроструктурных многослойных композиционных материалов из разнородных металлов или сплавов [Текст]: пат. 2572955 Рос. Федерация: МПК В32В15/01, В23К20/04 / Галкин В.И.; заявитель и патентообладатель Москва, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «МАТИ» – Российский государственный технологический университет имени К.Э. Циолковского. - № 2014119538/02; заявл. 15.05.2014; опубл. 20.01.2016; Бюл. № 32.

25 Сварка взрывом [Электронный ресурс] / Сварка металлов: [сайт]. URL: <https://svarkaed.ru/svarka/vidy-i-sposoby-svarki/svarka-vzryvom.html> (дата обращения: 21.10.20).

26 Недостатки сварки взрывом [Электронный ресурс] / Е.А. Банников// Сварка: [сайт]. URL: <https://info.wikireading.ru/84264> (дата обращения: 21.10.20).

27 Легированные нержавеющие стали и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки [Текст]: ГОСТ Р 5632-14. - Введ. 01-01-2015. - М.: Стандартиформ, 2015. - 52 с.

28 Сталь 20Х13 и её особенности, характеристики и использование [Электронный ресурс] / Сталь: [сайт]. URL: <https://prompriem.ru/stal/20x13.html> (дата обращения 25.10.2020).

29 Определение микротвердости металлов [Электронный ресурс] / [сайт]. URL: <https://lektsii.org/8-65656.html> (дата обращения: 25.03.2021).

30 Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников [Текст]: ГОСТ Р 9450-76. - Введ. 01-01-1977. - М.: Издательство стандартов, 1993. - 33 с.: ил

31 Микротвердость [Электронный ресурс] / [сайт]. URL: <http://www.modificator.ru/terms/microhardness.html> (дата обращения: 25.03.2021).

32 Панченко, Е.В. Лаборатория металлографии [Текст]: 2-е издание, перераб и доп. / Е.В. Панченко, Ю.А. Скаков, Б.И. Криммер: М: «Металлургия», Москва, 1965. - 440 с.

33 Бернштейн, М.Л. Металловедение и термическая обработка стали [Текст]: справ. изд. - 3-е изд., перераб. и доп. в 3-х т. I. Методы испытаний и исследований / под ред. М.Л. Бернштейна, А.Г. Рахштадта М.: «Металлургия», 1983. - 352 с.

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

35 Микротвердомер ПМТ-3 [Электронный ресурс] / [сайт]. URL: <https://asma.com.ua/files/208/1511702478pmt-3-to.pdf> (дата обращения: 25.03.2021).

36 Маятниковые коперы ИО 5003-0,3-10; ИО 5003-0,3-11 [Электронный ресурс] / [сайт]. URL: <https://tochpribor-nw.ru/production/copra/mayatnikovye/io5003/> (дата обращения: 25.03.2021).

37 Основы термической обработки: учебное пособие / Смирнов М.А., Счастливцев В.М., Журавлев Л.Г. - Екатеринбург: УрО РАН, 1999г. – 496 с.

38 Соединения сварные. Методы определения механических свойств макроструктуры и микроструктуры [Текст]: ГОСТ Р 57180-2016. - Введ. 01-06-2017. - М.: Стандартинформ, 2017. - 20 с.: ил

39 Композиционный материал с эффектом самозатачивания, полученный сваркой взрывом / Д.Б. Крюков, А.О. Кривенков, С.Н. Чугунов, Д.В. Межевова. - Издательство ВолгГТУ, г. Волгоград, 2020. – 92 с.

«ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ФАКУЛЬТЕТ ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ И ТРАНСПОРТА
КАФЕДРА «СВАРОЧНОЕ, ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ»

Магистерская диссертация на тему:

«Исследование зависимости структуры и свойств
гетерогенных металлических материалов от
параметров термической обработки»

Направление подготовки – 22.04.01 – Материаловедение и технологии материалов

Выполнил: ст.гр. 23МТм1

Чугунов С.Н.

Руководитель: к.т.н., доцент

Кривенков А.О.

Актуальность работы

- Основными особенностями условий лезвийной обработки при резании, рубке, особенно в тяжелых условиях работы инструмента являются значительные контактные напряжения, возникновение чрезмерных температурных градиентов, вызывающих термические напряжения в поверхностном слое инструмента, его окисление, структурные превращения.
- Материалы для исследования получены при поддержке «Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» (Проект № 3254ГС2/39147 в рамках реализации инновационного проекта «Композитный режущий инструмент»).

Цель и задачи магистерской диссертации

Цель работы: исследование влияния режимов термической обработки на структуру и механические свойства композиционных материалов системы 20Х13 – 40Х13 – 65Х13 – 40Х13 – 20Х13, полученных сваркой взрывом.

Задачи:

- провести анализ получения композиционных металлических слоистых материалов; обосновать выбор способа сварки взрывом;
- провести патентное исследование;
- обосновать выбор исходных материалов для получения композиционного материала и методов исследования механических свойств;
- получить образцы композиционных материалов сваркой взрывом;
- обосновать выбор режимов термической обработки;
- провести анализ полученных результатов.

Получение композиционных материалов

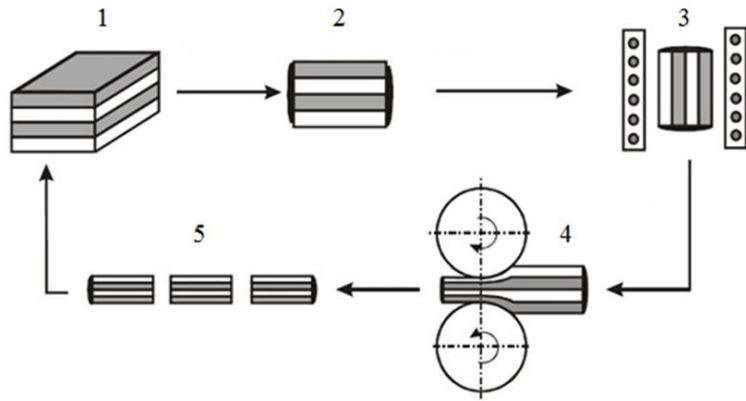


Рисунок 1 – Схема получения слоистых металлических композиционных материалов методом *пакетной прокатки*:

- 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

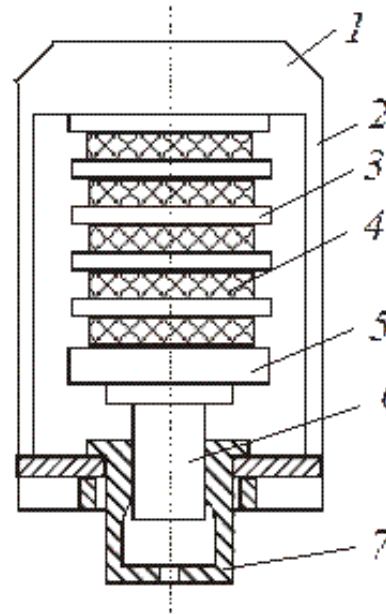


Рисунок 2 – Этажный пресс для *прессования* слоистых материалов:
1 – станина,
2 – стойка станины,
3 – обогревающие плиты,
4 – прессуемый пакет,
5 – подвижный стол,
6 – плунжер,
7 – рабочий гидроцилиндр.

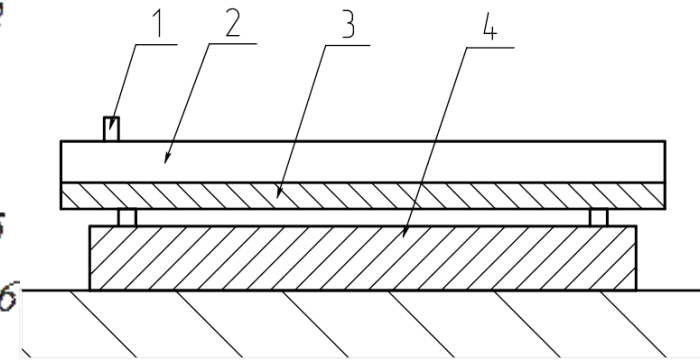


Рисунок 3 – Схема параллельной *сварки взрывом*:

- 1 – детонатор,
- 2 – взрывчатое вещество,
- 3 – метаемая пластина,
- 4 – неподвижная пластина.

Обоснование выбора материалов

Таблица 2 –Химический состав сталей

Химический элемент Содержание в марке, %	C	Si	Mn	S	P	Cr	Fe
20X13	0,16...0,25	Не более 0,8	Не более 0,8	Не более 0,025	Не более 0,025	12,0...14	Осн.
40X13	0,36...0,55	Не более 0,8	Не более 0,8	Не более 0,025	Не более 0,025	12,0...14	Осн.
65X13	0,6...0,7	Не более 0,8	Не более 0,8	Не более 0,025	Не более 0,025	12,0...14	Осн.

Таблица 3 –Механические свойства сталей

Характеристика Марка материала	ГОСТ	Предел прочности σ_B , МПа	Относительное удлинение δ_5 , %	Твердость
20X13	5949-75	650	16	58HRC
40X13	5582-75	550	15	-
65X13	ТУ14-1-3918-85	<785	<18	<97HRB

Обоснование выбора методов исследования

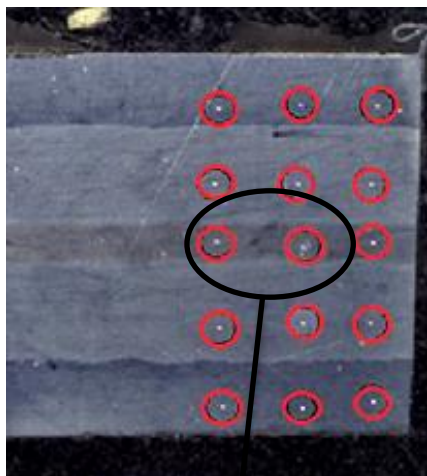
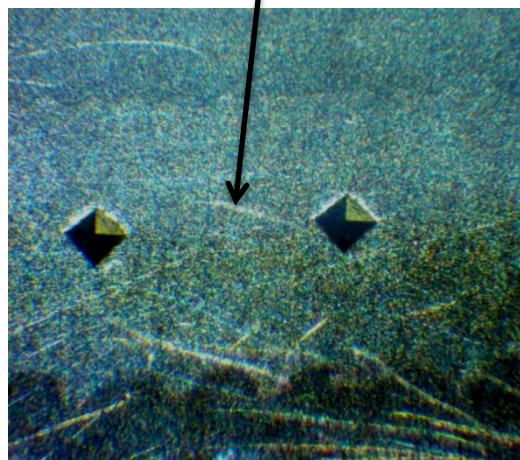


Рисунок 4, 5 – Схема замера твердости

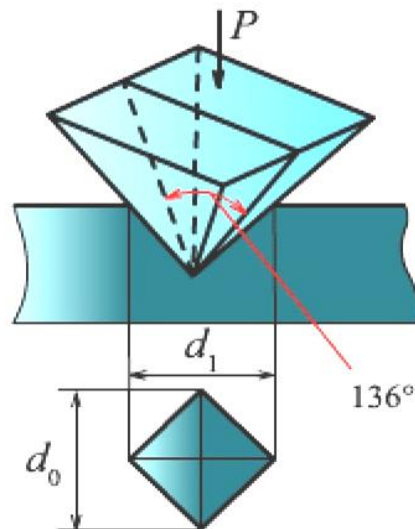


Рисунок 6 – Измерение микротвердости:
 P – нагрузка;
 d_0 – диаметр отпечатка 1;
 d_1 – диаметр отпечатка 2



Рисунок 7 –
Микротвердомер
ПМТ-3

Обоснование выбора методов исследования

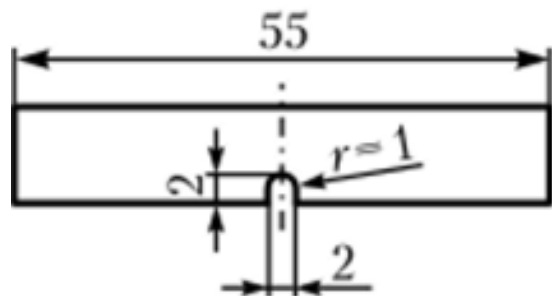
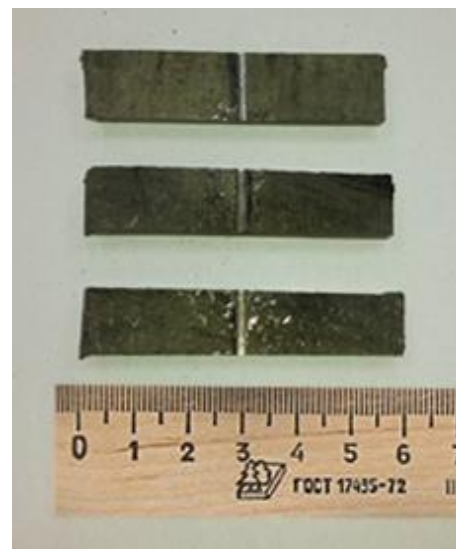


Рисунок 8 – Эскиз образца с концентратором типа *U*



Рисунок 9 – Маятниковый копер ИО-5003-0,3-11



а



б

Рисунок 10 – Образцы для испытания на ударную вязкость:

а – вид сверху, б – вид с торца

Получение композита

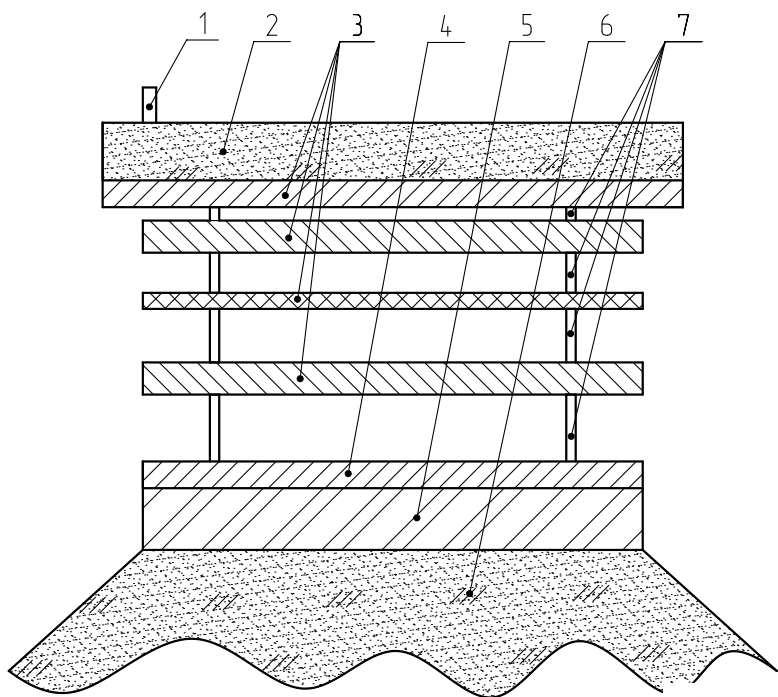


Рисунок 11 – Схема сварки взрывом: 1 – детонатор, 2 – взрывчатое вещество, 3 – метаемые пластины, 4 – неподвижная пластина, 5 – подложка, 6 – песчаное основание, 7 – технологические опоры

Таблица 4 – Параметры сварки взрывом

Характеристики взрывчатого вещества	$D_{вв}$, м/с	2700
	$H_{вв}$, мм	80
	$\rho_{вв}$, г/см ³	0,75
Величина зазора между пластинами, мм	1-2	1
	2-3	3
	3-4	4
	4-5	5



Рисунок 12 – Заготовка после сварки взрывом (лицевая и оборотная стороны)

Термическая обработка

Таблица 5 – Режимы термической обработки

Вид ТО	Отжиг	Закалка + низкий отпуск	Закалка + средний отпуск	Закалка + высокий отпуск
Т нагрева, °С	840...860	1040...1060	1040...1060	1040...1060
Среда охлаждения	Печь	Масло	Масло	Масло
Т отпуска, °С	-	200...250	350...500	500...650
Выдержка, ч	2...3	2	2	2
Среда охлаждения	-	Масло	Масло	Масло

Результаты исследования микротвердости

Параметр	Микротвердость <i>HV</i>				
Слой \ Состояние образца	1	2	3	4	5
После сварки взрывом	268	265	266	287	284
После отжига	187	190	176	169	180
После закалки и низкого отпуска	465	539	663	539	464
После закалки и среднего отпуска	421	517	631	518	422
После закалки и высокого отпуска	437	528	644	527	438

Таблица 6 – Результаты определения микротвердости

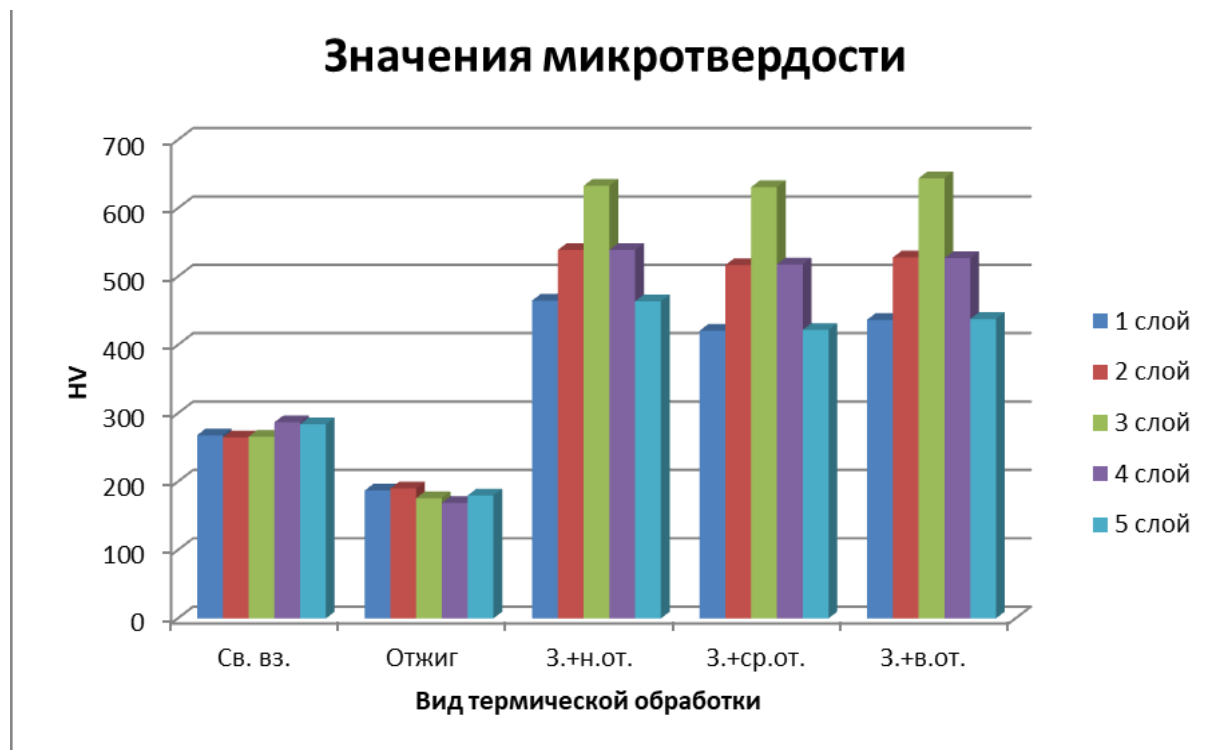


Рисунок 13 – Результаты определения микротвердости

Результаты исследования микротвердости

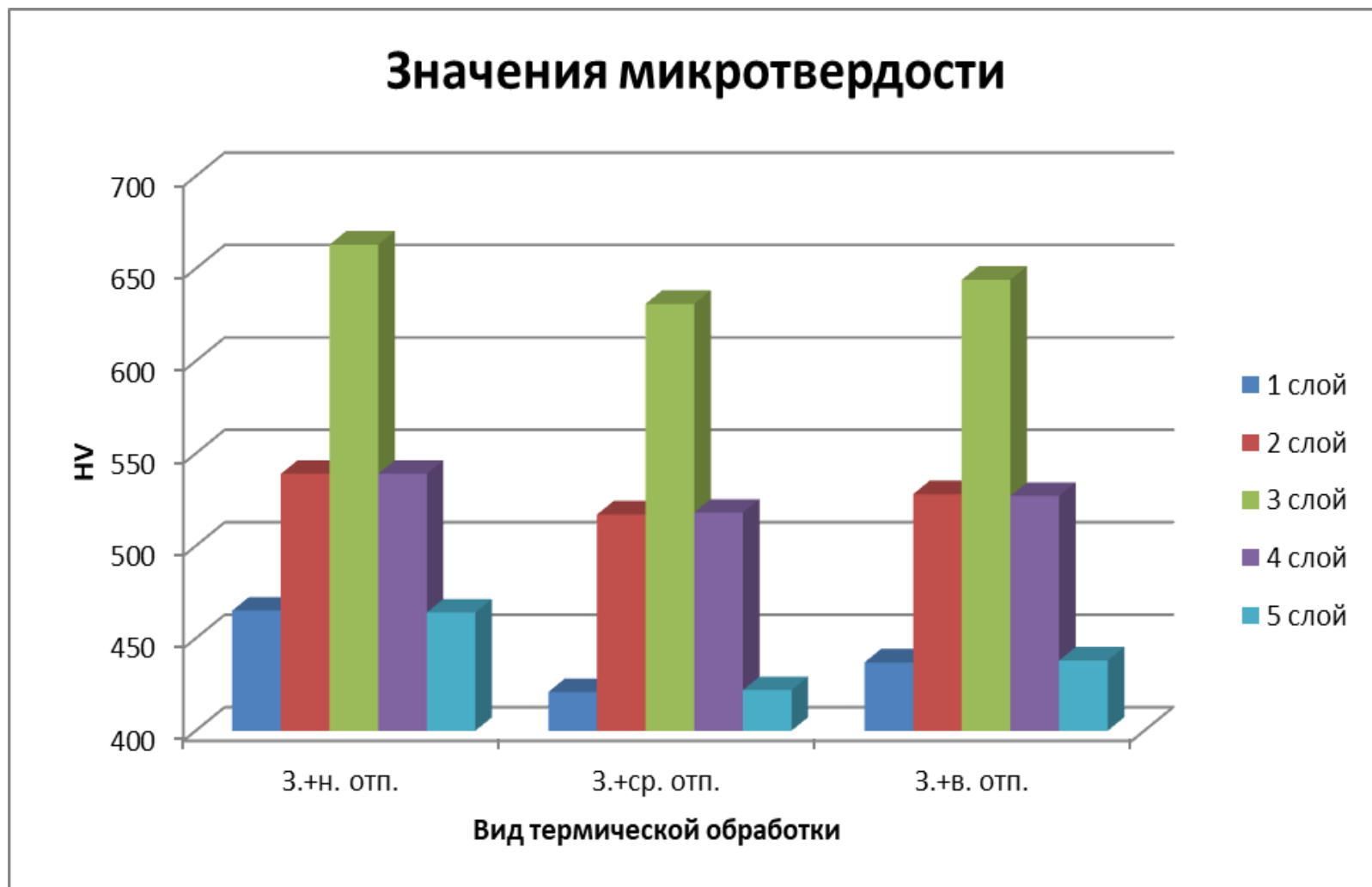


Рисунок 14 – Значения микротвердости после термической обработки

Результаты исследования микротвердости

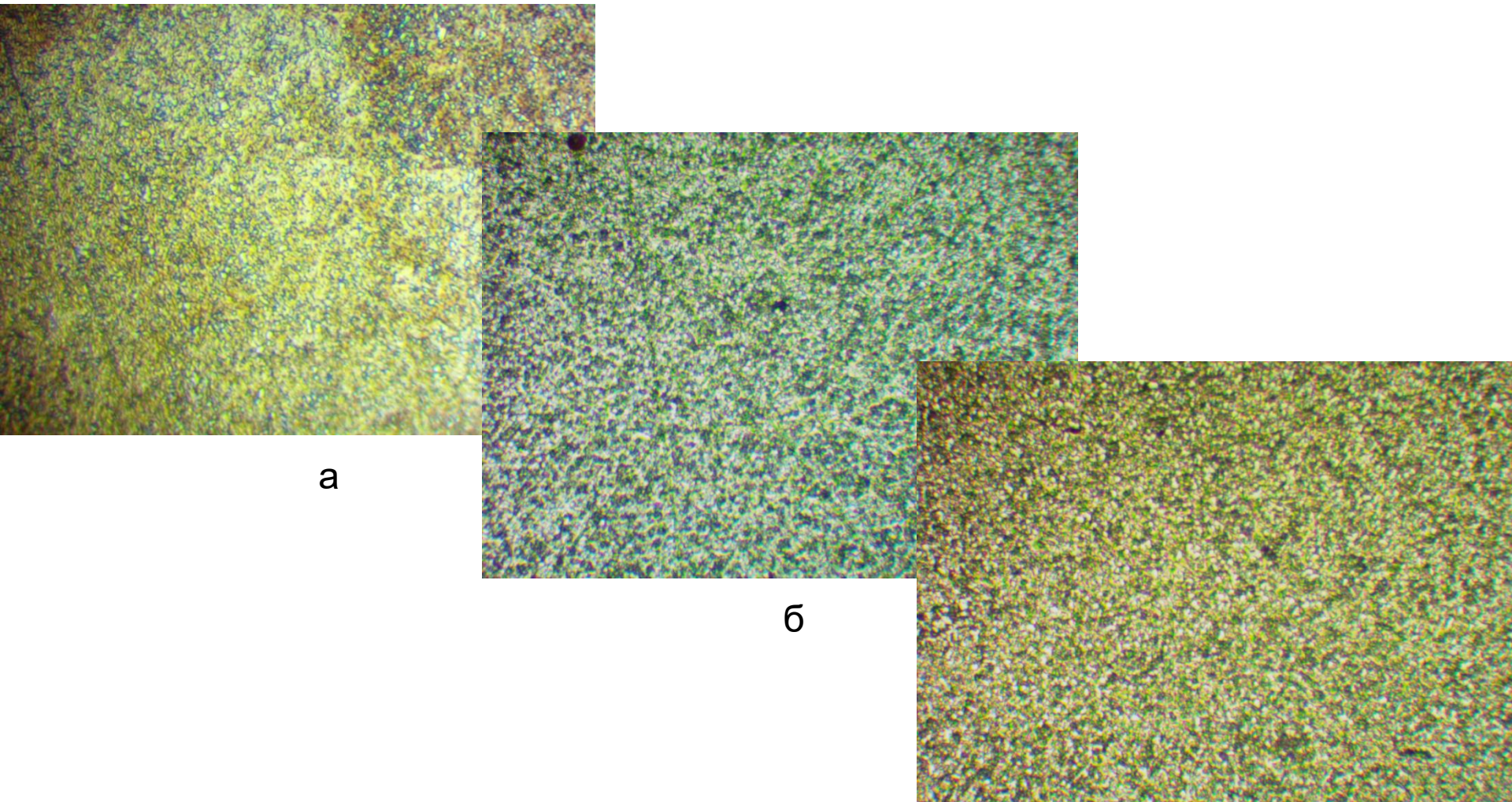


Рисунок 15 – Микроструктура стали 65X13(режущий слой):

- а – после закалки и низкого отпуска ($\times 1000$),
б – после закалки и среднего отпуска ($\times 1000$),
в – после закалки и высокого отпуска ($\times 1000$).

В

Результаты исследования ударной вязкости

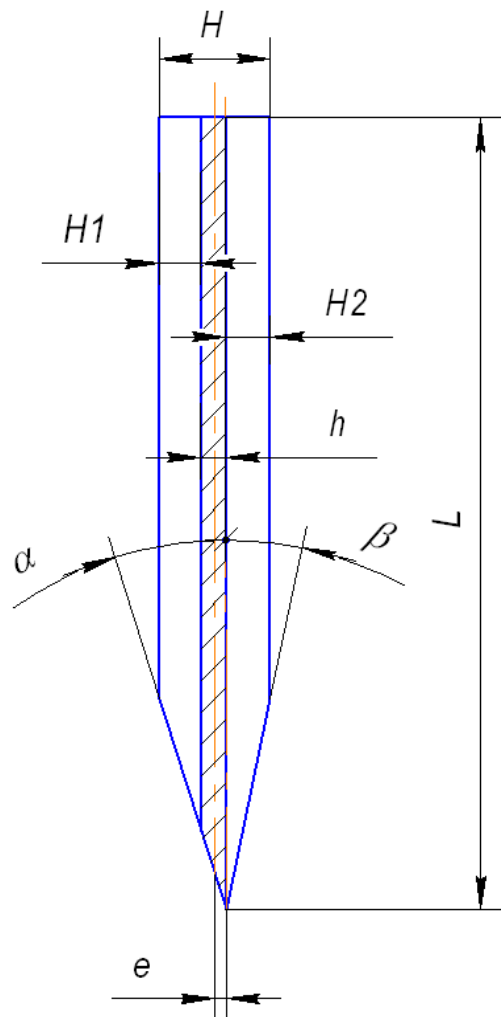
Вид термической обработки	Значение ударной вязкости КСУ, Дж/кв.см
После сварки взрывом	23,4
После отжига	79,6
После закалки и низкого отпуска	9,2
После закалки и среднего отпуска	11,0
После закалки и высокого отпуска	9,1

Таблица 7 –
Результаты
испытания на
ударный изгиб

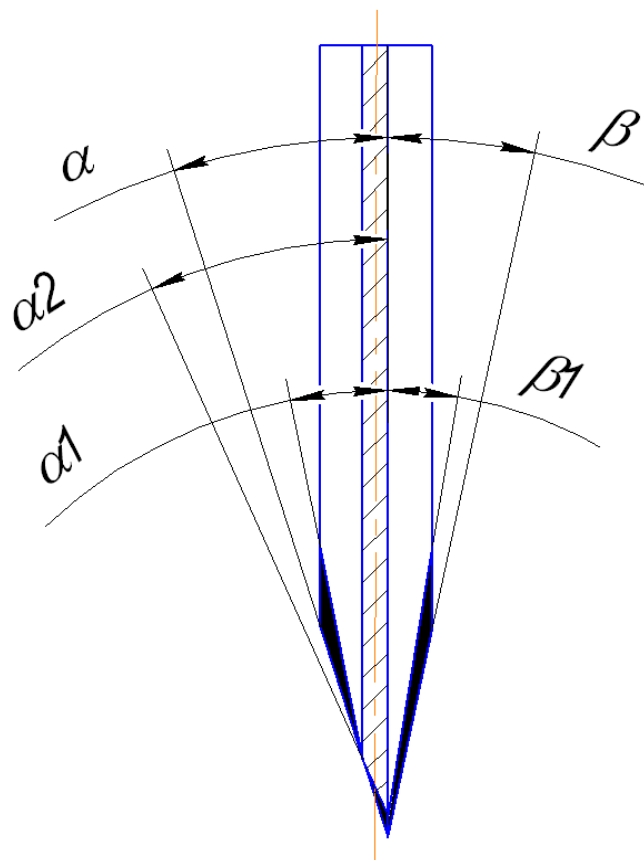


Рисунок 16 –
Результаты
испытания на
ударный изгиб

Поперечное сечение инструмента



Инструмент до износа



Инструмент после износа

Рисунок 17 – Предложенная схема асимметричной заточки

Публикации по теме магистерской диссертации

- По результатам выполнения магистерской диссертации были опубликованы статьи входящие в РИНЦ:
- - «Практика выбора режимов термической обработки для упрочнения жаропрочной хромистой стали 20Х13» в сборнике «Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации»;
- - «Гетерогенные металлические материалы нового поколения» в сборнике «Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации»;
- - «Технологические аспекты применения способа сварки взрывом при изготовлении гетерогенных металлических материалов нового поколения» в сборнике «Достижения науки и технологий-ДНиТ-11-2023. Сборник научных статей по материалам II Всероссийской научной конференции»;
- - «Перспективы применения технологии сварки взрывом при производстве гетерогенных материалов нового поколения» в сборнике «Автоматизированное проектирование в машиностроении».
- Часть результатов работы была апробирована с докладом на университетской научно-практической конференции «Актуальные проблемы науки и образования», работа «Многослойные металлические материалы полученные сваркой взрывом».

Выводы по работе

- Приведен обзор методов получения слоистых металлических композиционных материалов. Проведен обзор метода получения композиционных материалов сваркой взрывом.
- Выполнен патентный поиск
- Для исследований были выбраны такие стали как, 20X13, 40X13 и 65X13 и получена пятислойный гетерогенный металлический материал.
- При режиме термической обработки закалке и высоком отпуске происходит явление вторичной твердости и отпускной хрупкости, что недопустимо для сталей, у которых главным требованием является высокая твердость.
- Таким образом, рациональным режимом термической обработки для ножей бытового назначения, где важны высокие показатели твердости и износостойкости композита является закалка и низкий отпуск.
- Для ножей и режущего инструмента промышленного назначения, где важно сочетание высокой твердости, коррозионной стойкости достаточных показателей пластичности и вязкости композита рациональным режимом термической обработки является закалка и средний отпуск.

Спасибо за внимание!

Чугунов Сергей Николаевич

**Исследование зависимости структуры и свойств гетерогенных
металлических материалов от параметров термической обработки**

Направление 22.04.01 – «Материаловедение и технологии материалов»

Профиль – «Материаловедение и технологии новых материалов»

**Автореферат
диссертации на соискание степени
магистра**

Пенза 2025

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Пензенский государственный университет» на кафедре «Сварочное, литейное производство и материаловедение».

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет», доцент кафедры «СЛПиМ»,
г. Пенза

Кривенков Алексей Олегович

Рецензент: кандидат технических наук, инженер-технолог
АО ФНПЦ «ПО «Старт» им. М. В. Проценко»,
г. Заречный

Чижова Евгения Владимировна

Защита диссертации состоится 25 июня 2025 года на заседании Государственной аттестационной комиссии кафедры «СЛПиМ» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет».

Секретарь ГАК

Гуськов М.С.

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Основными особенностями условий лезвийной обработки при резании, рубке, особенно в тяжелых условиях работы инструмента (обработка металлов, почвы, твердых пород и т.д.) являются значительные контактные напряжения, высокая температура поверхности инструмента за счет перемещения и деформирования обрабатываемого материала, возникновение чрезмерных температурных градиентов, вызывающих термические напряжения в поверхностном слое инструмента, его окисление, структурные превращения.

В этой связи, для эффективной работы режущего инструмента, повышения его надежности и срока службы необходимым условием является обеспечение достаточной остаточной прочности и износостойкости. Помимо этого, актуальной задачей является увеличение его срока работы от момента заточки до потери режущих свойств.

В настоящее время предложено достаточное количество способов увеличения ресурса режущего инструмента, таких как ультразвуковая поверхностная обработка, химико-термическая обработка, алмазное выглаживание, нанесение износостойких покрытий и их наплавка и т.д. При этом, следует учитывать, что все выше перечисленные методы требуют использования дорогостоящего технологического оборудования и не избавляют, в конечном счете, от необходимости периодической правки в процессе эксплуатации.

Возможным решением данной проблемы может явиться применение многослойных материалов с эффектом самозатачивания. Этого возможно достичь получением многослойного металлического слоистого композиционного материала. Эффект самозатачивания обеспечивается за счет более интенсивного износа поверхностных слоев, что дает возможность сохранять постоянным заданный изначально угол заточки инструмента на протяжении всего цикла эксплуатации.

Объект исследования: композиционный материал системы 20Х13 – 40Х13 – 65Х13 – 40Х13 – 20Х13.

Предмет исследования: механические свойства (микротвердость, ударная вязкость).

Целью исследования является исследование влияния режимов термической обработки на структуру и механические свойства гетерогенных металлических материалов системы 20Х13 – 40Х13 – 65Х13 – 40Х13 – 20Х13, полученных сваркой взрывом.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи:**

- а) провести анализ получения композиционных металлических слоистых материалов; обосновать выбор способа сварки взрывом;
- б) провести патентное исследование;
- в) обосновать выбор исходных материалов для получения композиционного материала и методов исследования механических свойств;
- г) получить образцы композиционных материалов сваркой взрывом;
- д) обосновать выбор режимов термической обработки;
- е) провести анализ полученных результатов.

Методы исследования. В работе для получения композиционных материалов использовался метод сварки взрывом. Результаты работы получены методом теоретических и экспериментальных исследований, с применением методики микроструктурного анализа, метода определения микротвердости и испытания на ударный изгиб.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- а) предложен способ получения композиционных материалов, обладающих эффектом самозатачивания;
- б) предложена пятислойная композиционная система 20Х13 – 40Х13 – 65Х13 – 40Х13 – 20Х13, получаемая сваркой взрывом;
- в) исследованы микротвердость и ударная вязкость композиционных материалов, полученных методом сварки взрывом.

Практическая значимость работы: получен пятислойный композиционный материал системы 20X13 – 40X13 – 65X13 – 40X13 – 20X13 с градиентными свойствами по сечению.

Положения, выносимые на защиту:

- а) теоретические исследования методов получения слоистых композиционных материалов;
- б) обоснование выбора материалов для получения композиционного материала и методов исследования механических свойств;
- в) результаты экспериментальных исследований микротвердости и ударной вязкости.

Структура и объём работы. Работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы. Работа изложена на 64 страницах машинописного текста, содержит 29 рисунков и 12 таблиц. Список использованной литературы включает 39 наименований.

Область применения: работа выполнена при поддержке «Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» (Проект № 3254ГС2/39147 от в рамках реализации инновационного проекта «Композитный режущий инструмент»).

Содержание диссертации

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цели и задачи, определены предмет и объект исследования.

В первой главе рассмотрены твердофазные методы получения композиционных материалов, такие как метод пакетной прокатки, метод прессования, метод сварки взрывом.

Метод пакетной прокатки заключается в следующем, листовые заготовки собирают в пакет, нагревают и подвергают прокатке в горячем состоянии. Недостатком данного метода 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.

При выполнении метода прессования происходит соединение отдельных элементов заготовок в компактный материал, то есть формирование изделий. В большинстве случаев прессование заготовок композиционных материалов ведется в замкнутом объеме – в пресс-формах, состоящих из матрицы и двух пуансонов. Недостатками является: значительно большая величина потерь на отходах металла, большая неравномерность механических свойств по длине и поперечному сечению заготовки, небольшая производительность процесса.

Сварка взрывом – это процесс твердофазной сварки, в котором детонация бризантных взрывчатых веществ используется для сближения сварных поверхностей при высокоскоростном косом соударении, которое создает сильный, но локализованный пластический поток на взаимодействующих поверхностях.

На рисунке 1 показана принципиальная схема сварки взрывом. Неподвижную пластину 4 и μεταаемую пластину 3 располагают на заданном расстоянии от вершины угла. На μεταаемую пластину укладывают заряд 2 взрывчатого вещества. В вершине угла устанавливают детонатор 1. Сварка

производится на опоре (металлическая плита, бетон, песок и т.д.) При инициировании по заряду взрывчатого вещества распространяется фронт детонации со скоростью D до нескольких тысяч метров в секунду. Под действием высокого давления расширяющихся продуктов взрыва метаемая пластина приобретает скорость v_0 порядка нескольких сотен метров в секунду и соударяется с неподвижной пластиной под определенным углом γ . Вследствие высоких скорости соударения и давления в зоне контакта происходит очистка поверхностей, их активация и образования соединения. Соединение обычно имеет характерную волнообразную форму, однако встречаются соединения и без волнообразования.

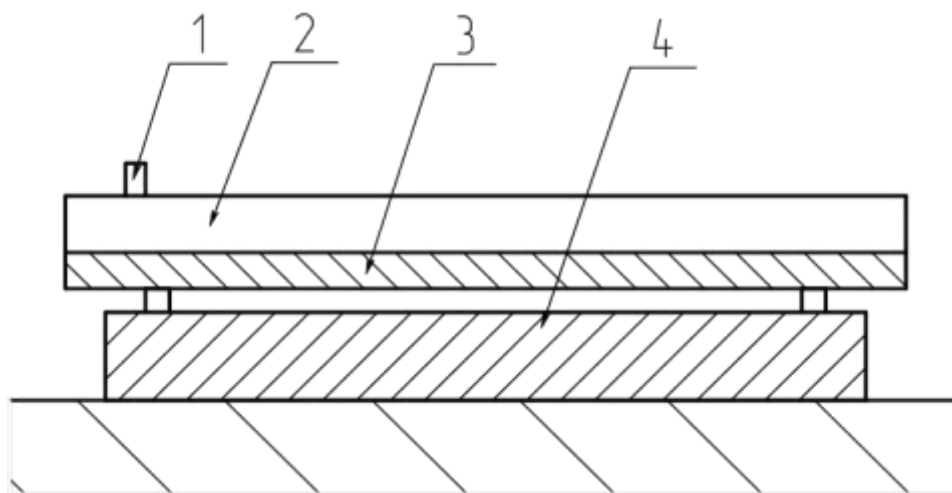


Рисунок 1 – Схема параллельной сварки взрывом: 1 – детонатор, 2 – взрывчатое вещество, 3 – метаемая пластина, 4 – неподвижная пластина

На основе проведенного анализа для получения композиционных материалов выбран метод сварки взрывом. Главное преимущество сварки взрывом по сравнению с другими методами сварки заключается в том, что она не страдает от ограничений, налагаемых на другие сварочные процессы их специфическими характеристиками. Например, при сварке плавлением необходимо плавление двух свариваемых металлов на границе раздела, а при сварке давлением требуется большая пластическая деформация. Поэтому оба процесса ограничены металлами, которые имеют сопоставимые температуры плавления и пластические напряжения течения соответственно. Практические

проблемы возникают также в случае металлов и сплавов с высокой температурой плавления (например, вольфрама) или с высокой механической прочностью. Ни плавление, ни чрезмерное пластическое течение не являются существенными проблемами для успеха сварки взрывом, хотя они могут наблюдаться при определенных условиях, и поэтому никакие серьезные ограничения не налагаются большими различиями в свойствах металла, отвечающего требованиям. Использование взрывчатых веществ, тем не менее, накладывает ограничение с точки зрения правил безопасности. Помимо того, сварка взрывом обладает такими преимуществами как: Сварка взрывом обладает такими достоинствами как: прочность сцепления при сварке взрывом не меньше наименее прочного компонента; широкая номенклатура малоуглеродистых, высоколегированных сталей и цветных сплавов (сталь и титан, сталь и медь, сталь и латунь); процесс сварки взрывом производят без использования сложного оборудования; высокая скорость (несколько микросекунд) соединения; изготовление заготовок для штамповки и ковки; возможность изготовления прямолинейных и криволинейных заготовок площадью от нескольких квадратных сантиметров до десятков квадратных метров.

Во второй главе описывается обоснование выбора материалов и методов исследования.

Для получения материала с эффектом самозатачивающего, необходимо получить композиционный материал, состоящий из пяти слоев. Основными требованиями, предъявляемыми к свойствам таких материалов, являются твердость, износостойкость и коррозионная стойкость. Внутренний слой композита должен быть изготовлен из стали, которая имеет более высокие значения твердости, по сравнению с внешними слоями. Внутренний слой обеспечивает режущие характеристики композиционного материала на протяжении всего цикла эксплуатации инструмента. Величина твердости внешних слоев композита должна быть в диапазоне от 1,2 до 2,6 раз ниже

твердости внутреннего режущего слоя в зависимости от условий работы инструмента.

Для получения требуемых свойств были выбраны стали с различным содержанием углерода: 20X13, 40X13 и 65X13. Была получена система 20X13–40X13–65X13–40X13–20X13.

Для определения твердости в слоях композиционного материала используется метод определения микротвердости. Определение микротвердости – это один из статических методов определения твердости путем вдавливания.

Так как режущий инструмент подвергается динамическим нагрузкам, абразивному износу, надежность инструмента зависит от сопротивления материала ударным нагрузкам. Для определения сопротивления материала к динамическим, ударным нагрузкам необходимо проводить испытание на ударную вязкость.

Метод испытания на ударный изгиб проводится в соответствие с ГОСТ 9454–78 и он основан на разрушении образца с концентратором посередине одним ударом маятникового копра, концы образца располагаются в опорах. В результате испытания определяют полную работу, затраченную при ударе, или ударную вязкость.

В третьей главе приводится схема получения образцов композиционного материала, которая показана на рисунке 2 и режимы сварки взрывом, которые представлены в таблице 1.

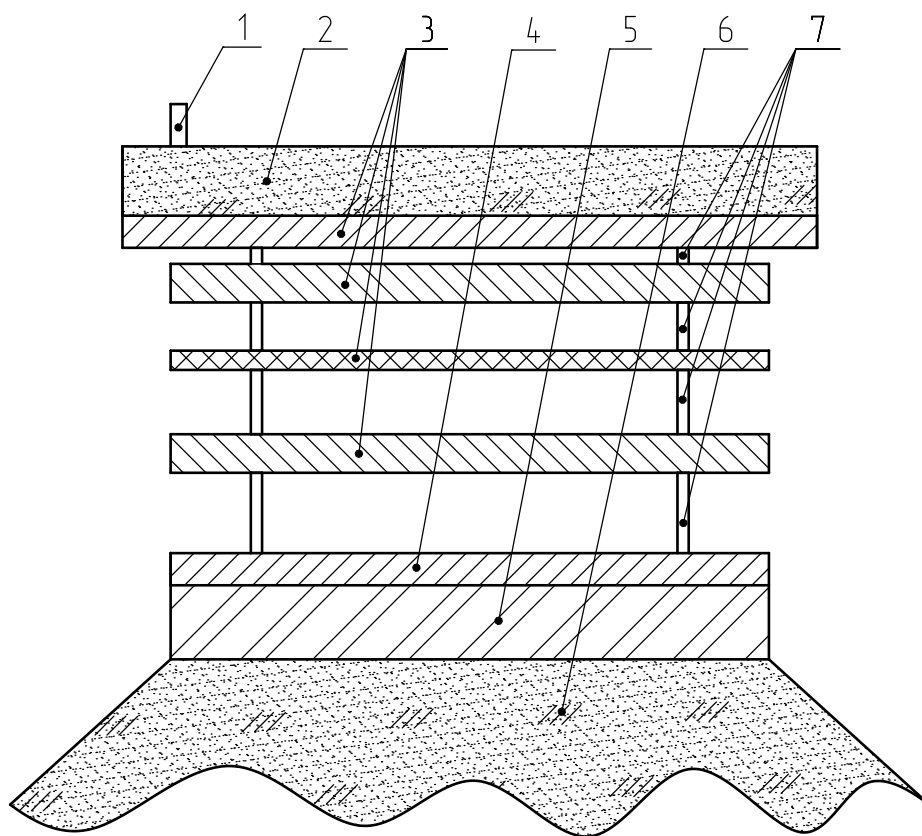


Рисунок 2 – Схема сварки взрывом: 1 – детонатор, 2 – взрывчатое вещество, 3 – метаемые пластины, 4 – неподвижная пластина, 5 – подложка, 6 – песчаное основание, 7 – технологические опоры

Таблица 1 – Исходные параметры сварки взрывом

Характеристики взрывчатого вещества	$D_{\text{ВВ}}$, м/с	2700
	$H_{\text{ВВ}}$, мм	80
	$\rho_{\text{ВВ}}$, г/см ³	0,75
Величина зазора между пластинами, мм	1-2	1
	2-3	3
	3-4	4
	4-5	5

Обоснован выбор термической обработки. Режим термической обработки для получения требуемых свойств композиционного материала представляет

собой закалку и отпуск. С целью исследования влияния режима отпуска на свойства композиционных материалов, полученных сваркой взрывом, режимы термической обработки были следующие:

– закалка до температур от 1040 до 1060 °С с последующим охлаждением в масле и низкий отпуск, заключающийся в нагреве до температуры от 200 до 250 °С, выдержке в печи в течении 2-х часов с последующим охлаждением в масле;

– закалка до температур от 1040 до 1060 °С с последующим охлаждением в масле и средний отпуск, заключающийся в нагреве до температуры от 350 до 500 °С, выдержке в печи в течении 2-х часов с последующим охлаждением в масле;

– закалку до температуры от 1040 до 1060 °С с последующим охлаждением в масле и высокий отпуск, заключающийся в нагреве до температуры от 500 до 650 °С, выдержке в печи в течении 2-х часов с последующим охлаждением в масле.

В четвертой главе описываются результаты исследований микротвердости и ударной вязкости.

Результаты исследования микротвердости представлены в таблице 2 и на рисунке 3.

Таблица 2 – Результаты исследования микротвердости

Параметр	Микротвердость <i>HV</i>				
Слой	1	2	3	4	5
Состояние образца					
После сварки взрывом	268	265	266	287	284
После отжига	187	190	176	169	180
После закалки и низкого отпуска	465	539	663	539	464
После закалки и среднего отпуска	421	517	631	518	422
После закалки и высокого отпуска	437	528	644	527	438

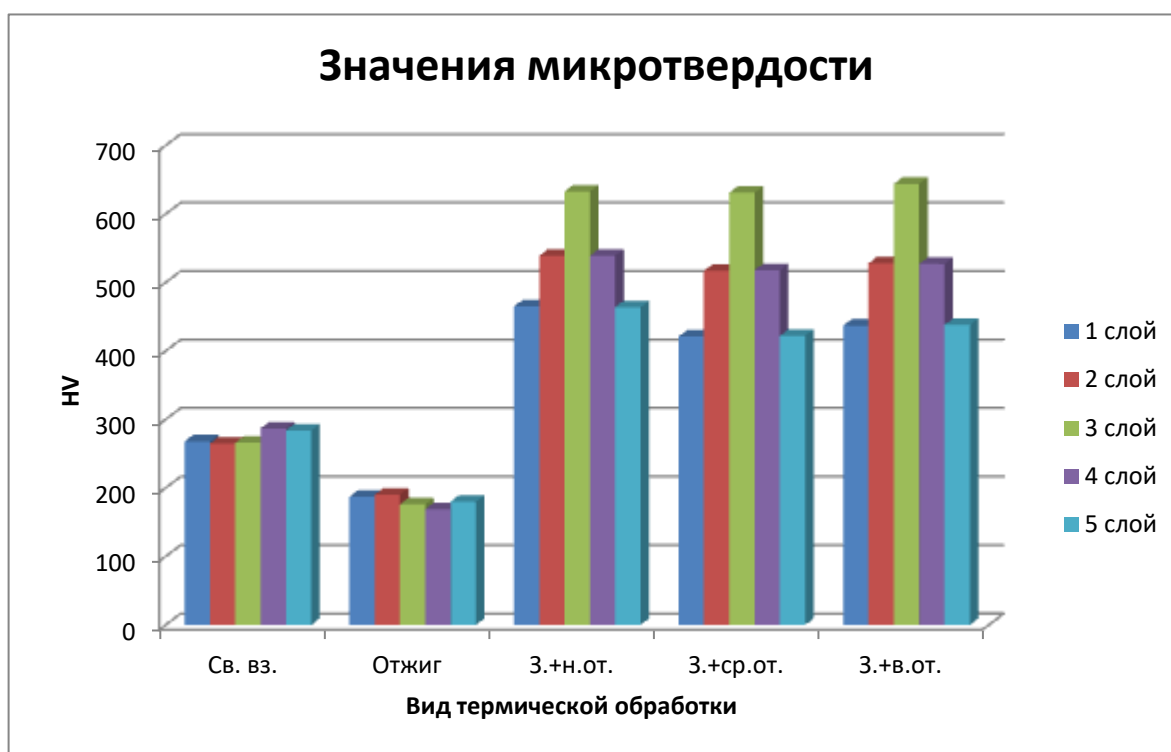


Рисунок 3 – Значения микротвердости

После сварки взрывом микротвердость слоев незначительно увеличивается к нижнему слою. Вследствие отжига твердость композиционного материала снижается примерно на 100 единиц. Для получения требуемых свойств (повышенной твердости) проводится закалка с последующим отпуском. Для определения оптимального режима термической обработки (наилучших механических свойств) проводится 3 режима закалки и отпуска. Значения микротвердости после закалки и отпуска представлены на рисунке 24.

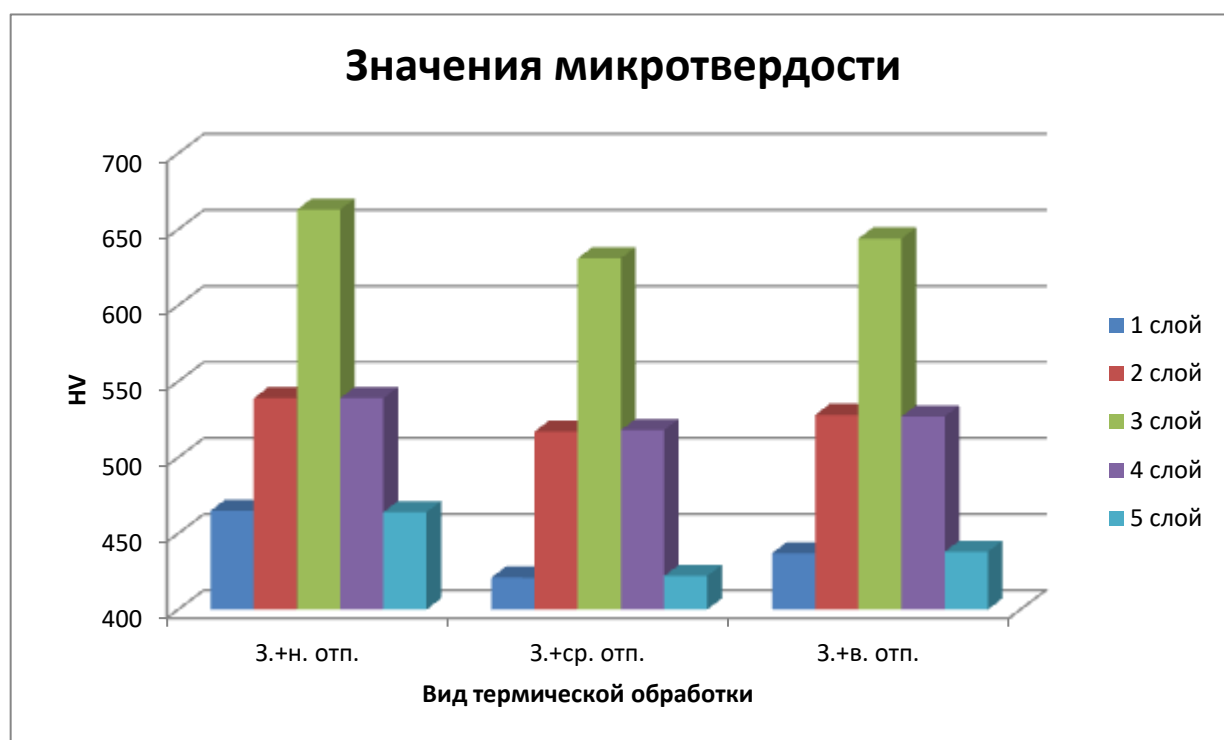


Рисунок 4 – Значения микротвердости после закалки и отпуска

Максимальные значения микротвердости наблюдаются у композиционного материала после закалки и низкого отпуска. Минимальные значения наблюдаются у композиционного материала после закалки и среднего отпуска. При значительном легировании стали карбидообразующими элементами (Cr, W, Mo, V) возможно образование специальных карбидов, которые значительно дисперснее цементита, поэтому выделение их является главной причиной образования вторичной твердости при высоком отпуске, что подтверждается исследованием микроструктуры, изображение которой представлены на рисунке 5.

В данном случае увеличение микротвердости композиционного материала с температурой отпуска до 650 °С сопровождается выделением карбидов, что объясняется явлением вторичной твердостью. Но наряду с увеличением твердости происходит уменьшение ударной вязкости, что показано в таблице 10, что приводит к охрупчиванию металла.

Результаты исследования ударной вязкости представлены в таблице 3 и на рисунке 6.



×1000

а

б

в

Рисунок 5 – Микроструктура стали 65X13(режущий слой): а – после закалки и низкого отпуска, б – после закалки и среднего отпуска, в – после закалки и высокого отпуска

Таблица 3 – Результаты исследования ударной вязкости

Вид термической обработки	Значение ударной вязкости KCU , Дж/см ²
После сварки взрывом	23,4
После отжига	79,6
После закалки и низкого отпуска	9,2
После закалки и среднего отпуска	11
После закалки и высокого отпуска	9,1

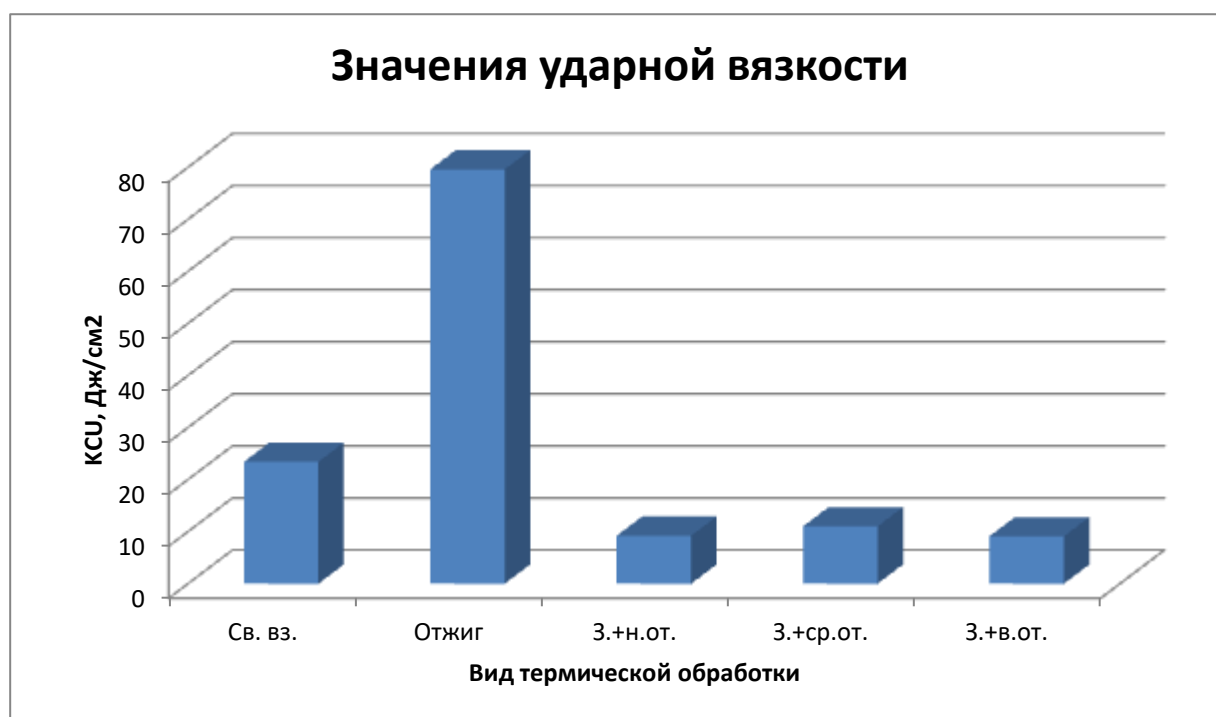


Рисунок 6 – Значения ударной вязкости

После сварки взрывом композиционный материал имеет ударную вязкость 23,4 Дж/см². После отжига ударная вязкость сильно возросла на 56 единиц. После закалки и отпуска ударная вязкость резко снизилась на порядка 70 единиц.

Ударная вязкость у композиционного материала после закалки и низкого отпуска 9,2 Дж/см². Максимальное значение ударной вязкости (по сравнению с другими режимами закалки и отпуска) у композиционного материала после закалки и среднего отпуска (11 Дж/см²). Уменьшение ударной вязкости объясняется явлением отпускной хрупкости. Данное явление возникает при замедленном охлаждении сталей, легированных Cr, Mg и Ni, которые отпускаются при температурах выше 500°С. Причиной отпускной хрупкости является выделение и диффузное перераспределение карбидов.

При режиме термической обработки закалке и высоком отпуске происходит явление вторичной твердости и отпускной хрупкости, что недопустимо для сталей, у которых главными требованиями являются высокая твердость, износостойкость и коррозионная стойкость. Таким образом, оптимальным режимом термической обработки для композиционного материала является закалки и низкий отпуск, обеспечивающим высокую твердость и достаточную ударную вязкость.

В заключении сформулированы результаты проведенных исследований в рамках диссертационной работы. Приведен обзор методов получения слоистых металлических композиционных материалов. Проведен обзор метода получения композиционных материалов сваркой взрывом. Дана характеристика данного метода (рассмотрен процесс сварки взрывом, перечислены параметры и рассмотрено явление волнообразования).

Выполнен патентный поиск, в результате которого было найдено 16 патентов по таким предметам поиска как: технологии получения изделий с эффектом самозатачивания; материалы, обладающие эффектом

самозатачивания; получение композиционных материалов сваркой взрывом и способы получения слоистых композиционных материалов.

Для исследований были выбраны такие стали как, 20X13, 40X13 и 65X13 и получена система 20X13 – 45X13 – 65X13 – 40X13 – 20X13. Приведена характеристика данных сталей, химический состав и механические свойства.

Для проведения экспериментов были выбраны такие методы исследования механических свойств как, определение микротвердости и испытание на ударный изгиб. Рассмотрена их методика и описано используемое оборудование.

Приведена технологическая схема получения композиционного материала и режим сварки взрывом. Для достижения требуемых механических свойств необходимо проведение термической обработки, которая заключается в закалке и отпуске.

Результаты исследования микротвердости: наименьшая микротвердость у композиционного материала после закалки и среднего отпуска ($631\ HRC$ у режущего слоя), наибольшая микротвердость после закалки и низкого отпуска ($663HV$ у режущего слоя). У композиционного материала после закалки и высокого отпуска наблюдается явление вторичной твердости, что объясняется увеличением твердости ($644\ HRC$ у режущего слоя).

Результаты исследования ударной вязкости: максимальное значение ударной вязкости у композиционного материала после закалки и среднего отпуска; у композиционного материала после закалки и низкого отпуска ударная вязкость составляет $9,2\ Дж/см^2$. Дальнейшее уменьшение ударной вязкости после закалки и высокого отпуска объясняется явлением отпускной хрупкости и ударная вязкость составляет $9,1\ Дж/см^2$.

Таким образом, рациональным режимом термической обработки для ножей бытового назначения, где важны высокие показатели твердости и износостойкости композита является закалка и низкий отпуск.

Для ножей и режущего инструмента промышленного назначения, где важно сочетание высокой твердости, коррозионной стойкости достаточных

показателей пластичности и вязкости композита рациональным режимом термической обработки является закалка и средний отпуск.

Публикации по теме диссертации:

Практика выбора режимов термической обработки для упрочнения жаропрочной хромистой стали 20Х13 / Сермин В.Г., Чугунов С.Н. // В сборнике: Молодежь и системная модернизация страны. Сборник научных статей 8-й Международной научной конференции студентов и молодых ученых. В 4-х томах. Курск, 2024. С. 272-276.

Гетерогенные металлические материалы нового поколения / Крюков Д.Б., Кривенков А.О., Чугунов С.Н., Гуськов М.С., Миронов С.А., Акимов А.А. // В сборнике: Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации ("Шляндинские чтения - 2023"). Материалы XV Международной научно-технической конференции с элементами научной школы и конкурсом научно-исследовательских работ для студентов, аспирантов и молодых ученых. Под редакцией Е.А. Печерской. Пенза, 2023. С. 194-196.

Технологические аспекты применения способа сварки взрывом при изготовлении гетерогенных металлических материалов нового поколения / Крюков Д.Б., Кривенков А.О., Чугунов С.Н., Гуськов М.С., Миронов С.А. // В сборнике: Достижения науки и технологий-ДНиТ-11-2023. Сборник научных статей по материалам II Всероссийской научной конференции. Красноярск, 2023. С. 77-80.

Перспективы применения технологии сварки взрывом при производстве гетерогенных материалов нового поколения / Крюков Д.Б., Кривенков А.О., Чугунов С.Н., Гуськов М.С., Миронов С.А., Зиновьева В.А. // Автоматизированное проектирование в машиностроении. 2023. № 14. С. 20-22.