

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра материаловедения, технологии  
и управления качеством

**АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОЦЕССОВ  
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЕРЕКРИСТАЛИЗАЦИИ  
ПОВЕРХНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ МАРОК СТАЛИ**

**АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ**

студента 4 курса 4091 группы  
направления 22.03.01 «Материаловедения и технологии материалов»,  
профиль «Нанотехнологии, диагностика и синтез современных материалов»  
института физики

Грицарука Михаила Сергеевича

Научный руководитель,

д.ф.-м.н., профессор

\_\_\_\_\_  
должность, уч. степень, уч. звание

\_\_\_\_\_  
подпись, дата

С.Б. Вениг

\_\_\_\_\_  
инициалы, фамилия

Зав. кафедрой,

д.ф.-м.н., профессор

\_\_\_\_\_  
должность, уч. степень, уч. звание

\_\_\_\_\_  
подпись, дата

С.Б. Вениг

\_\_\_\_\_  
инициалы, фамилия

Саратов 2023

**Введение.** Упрочнение металлов является одной из ключевых технологических задач в области металлургии и машиностроения [1]. Оно имеет важное значение, поскольку позволяет улучшить механические свойства материала, а, следовательно, повысить его надежность и долговечность. Существует множество методов упрочнения металлов, каждый из которых обладает своими преимуществами и недостатками, а также нацелен на достижение определенных целей [2].

Одним из эффективных методов упрочнения металлов является электродуговое упрочнение [3]. Этот метод основан на использовании высокотемпературной плазмы, которая образуется между электродом и металлической поверхностью. При этом происходит изменение структуры материала, а также упрочнение поверхности за счет взаимодействия плазмы с поверхностью металла. Электродуговое упрочнение предоставляет возможность эффективно контролировать процесс, что позволяет достичь желаемых свойств и поверхностной твердости материала [4].

Целью данного исследования является более глубокое изучение метода электродугового упрочнения металлов и его применение для повышения механических характеристик различных металлических материалов. В рамках работы будет рассмотрен механизм взаимодействия плазмы с поверхностью 3 видов стали: борированной, марганцевой и стали 20, а также будет проведено экспериментальное исследование влияния различных параметров процесса на получаемые результаты. Кроме того, будут изучены структурные изменения материала, происходящие в результате электродугового упрочнения.

Исследование метода электродугового упрочнения металлов является актуальным, поскольку его применение может найти широкое применение в различных отраслях, включая авиацию, машиностроение и строительство. Повышение прочности и износостойкости материалов открывает новые возможности для создания более надежных и долговечных конструкций, что является важным фактором в современной технике. Электродуговое

упрочнение представляет собой перспективный метод, который может быть применен для улучшения свойств различных металлических материалов.

Целью выпускной квалификационной работы является изучение электродугового метода упрочнения стали и подбор оптимального режима работы для 3 видов стали: борированной, марганцевой и стали 20.

На основе поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

провести анализ, систематизацию и обобщение научно-технической информации по теме исследований;

- экспериментальное установление зависимостей и особенностей исследуемого метода;

- анализ результатов экспериментальных исследований электродугового упрочнения стали;

- подбор оптимального режима упрочнения для борированной, марганцевой стали и стали 20.

- анализ полученных образцов.

Дипломная работа занимает 41 страницу, имеет 35 рисунков и 5 таблиц.

Обзор составлен по 30 информационным источникам.

### **Основное содержание работы**

Первый раздел представляет собой теоретическую часть. В данной части работы представлен обзор теоретических аспектов, связанных с упрочнением сталей и введением необходимых понятий.

1. Общая характеристика сталей и их упрочнение. Этот раздел содержит обзор основных свойств и характеристик сталей, а также рассматривает методы упрочнения сталей и их значение.

2. Легированные стали. В этом разделе представлен обзор легированных сталей, их состава и основных свойств. Рассматриваются различные типы легированных сталей и их применение.

3. Диаграмма состояния системы железо-углерод. Данный раздел посвящен рассмотрению диаграммы состояния системы железо-углерод и ее

роль в упрочнении сталей. Обсуждаются различные фазы и компоненты системы.

4. Компоненты и фазы системы. В этом разделе детально рассматриваются компоненты, структуру и фазы системы железо-углерод. Описываются основные свойства каждой фазы и их влияние на свойства сталей.

5. Компоненты области сталей. Данный раздел посвящен обсуждению компонентов, присутствующих в области сталей, и их влияния на свойства сталей. Рассматриваются различные типы сталей и их составы.

6. Доэвтектоидные, эвтектоидные и заэвтектоидные стали. В этом разделе анализируются различные типы сталей: доэвтектоидные, эвтектоидные и заэвтектоидные. Рассматриваются их особенности, составы и свойства.

7. Борированная сталь. Данный раздел посвящен изучению борированной стали, ее составу и основным свойствам. Рассматриваются методы борирования стали и его влияние на ее упрочнение.

8. Марганцевая сталь. В этом разделе проводится обзор марганцевой стали, ее состава и характеристик. Рассматривается роль марганца в упрочнении стали и его влияние на механические свойства материала.

9. Структура работы электродугового упрочнения. В данном разделе представлено описание основной темы работы – электродугового упрочнения. Рассматривается схема обработки, включая косвенную и прямую дугу, режим короткого замыкания, а также использование графитового электрода. Обсуждаются физические процессы, происходящие при горении дуги, формировании плазменных потоков и их взаимодействии с поверхностью стали.

10. Принцип работы сканирующего электронного микроскопа СЭМ В данном разделе кратко описывается принцип работы сканирующего электронного микроскопа СЭМ, который будет использован для анализа структуры обработанных образцов.

Во втором разделе работы представлена экспериментальная часть работы с использованием стали 20 и марганцевой стали.

В первой половине экспериментальной части описаны опыты с использованием стали марки 20, содержащей 0,2% углерода. Всего было использовано 14 стальных пластин данной марки. На следующем этапе эксперимента на девять пластин был нанесен раствор оксида церия ( $\text{CeO}_2$ ), полученный путем смешивания порошка оксида церия с изопропиловым спиртом в соотношении 1 к 15. После испарения спирта были удалены излишки раствора, что привело к образованию тонкого слоя оксида церия на поверхности пластин. Оксид церия добавлялся в качестве модификатора с целью повышения температуры горения и получения материала с нелинейными свойствами. Оставшиеся пять пластин были упрочнены без добавления модификаторов.

Для проведения перекристаллизации была использована установка для скоростного электродугового упрочнения. Сила тока была изменена с начального значения 270 А с шагом в 10 А. Напряжение составляло  $U = 32 \text{ В}$ , а скорость движения столика с образцом равнялась  $V = 10 \text{ мм/с}$ .

Измерения твердости образцов проводились на предприятии ООО "ТехноТерм-Саратов" [5]. Перед определением твердости образцы прошли процедуру пробоподготовки, включающую разрезание образцов, горячую запрессовку в эпоксидную смолу и шлифовку.

Разрезание образцов осуществлялось с помощью отрезного станка Labotom 5 с водяным охлаждением и сменными дисками, содержащими алмазные суспензии разной структуры.

Запрессовка образцов в эпоксидную смолу производилась на автоматическом гидравлическом прессе CitoPress-1 с использованием эпоксидной смолы DuroFast. Процесс запрессовывания включал нагрев смолы до  $150^\circ\text{C}$  с приложением усилия в 25 кН в течение 6 минут, а затем охлаждение в течение 5 минут.

Последним этапом пробоподготовки была шлифовка образцов. Первичную шлифовку проводили на шлифовально-полировальном станке при скорости вращения 250 об/мин, используя диски крупнозернистой наждачной

бумаги P80 и P120, а также мелкозернистой наждачной бумаги P240, P400 и P600. Окончательное оксидное полирование выполняли на шлифовально-полировальном станке LaboPol при скорости вращения 250 об/мин с использованием абразивного диска и оксидной суспензии OP-S.

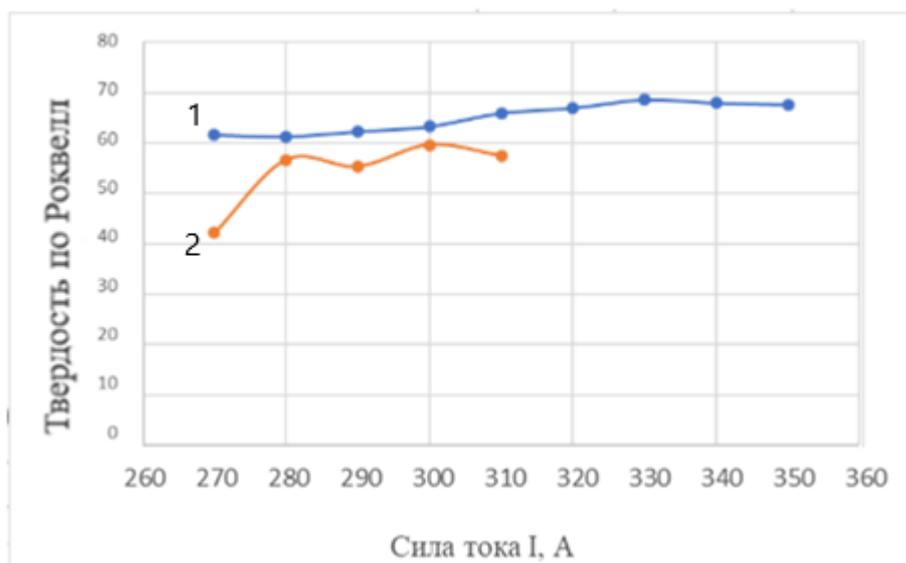
Определение твердости металла производилось по шкале Виккерса на микротвердометре DuraScan 20. Измерения твердости проводились в трех точках каждого образца, чтобы получить более точные результаты и изучить, как изменение силы тока влияет на твердость в объеме образца.

Результаты измерений твердости представлены в таблице 1. Образцы с номерами 1-9 были покрыты оксидом церия ( $\text{CeO}_2$ ), в то время как образцы с номерами 10-14 были без добавления модификатора.

Таблица 1 – Показания твердости образцов от силы тока

Номер образца	Сила тока I, А	Твердость по Роквелл, HRC		
		Точка №1	Точка №2	Точка №3
1	270	60	62	63
2	280	61	68	55
3	290	60	65	62
4	300	60	65	65
5	310	61	68	69
6	320	68	70	63
7	340	69	68	69
8	350	67	69	68
9	360	68	68	67
10	270	41,5	42	43
11	280	54	57	59
12	290	53	56	57
13	300	60	60	59
14	310	57	57,5	58

На основе полученных данных построили график зависимости твердости от силы тока, рисунок 1.



1 – Образцы с добавлением оксида церия, 2 – образцы без модификатора

Рисунок 1 – зависимость твердости от силы тока

Из анализа сравнительной характеристики (рисунок 1) следует, что введение оксида церия в состав материала оказывает существенное влияние на его твердость. Конкретно, твердость материала увеличивается на порядок благодаря присутствию оксида церия.

Вторая половина экспериментальной части посвящена опытам с целью подобрать оптимальный режим обработки марганцевой стали и изучить влияние добавления редкоземельных металлов на упрочнение материала.

В результате экспериментов было установлено, что оптимальным режимом упрочнения является режим "старт-стоп" с использованием силы тока в диапазоне от 300 до 340 ампер. При увеличении тока не наблюдалось возгорания дуги или расплавления стали. Однако при малых значениях тока было отмечено недостаточное увеличение твердости материала.

Из-за отличной теплопроводности марганцевой стали от стали 20 было решено добавить редкоземельные металлы в виде оксида церия. Редкоземельные металлы были нанесены на углеродный электрод в виде тонкого слоя перед процессом упрочнения. В результате горения электрода с добавлением редкоземельных металлов на поверхности марганцевой стали образовалась двойная дуга, которая интенсивно нагревала поверхность детали и плавила сталь.

В экспериментах использовались лапы культиватора КШУ в качестве деталей. Для оценки результатов была взята упрочненная деталь, на которой проводились тесты химического анализа и измерения твердости. Проб подготовка образца включала шлифовку и полировку для получения плоской поверхности.

Измерение твердости проводилось с использованием твердомера Микротвердомер DuraScan 20 по методу Виккерса с алмазным индентором.

Результаты измерений твердости представлены в таблицах 1-4.

Таблица 1 – Измерения твердости марганцевой стали в точке 1

Глубина, мм	Твердость по Виккерсу	Твердость по Роквеллу
0,1	684	59
0,3	637	57
1,0	684	59
1,6	637	57
1,8	648	57
2,2	288	28
3,0	314	32

Таблица 2 – Измерения твердости марганцевой стали в точке 2

Глубина, мм	Твердость по Виккерсу	Твердость по Роквеллу
0,1	766	63
0,3	737	62
0,6	766	63
0,9	684	59
1,2	648	57
1,8	752	63
2,3	467	46
3,0	433	42

Таблица 3 – Измерения твердости марганцевой стали в точке 3

Глубина, мм	Твердость по Виккерсу	Твердость по Роквеллу
0,1	797	65
0,4	781	65
0,7	847	66
1,0	797	65
1,3	847	66
2,9	847	65
3,5	403	42

Таблица 4 – Измерения твердости марганцевой стали в точке 4

Глубина, мм	Твердость по Виккерсу	Твердость по Роквеллу
0,1	882	67
0,4	797	65
0,7	784	65
1,0	647	57
1,5	626	57
2,0	537	50
3,0	467	46

Глубина упрочненного слоя в каждой точке составляла 2 мм для первой точки, 1,9 мм для второй точки, и 3 мм для третьей точки. Для оценки химического состава был использован стационарный оптико-эмиссионный искровой спектрометр Q8 MAGELLAN.

В результате химического анализа были определены процентные содержания элементов в марганцевой стали: углерод – 6%, марганец – 1%, железо – 91%.

**Заключение.** В ходе дипломной работы была поставлена и выполнена цель по изучению электродугового метода упрочнения стали и подбору оптимального режима для трех видов стали: борированной, марганцевой и стали 20.

Использование разных видов стали было необходимо для расширения потенциальных возможностей установки в соответствии с конкретной задачей, поставленной заказчиком. Результатом стало открытие новых режимов работы установки, а также новые физические процессы.

В результате эксперимента был успешно подобран оптимальный режим упрочнения для марганцевой и стали 20. Тесты химического анализа и измерения твердости подтвердили эффективность выбранного метода упрочнения и позволили количественно оценить изменения в свойствах материала.

Эксперимент по добавлению оксида церия к борированной стали не дал успешных результатов.

В эксперименте были использованы лапы культиватора КШУ из марганцевой стали. Была сделана партия для последующих полевых испытаний, которые продолжаются в настоящее время. Это позволит оценить влияние упрочнения на долговечность и производительность лап культиватора КШУ и определить преимущества и эффективность электродугового метода упрочнения марганцевой стали в практических условиях использования.

В ходе данной работы все задачи были выполнены.

#### **Список использованных источников**

- 1 Абрамова, В. И. *Материаловедение: учебник* / В. И. Абрамова, Н. Н. Сергеев, А. Н. Сергеев, Н. А. Евтушенко. – Тула : Изд-во ТулГУ, 2015. – 238 с.
- 2 Думанский, И. О. *Измерение твердости металлов и сплавов: метод. указания к выполнению лаб. работы по материаловедению* / И. О. Думанский, В. М. Александров, В. Л. Сытин. – Архангельск : САФУ, 2013 – 18 с.
- 3 Лялякин, В. П. *Метод скоростной электродуговой цементации* / В. П. Лялякин [и др.] // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. В, Прикладные науки. – 2005. – № 6. – С. 109-112.
- 4 Лещинский, Л. К. *Плазменное поверхностное упрочнение* / Л. К. Лещинский, С. С. Самоутугин, И. И. Пирч. – Киев : Тэхника, 1990. – 107 с.

5      Лаборатория [Электронный ресурс] // ООО«ТехноТерм–Саратов»  
[Электронный ресурс] : [сайт]. – URL: [http://ttc-sar.ru/ttc-equipment/laboratory-  
area](http://ttc-sar.ru/ttc-equipment/laboratory-area) (дата обращения: 19.04.2023). – Загл. с экрана. – Яз. рус.