

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО  
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
"ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ"



МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ ПО ДИСЦИПЛИНЕ  
**ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ПЛАЗМЕННОГО ПОВЕРХНОСТНОГО  
УПРОЧНЕНИЯ И МОДИФИЦИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ**

Для студентов, обучающихся по направлению 22.04.01 «Материаловедение и  
технологии материалов»

Донецк – 2016 р.

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО  
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
"ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ"

КАФЕДРА «ФИЗИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ ПО ДИСЦИПЛИНЕ  
**ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ПЛАЗМЕННОГО ПОВЕРХНОСТНОГО  
УПРОЧНЕНИЯ И МОДИФИЦИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ**

Для студентов направления 22.04.01 «Материаловедение и технологии  
материалов»

Рассмотрено:

На заседании кафедры физического материаловедения  
протокол № 2 от 12.09.2016 г.

Зав.кафедрой \_\_\_\_\_ Н.Т.Егоров

Утверждено:

На заседании учебно-методической комиссии по  
направлению 22.03.01 «Материаловедение и технологии  
материалов».

Председатель комиссии

\_\_\_\_\_ В.П. Горбатенко

Донецк – 2016 р.

УДК 608.1

ББК 34.2

М54

**Рецензенты:**

Штычно Алла Петровна – кандидат технических наук, доцент кафедры физического материаловедения ГОУВПО «ДОННТУ»;

Кузин Андрей Викторович - кандидат технических наук, доцент кафедры руднотермических процессов и малоотходных технологий ГОУВПО «ДОННТУ».

**Составитель:**

Крымов Виталий Николаевич - кандидат технических наук, доцент кафедры физического материаловедения ГОУВПО «ДОННТУ»

**Ответственный за выпуск:**

Егоров Николай Тимофеевич - кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой физического материаловедения ГОУВПО «ДОННТУ»

**Методические указания к лабораторным работам по курсу “Теория и технология плазменного поверхностного упрочнения и модифицирования поверхности”** (для студентов направления подготовки 22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов»)» [Электронный ресурс] / Сост.: Крымов В.Н., – Электрон. дан. (1 файл: 1,5 Мб). - Донецк : ДОННТУ, 2018. - Системные требования: Acrobat Reader.

В методических указаниях приведены теоретические сведения, описана методика выполнения лабораторных работ, составлен перечень контрольных вопросов

## Оглавление

Работа №1. СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА УПРОЧНЕННОГО СЛОЯ НА ЧУГУНАХ.....	5
Работа №2. ПЛАЗМЕННОЕ УПРОЧНЕНИЕ СТАЛЕЙ .....	9
Работа №3. ПЛАЗМЕННОЕ ПОВЕРХНОСТНОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ.....	15
ЛИТЕРАТУРА .....	19

## **Работа №1. СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА УПРОЧНЕННОГО СЛОЯ НА ЧУГУНАХ**

*Цель работы:* изучить влияние плазменного поверхностного упрочнения на структуру и твердость поверхностного слоя на различных чугунах.

### 1.1. Краткие теоретические сведения.

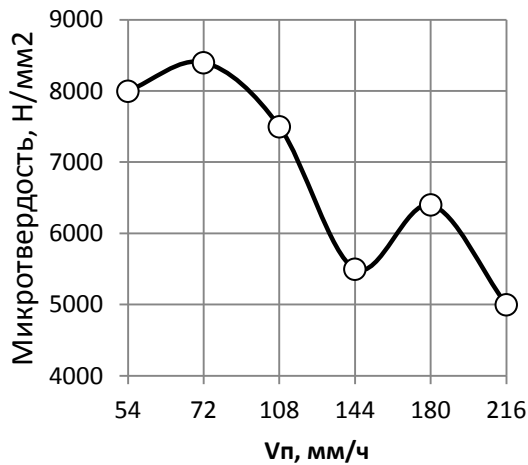
Чугуны могут подвергаться поверхностному термическому упрочнению высококонцентрированными источниками энергии (ВИЭ) и плазмой в том числе, так же как и стали. Однако эффективным такое упрочнение будет для чугунов на перлитной основе. Это связано с тем, что ферритная матрица чугунов при закалке не будет получать высокой твердости. Вследствие практически полного отсутствия выдержки при аустенитизации, аустенит не успеет насытиться углеродом, источником которого является графит.

Как правило, поверхностное упрочнение чугунов ВИЭ осуществляют с оплавлением поверхности. Это объясняется образованием «отбеленного» слоя при кристаллизации. В большинстве случаев, такую обработку применяют для изделий, испытывающих абразивный износ. Однако, есть примеры упрочнения с «отбелом» чугунных деталей машин. Например, в 80е гг. в ГДР была создана промышленная установка по упрочнению кулачков распределительных валов автомобилей.

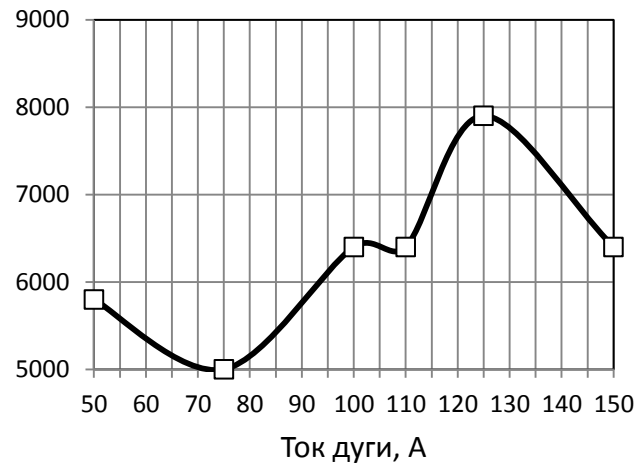
При такой упрочняющей обработке вначале образуется зона оплавления (ЗО). В расплаве происходит растворение графитных включений. При последующем охлаждении расплав кристаллизуется по метастабильной диаграмме «железо-углерод».

Твердость зоны оплавления чугунов зависит отряда факторов: от режима обработки, степени растворения графита, скорости охлаждения и др. Очевидно, что растворяться быстрее будет графит с большей удельной поверхностью, т.е., пластинчатый.

Как правило, при любом (из применяющихся на практике) режиме обработки ЗО кристаллизуется с образованием ледебурита. Варьируя скоростью перемещения и удельной мощностью плазменной струи можно изменять количество растворенного графита и, таким образом, влиять на твердость (см. рис 1.1). Скорость охлаждения зависит от соотношения масс ЗО и холодной сердцевины изделия.



а



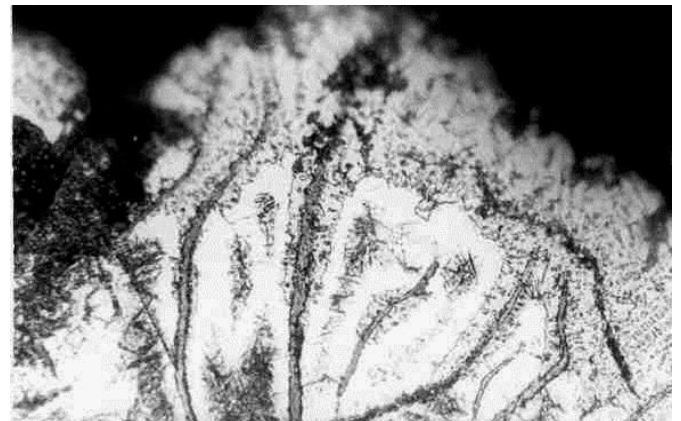
б

Рисунок 1.1 – Влияние скорости перемещения (а) и силы тока дуги плазмотрона (б) на микротвердость ЗО чугуна ВЧ 42

Строение упрочненной поверхности представлено двумя слоями. Первый, как уже говорилось ЗО. Под ним расположена зона термического влияния (ЗТВ). В чугунах эта зона, в отличие от сталей, выражена слабее (рис.1.2).



а



б

Рисунок 1.2 – Микроструктура серого чугуна после плазменного упрочнения, x500

Структура ЗО представлена дисперсным ледебуритом и перлитом (или мартенситом), образовавшимся в участках первичного аустенита. Для упрочненного слоя на чугунных изделиях характерно значительное содержание остаточного аустенита – иногда до 50%.

Граница с ЗТВ часто размытая. Графитные пластины не всегда растворяются в расплаве. Чем ниже погонная энергия при обработке, чем грубее графитные включения, тем выше вероятность сохранения графита в ЗО.

Для серого чугуна характерным является значительное возрастание

шероховатости поверхности при упрочнении с оплавлением. Это проявляется в собирании расплава ЗО в капли. При этом толщина сплошного отбеленного слоя может составлять несколько десятков мкм (см. рис. 1.2 б). Это делает невозможным упрочнение некоторых изделий, у которых регламентируется качество поверхности. Как было установлено, причиной этого явления могут считаться графитные пластины. Они плохо смачиваются расплавом, что и приводит к образованию капель. Дополнительно ухудшает смачиваемость выделение графитом абсорбированных газов, прежде всего, азота.

Чугун с компактным графитом упрочняется с оплавлением без образования такого дефекта.

Как можно заключить из графиков на рис. 1.1, при плазменном упрочнении твердость поверхностного отбеленного слоя заметно выше, чем при твердофазной закалке того же чугуна. Так, например, для высокопрочного чугуна на перлитной основе после объемной закалки твердость не превышает HV 550-590. Такая отбеленная структура обладает высокой абразивной износостойкостью.

Вместе с тем, упрочнение с «отбелом» заметно снижает агрегатную ударную вязкость. Установлено, что упрочнение чугуна ВЧ 42 с оплавлением снижает сопротивление ударному изгибу на 70-80%. Это необходимо учитывать при назначении такой обработки конкретным деталям машин.

## 1.2. Экспериментальная часть

На обработанных образцах выполнить поперечный шлиф с использованием струбцины.

На шлифе необходимо измерить геометрические размеры единичной упрочненной дорожки: глубину и ширину. Размеры ЗО и ЗТВ определяются отдельно. Изучить и зарисовать структуру упрочненного слоя.

На приборе ПМТ-3 измерить микротвердость ЗО и ЗТВ. Причем при измерении твердости ЗТВ необходимо выявить закономерность изменения микротвердости по глубине.

Полученные результаты занести в таблицу.

Таблица 1.1 – Влияние режима плазменного упрочнения на характеристики упрочненного слоя на чугунах

Марка чугуна	Режим обработки	Размеры ЗО/ЗТВ, мм		Максимальная микротвердость ЗО/ЗТВ, Н/мм <sup>2</sup>
		глубина	ширина	

### 1.3. Состав отчета:

- 1.Краткие теоретические сведения;
- 2.Материал и методику работы;
- 3.Рисунки и анализ микроструктуры;
4. Таблица с характеристиками упрочненного слоя;
5. Выводы с анализом характера влияния режима обработки и состава чугуна на свойства упрочненного слоя.

### 1.4. Контрольные вопросы.

- 1.Какова природа поверхностного упрочнения при обработке чугунов ВИЭ?
2. Какой недостаток упрочнения чугунов с оплавлением поверхности вы можете назвать?
3. Возможно ли упрочнение чугунов с использованием ВИЭ без оплавления поверхности? Какие параметры обработки нужно для этого изменить?



## Работа №2. ПЛАЗМЕННОЕ УПРОЧНЕНИЕ СТАЛЕЙ

*Цель работы:* изучить строение и распределение твердости в упрочненном слое на сталях; познакомиться с влиянием параметров упрочнения на характеристики слоя.

### 2.1 Краткие теоретические сведения.

Локальное плазменное термическое упрочнение (ЛПУ) основано на нагреве участка поверхности выше критических температур (или выше температуры плавления) и последующем охлаждении нагретого объема за счет теплоотвода в холодную сердцевину. Внешняя охлаждающая среда не используется.

Основными параметрами ЛПУ являются:

- сила тока дугового разряда;
- скорость относительного перемещения плазмотрона и обрабатываемого изделия;
- состав и расход плазмообразующего газа;
- диаметр сопла плазмотрона;
- расстояние между плазмотроном и изделием.

Из-за высокой удельной плотности теплового потока плазменной струи,  $10^3-10^6$  Вт/см<sup>2</sup>, для плазменного нагрева характерна скорость, намного превышающие скорости нагрева при печной термообработке. Следствием этого являются особенности фазовых и структурных превращений при ЛПУ.

#### Особенности фазовых и структурных превращений.

Нагрев стали, со скоростью  $10^2-10^6$  °С, вызывает смещение фазовых превращений (рис. 2.1) в область температур на 50-300° С.

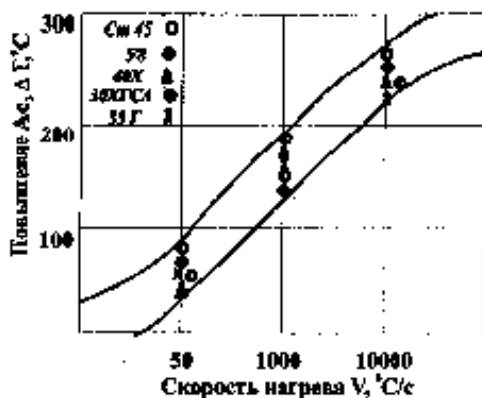


Рисунок 2.1 - Повышение температуры точки Ас3 в сравнении с равновесной в зависимости от скорости нагрева

Размер зерен аустенита, в первую очередь, зависит от отношения скоростей двух элементарных процессов: - возникновения центров (зародышей) - n и их роста С. Чем больше это отношение, тем меньше

начальное зерно S образующейся фазы - аустенита. С повышением температуры наблюдается все большее количественное опережение скорости зарождения над скоростью роста. При смещении фазовых превращений в сторону высоких температур, процесс зарождения становится доминирующим над процессом роста зерен. Регулируя скорость нагрева (т.е., количество введенной энергии в поверхностный слой металла) можно получать различные соотношения п/с. Поэтому, использование скоростного нагрева позволяет различное состояние аустенита - от крупнозернистого до мелкозернистого.

С увеличением скорости нагрева вследствие инерционности процессов и перераспределении дислокационной структуры, полигонизация не успевает произойти и уменьшение внутренних напряжений осуществляется путем рекристаллизации что вызывает измельчение ферритных зерен. При дальнейшем нагреве это приводит к образованию мелкозернистой структуры аустенита, которая после охлаждения дает мелкодисперсный мартенсит.

Высокие скорости нагрева приводят к наследованию дефектов исходной структуры. Это сопровождается повышением твердости, что объясняется дроблением блоков мозаики и значительным увеличением плотности дефектов кристаллической решетки (табл. 2.1), превышающим величины для случаев традиционной закалки. Положительное влияние на результат плазменного упрочнения оказывают термоупругие напряжения, которые с одной стороны увеличивают плотность дефектов, с другой - способствуют развитию рекристаллизационных процессов измельчения зерна.

Таблица 2.1 - Параметры тонкой кристаллической структуры стали 30ХГСА после ЛПУ

Вид обработки	Размер блоков * $10^{-7}$ , м	Микроискажения $\Delta a/\alpha * 10^2$	Плотность дефектов $* 10^{10}$ , см <sup>-2</sup>
Исходное состояние	2,1	0,168	0,47
Плазменное упрочнение + отпуск (200° С)	0,086	0,3	4,01
Объемная закалка + отпуск (200° С)	0,34	0,437	1,12

Практически полное отсутствие выдержки при аустенитизации приводит к образованию негомогенного аустенита. При этом объемы, обедненные по углероду, обладают меньшей устойчивостью при закалке.

После плазменного упрочнения металлов в поверхностном слое возникают остаточные напряжения, появление которых обусловлено двумя основными

причинами: термическими напряжениями при неоднородном температурном поле и структурными превращениями. Остаточные напряжения при поверхностном упрочнении распределяются следующим образом: в поверхностном слое  $X_c$  (10-100 мкм) они носят сжимающий характер, а в более глубоком слое  $X_p$  (0,3-3 мм) переходят в растягивающие напряжения и при увеличении расстояния от поверхности уменьшаются до нуля (рис. 2.2).

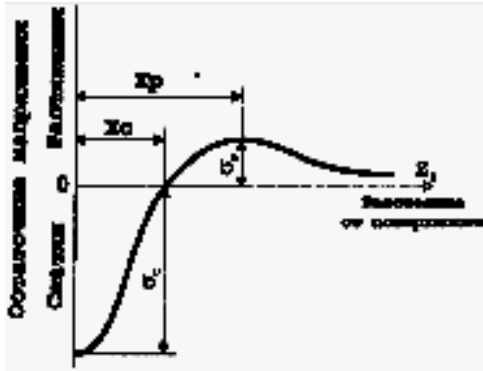


Рисунок 2.2 - Схема распределения остаточных напряжений по глубине упрочненного поверхностного слоя.

На характер распределения остаточных напряжений большое влияние оказывают параметры режимов упрочнения, химический состав упрочняемого материала, исходное состояние поверхностного слоя и т.д. Изменяя параметры режимов упрочнения, можно получить разную глубину закаленного слоя и различный характер остаточных напряжений по глубине материала, рис.2.7.

Термоупругие напряжения, действующие в процессе охлаждения, сдвигают влево термокинетические кривые распада аустенита, что приводит к необходимости увеличения критических скоростей охлаждения.

#### Технологические способы ЛПУ.

В настоящее время наиболее следующие способы плазменного упрочнения.

- Закалка сплавов из твердого состояния со скоростями нагрева и охлаждения  $10^2-10^4$  °C/c;
- Закалка сплавов из жидкого состояния с высокими скоростями плавления и кристаллизации  $10^2 - 10^5$  °C/c ;
- Оплавление и затвердевание с высокими и сверхвысокими скоростями ( $10^4- 10^7$  °C\c), приводящие к аморфизации (стеклованию) тонкого поверхностного слоя.

На лабораторной стадии находится плазменное ударное упрочнение. Газодинамический напор плазменного потока создает в зоне обработки давление 400-800 МПа, что значительно выше предела текучести аустенита.

В большинстве случаев, поверхностное упрочнение реализуется при обработке без оплавления. Это объясняется сохранением исходной

шероховатости поверхности.

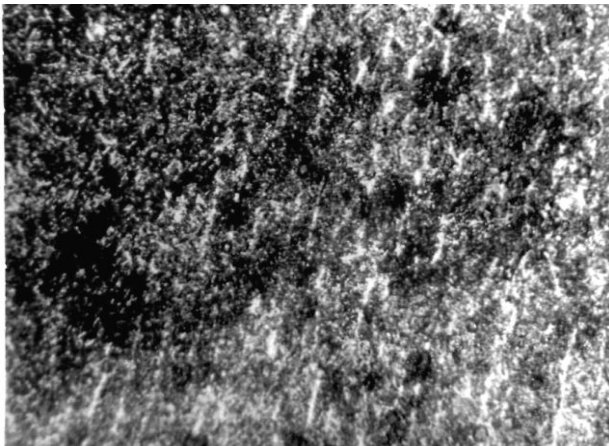
При обработке с оплавлением структура упрочненной поверхности состоит из нескольких слоев (рис. 2.3):

1) зона оплавления. ЗО имеет столбчатое строение с кристаллами, вытянутыми в направлении теплоотвода. Основная структурная составляющая мартенсит.

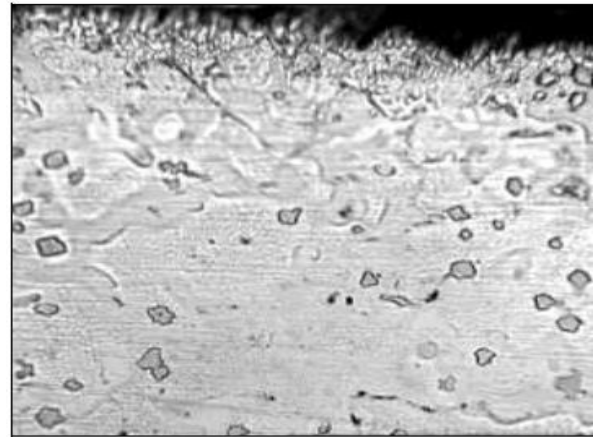
2) слой, нагретый до температур  $T_{пл} - T_{Ac3}$ . Структура этого слоя представлена мартенситом (остаточным аустенитом). Дендритность отсутствует. Кристаллы мартенсита в верхней и нижней части слоя могут сильно отличаться по размерам.

3) слой, нагретый до температур  $T_{Ac3}-T_{Ac1}$ , т.е., в этом слое происходит неполная закалка. Наряду с мартенситом наблюдается избыточный феррит (в доэвтектоидных сталях) или цементит (в заэвтектоидных).

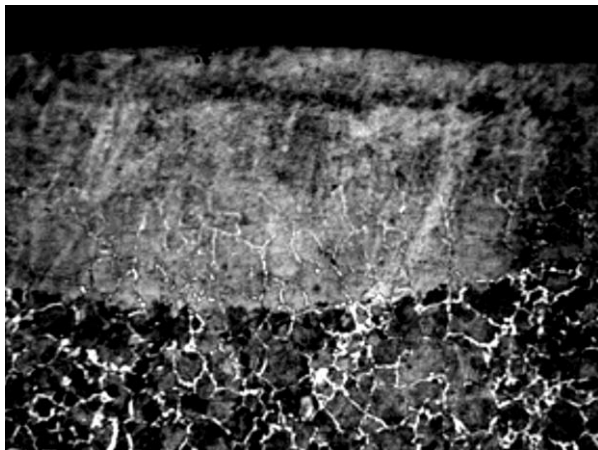
4) в сталях, которые подвергаются ЛПУ в закаленном состоянии, может наблюдаться и четвертый слой, в которой металл нагревается до температур ниже точки  $Ac1$ . В этом слое будут происходить процессы отпуска.



а



б



в

Рисунок 2.3 – Микроструктура сталей 10 (а), Р6М5 (б), 45 (в) после поверхностного упрочнения, х400;

а – обработка с оплавлением;

б – обработка без оплавления

При обработке без оплавления первый слой отсутствует.

Как следует из анализа микроструктуры, строение упрочненного слоя может характеризоваться определенной неоднородностью. В доэвтектоидных сталях может сохраняться избыточный феррит (см. рис. 2.3 в). В заэвтектоидных – избыточные карбиды (рис. 2.3 б).

Твердость упрочненного слоя, как правило, выше, чем твердость после объемной термообработки (см. табл. 2.2). Причины этого были перечислены выше.

Таблица 2.2 – Микротвердость различных сталей после ЛПУ без оплавления

Марка стали	Исходная микротвердость, МПа		Микротвердость после закалки, МПа	
	Феррит	Перлит	Бывшие перлитные зерна	Феррит
08кп	1200-1300	2000	2800-3000	1600
10	1300-1400	2000-2200	5800-6000	1500-1600
20	1200-1300	2200	4800-5300	1600
35	1800	2300-2400	5000-5600	2500-2700
40	1800	2300-2400	6000-7100	2500
45	1900	2400-2500	7800-8600	2600
60	2000	2500	9000-10500	-
У8	-	6200	10900-11300	-
30ХГСА	-	3400	6000-7500	-
40Х	-	2300-2500	10500-11200	-

При обработке с оплавлением конструкционных сталей твердость, как правило, на 30-40% ниже. Это объясняется повышенным содержанием остаточного аустенита. В сталях У10-У12 его содержание может достигать до 50%. Для инструментальных, коррозионностойких сталей мартенситного класса эта зависимость сложнее.

Легирование конструкционных сталей (40Х, 40ХН, 30ХГСА и т.п.) приводит к росту твердости упрочненного слоя. Это является следствием упрочнение пересыщенного твердого раствора (мартенсита) и ростом прокаливаемости стали. Однако повышение степени легированности приводит к росту содержания остаточного аустенита, что может снижать твердость. В этом случае можно рекомендовать после ЛПУ обработку изделий холодом.

## 2.2. Экспериментальная часть

На обработанных образцах различных сталей выполнить поперечный шлиф с использованием струбцины.

На шлифе необходимо измерить геометрические размеры единичной упрочненной дорожки: глубину и ширину. Размеры ЗО и ЗТВ определяются отдельно. Изучить и зарисовать структуру упрочненного слоя.

На приборе ПМТ-3 измерить микротвердость ЗО и ЗТВ. Причем при измерении твердости ЗТВ необходимо выявить закономерность изменения микротвердости по глубине.

Полученные результаты занести в таблицу.

Таблица 1.1 – Влияние режима плазменного упрочнения на характеристики упрочненного слоя

Марка стали	Режим обработки	Размеры ЗО/ЗТВ, мм		Максимальная микротвердость ЗО/ЗТВ, Н/мм <sup>2</sup>
		глубина	ширина	

### 2.3. Состав отчета:

1. Краткие теоретические сведения;
2. Материал и методику работы;
3. Рисунки и анализ микроструктуры;
4. Таблица с характеристиками упрочненного слоя;
5. Выводы с анализом характера влияния режима обработки и состава стали на свойства упрочненного слоя.

### 2.4. Контрольные вопросы.

1. Какие преимущества ЛПУ с (без) оплавления можно назвать?
2. Какими параметрами можно охарактеризовать ЛПУ?
3. Анализируя данные табл. 2.2, предположите, как может меняться твердость тех же сталей при добавлении легирующих элементов.

## Работа №3. ПЛАЗМЕННОЕ ПОВЕРХНОСТНОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ

*Цель работы:* изучить влияние плазменного поверхностного легирования на структуру и твердость поверхностного слоя на углеродистых сталях

### 3.1. Краткие теоретические сведения.

Поверхностное легирование с использованием ВИЭ находит все более широкое применение на практике. Это связано с возможностью получения тонких поверхностных слоев, состав которых, радикально отличается от материала основы. При этом градиент концентрации при переходе от легированного слоя к сердцевине может на несколько порядков превышать градиент, полученный при диффузионном насыщении.

При поверхностном легировании ВИЭ можно получить твердые растворы, концентрации которых будут превышать предельную равновесную растворимость в несколько раз.

Поверхностное легирование выполняют почти исключительно с оплавлением поверхности.

Легирующий элемент подается в зону обработки в твердой или в жидкой фазе. Хотя опубликована информация о легировании из газообразной среды. Легирующий элемент подается или в чистом виде (например, порошок хрома, бора и т.п.) или в виде соединения, которое диссоциирует при температуре обработки.

При плазменном поверхностном легировании возможно применение тех же способов, что и при лазерном:

- легирование из твердой фазы (обмазки, засыпки, предварительно нанесенного покрытия);
- легирование из жидкой фазы при погружении изделия под слой жидкого легирующего компонента или его соединения;
- легирование из газообразной фазы.

#### Плазменное легирование из твердой фазы.

Как правило, этот способ реализуется при оплавлении обмазки, содержащей легирующий элемент, нанесенной на поверхность с помощью связующего. В роли связующего может использоваться раствор любого термореактивного вещества: этилсиликат, клей БФ-2, жидкое стекло и пр.

Обмазка или покрытие оплавляется под воздействием плазменной струи. Под действием газодинамического напора плазменной струи происходит интенсивное перемешивание жидкого металла с углеродом и при последующей кристаллизации образуется легированный слой.

В отличие от других ВИЭ, плазменная технология обладает определенным преимуществом при поверхностном легировании. Это связано с возможностью введения легирующего элемента непосредственно в плазменную струю в виде порошка.

В наибольшей степени изучено поверхностное легирование углеродом.

В качестве основного компонента углеродосодержащих паст, обмазок, покрытий наиболее часто используют графит. При нанесении на низкоуглеродистую сталь углеродосодержащей пасты и последующего ее оплавления плазменной струей, в упрочненном слое образуются три зоны (рис. 3.1).

Первая зона является зоной легированной углеродом, с микротвердостью 8400-9200 МПа. Структура этой зоны зависит от концентрации углерода и может меняться от мартенситной (с разным содержанием остаточного аустенита) до отбеленного слоя со структурой белого чугуна.

Вторая зона глубиной является зоной закалки из твердой фазы. Структура - мартенсит и остаточный аустенит. Микротвердость по глубине распределена неравномерно, т.к. в этой зоне имеются структуры полной (ближе к ЗО) и неполной (нижняя граница зоны) закалки.

Третья зона - переходная зона, образовавшаяся при нагреве ниже точки  $A_{c3}$ .

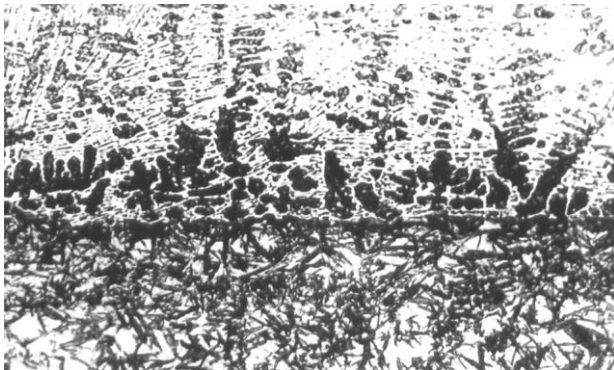


Рисунок 3.1 – Микроструктура стали после плазменной цементации, х400

#### Азотирование.

В качестве паст, обмазок используют азотосодержащие соли. В поверхностном слое на стали 20 образуется не только  $\alpha \rightarrow \gamma$  твердые растворы азота в железе, но и нитрид  $Fe_2N$ . Микротвердость легированного слоя достигает 8400-8800 МПа.

#### Борирование

Плазменное борирование осуществлялось при помощи порошка карбида бора или бора. Диффузионный слой на стали состоит из вытянутых и ориентированных перпендикулярно поверхности боридных фаз ( $FeB$ ,  $Fe_3B$ ). Толщина слоя составляет 0,1-0,180 мкм. На поверхности образуется  $FeB$  и  $Fe_2B$  (под слоем). Микротвердость борида  $FeB$  18000-20100 МПа, а  $Fe_2B$ - 15000-16500 МПа. При борировании возможно образование наряду с фазами  $FeB$  и  $Fe_2B$ -  $\beta$ - модификации бора с микротвердостью 25000-30000 МПа.

#### Плазменное легирование из жидкой фазы

Для насыщения поверхностного слоя углеродом или азотом обрабатываемую деталь погружают в жидкость, содержащую углерод (толуол,



минеральное масло и др.) или азот (водный раствор хлористого аммония и др.)

Установлено, что процесс азотирования наблюдается только при оплавлении поверхности.

Азотированный слой на стали 20 представляет собой белую плохо травящуюся полосу карбонитридного состава, содержащую  $\approx 4\%$  азота,  $\approx 1,5\%$  углерода,  $\approx 10-15\%$  остаточного аустенита. Содержание остаточного аустенита на стали 20 возрастает с увеличением длительности насыщения и концентрации азота в растворе.

Плазменное легирование из газообразной фазы возможно только при воздействии на образец при высоком давлении газа. По-видимому, давление должно быть, как минимум, более десяти атм. Опубликована работа, в которой утверждается о возможности азотирования при воздействии азотной плазменной струи. Однако это утверждение вызывает сомнение.

### 3.2. Экспериментальная часть.

На образцы из низкоуглеродистых сталей нанести обмазки содержащие графит, бор (карбид бора) или феррохром. в качестве связующего необходимо использовать 20%-ный раствор клея БФ-2 в ацетоне. Обработать образец с обмазкой с оплавлением поверхности.

На обработанных образцах изготовить поперечные шлифы с использованием струбцины.

На шлифе необходимо измерить геометрические размеры единичной упрочненной дорожки: глубину и ширину. Размеры ЗО и ЗТВ определяются отдельно. Изучить и зарисовать структуру упрочненного слоя.

На приборе ПМТ-3 измерить микротвердость ЗО и ЗТВ. Причем при измерении твердости ЗТВ необходимо выявить закономерность изменения микротвердости по глубине.

Полученные результаты занести в таблицу.

Таблица 3.1 – Влияние режима плазменного легирования на характеристики упрочненного слоя

Состав обмазки	Режим обработки	Размеры ЗО/ЗТВ, мм		Максимальная микротвердость ЗО/ЗТВ, Н/мм <sup>2</sup>
		глубина	ширина	

### 3.3. Состав отчета:

1. Краткие теоретические сведения;

2. Материал и методику работы;
3. Рисунки и анализ микроструктуры;
4. Таблица с характеристиками упрочненного слоя;
5. Выводы с анализом характера влияния состава обмазки на свойства упрочненного слоя.

#### 3.4. Контрольные вопросы.

1. Каков механизм поверхностного легирования при воздействии плазменной струи?
2. В чем отличие в способах введения легирующего элемента при плазменном легировании от других ВИЭ?
3. Каким условиям должно отвечать химическое соединение для использования его в качестве легирующего вещества?

## ЛИТЕРАТУРА

- 1.Фролов В. Я., Лисенков А. А., Барченко В. Т. Физические основы применения низкотемпературной плазмы: учеб.пособие. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – 220 с.
- 2.Юрьева А.В. Введение в плазменную технологию и водородную энергетику: уч.пособие / А.В. Юрьева, А.Н. Ковальчук / Томск: Изд-во ТПУ, 2014. – 90 с.
- 3.Суминов И.В. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов / И.В. Суминов, Белкин П.Н., Эпельфельд А.В., Людин В.Б., Крит Б.Л., Борисов А.М. В 2-х томах. Том I. - Москва: Техносфера, 2011. — 464 с.
- 4.Суминов И.В. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов / И.В. Суминов, Белкин П.Н., Эпельфельд А.В., Людин В.Б., Крит Б.Л., Борисов А.М. В 2-х томах. Том II. - Москва: Техносфера, 2011. — 512 с.