

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
Юргинский технологический институт

ТЕОРИЯ СВАРОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ  
Методические указания по выполнению лабораторных работ  
для студентов направления «Машиностроение»,  
профиль «Оборудование и технология сварочного производства»

Юрга 2016

Теория сварочных процессов: методические указания по выполнению лабораторных работ для студентов направления «Машиностроение», профиль «Оборудование и технология сварочного производства». Юрга: ИПЛ ЮТИ ТПУ, 2016. – 29 с.

Составители

Е.А. Зернин  
М.А. Крампит

Рецензент

А.В. Крюков

Методические указания рассмотрены и рекомендованы к изданию методическим семинаром кафедры сварочного производства « \_\_ » \_\_\_\_\_ 2016г.

Зав. кафедрой СП

С.Б. Сапожков

## Содержание

Лабораторная работа № 1	4
Лабораторная работа № 2	9
Лабораторная работа № 3	13
Лабораторная работа № 4	19
Лабораторная работа № 5	23
Список литературы	29

# **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1**

## **СОВРЕМЕННЫЕ СПОСОБЫ ИМПУЛЬСНО-ДУГОВОЙ СВАРКИ**

### **1. Цель работы**

Выявить технологические особенности применения современных способов импульсно-дуговой сварки.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Изучить принципы управления дугой и переносом электродного металла при импульсно-дуговой сварке в среде защитных газов.
2. Оценить влияние режимов на разбрызгивание, форму и размеры шва.

### **2. Оборудование, приборы и материалы**

1. Пост для механизированной сварки в среде защитных газов с импульсным управлением тока и напряжения (Lorch S серии).
2. Осциллограф.
3. Средства ВИК.

### **3. Краткая характеристика объекта исследования**

Управление сварочной дугой и ее свойствами необходимо для повышения стабильности горения дуги и получения направленного переноса электродного металла в сварочную ванну, что особенно актуально при сварке в положениях, отличных от нижнего, а также воздействия на процессы, протекающие в сварочной ванне в околошовной зоне (управление первичной кристаллизацией металла шва и термическим циклом в околошовной зоне).

#### **Механизированная сварка короткой дугой с короткими замыканиями**

Современные сварные конструкции требуют высоких показателей качества. И импульсные процессы – один из методов, помогающих добиться высокого качества. Они позволяют снизить разбрызгивание, что сказывается на внешнем виде сварных соединений и снижает затраты на последующую механическую обработку. Сниженное тепловложение позволяет вести сварку без прожогов, а также в положениях, отличных от нижнего.

Сейчас многие производители сварочного оборудования предлагают процесс сжатой, короткой дуги.

Форсированная дуга имеет ряд преимуществ перед дугой со струйным переносом:

- глубокое проплавление благодаря увеличенному давлению дуги на ванну жидкого металла;
- упрощение управления процессом благодаря большей стабильности дуги;
- отсутствие подрезов благодаря короткой дуге;

- высокая производительность, обусловленная более высокой скорости сварочного процесса и увеличению коэффициенту наплавки (уменьшение числа проходов);

- уменьшение зоны нагрева;
- экономия сварочной проволоки и защитного газа;
- уменьшение необходимой ширины разделки;
- снижение остаточных деформаций.

Процесс SpeedArc нацелен на повышение качества сварных соединений из толстолистового металла, связанного с обеспечением гарантированного проплавления в корне шва, а также MIG/MAG сварки в узкую разделку. Функция SpeedArc в отличие от стандартной струйной дуги поддерживает уверенный струйный процесс переноса металла более короткой дугой. Дуга становится более сфокусированной, очень устойчивой. Благодаря высокому плазменному давлению в дуге обеспечивается более глубокое проплавление. При этом снижается тепловложение в основной металл и снижается вероятность возникновения таких дефектов, как подрезы.

Область применения процесса сварки короткой дугой с короткими замыканиями:

- сварка толстолистового металла;
- сварка корневых швов;
- сварка в узкую разделку;
- сварка легированных сталей и сплавов.

#### **Сварка «холодной» дугой**

Разработки с целью создания процесса малой мощности без механического вмешательства в подачу проволоки привели к созданию варианта процесса, при котором все необходимые воздействия производятся исключительно в источнике тока. Этот вариант MIG/MAG процесса, называемый coldArc, предлагаемый компанией EWM, относится к сварке короткой дугой и поэтому характеризуется циклической сменой дуг и фаз короткого замыкания.

Фирма Merkle предлагает свой процесс, под названием ColdMIG, теплоотдача в котором на 20-30% меньше, чем в режиме стандартной короткой дуги.

Аналогом данных процессов является процесс Precision Pulse от компании Lincoln Electric.

Область применения процесса сварки «холодной дугой»:

- сварка тонких листовых металлов 0,6-3,0 мм;
- возможность сварки с большими зазорами;
- MIG-пайка с низкой теплоотдачей;
- сварка смешанных металлов;
- сварка металлов с покрытием.

## **Сварка вертикальных швов**

Импульсные процессы помогают в формировании шва при сварке вертикальных швов снизу-вверх. Возможность MIG/MAG сварки без сложных движений горелкой (техникой сварки «елочка» или поперечными колебаниями) достигается комбинированием двух технологий или, точнее, двух фаз сварочной дуги. Первая фаза – «горячая» фаза тока большой силы с высокой подачей энергии – для оптимального расплавления материала. Затем без переходов и, таким образом, практически без брызг наступает вторая, «холодная» фаза благодаря идеальному автоматическому регулированию.

Обычно сварка вертикальных швов требует от сварщика максимального умения и квалификации. Компания Шторм-Lorch для этой цели предлагает процесс SpeedUp. С функцией SpeedUp сварщику не нужно выполнять сложные движения горелкой (техникой сварки «елочка» или поперечными колебаниями), ему необходимо лишь перемещать горелку вдоль стыка с постоянной скоростью. Сварочный аппарат выстроит алгоритм импульсов так, чтобы обеспечить уверенный провар корня и получить качественное формирование шва с плавным переходом на основной металл [23].

Фирма Merkle предлагает процесс HighUP, реализованный сочетанием импульсов DeerARC и PULSE.

Особенности Merkle HighUP:

DeerARC обеспечивает глубокий, надежный провар корня шва.

- PULSE формирует равномерный чешуйчатый внешний валик.

- Сварка в один проход без применения колебательных движений горелки.

- Высокое качество шва без использования сложного профессионального метода сварки «елочкой».

Область применения процессов для сварки вертикальных швов:

- сварка вертикальных швов на подъем;

- сварка тонколистовых изделий;

- сварка высоко текучих металлов и сплавов.

## **4. Методика выполнения лабораторной работы**

1. Подготовить сварочный пост к работе. Подключить осциллограф в соответствии с предложенной схемой (рис. 1.1).

2. Настроить источник питания для сварки на обычном режиме (рис. 1.2). Для этого кнопкой 1 выбрать режим 5 под названием «СТАНДАРТ». Кнопкой 2 задать свариваемый металл на дисплее 6, кнопкой 3 задать толщину сварочной проволоки на дисплее 9, кнопкой 4 задать состав газовой смеси на дисплее 8, кнопкой 12 выбрать настройку, исходя из толщины свариваемого металла (должен загореться индикатор 13), и ручкой 10 задать толщину свариваемого металла на дисплее 11. Средняя сила тока и напряжение отобразятся на дисплеях 15 и 14

соответственно. Произвести сварку углового шва. Измерить время сварки. Визуально оценить набрызгивание и формирование шва.

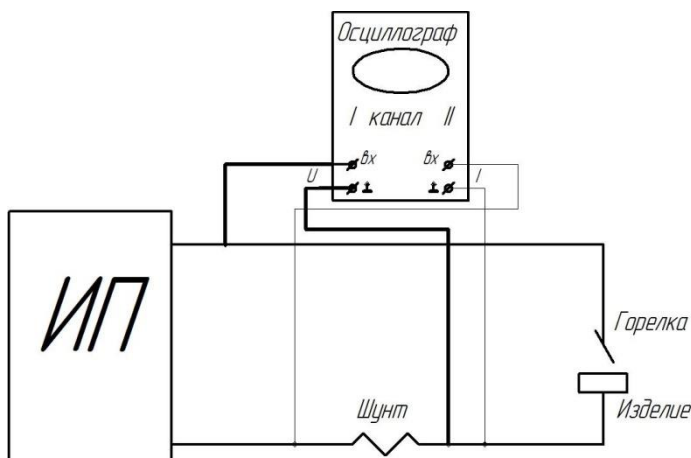


Рис. 1.1. Схема подключения осциллографа для снятия силы тока (A) и напряжения (V)



Рис. 1.2. Внешний вид панели управления ИП Lorch S-серии

3. Настроить источник питания на режим SpeedArc (RapidArc), для этого кнопкой 1 выбрать режим SpeedArc на дисплее 5. Задать требуемые параметры в зависимости от свариваемого изделия и применяемых материалов. Произвести сварку углового шва. Измерить время сварки. Снять полученные осциллограммы. Визуально оценить набрызгивание и формирование шва. Сравнить результаты с обычным режимом.

4. Настроить источник питания для сварки на обычном режиме. Произвести сварку вертикального шва на подъем методом «елочка». Измерить время сварки. Визуально оценить формирование шва.

5. Настроить источник питания на режим SpeedUp, для этого кнопкой 1 выбрать режим SpeedUp на дисплее 5. Произвести сварку вертикального шва на подъем без колебаний горелкой. Измерить время сварки. Снять полученные осциллограммы. Визуально оценить формирование шва. Сравнить результаты с обычным режимом. Данные занести в таблицу.

#### **5. Типовые вопросы для контроля и самоконтроля студентов**

1. Для чего необходимо управление сварочной дугой и ее свойствами?
2. В чем сущность процесса SpeedArc (RapidArc)? Область применения.
3. В чем сущность процесса ColdArc (coldMIG, Precision Pulse)? Область применения.
4. В чем сущность процесса SpeedUp (HighUp)? Область применения.
5. Как влияет перенос электродного металла на процесс формирования и кристаллизации сварного шва?



## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2**

### **РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ В СТЫКОВЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ**

#### **1. Цель работы**

Выявить закономерности распределения внутренних напряжений в стыковых сварных соединениях.

Для достижения поставленной цели необходимо:

1. Исследовать распределение внутренних напряжений в пластинах до сварки.
2. Провести сварку встык двух пластин.
3. Исследовать распределение внутренних напряжений в стыковом сварном соединении.

#### **2. Оборудование, приборы и материалы**

1. Источник питания ТИР-315.
2. Прибор для измерения внутренних напряжений ИМН-1.
3. Линейка, карандаш, циркуль.
4. Стальные пластины.
5. Электроды для ручной дуговой сварки.

#### **3. Краткая характеристика объекта исследования**

Сварка как технологический процесс получения неразъемного соединения характеризуется высоколокальным введением тепловой энергии в металл. Одним из основных факторов, определяющих несущую способность элементов сварной конструкции, являются остаточные сварочные напряжения, появляющиеся в результате сварочного термомодеформационного цикла.

При производстве стального листового проката в результате пластического деформирования появляются остаточные напряжения, неоднородность состава, изменяются механические свойства, что приводит в свою очередь к деформации заготовок после сварки. Растягивающие напряжения с разных сторон листов действуют как вдоль, так и поперек направления проката.

Для определения остаточных напряжений в элементах конструкций наибольшую ценность имеют неразрушающие методы исследования – рентгеновский, ультразвуковой, токовихревой, метод лазерной интерферометрии (в сочетании с методом отверстий) и др. Одним из методов неразрушающего исследования остаточных напряжений также является магнитоупругий способ измерения.

Основные преимущества использования магнитоупругого эффекта: простота и высокая оперативность; не требуется специальная предварительная подготовка исследуемой поверхности (травление, полирование и др.); исключается

разрушение детали; возможность построения траекторий на реальных изделиях, а не на заменяющих их моделях; универсальная применимость для исследования рабочих и любых видов остаточных напряжений); минимальные затраты времени на освоение методики измерений.

Для определения величины остаточных напряжений используется измеритель напряжений ИМН-1, который является электронным устройством средней сложности, обеспечивающим удовлетворительную точность измерений и удобство в работе. Благодаря применению полупроводниковых элементов прибор имеет небольшие габариты, массу и малое потребление энергии.

Одноканальный измеритель напряжений ИМН-1 относится к группе приборов неразрушающего контроля на основе использования магнитоупругого эффекта и предназначен для измерений перепада приложенных и остаточных напряжений по абсолютной величине в двух взаимноперпендикулярных направлениях на поверхности исследуемых стальных листов и прочих деталей, включая сварные швы из однородных металлов. Исследуемый участок на поверхности нагруженной детали определяется габаритами первичного преобразователя или датчика.

На рисунке 2.1 представлен внешний вид прибора ИМН-1.



*Рис. 2.1. Внешний вид прибора с магнитоупругим датчиком для измерения величины остаточных напряжений*

#### **4. Методика выполнения лабораторной работы**

1. Самостоятельно осуществить предварительную подготовку отчета с необходимыми формами таблиц и графиков.
2. Изучить характеристику объекта исследования, используя методические указания, конспект лекций и предлагаемую литературу.

3. Пройти инструктаж по технике безопасности проведения лабораторной работы.
4. Получить допуск к выполнению лабораторной работы.
5. Ознакомиться с оборудованием и измерительными приборами, применяемыми для исследований.
6. Ознакомиться с требованиями к уровню достоверности и повторяемости результатов измерений. Определить абсолютную и относительную погрешность измерения приборов.
7. Подготовить образцы сварных соединений для измерения внутренних напряжений по схеме, представленной на рисунке 2.2.

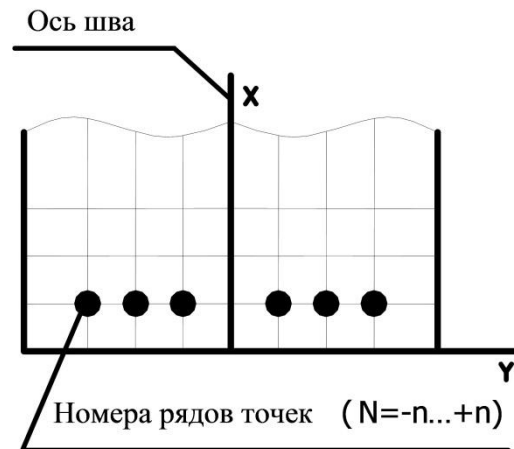


Рис. 2.2. Схема измерения остаточных напряжений

8. Измерить внутренние напряжения в пластинах до сварки. Данные занести в таблицу 2.1.
9. Произвести сварку пластин.
10. Измерить внутренние напряжения после сварки. Данные занести в таблицу 2.1.
11. Используя вычислительные пакеты *Mathcad*, *Matlab* или приложение *Microsoft Excel* построить графики распределения внутренних напряжений параллельно ( $\sigma_x$ ) и перпендикулярно ( $\sigma_y$ ) оси шва до, и после сварки (данные представить в распечатанном виде).
12. По полученным экспериментальным данным сделать выводы.
13. Ответить на типовые вопросы для контроля и самоконтроля.
14. Оформить отчет в соответствии с требованиями и представить его для защиты преподавателю.

## 5. Формы таблиц, рекомендуемых для записи измеряемых свойств объекта исследования

Таблица 2.1

Значения внутренних напряжений  
в различных участках сварного соединения

ПЛОСКОСТЬ	Внутренние напряжения до/после сварки												
	Ряд												
	-n	-n+1	...	-3	-2	-1	0	1	2	3	...	n-1	n
1													
n-1													
n													

### 6. Типовые вопросы для контроля и самоконтроля студентов

1. Причины возникновения внутренних напряжений.
2. Методы определения внутренних напряжений.
3. Преимущества и недостатки различных способов измерения внутренних напряжений в сварных соединениях.
4. Способы уменьшения внутренних остаточных напряжений после сварки.
5. От чего зависит уровень внутренних напряжений в пластинах до и после сварки?

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СВАРИВАЕМОСТИ СТАЛЕЙ

### 1. Цель работы

Оценить свариваемость различных конструкционных сталей.

Для достижения поставленной цели необходимо:

1. Теоретически определить свариваемость различных марок сталей.
2. Классифицировать полученные результаты по группам свариваемости.

### 2. Краткая характеристика объекта исследования

Специфика теплового воздействия на металл при сварке вызывает многообразные сложные изменения в составе и структуре металла сварных соединений. Реакция сталей различного химического состава на термический цикл сварки неодинакова и, как правило, следствием ее является ухудшение свойств стали в зоне сварного соединения, что затрудняет получение качественных сварных соединений.

Разница между сталями, обладающими хорошей и плохой свариваемостью, заключается в том, что для качественной сварки последних необходима более сложная технология (предварительный или сопутствующий подогревы, последующая термообработка, облицовка кромок и т.п.). В некоторых случаях усложнение технологии может быть настолько значительным, что изготовление сварной конструкции может оказаться экономически нецелесообразным. Однако, усовершенствование существующих и разработка новых сварочных процессов и сварочных материалов сокращает ряд таких сталей.

Разработке технологического процесса изготовления сварной конструкции из той или иной стали должна предшествовать оценка свариваемости этой стали. Существует множество разнообразных по своей сущности, трудоемкости и объективности способов оценки свариваемости сталей и различных сплавов.

Образование сварного соединения сопровождается возникновением химических (ионной, ковалентной, металлической и др.) связей между элементарными частицами соединяемых элементов. Образование химических связей сопровождается, в свою очередь, протеканием определенных явлений, называемых сварочными процессами, которые условно делят на три группы.

Характер и степень развития сварочных процессов определяют **технологическую прочность** металла шва и зоны термического влияния, то есть способность материалов выдерживать без разрушения различного рода воздействия в процессе их технологической обработки. Кроме того, сварочные процессы в значительной мере определяют и **эксплуатационную прочность**, работоспособность сварного соединения. При сварке различают технологическую прочность в процессе кристаллизации (стойкость против горячих трещин) и в

процессе фазовых и структурных превращений в твердом состоянии (стойкость против холодных и других видов трещин).

Определение понятия свариваемости дано в ГОСТ 2601-84: «Свариваемость – свойство металла или сочетания металлов образовывать при установленной технологии сварки соединение, отвечающее требованиям, обусловленным конструкцией и эксплуатацией изделия».

Само понятие свариваемости уже говорит о том, что свариваемость является комплексной характеристикой металла, отражающей его реакцию на физико-химическое воздействие процесса сварки и способность образовывать сварное соединение, отвечающее заданным эксплуатационным требованиям.

В процессе изготовления сварной конструкции могут возникать горячие, холодные трещины, поры в металле шва, металл может потерять стойкость против перехода в хрупкое состояние и т.д.

С учетом этого основными показателями свариваемости в настоящее время приняты следующие:

- сопротивляемость образованию горячих трещин при сварке;
- сопротивляемость образованию холодных трещин и замедленному разрушению;
- окисляемость металла при сварке, зависящая от его химической активности;
- чувствительность металла к тепловому воздействию сварки, характеризующая его склонностью к росту зерна, структурными и фазовыми изменениями в шве и зоне термического влияния, изменением прочностных и пластических свойств;
- чувствительность к образованию пор;
- сопротивляемость образованию трещин при повторных нагревах;
- соответствие свойств сварного соединения эксплуатационным требованиям: жаростойкость, жаропрочность, коррозионная стойкость и т.п.

В практике пользуются набором основных показателей, типовых для каждого вида материала и условий эксплуатации изготовленных из него сварных конструкций.

Одним из способов оценки склонности металла сварных соединений к холодным трещинам является оценка потенциальной склонности стали по значению эквивалента углерода  $C_{\text{э}}$ .

Одной из наиболее распространенных формул для подсчета углеродного эквивалента считают формулу вида:

$$C_{\text{э}} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr}{5} + \frac{V}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cu}{13} + \frac{P}{2},$$

где символы химических элементов обозначают их содержание в стали, %.

При пользовании этой формулой содержание меди учитывается при  $Cu$  0...0,5 %, а фосфора при  $P > 0,05$  %.

В случае, если  $C_э > 0,45...0,55$  %, в зависимости от толщины металла, рекомендуется применять предварительный подогрев. При сварке низколегированных сталей повышенной прочности низководородистыми электродами (как правило, с основным покрытием по специальной технологии (многопроходная сварка, обеспечивающая прогрев предыдущего слоя при наложении последующего по всему сечению до температур выше  $A_{c3}$ ) критическое значение углеродного эквивалента может быть увеличено до 0,70 %.

В литературе также приводится формула с другими коэффициентами:

$$C_э = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{10} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14} + 5B$$

Стали, у которых  $C_э$  больше 0,45 %, считаются потенциально склонными к образованию холодных трещин, так как в этом случае становится возможным образование закалочных структур в металле сварного соединения, что при условии насыщения металла водородом и высоких сварочных напряжений может вызвать образование трещин.

Приведенные формулы для расчета углеродного эквивалента не учитывают толщину металла и содержание в нем водорода. Толщина металла оказывает влияние как на термический цикл, так и на уровень сварочных напряжений, влияние водорода рассмотрено ранее. Это обстоятельство в значительной мере снижает объективность оценки.

Красовский А.И. приводит несколько иную формулу, учитывающую влияние толщины металла:

$$C_э = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr}{5} + \frac{Ni}{15} + \frac{Mo}{4} + \frac{Cu}{13} + \frac{P}{2} + 0,0024S$$

где  $S$  – толщина металла, мм.

Согласно рекомендациям по использованию этой формулы для ответственных сварных конструкций может быть применена сталь с содержанием углерода не более 0,22 % и  $C_э \leq 0,50$  %.

Пользуясь данной формулой и учитывая данные таблицы 3.1, устанавливают степень сложности технологии сварки углеродистых и низколегированных сталей перлитного класса, обеспечивающую отсутствие трещин в околошовной зоне сварного соединения.

При сварке изделий небольшой массы, или в условиях малой интенсивности отвода тепла, степень сложности технологии выполнения сварных соединений

может быть снижена путем применения соответствующих повышенных режимов сварки.

А.И. Красовский же считает достаточно проверенной и надежной несколько сокращенную формулу:

$$C_3 = C + \frac{Mn}{20} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cr + Mo + V}{10}$$

Таблица 3.1

Условия сварки углеродистых и низколегированных сталей перлитного класса в зависимости от их химического состава

Эквивалентное содержание углерода в стали, %	Технологический процесс, обеспечивающий отсутствие холодных трещин
$C_3 \leq 0,25$	Сварка в обычных условиях (без подогрева)
$0,25 < C_3 \leq 0,35$	Сварка с предварительным низким подогревом (150-200 °С) и с последующей термообработкой (нормализация или отпуск)
$0,35 < C_3 \leq 0,5$	Сварка с предварительным высоким подогревом (500-600 °С), либо в некоторых случаях с сопутствующим подогревом и последующей термообработкой (нормализация или отпуск)

Им проведена графоаналитическая обработка результатов многочисленных исследований, которая позволила представить графически зависимость допускаемой минимальной начальной температуры изделия из низколегированной стали от значения ее углеродного эквивалента, определенного по формуле, и толщины свариваемых деталей.

Формула Д. Сефериана для расчета эквивалента углерода связывает последний не только с химическим составом стали, но и с толщиной свариваемого металла. Им же предложена расчетная формула для определения температуры предварительного подогрева. Вся методика оценки разработана на основе обобщения экспериментальных данных по сварке различных марок сталей.

Согласно этой методике сначала рассчитывается значение эквивалента углерода без учета толщины металла по формуле:



$$C_{\text{э}} = C + \frac{Mn}{9} + \frac{Cr}{9} + \frac{Ni}{18} + \frac{Mo}{13}$$

Влияние толщины свариваемого металла учитывается поправкой:

$$C'_{\text{э}} = 0,005\delta \cdot C_{\text{э}}$$

Полный эквивалент углерода определяется выражением:

$$C''_{\text{э}} = C_{\text{э}} + C'_{\text{э}} = C_{\text{э}}(1 + 0,005\delta)$$

Температура предварительного подогрева определяется по формуле:

$$T_{\text{под}} = 350\sqrt{C''_{\text{э}} - 0,25}$$

Значение  $C_{\text{э}}$  определяется по формуле:

$$C_{\text{э}} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{5} + \frac{Cr}{6} + \frac{Ni}{12} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{5} + \frac{Cu}{7} + \frac{P}{2}$$

Предельное содержание элементов в стали не должно превышать значений 0,5% С; 1,6% Мn; 1% Cr; 3,5% Ni; 0,6% Мо; 1% Cu. Как видно, с увеличением степени легированности стали и толщины свариваемого проката температура подогрева возрастает.

### 3. Методика выполнения лабораторной работы

1. По таблице 3.1 выбрать марки сталей для выполнения лабораторной работы.
2. Расшифровать данные марки сталей и определить их химический состав.
3. По формулам, приведенным выше определить свариваемость данных марок сталей.

Таблица 3.2

1	Сталь 12X18H10T	11	Сталь 12X2H4A	21	Ст 4
2	Сталь 09Г2С	12	Ст2	22	Сталь 30Х
3	Сталь 10	13	Сталь 20	23	Сталь 20ХН
4	Ст 3	14	Сталь 12Х17	24	Сталь 18ХГТ
5	Сталь 20Х13	15	Сталь 15Х5М	25	Сталь 16Г2АФ
6	Сталь 10Х23Н18	16	Сталь 20Х23Н13	26	Сталь 15Х25Т
7	Сталь 40Х13	17	Сталь 40Х10С2М	27	Сталь 12ХН2
8	Сталь 10ХСНД	18	Сталь 35ХГСЛ	28	Сталь 08Х18Т1
9	Сталь 40ХНМА	19	Сталь 20ХГСА	29	Сталь 45ХНМ
10	Сталь 12Г2А	20	Сталь 35	30	Сталь 40Х5МФ

#### 4. Типовые вопросы для контроля и самоконтроля студентов

1. Как влияет содержание углерода на свариваемость металлов?
2. Что такое свариваемость?
3. Назовите основные критерии свариваемости?

# **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ**

### **1. Цель работы**

Определить механическую неоднородность сварных соединений.

Для достижения поставленной цели необходимо:

1. Исследовать распределение твердости в стыковых сварных соединениях при однопроходной сварке (использовать метод измерения твердости по Роквеллу).
2. Исследовать распределение твердости в стыковых сварных соединениях при многопроходной сварке (использовать метод измерения твердости по Викерсу).
3. Используя аналитическую зависимость, существующую между пределом прочности и твердостью, определить прочность различных участков сварных соединений.

### **2. Оборудование, приборы и материалы**

1. Макрошлифы сварных соединений.
2. Прибор для измерения твердости металлов по методу Виккерса модели ТПП-2.
3. Прибор для измерения твердости металлов и сплавов по методу Роквелла модели ТК-14-250.
4. Эталоны твердости.
5. Линейка, карандаш.
6. Персональный компьютер.

### **3. Краткая характеристика объекта исследования, способов его исследования**

Поведение металлов под действием внешних нагрузок характеризуется их механическими свойствами. Характеристики механических свойств позволяют определить пределы нагрузки для каждого конкретного материала, произвести сопоставимую оценку различных материалов и осуществить контроль качества металла в заводских условиях.

К испытаниям механических свойств предъявляется ряд требований. Температурно-силовые условия проведения испытаний должны быть по возможности приближены к служебным условиям работы материалов в реальных машинах и конструкциях. Вместе с тем методы испытаний должны быть достаточно простыми и пригодными для массового контроля качества металлургической продукции.

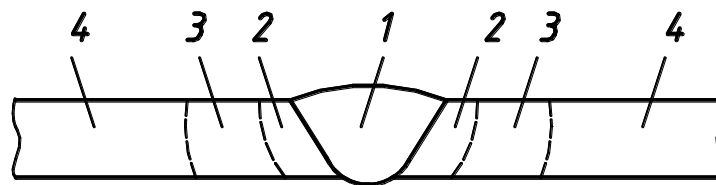
При механических испытаниях получают числовые значения механических свойств. Существует множество стандартных методов определения механических свойств металлов. Это испытания на растяжение, испытания гладких образцов на статический изгиб и надрезанных образцов на ударный изгиб, испытание на длительную прочность, определение твердости металла и др. Между твердостью металлов, определяемой способом вдавливания, и другими механическими свойствами, существует приближенная количественная зависимость:

$$\sigma_B = 3,4 \cdot HB$$

где  $\sigma_B$  – предел прочности при растяжении; HB – твердость металла по Бриннелю.

Сварные соединения должны быть по возможности равнопрочными с основным металлом элементов конструкции при всех температурах во время эксплуатации, а также при всех видах нагрузок (статических, ударных, вибрационных).

Сварное соединение в поперечном сечении имеет несколько участков, которые могут существенно различаться между собой по механическим свойствам (рис. 4.1).



*Рис. 4.1. Стыковое сварное соединение*

Это сам шов 1, околошовная зона 2, материал, который у ряда сталей претерпевает структурные превращения и может иметь повышенную твердость и прочность, зона высокого отпуска 3, в которой у термически обработанных сталей прочность и твердость понижена в результате сварочного нагрева. Далее следует зона 4, нагревшаяся до более низких температур, материал которой по-разному изменяет свои свойства, в зависимости от марки стали или сплава. В той или иной мере для всех сварных соединений характерно различие механических свойств металла в разных участках, соизмеримыми с размерами соединений, главным образом с толщиной свариваемых элементов, называемое механической неоднородностью. Сварные соединения являются несущими элементами конструкции, в которых неоднородность свойств может быть весьма значительной. При установившемся режиме сварки ширина зон и их механические свойства мало меняются по длине сварного соединения. Обычно рассматривают неоднородность свойств и чередование зон в поперечном сечении сварного соединения.

Участок сварного соединения, в котором металл имеет пониженные показатели твердости и (или) прочности по сравнению с металлом соседних участков называется мягкой прослойкой сварного соединения.

Участок сварного соединения, в котором металл имеет повышенные показатели твердости и (или) прочности по сравнению с металлом соседних участков называется твердой прослойкой сварного соединения.

#### 4. Методика выполнения лабораторной работы

1. Самостоятельно осуществить предварительную подготовку отчета с необходимыми формами таблиц и графиков.
2. Изучить характеристику объекта исследования, способы его исследования, используя методические указания, конспект лекций и предлагаемую литературу.
3. Пройти инструктаж по технике безопасности проведения лабораторной работы.
4. Получить допуск к выполнению лабораторной работы.
5. Ознакомиться с оборудованием и измерительными приборами, применяемыми для исследований.
6. Ознакомиться с требованиями к уровню достоверности и повторяемости результатов измерений, изложенными в пункте 4. Определить абсолютную и относительную погрешность измерения приборов.
7. Подготовить образцы сварных соединений для измерения твердости по схемам, представленным на рисунке 4.2. Сделать эскизы сварных соединений с координатной сеткой.

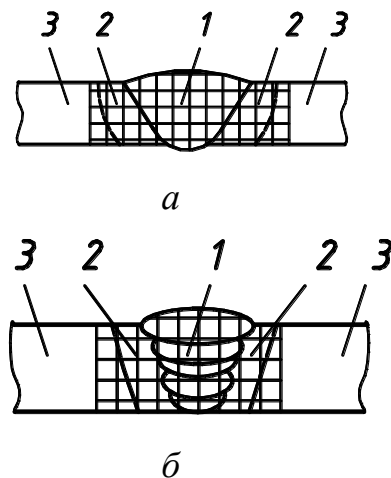


Рис. 4.2. Макрошлифы сварных соединений с координатной сеткой  
(1 – шов; 2 – ЗТВ; 3 – основной металл):

- а* – сварка проводилась за один проход (размер ячеек 2×2 мм);  
*б* – сварка проводилась за несколько проходов (размер ячеек 3×3 мм)

8. Измерить твердость в сварных соединениях. Перевести значения твердости по Виккерсу (HV) и Роквеллу (HRA) в значения твердости по Бриннелю (HB), (использовать таблицу 1, приложения А). Данные занести в таблицу.

9. Используя вычислительные пакеты *Mathcad*, *Matlab* или приложение *Microsoft Excel* построить графики распределения твердости в каждом из рядов координатной сетки (данные представить в распечатанном виде). По экспериментальным данным получить математическую модель распределения твердости по оси многослойного сварного соединения.

10. Применяя аналитическую зависимость (1), существующую между пределом прочности и твердостью, определить прочность различных участков сварных соединений. Данные занести в таблицу.

11. Построить трехмерные графические модели механической неоднородности в сварных соединениях (данные представить в распечатанном виде).

12. По полученным экспериментальным данным сделать выводы.

13. Ответить на типовые вопросы для контроля и самоконтроля.

14. Оформить отчет в соответствии с требованиями и представить его для защиты преподавателю.

#### **5. Типовые вопросы для контроля и самоконтроля студентов**

1. Что называется мягкой прослойкой?

2. Что такое твердая прослойка?

3. В результате чего появляется мягкая и твердая прослойка?

4. Представляет ли опасность мягкая прослойка?

5. Какие показатели характеризуют механические свойства сварных соединений?

6. Назовите причины возникновения механической неоднородности сварных соединений.

7. Перечислите способы и методы уменьшения механической неоднородности сварных соединений.

# **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5**

## **ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ**

### **1. Цель работы**

Целью работы является определение влияния термической обработки на механическую неоднородность свойств по зонам сварного соединения.

Для достижения поставленной цели необходимо:

1. Определить твердость в поперечном сечении стыковых сварных соединениях.
2. Произвести термическую обработку сварного соединения.
3. Выявить закономерность изменения механических свойств сварного соединения после термической обработки.

### **2. Оборудование, приборы и материалы**

1. Макрошлифы сварных соединений.
2. Прибор для измерения твердости металлов и сплавов по методу Роквелла модели ТК-14-250.
3. Эталоны твердости.
4. Электродпечь сопротивления камерная лабораторная СНОЛ-1,6.2,5.1/11-И2.
5. Линейка, карандаш.
6. Персональный компьютер.

### **3. Краткая характеристика объекта исследования**

Соединения, выполняемые сваркой плавлением, характеризуются рядом особенностей, заключающихся в неоднородности структуры и свойств металла зон и высоком уровне остаточных напряжений. Главным назначением термической обработки является устранение, особенно при нарушении оптимальных режимов, отрицательных последствий сварки. Это в первую очередь относится к необходимости снятия наклепа и эффекта деформационного старения в зонах концентрации напряжений, устранения хрупких закалочных структур в околошовной зоне и шве, повышения их пластичности за счет завершения процессов дисперсионного твердения, релаксации остаточных сварочных напряжений.

Известно, что повреждения сварных соединений вызваны комплексным действием трех факторов – конструктивных, технологических и эксплуатационных и в том числе:

- наличием концентраторов напряжений (конструктивных дефектов – неудовлетворительной формы сварного изделия; технологических дефектов – трещины, шлаковые включения, поры, подрезы и др.);

- высоким уровнем напряжений (остаточных сварочных; рабочих напряжений, обусловленных давлением рабочей среды, массовыми нагрузками, температурным и коррозионным воздействием и др.);

- неудовлетворительными свойствами сварного соединения (наличие хрупких и малопрочных прослоек металла).

Повреждение сварных соединений носят локальный характер и могут происходить по хрупкой прослойке в околошовной зоне, по мягкой разупрочненной прослойке в ЗТВ или шве, а также из-за трещин усталости и хладноломкости по зонам сварного соединения.

Термическая обработка сварных соединений проводится для улучшения структуры и свойств, снижения (релаксации) остаточных напряжений, удаления диффузионного водорода.

Конкретные вопросы в эффективности термической обработки должны решаться исходя из условий работы сварных соединений.

На практике применяются главным образом три вида термической обработки: высокий отпуск, аустенизация и нормализация. Наиболее часто используемым видом термической обработки является высокий отпуск.

Высокий отпуск заключается в нагреве сварного соединения до температуры несколько ниже критической точки  $A_{c1}$  (на 20-300С), продолжительной выдержке при этой температуре от одного до нескольких часов и последующем медленном охлаждении.

#### **4. Методика выполнения лабораторной работы**

1. Самостоятельно осуществить предварительную подготовку отчета с необходимыми формами таблиц и графиков.

2. Изучить характеристику объекта исследования, используя методические указания, конспект лекций и предлагаемую литературу.

3. Пройти инструктаж по технике безопасности проведения лабораторной работы.

4. Получить допуск к выполнению лабораторной работы.

5. Ознакомиться с оборудованием и измерительными приборами, применяемыми для исследований.

6. Подготовить образцы сварных соединений для измерения твердости по схеме, представленной на рисунке 5.1. Сделать эскизы сварных соединений с координатной сеткой.



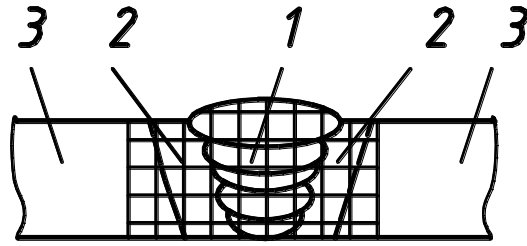


Рис. 5.1. Макрошлифы сварных соединений с координатной сеткой (размер ячеек  $2 \times 2$  мм): 1 – шов; 2 – ЗТВ; 3 – основной металл

7. Измерить твердость в сварных соединениях. Данные занести в таблицу.
8. Произвести отпуск сварных соединений.
9. Измерить твердость в сварных соединениях после термообработки. Данные занести в таблицу.
10. Оценить равнопрочность сварного соединения до и после термообработки. При этом использовать следующее выражение:

$$R = \frac{HRA_{max} - HRA_{min}}{HRA_{max}} \cdot 100\% ,$$

где  $HRA_{max}$  – максимальное значение твердости в сварном соединении;  $HRA_{min}$  – минимальное значение твердости в сварном соединении.

11. Построить графики распределения твердости в каждом из рядов координатной сетки до и после термообработки (данные представить в распечатанном виде).
12. Построить трехмерные графические модели механической неоднородности в сварных соединениях до и после термообработки (данные представить в распечатанном виде).
13. По полученным экспериментальным данным сделать выводы.
14. Ответить на типовые вопросы для контроля и самоконтроля.
15. Оформить отчет в соответствии с требованиями и представить его для защиты преподавателю.

## 5. Схема лабораторной установки и схема проведения опыта

### 5.1 Измерение твердости вдавливанием конуса или шарика (твердость по Роквеллу)

При испытании на твердость по методу Роквелла в поверхность материала вдавливаются алмазный конус с углом при вершине  $120^\circ$  или стальной шарик

диаметром 1,588 мм. Согласно этому методу, за условную меру твердости принимается глубина отпечатка. Схема испытания по методу Роквелла показана на рис. 5.2. Вначале прикладывается основная нагрузка  $P_0$ , под действием которой индентор вдавливается на глубину  $h_0$ . Затем прикладывается основная нагрузка  $P_1$ , под действием которой индентор вдавливается на глубину  $h_1$ . После этого снимают нагрузку  $P_1$ , но оставляют предварительную нагрузку  $P_0$ . При этом под действием упругой деформации индентор поднимается вверх, но не достигает уровня  $h_0$ . Разность  $(h - h_0)$  зависит от твердости материала: чем тверже материал, тем меньше эта разность. Глубина отпечатка измеряется индикатором часового типа. Число твердости, определяемое методом Роквелла, обозначается символом HR. Однако в зависимости от формы индентора и значений нагрузок вдавливания к этому символу добавляется буква А, В или С, обозначающая соответствующую шкалу измерений. Обозначение твердости и значение нагрузок вдавливания для разных шкал измерений методом Роквелла приведены в таблице 5.1.

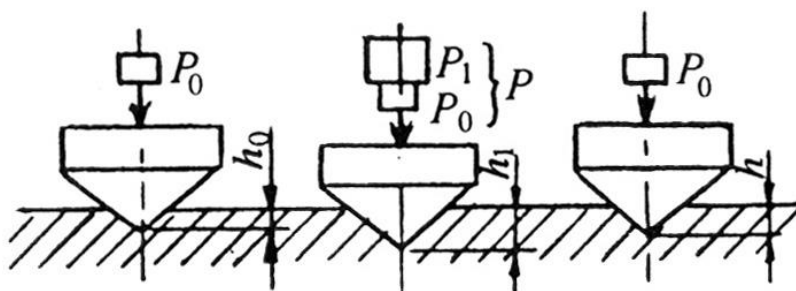


Рис. 5.2. Схема испытаний на твердость по Роквеллу

Таблица 5.1

Обозначение твердости и значение нагрузок вдавливания для разных шкал измерений методом Роквелла

Шкала	А	В	С
Индентор	Алмазный конус	Стальной шарик	Алмазный конус
Обозначение твердости	<i>HRA</i>	<i>HRB</i>	<i>HRC</i>
Нагрузки вдавливания, Н:			
$P_0$	98,1	98,1	98,1
$P_1$	490,5	882,9	1373,4
$P$	588,6	981	1457,5

## 6.2 Оборудование для проведения термической обработки сварных соединений

Для термической обработки сварных соединений в данной работе применяется электропечь сопротивления камерная лабораторная СНОЛ-1,6.2,5.1/11-И2 (рис. 5.3).

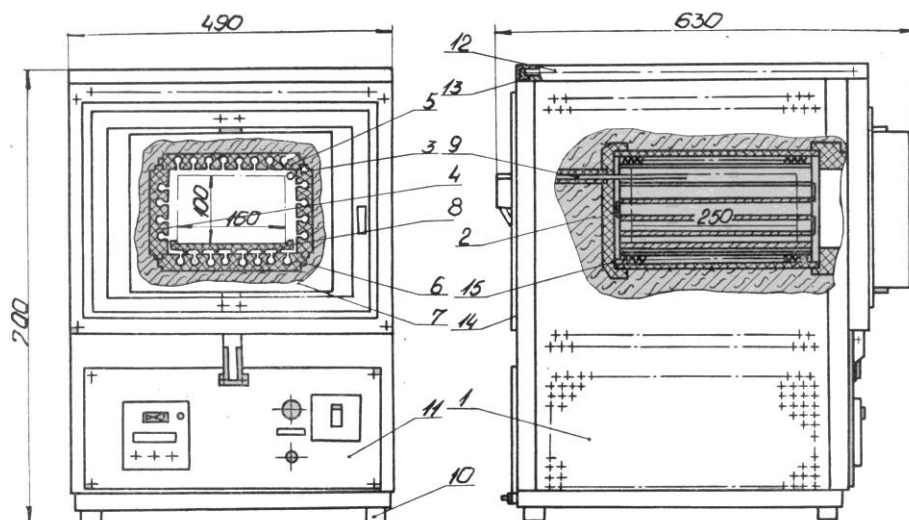


Рис. 5.3. Электропечь сопротивления камерная лабораторная СНОЛ-1,6.2,5.1/11-И2:

1 – корпус; 2 – теплоизоляция; 3 – правый нагреватель; 4 – левый нагреватель;  
5 – верхний нагреватель; 6 – нижний нагреватель; 7 – дверца; 8 – подовая плита;  
9 – термоэлектрический преобразователь; 10 – опора; 11 – электрический блок;  
12 – верхний щит; 14 – задний лист; 15 – задняя плита

Электропечь сопротивления камерная лабораторная СНОЛ-1,6.2,5.1/11-И2 предназначена для проведения термической обработки материалов и аналитических работ в стационарных условиях при температуре до 1100°C.

Перед работой с электропечью необходимо убедиться в ее исправности, правильном подключении к электросети и контуру заземления.

Порядок работы:

1. Установить загрузку на керамическую подовую плиту.
2. Закрыть дверцу электропечи.
3. С помощью указателя-задатчика на шкале электронного регулятора, руководствуясь инструкцией на него, установить необходимую температуру.
4. Включить электропечь автоматическим выключателем, при этом загорится лампа «Сеть».
5. Для визуального наблюдения за загрузкой или ввода контрольного термоэлектрического преобразователя в дверце имеется отверстие.
6. При открывании дверцы печь автоматически отключается.

**6. Формы таблиц, рекомендуемых для записи измеряемых свойств объекта исследования**

Таблица 5.2

Значения твердости в различных участках сварного соединения

Ряд	Твердость ( <i>HRA</i> ) до/после термообработки												
	Плоскости												
1													
2													
3													
...													
n-1													
n													

Примечание: Плоскость (0) соответствует середине шва.

**7. Типовые вопросы для контроля и самоконтроля студентов**

1. Какие причины вызывают повреждение сварных соединений?
2. Как влияет термическая обработка на механические свойства и неравнопрочность сварных соединений?
3. В чем заключается высокий отпуск?
4. Для чего применяется термическая обработка сварных соединений?
5. Назовите причины возникновения механической неоднородности сварных соединений.
6. Перечислите способы и методы уменьшения механической неоднородности сварных соединений.

### Список литературы

1. Теория сварочных процессов: Учебник для вузов / А.В. Коновалов, А.С. Куркин, Э.Л. Неровный, Б.Ф. Якушин; Под ред. В.М. Неровного. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 752 с.
2. Технология и оборудование сварки плавлением и термической резки: Учебник для вузов. – 2-е изд., испр. и доп. / А.И. Акулов, В.П. Алехин, С.И. Ермаков и др. / Под ред. А.И. Акулова. – М: Машиностроение, 2003. – 560 с.
3. Справочник «Сварка. Резка. Контроль» в 2-х томах / Под общ. ред. Н.П. Алёшина, Г.Г. Чернышева, М.: Машиностроение, т.1, 2004. – 624 с.
4. Чернышев Г.Г. Сварочное дело: Сварка и резка металлов. – М.: издательский центр «Академия», 2007. – 496 с.
5. Технология и оборудование газовой сварки и резки металлов: учебное пособие / В.Т. Федько, В.И. Васильев, Е.А. Зернин, С.А. Солодский, С.Б. Сапожков – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 252 с.