

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Оборудование и технология сварочного производства»

ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СВАРОЧНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

*Методические рекомендации к лабораторным работам
для студентов специальности 1-36 80 02
«Инновационные технологии в машиностроении»
очной и заочной форм обучения*



Могилев 2020

УДК 621.791:004
ББК 30.61:32.973
Ц75

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Оборудование и технология сварочного производства» «20» марта 2020 г., протокол № 8

Составитель канд. техн. наук, доц. А. О. Коротеев

Рецензент канд. техн. наук, доц. А. М. Кургузиков

Методические рекомендации к лабораторным работам по дисциплине «Цифровые технологии в сварочном производстве» предназначены для студентов специальности 1-36 80 02 «Инновационные технологии в машиностроении».

Учебно-методическое издание

ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СВАРОЧНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Ответственный за выпуск	А. О. Коротеев
Корректор	А. А. Подошевка
Компьютерная верстка	Е. В. Ковалевская

Подписано в печать 24.04.2020. Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. 2,09. Уч.-изд. л. 2,19. Тираж 21 экз. Заказ № 184.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03.2019.
Пр-т Мира, 43, 212022, Могилев.

© Белорусско-Российский
университет, 2020

Содержание

1 Лабораторная работа № 1. Изучение особенностей технологии СМТ (Cold Metal Transfer) FRONIUS.....	4
2 Лабораторная работа № 2. Изучение особенностей технологии Q-Set ESAB.....	7
3 Лабораторная работа № 3. Изучение особенностей технологии STT LINCOLN ELECTRIC.....	11
4 Лабораторная работа № 4. Изучение особенностей технологии Wise Penetration KEMPPİ.....	19
5 Лабораторная работа № 5. Изучение особенностей технологии Wise ROOT KEMPPİ.....	22
6 Лабораторная работа № 6. Изучение технологии аддитивной наплавки на базе СМТ и СМТ Advanced FRONIUS с использованием роботизированного комплекса Fanuc.....	26
7 Правила техники безопасности при проведении лабораторных работ.....	32
8 Действия на случай возникновения загорания, пожара.....	33
9 Действия на случай других аварийных ситуаций.....	34
Список литературы.....	35

1 Лабораторная работа № 1. Изучение особенностей технологии CMT (Cold Metal Transfer) FRONIUS

Цель работы: изучить особенности технологии сварки с применением системы управляемого переноса электродного металла CMT (Cold Metal Transfer) FRONIUS.

1.1 Общие теоретические сведения

Одним из наиболее динамично развивающихся направлений развития сварочных технологий является реализация механизмов управления переносом электродного металла при дуговой сварке в среде защитных газов плавящимся электродом. Создание инверторных источников питания позволило управлять процессом сварки на больших частотах.

Одной из революционных технологий в этом направлении является технология CMT (Cold Metal Transfer) разработанная компанией FRONIUS. Эта технология известна также в буквальном переводе как технология сварки с «холодным переносом металла». Ее применение относится к области переноса электродного металла короткими замыканиями, т. к. в этом случае процесс лучше всего контролируется системами цифрового управления источником питания [1].

В отличие от традиционных способов сварки, процесс характеризуется пониженным тепловложением в основной металл, что обусловлено снижением значения силы сварочного тока в момент короткого замыкания и касания капли поверхности жидкой сварочной ванны, фактически до нуля (ток полностью отключается). Этот момент синхронизирован с реверсивным движением проволоки в обратном направлении, что вызывает появление эффекта «стряхивания» капли в расплавленный металл ванны за счет силы инерции и массы самой капли (рисунок 1.1).

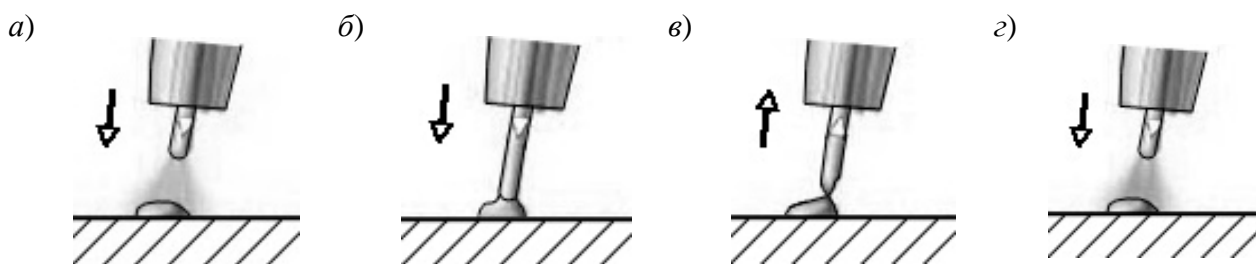


Рисунок 1.1 – Установка для сварки плавлением с использованием технологии CMT

Затем значение силы сварочного тока вновь возрастает до заданного значения, что способствует горению дуги необходимой мощности, а проволока вновь продолжает движение в направлении свариваемого изделия. Так как основное количество брызг при сварке образуется, как правило, при отделении капли от сварочной проволоки из-за перегрева и взрыва перемычки жидкого металла, обладающей малым сечением и большим кратковременным

сопротивлением, то в случае применения технологии СМТ в связи с уменьшением значения силы тока взрыва перемишки и выброса большого количества расплавленного металла удастся избежать. Кроме того, выключение тока в момент перехода капли металла в сварочную ванну способствует снижению тепловложения в основной металл, что благоприятно сказывается на уменьшении деформаций изделия.

Ключевым механизмом реализации такой технологии является система управления источником питания. Это обусловлено необходимостью синхронизации реверсивных движений проволоки и процессом образования капель расплавленного электродного металла, их переходами в сварочную ванну. В момент короткого замыкания система реагирует на падение напряжения и снижает значение силы сварочного тока до минимума, параллельно подавая импульс на механизм подачи проволоки [1].

Эффективность применения СМТ-процесса при наплавке связана с тем, что за счет низкой температуры сварочной ванны перемешивание основного и электродного металла значительно меньше, чем при наплавке с применением классического MIG-/MAG-оборудования. При этом изменения металлургической структуры, химического состава, а следовательно, и эксплуатационных свойств наплавленного слоя минимальны. Это позволяет осуществлять наплавку меньшего количества слоев и в некоторых случаях отказаться от использования буферных или промежуточных слоев. Таким образом сокращение длительности операции наплавки и расхода проволоки может достигать 50 %. Гибкость СМТ-установок обеспечивается за счет модульной компоновки. Оборудование позволяет выполнять сварку не только по системе СМТ, но и по стандартной технологии MIG/MAG или сварки в импульсном режиме. Кроме того, экономия достигается за счет отсутствия потерь подачи защитного газа к сварочной горелке, автоматического отключения блока охлаждения, низкого потребления мощности на холостом ходу. Основные области применения СМТ-сварки – это автомобильная, аэрокосмическая промышленность, изготовление металлических емкостей и порталных металлоконструкций, энергетического оборудования (котельных агрегатов, теплообменников), производство комплектующих и т. д.

1.2 Оборудование, приборы и материалы

1.2.1 Сварочный полуавтомат FRONIUS TransPuls Synergic 3200 с роботом Fanuc и системой СМТ.

1.2.2 Комплект ручного инструмента.

1.2.3 Весы.

1.2.4 Образцы тонколистового металла для сварки.

1.3 Порядок проведения работы

1.3.1 Подготовить два комплекта выданных образцов в виде пластин тонколистового материала к сварке. Зачистить кромки свариваемых деталей при помощи абразивных материалов с использованием шлифовальной машинки на ширину 20 мм в обе стороны. Проверить качество подготовки поверхностей, в случае необходимости исправить имеющиеся дефекты.

1.3.2 Осуществить прихватку деталей (для лучшего формирования сварного соединения необходимо использовать выводные планки, на которых происходит зажигание дуги и окончание процесса сварки). Тип сварного соединения С2. Зазор отрегулировать равномерным по величине согласно ГОСТ 14771–76.

1.3.3 Взвесить прихваченные заготовки и определить их массу до сварки. Данные занести в отчет.

1.3.4 Изучить порядок настройки значений параметра режима сварки. Произвести настройку робота для выполнения прямолинейного шва вдоль кромок свариваемых деталей.

1.3.5 Выполнить сварку соединений с использованием системы СМТ и традиционной технологии. В процессе сварки необходимо зафиксировать время сварки и скорость подачи проволоки.

1.3.6 Рассчитать массу расплавленного металла через объем расплавленной проволоки (зная время сварки и скорость подачи проволоки, его можно определить). Её плотность принять равной 7,8 г/см³.

1.3.7 Взвесить на весах сваренные соединения. Разность в массе деталей до сварки и после неё будет являться массой наплавленного металла. Разницей между массами наплавленного и расплавленного металлов будет являться масса потерь на разбрызгивание и угар. Определить коэффициент потерь через отношение

$$\psi = \frac{G_p - G_n}{G_p} \cdot 100,$$

где G_p – масса расплавленного металла, г;

G_n – масса наплавленного металла, г;

ψ – коэффициент потерь электродного металла, %.

1.3.8 Проанализировать величину деформаций деталей после сварки. Сделать соответствующие выводы и занести информацию в отчет.

1.4 Содержание отчета

1.4.1 Цель работы.

1.4.2 Оборудование и материалы.

1.4.3 Таблица с данными.

1.4.4 Выводы по работе.

Контрольные вопросы

- 1 Каков принцип работы системы СМТ?
- 2 Преимущества и недостатки технологии СМТ? Области её эффективного применения?
- 3 Состав и основные узлы установки для роботизированной сварки.

2 Лабораторная работа № 2. Изучение особенностей технологии Q-Set ESAB

Цель работы: изучить особенности технологии сварки в защитных газах плавящимся электродом с использованием системы ESAB Q-Set.

2.1 Общие теоретические сведения

Одной из современных технологий управления процессом дуговой сварки в среде защитных газов является технология Q-Set фирмы ESAB. Технология является достаточно распространенной, в то же время принципы её работы для многих специалистов сварочного производства остаются неизученными. Сущность работы технологии заключается в следующем: технология относится, как и большинство существующих на сегодняшний день, к области сварки с короткими замыканиями дугового промежутка. При таком способе переноса электродного металла процесс наиболее стабилен и управляем. При этом, с точки зрения стабильности технологии, отношение времени короткого замыкания к времени горения дуги должно вписываться в достаточно узкий диапазон оптимальных значений. Если система управления процессом обеспечивает это нужное соотношение, то процесс сварки становится максимально эффективным и характеризуется минимальными потерями электродного металла на разбрызгивание [2].

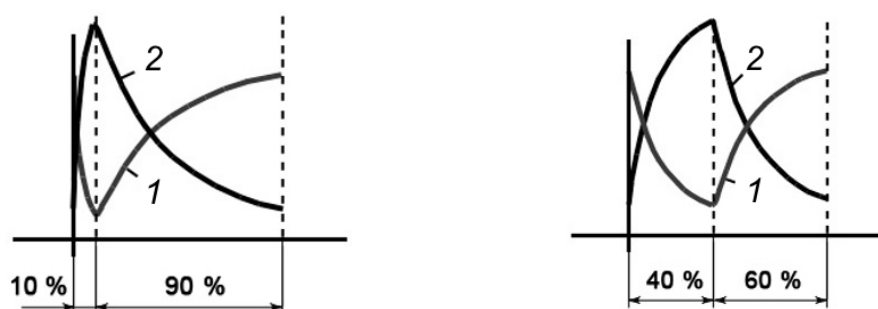
Сущность функции Q-Set заключается в постоянном измерении и контроле требуемого времени короткого замыкания и корректировке значения напряжения на дуге (т. е. функция выполняет активное управление процессом в реальном времени). Напряжение на дуге, как правило, определяет длину дуги и оказывает непосредственное воздействие на длительность короткого замыкания при сварке.

Для оптимизации процесса с использованием рассматриваемой технологии сварщику необходимо провести пробную сварку, выбрав из всех параметров только силу сварочного тока. В процессе сварки и работы системы Q-Set оборудование стабилизирует процесс корректировкой значения напряжения. Как правило это происходит достаточно быстро и для настройки оборудования достаточно выполнить несколько сантиметров длины пробного шва. В случае, если во время стабильного процесса сварки увеличилась скорость подачи проволоки или произошли какие-либо другие воздействия, приводящие к повышению времени фазы короткого замыкания и, таким образом, нарушению

отношения времени короткого замыкания к времени горения дуги, система управления среагирует на это увеличением средней величины напряжения, что опять приведет данное соотношение в область оптимальных значений [2].

Таким образом, система работает не только как настройка параметров на оптимальное соотношение, что может быть произведено и вручную опытным сварщиком, но и как система поддержания стабильности в процессе сварки.

Функция Q-Set может также использоваться для регулировки мощности дуги и особенностей её горения. Для этого можно изменять соотношение длительностей короткого замыкания и горения дуги (рисунок 2.1).



1 – кривая изменения силы сварочного тока; 2 – кривая изменения напряжения

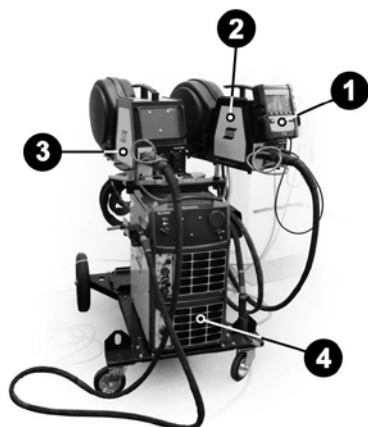
Рисунок 2.1 – Регулировка соотношения длительности короткого замыкания и горения дуги

Это позволяет в некотором диапазоне изменять тепловложение в основной материал за счет изменения времени горения дуги.

В лабораторной работе используется сварочное оборудованием ESAB Mig U5000i WeldCloud. Основные технические характеристики источника питания представлены в таблице 2.1. Внешний вид оборудования представлен на рисунке 2.2. Внешний вид панели управления Aristo U82 представлен на рисунке 2.3.

Для дуговой сварки плавящимся электродом в среде защитного газа MIG-/MAG-источник питания комплектуется блоками подачи проволоки Feed 3004 или Feed 4804, которые содержат четырехроликовые механизмы подачи проволоки, а также электронную схему управления. Источник питания Mig U5000i WeldCloud работает совместно с панелью управления Aristo U8₂ и поставляется с блоком управления, который позволяет осуществлять беспроводной мониторинг.

Если устройство дистанционного управления подключено, источник питания и блок подачи проволоки находятся в режиме дистанционного управления; все кнопки и регуляторы заблокированы. Регулировку всех функций можно выполнить только при помощи пульта дистанционного управления.



1 – панель управления ESAB Aristo U82;
2 – первый подающий механизм Feed 4804 PSF 510W;
3 – второй подающий механизм Feed 3004 PSF 410 W;
4 – источник питания Mig U5000i

Рисунок 2.2 – Внешний вид сварочного оборудования ESAB Mig U5000i WeldCloud



1 – разъем для USB-накопителя;
2 – рукоятка перемещения курсора;
3 – дисплей; 4 – программные кнопки;
5 – кнопка меню; 6 – кнопка ввода;
7 – рукоятка увеличения и уменьшения заданных значений и настройки напряжения;
8 – рукоятка увеличения и уменьшения заданных значений и настройки скорости подачи проволоки

Рисунок 2.3 – Панель управления Aristo U82

Таблица 2.1 – Технические характеристики источника питания ESAB Mig U5000i WeldCloud

Показатель	Значение
Напряжение питания	400 В ± 10 %, 3~ 50/60 Гц
Первичный ток I _{max} (MIG/MAG)	33 А
Питание без нагрузки в режиме энергосбережения, который включается через 6,5 мин после сварки	
MIG (GTAW/GMAW)	45 Вт
Диапазон напряжения/тока MIG/MAG (GMAW)	8...60 В / 16...500 А
Допустимая нагрузка при сварке MIG/MAG (GMAW):	
Коэффициент нагрузки 60 %	500 А / 39 В
Коэффициент нагрузки 100 %	400 А / 34 В
Коэффициент мощности при максимальном токе I ₂ MIG	0,90
Коэффициент нагрузки 60 %	500 А / 39 В
Коэффициент нагрузки 100 %	400 А / 34 В
Коэффициент мощности при максимальном токе I ₂ MIG	0,90
КПД при максимальном токе I ₂ MIG	83 %

Окончание таблицы 2.1

Показатель	Значение
Напряжение холостого хода U_0 max	
MIG/MAG (GMAW) без функции VRD	72...88 В
Функция VRD активирована	< 35 В
Рабочая температура	от –10 до +40 °С
Размеры (Д × Ш × В) с блоком охлаждения	625 × 394 × 776 мм
Класс изоляции трансформатора	Н
Класс защиты корпуса	IP23
Вес без блока охлаждения / с блоком охлаждения	82 кг / 102 кг

2.2 Оборудование, приборы и материалы

2.2.1 Пост для механизированной сварки в защитных газах со сварочным полуавтоматом.

2.2.2 Баллоны с углекислым газом.

2.2.3 Электродная проволока Св-08Г2С, Св-08ГС.

2.2.4 Защитные щитки.

2.2.5 Образцы: пластины из низкоуглеродистой стали размером 30 × 10 × 100.

2.2.6 Набор слесарного инструмента.

2.3 Порядок проведения работы

2.3.1 Подготовить два комплекта выданных образцов в виде пластин листового материала (толщина 10...16 мм) к сварке. Зачистить кромки свариваемых деталей при помощи абразивных материалов с использованием шлифовальной машинки на ширину 20 мм в обе стороны. Проверить качество подготовки поверхностей, в случае необходимости исправить имеющиеся дефекты.

2.3.2 Осуществить прихватку деталей (для лучшего формирования сварного соединения необходимо использовать выводные планки, на которых происходит зажигание дуги и окончание процесса сварки). Тип сварного соединения С17. Зазор отрегулировать равномерным по величине согласно ГОСТ 14771–76.

2.3.3 Изучить порядок настройки значений параметров режима сварки. Выполнить сварку соединений с использованием системы ESAB Q-Set. В процессе сварки обратить внимание на стабильность горения дуги. Во время сварки рекомендуется изменять условия горения дуги, например, увеличением вылета электродной проволоки, угла наклона горелки и т. д., и обратить внимание на корректирующие действия источника питания.

2.3.4 Сделать выводы. Информацию занести в отчет.

2.4 Содержание отчета

2.4.1 Цель работы.

2.4.2 Оборудование и материалы.

2.4.3 Таблица со значениями параметров режима сварки.

2.4.4 Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1 Какова основная идея технологии ESAB Q-Set?

2 Каков принцип работы и основные элементы панели ESAB U82?

3 Как производится настройка оборудования и выбор значений параметров режима сварки?

4 Каковы основные достоинства и область применения технологии ESAB Q-Set?

3 Лабораторная работа № 3. Изучение особенностей технологии STT LINCOLN ELECTRIC

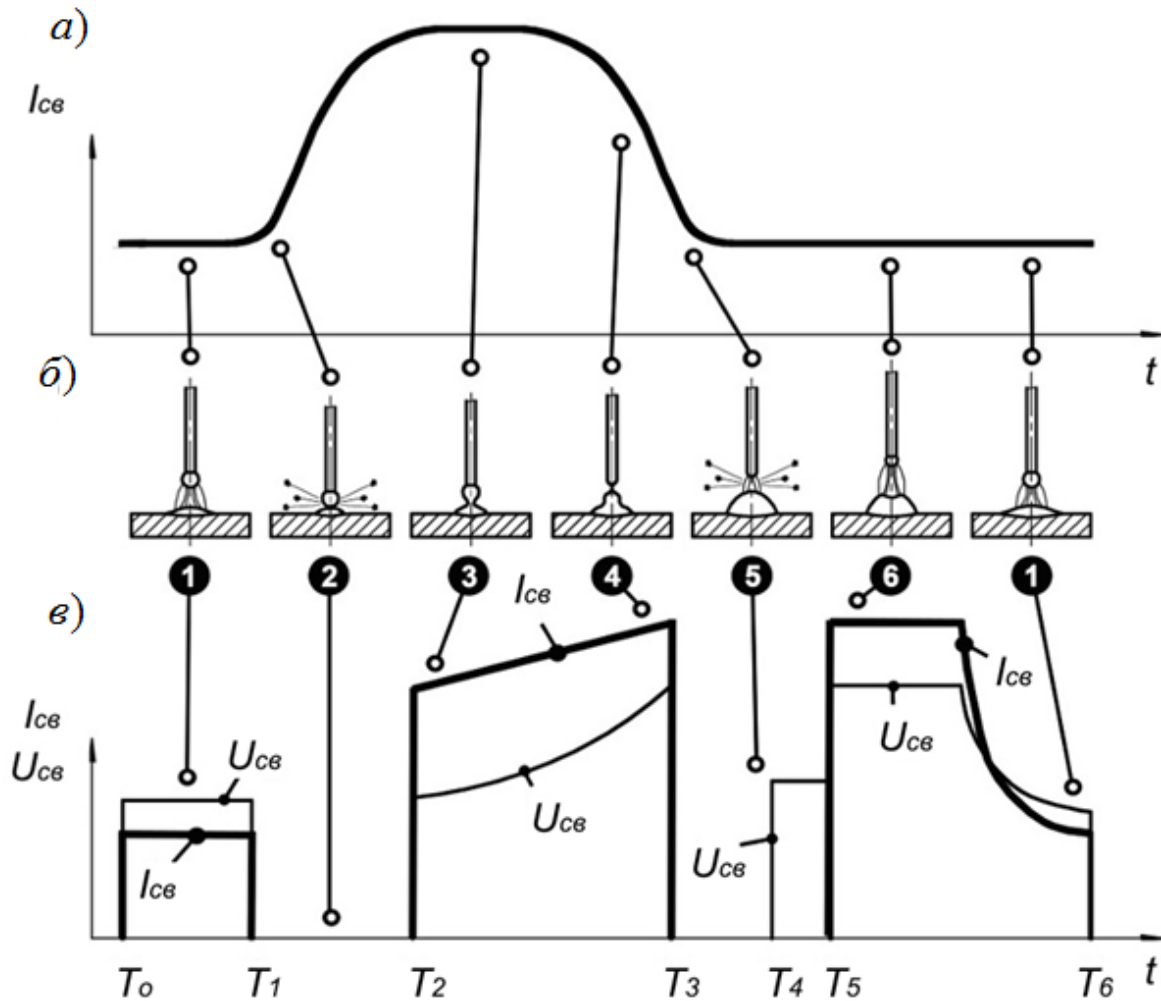
Цель работы: ознакомиться с сущностью технологии; изучить принцип работы источника питания для сварки, основные преимущества и область применения способа.

3.1 Общие теоретические сведения

Технология STT относится к процессам сварки в среде защитных газов с переносом электродного металла короткими замыканиями, т. е. на относительно небольших значениях силы сварочного тока и напряжения на дуге. Вместе с тем существует важное и принципиальное отличие, возможность прямого управления процессом, обеспечиваемая быстродействующей инверторной схемой источника питания, специальным электронным микропроцессорным модулем, принудительно задающим необходимый уровень сварочного тока и контуром обратной связи, динамично отслеживающим изменения напряжения на дуге. В течение цикла переноса капли расплавленного металла в сварочную ванну величина сварочного тока жестко зависит от фазы формирования и перехода последней. Идентификация фазы переноса осуществляется за счет обработки величины напряжения, постоянно снимаемого с дугового промежутка.

Рассмотрим подробнее влияние основных параметров сварочного режима на процессы, происходящие в дуговом промежутке. Как уже было отмечено, перенос наплавляемого металла происходит сериями коротких замыканий. На рисунке 3.1 представлены диаграммы кривых тока и напряжения, характерные для традиционного полуавтомата и источника STT.

Каждое замыкание проволоки в сварочную ванну – цикл переноса – удобно разбить на несколько характерных этапов.



1 – стадия горения дуги; 2 – стадия касания поверхности сварочной ванны каплей расплавленного металла; 3, 4 – короткое замыкание; 5 – обрыв жидкой перемычки; 6 – повторное зажигание дуги

Рисунок 3.1 – Стадии переноса одной капли электродного металла (б) и изменение силы тока при неуправляемом (а) и управляемом (в) переносах по системе STT

Подготовка капли ($T_7 - T_0 - T_1$). Этап действия базового тока на уровне 50...100 А и подготовка капли расплавленного металла присадочной проволоки к моменту короткого замыкания с поверхностью сварочной ванны. На этом этапе под действием сил поверхностного натяжения форма капли приближается к сферической, создавая тем самым благоприятные условия для плавного объединения с жидким металлом ванны.

Управление величиной базового тока несет в себе две основные функции: во-первых, он должен обеспечить электрическую сварочную дугу необходимым количеством энергии, достаточным для преодоления потерь на излучение и поддержание определенного объема расплавленной на конце электрода капли. Если базовый ток слишком мал, это приводит к кристаллизации верхней части капли и уменьшению ее объема. Более того, это может привести даже к полной кристаллизации капли и, как следствие, к нестабильности всего процесса и

утыканиям проволоки в дно сварочной ванны. Во-вторых, от уровня базового тока зависит степень общего разогрева свариваемого изделия.

Действие базового тока схоже с влиянием напряжения на дуге при обычной полуавтоматической сварке. При повышении обоих параметров сварной шов теряет выпуклость, приобретает более низкую и плавную форму профиля. Это происходит за счет увеличения зоны разогрева дугой и повышения жидкотекучести металла.

Однако повышение величины базового тока более 120 А приводит к значительному росту разбрызгивания, что связано с перегревом перемычки жидкого металла в момент перехода капли в сварочную ванну.

Оптимальная величина базового тока зависит от типа защитного газа (понижается с переходом на смеси аргона), материала, диаметра и скорости подачи сварочной проволоки. Установка оптимального для тех или иных условий базового тока в процессе работы, а именно его соответствие заданной скорости подачи проволоки, имеет принципиальное значение для качества всего соединения.

Начальный период короткого замыкания ($T_1 - T_2$). В момент времени T_1 происходит короткое замыкание капли на сварочную ванну. Если при этом величина сварочного тока составляет 150...200 А, как в случае с обычным традиционным процессом, капля мгновенно отрывается, разрушаясь и разлетаясь в стороны, что приводит к росту разбрызгивания. Кроме того, ток такой величины, пытаясь пройти через узкую перемычку, образовавшуюся между каплей и ванной, приводит к выплеску жидкого металла за пределы зоны сварки.

При действии источника STT образование контакта происходит при значительно более низком уровне сварочного (базового) тока, что исключает эти негативные явления. Капля спокойно «залипает» на сварочную ванну, образуя пятно контакта. Датчик контура обратной связи источника питания Invertec STT в момент T_1 подает микропроцессору сигнал о возникновении короткого замыкания (напряжение упало до значения, близкого к нулю), источник понижает ток с базового уровня до 10 А на время 0,75 мс. В течение этого времени происходит развитие пятна контакта, переход большей части капли в сварочную ванну и образуется надежная перемычка между ванной и электродной проволокой [3].

Стадия пинч-эффекта ($T_2 - T_3$). Пинч-эффектом называют возникновение вокруг электрического проводника центростремительных сжимающих сил, пропорциональных квадрату протекающего по проводнику тока. Этот эффект присутствует в сварочном контуре всегда, когда сварочный ток не равен нулю. Однако только на рассматриваемом этапе влияние пинч-эффекта на перенос наплавляемого металла в сварочную ванну имеет принципиальное значение. По истечении времени действия начального периода короткого замыкания (0,75 мс, момент T_2) микропроцессор резко повышает величину сварочного тока. На этой короткой первой стадии происходит стремительный рост электромагнитных сил осесимметричного сжатия жидкой перемычки и образование на ней шейки. Уровень, до которого источник повышает ток на первой стадии, зависит от диаметра применяемой проволоки (повышается с увеличением диаметра) и устанавливается сварщиком с помощью

двухпозиционного тумблера на лицевой панели аппарата. На второй стадии пинч-эффекта повышение сварочного тока происходит значительно более плавно. Источник «готовится» к моменту разрушения шейки и отделения капли от электродной проволоки. Необходимо отметить, что во время короткого замыкания напряжение между электродной проволокой и сварочной ванной не равно нулю, поскольку при температуре плавления ($1550\text{ }^{\circ}\text{C}$) металл имеет высокое электрическое сопротивление. Образование шейки связано с уменьшением поперечного сечения перемычки и ростом электрического сопротивления этого участка проводника. На этой стадии снова вступает в действие контур обратной связи, снабжающий микропроцессор информацией о сварочном напряжении. Скорость изменения сопротивления определяется косвенно путем последовательных замеров изменения напряжения в единицу времени. Когда эта скорость достигает определенного значения, источник получает от датчика напряжения дуги сигнал, свидетельствующий о том, что шейка готова к разрушению (момент T_3). В этот момент источник прекращает плавное наращивание тока и резко снижает его до уровня порядка 5 А. Отделение капли (момент T_4) происходит без разбрызгивания, присущего традиционному полуавтомату с жесткой внешней характеристикой. Силы поверхностного натяжения уже слитых воедино капли и ванны «втягивают» каплю вглубь, формируя сварочный шов [3].

Рост капли ($T_5 - T_6$). В течение всего этого этапа действует так называемый пиковый уровень сварочного тока, устанавливаемый сварщиком на лицевой панели аппарата. После отделения капли от электродной проволоки дуговой промежуток восстанавливается и резко повышается напряжение. Для продолжения процесса необходимо быстро сформировать новую каплю на торце электрода. С этой целью источник питания, получая сигнал о восстановлении дуги, мгновенно повышает ток до пикового уровня и наращивает плазменный столб. Пиковое значение тока определяет скорость нарастания плазмы и увеличения дугового промежутка. На торце электрода формируется расплавленная капля. Одновременно с этим усиливается давление дуги на сварочную ванну, вызывая ее сжатие и еще большее удлинение дуги. Утонение жидкой прослойки под дугой приводит к увеличению глубины проплавления. Оптимальная длительность действия пикового тока устанавливается процессором в диапазоне 1...2 мс. Его действие в течение более длительного периода может привести к значительному увеличению разбрызгивания вследствие слишком большого объема образуемой капли. Таким образом, пиковый ток непосредственно влияет на длину дуги и обеспечивает необходимое проплавление. Уровень пикового тока довольно высок – чаще всего порядка 350...400 А. На таком токе обычный полуавтомат мог бы вести сварку проволокой диаметром 1,2 мм на скоростях сварки порядка 5 м/мин. Однако в случае STT такой высокий уровень тока действует только после отделения капли и ее переноса в ванну, что значительно повышает качество сварного шва [3].

Переход на базовый ток ($T_6 - T_7$). После окончания действия пикового тока, когда создана капля необходимого объема, источник экспоненциально понижает ток до базового уровня. Резкое снижение тока в данном случае неприемлемо, поскольку мгновенный сброс действия дуги может привести к возникновению возмущений. При работе с последней версией аппарата – Invertec STT II – сварщик имеет возможность регулировать скорость снижения тока на этом этапе специальной рукояткой на лицевой панели источника (функция Tailout), достигая при этом наибольшей стабильности процесса сварки и наилучшей формы сварного шва. Кроме того, замедление падения тока приводит к увеличению общего тепловложения в сварочную ванну без изменения длины дуги, что важно, например, при сварке высоколегированных и нержавеющей сталей. Повышение тепловложения способствует улучшению сплавления с основным металлом и позволяет повысить скорость сварки. С переходом тока на базовый уровень вновь созданная капля начинает приобретать правильную сферическую форму и весь цикл переноса повторяется.

Как было отмечено выше, в настоящее время для реализации описанного процесса используется сварочный источник марки Invertec STT II. Его нельзя отнести ни к одной группе аппаратов для сварки с традиционными вольт-амперными характеристиками. Правильнее считать его источником с высокоскоростным управлением величиной сварочного тока, оптимизированным специально для переноса сериями коротких замыканий. Как и традиционный сварочный полуавтомат, система на базе Invertec STT II состоит из собственно источника питания, блочно независимого механизма подачи сварочной проволоки с комплектом соответствующих контрольных и силовых кабелей и стандартной горелки для полуавтоматической сварки на 200 или 300 А. Кроме того, стандартная комплектация источника питания включает специальный раздвоенный провод длиной до 15 м, предназначенный для организации контура обратной связи от сварочной дуги к источнику питания. Одна из линий контура закрепляется на токоподводе механизма подачи, а другая с помощью небольшого зажима закрепляется на свариваемой детали. В процессе подбора режима сварщик должен установить необходимую скорость подачи проволоки, определяющую производительность наплавки, и выполнить ряд облегчающих работу и понижающих вероятность образования дефектов функциональных установок. К таковым относятся: 2...4-шаговый режим работы, точечный режим, скорость подачи проволоки до зажигания дуги, ускорение при переходе на рабочую скорость, длительность предварительной и послесварочной подачи защитного газа, длительность задержки между прекращением подачи и сбросом сварочного потенциала. Все эти установки выполняются на механизме подачи проволоки один раз перед началом работы.

Настройка источника питания Invertec STT II выглядит иначе, чем у обычного полуавтомата с жесткой характеристикой. Поскольку процесс сварки полностью подконтролен микропроцессору, сварщик лишь задает параметры и форму токовых импульсов, возникающих в контуре при переносе капли: устанавливается величина базового (0...125 А), пикового (0...450 А) токов,

а так же длительность заднего фронта импульса роста капли. Кроме того, перед началом работы простым переключением двух тумблеров источник настраивается на материал свариваемого изделия (углеродистая / нержавеющая сталь) и диаметр используемой сварочной проволоки (1,0 мм и менее / 1,2 мм и более). Функция «горячего старта», традиционно присутствующая на аппаратах инверторного типа производства «Линкольн Электрик», поможет сварщику достичь качественного зажигания дуги и обеспечит хорошее проплавление в начале шва.

Процесс STT основан на принципиально новом технологическом подходе к оборудованию для сварки и выполняемым им задачам. При внешней схожести с традиционной полуавтоматической сваркой сказанное выше о работе систем с технологией STT убеждает в наличии большого количества отличий, имеющих важное прикладное значение, в частности, для решения вопроса создания качественного корневого шва при сварке труб различного диаметра [3].

3.2 Оборудование, приборы и материалы

3.2.1 Пост для механизированной сварки в защитных газах со сварочным полуавтоматом.

3.2.2 Баллоны с углекислым газом (смесью Ar + CO₂).

3.2.3 Электродная проволока Св-08Г2С, Св-08ГС.

3.2.4 Защитные щитки.

3.2.5 Образцы: пластины из низкоуглеродистой стали размером 30 × 10 × 100.

3.2.6 Набор слесарного инструмента.

3.3 Порядок проведения работы

3.3.1 Ознакомиться с сущностью процесса дуговой сварки с использованием технологии STT.

3.3.2 Изучить принцип работы источника питания сварочного полуавтомата и порядок его настройки.

3.3.3 Подготовить таблицу для записей результатов экспериментов (таблица 3.1).

3.3.4 Выбрать режим сварки лабораторного образца (марку стали указывает преподаватель). Провести настройку оборудования и подготовить образцы для сварки.

Для сварки в среде углекислого газа силу сварочного тока можно определить по формуле

$$I_{св} = \frac{H_{np}}{K_n} \cdot 100, \quad (3.1)$$

где H_{np} – глубина проплавления, мм;

K_n – коэффициент пропорциональности, зависящий от условий сварки (для сварки проволокой $d_{np} = 1,2$ мм принимаем $K_n = 1,75$).

После вычисления сварочного тока уточняем плотность сварочного тока по формуле

$$J_{св} = \frac{4 \cdot I_{св} \cdot H_{np}}{\pi \cdot d_э^2} \cdot 100. \quad (3.2)$$

Таблица 3.1 – Результаты экспериментов

Номер опыта	Марка и диаметр электродной проволоки	Марка и толщина основного металла	Положение шва при сварке	Значение параметров режима сварки						Результат (характер горения дуги, разбрызгивание и набрызгивание на деталь, наличие непроваров)
				Полярность	Сила сварочного тока, А	Напряжение дуги, В	Скорость подачи проволоки, м/ч	Скорость сварки, м/ч	Расход защитного газа, дм ³ /мин	
1										
2										
...										
6										

Значения допустимой плотности тока приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Значения допустимой плотности тока

Диаметр электрода, мм	< 2	2	3	4	5
$j_{св}, \text{А/мм}^2$	90...200	60...120	45...90	35...60	30...50

Напряжение на дуге можно определить по формуле

$$U_{св} = \frac{20 + 50 \cdot 10^{-3}}{d_э^{0,5}} \cdot J_{св}. \quad (3.3)$$

Скорость сварки вычисляем по формуле

$$V_{св} = \frac{\alpha_H \cdot I_{св}}{\gamma \cdot F_H \cdot 100}, \quad (3.4)$$

где α_H – коэффициент наплавки; для сварки в CO_2 $\alpha_H = 13 \text{ г}/(\text{А} \cdot \text{ч})$;

γ – плотность металла, $\gamma = 7,8 \text{ г}/\text{см}^3$;

F_H – площадь поперечного сечения наплавленного металла, см^2 .

Скорость подачи сварочной проволоки находим по формуле

$$V_{CB} = \frac{\alpha_H I_{CB}}{\gamma F_{np} \cdot 100}, \quad (3.5)$$

где F_{np} – площадь сечения сварочной проволоки, см².

3.3.5 Сварить образцы на различных значениях параметров режима и проанализировать полученные результаты.

Опыты повторить с использованием функции STT и без нее. Сделать соответствующие выводы о стабильности процесса, качественно оценить потери электродного металла на разбрызгивание.

3.3.6 Сделать выводы о влиянии параметров режима на стабильность процесса сварки и качество формирования сварного шва.

3.3.7 Повторить опыты с использованием различных пространственных положений при сварке (сварка вертикального шва PF, сварка горизонтального шва PC, сварка в потолочном положении PE).

3.4 Содержание отчета

3.4.1 Цель работы.

3.4.2 Упрощённая схема и краткое описание процесса дуговой сварки в углекислом газе.

3.4.3 Используемое оборудование и материалы.

3.4.4 Устройство (основные узлы) и порядок настройки сварочного полуавтомата.

3.4.5 Таблица результатов экспериментов.

3.4.6 Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1 В чем основная идея технологии STT и сущность её работы? Преимущества и недостатки?

2 Каковы основные стадии переноса электродного металла через дуговой промежуток? Назовите основные силы, действующие на каплю расплавленного металла на торце плавящейся электродной проволоки.

3 Объясните сущность пинч-эффекта. Какова его роль в формировании капли расплавленного металла?

4 На какой полярности процесс сварки в среде углекислого газа наиболее стабилен?

5 Поясните принцип работы и основные узлы сварочного полуавтомата.

4 Лабораторная работа № 4. Изучение особенностей технологии Wise Penetration КЕМРПИ

Цель работы: изучение способов настройки оборудования на сварку конкретных изделий с использованием технологии Wise Penetration; экспериментальное определение возможностей интеллектуальных технологий при сварке с переменным вылетом электродной проволоки.

4.1 Общие теоретические сведения

При дуговой сварке в защитных газах существует определенная, довольно жесткая взаимосвязь между параметрами режима с точки зрения обеспечения максимальной стабильности процесса и минимизации потерь электродного металла на разбрызгивание. Наиболее важными параметрами являются сила сварочного тока, определяемая через скорость подачи проволоки (задается на сварочном оборудовании), и напряжение на дуге. То есть один параметр определяет характеристики движения проволоки к детали, а второй задает необходимое электрическое напряжение для возникновения и стабильного существования дуги, как основного источника энергии.

Сила сварочного тока определяет глубину проплавления основного металла свариваемого изделия, а напряжение, как правило, ширину шва и длину электрической дуги.

Несмотря на то, что сила сварочного тока определяется скоростью подачи проволоки, эта взаимосвязь различная для разных защитных газов, типов присадочных материалов и др. Немаловажную роль в определении силы сварочного тока играет вылет электродной проволоки (расстояние от токоподводящего наконечника до свариваемого изделия). Длиной дуги в этом случае можно пренебречь, т. к. она несоизмеримо мала при сварке на режимах, соответствующих процессу переноса электродного металла с короткими замыканиями дугового промежутка. Изменение вылета электродной проволоки будет приводить к изменению силы сварочного тока при неизменном напряжении на дуге и скорости подачи сварочной проволоки. Это происходит потому, что часть проволоки, находящаяся между токоподводящим наконечником и электрической дугой, подогревается за счет прохождения по ней электрического тока. Чем больше будет этот участок проволоки по длине, тем больше электрическое сопротивление, и, как следствие, больше количества тепла, на нем выделяемого. Таким образом, увеличение вылета при сварке будет приводить к дополнительному подогреву участка проволоки между соплом сварочной горелки и свариваемым изделием. Это будет способствовать плавлению проволоки при меньшей силе сварочного тока. В случае уменьшения вылета наблюдается обратное явление.

Таким образом, изменение вылета оказывает прямое воздействие на силу сварочного тока. Так как сила сварочного тока определяет глубину проплавления (один из наиболее важных параметров при дуговой сварке), то очевидно, что её

ненамеренные колебания будут приводить к тому, что на участках пониженных значений будут наблюдаться дефекты сварного шва в виде непроваров. Учитывая тот факт, что сварка производится сварщиком в механизированном варианте и вероятность колебаний значений вылета электродной проволоки велика, этот фактор имеет важное значение.

Кроме того, существуют случаи, когда вылет увеличивается из-за затруднения доступа сварочной горелки в место выполнения сварного соединения. Наиболее ярким примером является сварка двух труб под углом друг к другу. В этом случае часть сварного шва является труднодоступной (в месте сопряжения деталей под острым углом).

Очевидно, что разработка технологий, позволяющих компенсировать колебания значения сварочного тока с изменением вылета электродной проволоки, является актуальной и вызывает повышенный практический интерес. Одной из таких технологий является технология Wise Penetration фирмы КЕМРПИ.

Сущность её работы заключается в отслеживании падения значения силы сварочного тока при сварке в реальном времени и компенсации этого значения за счет повышения скорости подачи сварочной проволоки. Существуют возможности настройки чувствительности процесса, а также величины и скорости компенсирующего воздействия.

4.2 Оборудование, приборы и материалы

4.2.1 Пост для механизированной сварки в защитных газах со сварочным полуавтоматом КЕМРПИ FastMig Synergic.

4.2.2 Баллоны с углекислым газом (смесью Ar + CO₂).

4.2.3 Электродная проволока Св-08Г2С, Св-08ГС.

4.2.4 Защитные щитки.

4.2.5 Образцы: трубы из низкоуглеродистой стали.

4.2.6 Набор слесарного инструмента.

4.3 Порядок проведения работы

4.3.1 Проверить заземления оборудования. Установить смеситель на баллон с углекислым газом и подсоединить его к баллону с аргоном.

4.3.2 Подсоединить смеситель к сварочному аппарату.

4.3.3 Настроить показания смесителя по расходу защитного газа и составу защитной газовой смеси (расход защитного газа 5...8 л/мин, состав смеси 82 % Ar + 18 % CO₂). Включить рубильник и подать напряжение на источник питания сварочного аппарата.

4.3.4 Настроить аппарат на рабочий режим. Проверить подачу проволоки и защитного газа.

4.3.5 Подготовить образцы к сварке, установить их в требуемое положение (зазор 1 мм) и осуществить прихватку.

4.3.6 Установить обычный режим MIG-сварки на пробных образцах по данным преподавателя.

4.3.7 Выполнить сварку корневого шва на расстоянии $1/3$ длины окружности стыка.

4.3.8 Настроить аппарат в режиме синергетического управления по данным преподавателя на пробном образце.

4.3.9 Изучить способ задания параметров и принцип регулирования при синергетическом управлении процессом сварки.

4.3.10 Выполнить сварку корневого шва на расстоянии $1/3$ длины окружности стыка на синергетическом режиме, изменяя в процессе сварки величину вылета электродной проволоки.

4.3.11 Изучить способы настройки аппарата в режиме интеллектуального управления Wise Penetration.

4.3.12 Настроить аппарат в режиме интеллектуального управления Wise Penetration по данным преподавателя на пробном образце.

4.3.13 Выполнить сварку корневого шва на расстоянии $1/3$ длины окружности стыка с использованием технологии Wise Penetration, меняя в процессе сварки величину вылета электродной проволоки.

4.3.14 Эксперименты повторить для сварки образцов с зазором 2 и 3 мм.

4.3.15 Провести визуальный контроль и сделать выводы об особенностях сварки с использованием различных технологий. Оценить возможности программы Wise Penetration и сравнить её с обычным и синергетическим режимом на основе анализа сварных соединений образцов.

4.4 Содержание отчета

4.4.1 Цель работы.

4.4.2 Сущность процесса сварки Wise Penetration.

4.4.3 Краткая характеристика результатов экспериментов.

4.4.4 Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1 На чём основаны принципы цифрового управления процессом MIG-/MAG-сварки? Почему развитие инверторных источников питания привело к активному развитию способов цифрового управления процессом?

2 Что означает понятие синергетика и как этот принцип реализуется применительно к сварочному процессу?

3 Назовите основные технологии и отличительные особенности реализации программного управления процессом сварки короткой дугой.

4 Как осуществляется настройка сварочного аппарата на режим с использованием технологии Wise Penetration?

5 Сущность технологии Wise Penetration.

5 Лабораторная работа № 4. Изучение особенностей технологии Wise ROOT КЕМРПИ

Цель работы: изучение способов настройки оборудования на сварку конкретных изделий с использованием технологии Wise ROOT; экспериментальное определение возможностей интеллектуальных технологий при сварке корневого шва; оценить возможности программы Wise ROOT и сравнить её с обычным и синергетическим режимом при сварке с различной величиной зазора.

5.1 Общие теоретические сведения

В настоящее время управление сварочным аппаратом реализуется с помощью цифровых систем. Применение новых инверторных источников питания, работающих на повышенной частоте, позволило осуществлять контроль за параметрами сварки в реальном времени, т. к. появилась возможность контролировать значения параметров режима со значительно большей скоростью, в отличие от традиционных выпрямителей.

В основе всех способов цифрового управления лежит принцип автоматического регулирования и поддержания параметров режима на заданном уровне или изменяющимися по определённой, заданной программе, путём измерения сопротивления дуги в процессе сварки.

Современное оборудование строится на принципах синергетического управления. В общем случае синергетика – это область науки, изучающая самоорганизующиеся системы. В контексте управления сварочным процессом синергетика означает одновременное изменение величины сварочного тока и напряжения на дуге в их взаимосвязи и взаимозависимости. Это приводит к высокой стабильности процесса, т. к. система реагирует на внешние возмущения и сама корректирует параметры, приводя себя в равновесие. Возможность контролировать период короткого замыкания и управлять формой импульса сварочного тока приводит к созданию технологии сварки короткой дугой с пониженным разбрызгиванием электродного металла, получившей название «сварка модифицированной короткой дугой».

Одним из таких процессов является технология, разработанная компанией КЕМРПИ в серии программного управления Wise. Одним из программных продуктов серии является технология сварки корня шва Wise ROOT. Наиболее сложной задачей сварки корня шва является стабильное проплавление без прожогов и непроваров.

Технология Wise ROOT основана на цифровом контроле параметров сварки на выходе источника питания. Электроника отслеживает короткие замыкания и контролирует точное время перехода капли металла с конца проволоки в сварочную ванну. Принцип работы технологии Wise ROOT основан на разделении цикла сварки на два периода: период короткого замыкания и период горения дуги, чередующиеся между собой (рисунок 5.1).

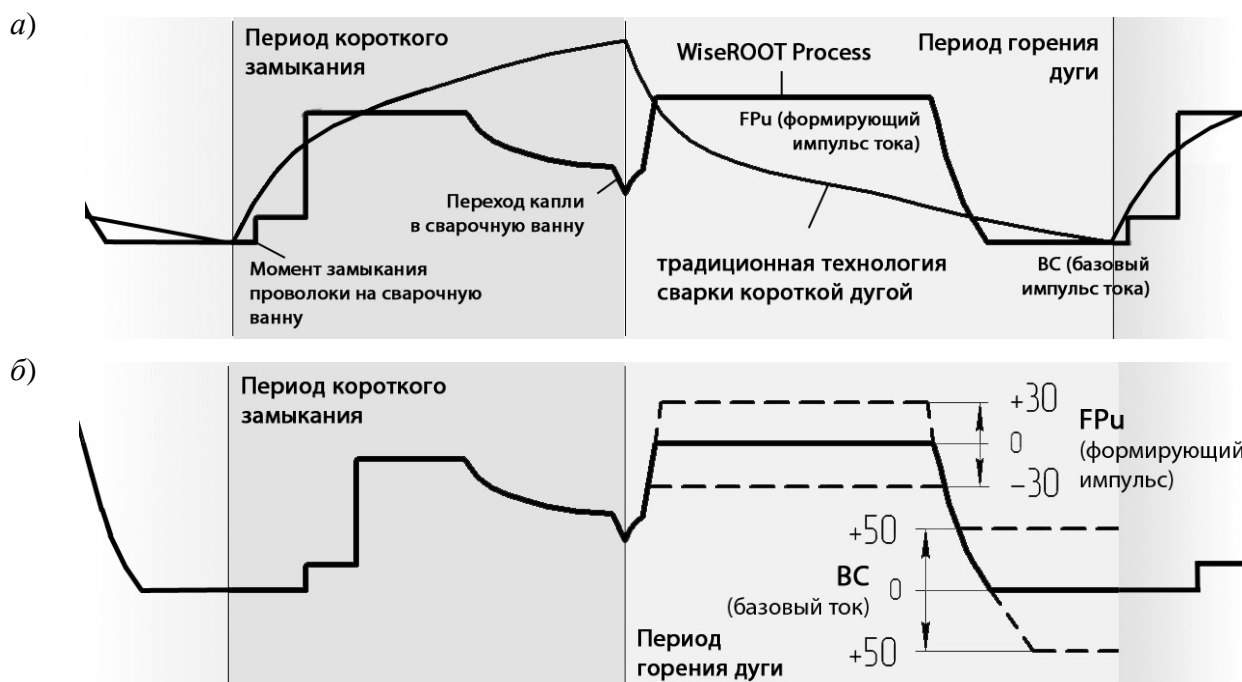


Рисунок 5.1 – Сравнение осциллограмм сварочного тока при использовании технологии Wise ROOT со сваркой короткой дугой по традиционной технологии (а) и возможности управления процессом (б)

Процесс Wise ROOT отличается от традиционной технологии сварки короткой дугой (см. рисунок 5.1, а). При сварке короткой дугой отделение капли и переход её в сварочную ванну сопровождается повышенным значением тока. После этого на стадии горения дуги значение величины сварочного тока плавно падает до следующего короткого замыкания. Большая величина тока в момент перехода капли расплавленного присадочного материала в сварочную ванну приводит к повышенному разбрызгиванию и возмущающим воздействиям со стороны дуги.

При использовании технологии Wise ROOT отделение капли происходит без повышенного разбрызгивания при пониженном значении сварочного тока. Во время первой стадии (стадии короткого замыкания) существует небольшой скачок величины тока, что свидетельствует о контакте торца проволоки со сварочной ванной. Далее следует быстрое нарастание сварочного тока до заданного уровня.

На протяжении всего интервала короткого замыкания решающее значение для ускорения разрушения перемычки имеет электродинамическая сила, которая стремится «пережечь» проволоку по линии расплавления, оторвать каплю электродного металла и придать ей ускоряющую «импульс–силу» для перемещения в направлении сварочной ванны. В последний момент, когда капля уже отделилась от сварочного электрода, преобладающее значение имеет сила поверхностного натяжения, способствующая переходу капли в сварочную ванну.

Перемычка разрушается при небольшом токе паузы. По окончании длительности паузы, после отделения капли от торца сварочной проволоки, система управления даёт резкое повышение значения тока до определённого,

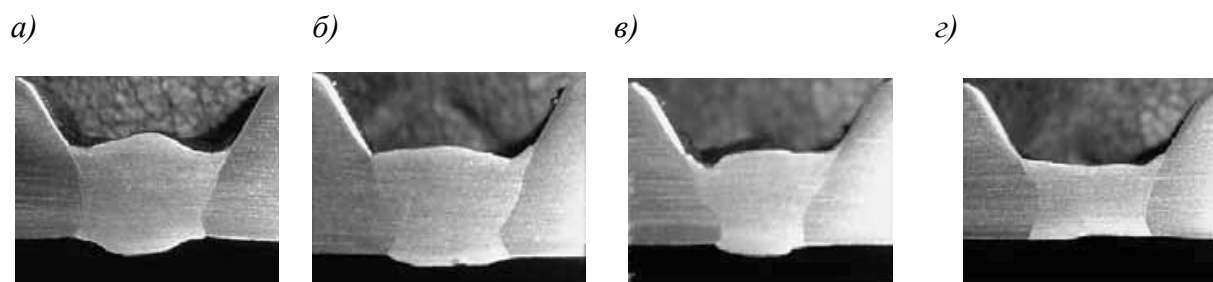
точно заданного, уровня. Это способствует проплавлению кромок свариваемого изделия и быстрому оплавлению торца сварочной проволоки. Затем следует резкое падение тока до установленного значения (базовый ток), соответствующее току короткого замыкания в начале следующей стадии.

Это необходимо для предотвращения взрыва перегретого расплавленного металла при контакте и замыкании проволоки на сварочную ванну. Важным элементом является точное соответствие и поддержание величины базового тока в конце периода горения дуги, т. к. он является началом последующего периода, и в случае отклонения от необходимого значения капля может отделиться от сварочной проволоки в неустановленный момент времени. Управление процессом точно показывает момент отделения капли и зажигания дуги.

Точный контроль времени роста и снижения тока гарантирует отсутствие брызг при переходе от периода короткого замыкания к горению дуги.

Управление процессом осуществляется посредством регулирования значений базового (BC) и формирующего (FPu) импульсов тока (см. рисунок 5.1, б).

Степень влияния этих параметров на геометрические параметры корневого шва сварного соединения показана на рисунке 5.2.



a – FPu -9; *б* – FPu +9; *в* – BC 25; *г* – BC 60

Рисунок 5.2 – Поперечное сечение корневых швов, выполненных при различных значениях регулируемых параметров формирующего импульса (*a–б*) и базового тока (*в–г*)

5.2 Оборудование, приборы и материалы

5.2.1 Пост для механизированной сварки в защитных газах со сварочным полуавтоматом Kemppi FastMig Synergic MSF57 с источником питания KMS 400.

5.2.2 Баллоны с углекислым газом (смесью Ar + CO₂).

5.2.3 Электродная проволока Св-08Г2С, Св-08ГС.

5.2.4 Защитные щитки.

5.2.5 Образцы: пластины из низкоуглеродистой стали размером 30 × 10 × 100.

5.2.6 Набор слесарного инструмента.

5.3 Порядок проведения работы

5.3.1 Проверить заземление оборудования. Установить смеситель на баллон с углекислым газом и подсоединить его к баллону с аргоном.

5.3.2 Подсоединить смеситель к сварочному аппарату.

5.3.3 Настроить показания смесителя по расходу защитного газа и составу защитной газовой смеси (расход защитного газа 5...8 л/мин, состав смеси 82 % Ar + 18 % CO₂). Включить рубильник и подать напряжение на источник питания сварочного аппарата.

5.3.4 Настроить аппарат на рабочий режим. Проверить подачу проволоки и защитного газа.

5.3.5 Подготовить образцы к сварке и установить их в требуемое положение (зазор 1 мм) и осуществить прихватку.

5.3.6 Установить обычный режим MIG-сварки на пробных образцах по данным преподавателя.

5.3.7 Выполнить сварку корневого шва на расстоянии 1/3 длины окружности стыка.

5.3.8 Настроить аппарат в режиме синергетического управления по данным преподавателя на пробном образце.

5.3.9 Изучить способ задания параметров и принцип регулирования при синергетическом управлении процессом сварки.

5.3.10 Выполнить сварку корневого шва на расстоянии 1/3 длины окружности стыка на синергетическом режиме.

5.3.11 Изучить способы настройки аппарата в режиме интеллектуального управления заварки корня шва Wise ROOT.

5.3.12 Настроить аппарат в режиме интеллектуального управления Wise ROOT по данным преподавателя на пробном образце.

5.3.13 Выполнить сварку корневого шва на расстоянии 1/3 длины окружности стыка с использованием технологии Wise ROOT.

5.3.14 Эксперименты повторить для сварки образцов с зазором 2 и 3 мм.

5.3.15 Провести визуальный контроль и сделать выводы об особенностях сварки с использованием различных технологий. Оценить возможности программы Wise ROOT и сравнить её с обычным и синергетическим режимом на основе анализа сварных соединений образцов, полученных сваркой с различной величиной зазора.

5.4 Содержание отчета

5.4.1 Цель работы.

5.4.2 Осциллограмма процесса сварки Wise ROOT с расшифровкой её характерных участков.

5.4.3 Краткая характеристика результатов экспериментов.

5.4.4 Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1 На чём основаны принципы цифрового управления процессом MIG-/MAG-сварки? Почему развитие инверторных источников питания привело к активному развитию способов цифрового управления процессом?

2 Что означает понятие синергетика и как этот принцип реализуется применительно к сварочному процессу?

3 Назовите основные технологии и отличительные особенности реализации программного управления процессом сварки короткой дугой.

4 Как осуществляется настройка сварочного аппарата на режим с использованием технологии Wise ROOT?

5 За счёт чего достигается пониженное разбрызгивание при сварке по технологии Wise ROOT?

6 Назовите основные сложности, возникающие при сварке корневого шва.

6 Лабораторная работа № 6. Изучение технологии аддитивной наплавки на базе CMT и CMT Advanced FRONIUS с использованием роботизированного комплекса Fanuc

Цель работы: изучение способов выполнения аддитивной наплавки изделий сложной формы с использованием дуговых сварочных источников нагрева на базе технологии CMT FRONIUS.

6.1 Общие теоретические сведения

Для реализации режима переноса металла в конструкцию CMT-установки включены специальные компоненты (рисунок 6.1).

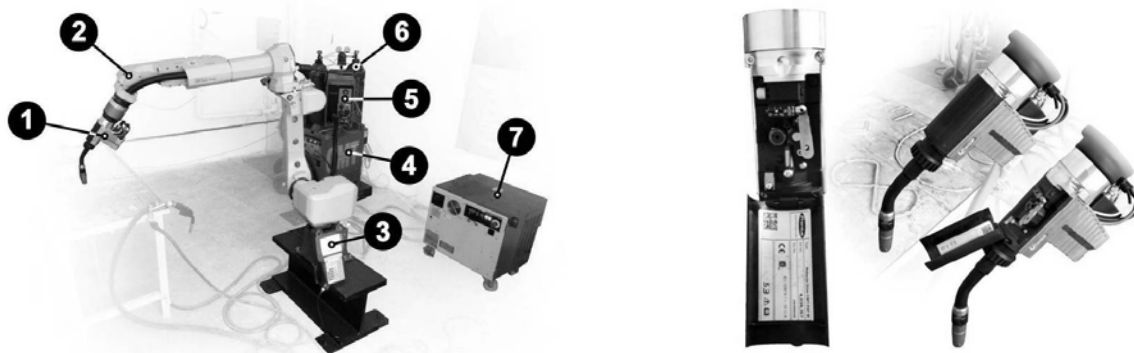
С одной стороны расположены два блока подачи проволоки, которые управляются в цифровом режиме. Передний блок Robacta Drive CMT обеспечивает пульсацию проволоки с частотой до 70 раз в секунду. Задний блок VR 7000 CMT служит для подачи проволоки.

Передний блок Robacta Drive CMT оснащен безредукторным приводом – высокодинамичным серводвигателем переменного тока, обеспечивающим точную подачу проволоки и постоянное давление прижима. В отличие от традиционных систем, кабель-шланговый пакет горелки может быстро отсоединяться от блока привода и не требует повторной настройки TSP (Tool Center Point).

С другой стороны, между двумя блоками привода устанавливается проволочный буфер, который обеспечивает независимую работу блоков и служит в качестве дополнительного накопителя проволоки. Такая схема позволяет подавать проволоку практически без усилий. Проволочный буфер желательно установить на балансире или на третьей оси робота.

При такой схеме реализации процесса переноса металла достигается еще целый ряд преимуществ, таких как: плавный старт; стабильное горение дуги при

низких значениях сварочного тока; высокая устойчивость сварочной ванны при сварке в вертикальном и потолочном положениях; равномерное и правильное формирование сварного шва; получение обратного формирования шва без использования подкладок.



1 – интегрированная сварочная горелка; 2 – сварочный робот-манипулятор; 3 – пульт управления роботом; 4 – источник питания сварочного оборудования; 5 – механизм подачи сварочной проволоки; 6 – баллон с защитным газом (аргон); 7 – источник питания и блок управления роботом

Рисунок 6.1 – Установка для сварки плавлением с использованием технологии СМТ

В системах СМТ основные узлы оборудования обмениваются информацией о реверсивной подаче проволоки по высокоскоростной шине данных. Это обеспечивает возможность выполнения сварочных циклов с частотой до 100 Гц. Благодаря методике переключения полярности становятся возможными два новых варианта технологии СМТ–СМТ Advanced и СМТ Advanced Pulse. В фазе процесса с положительной полярностью на электроде (фаза EP) осуществляется наиболее эффективное тепловложение в основной материал (независимо от варианта процесса).

В фазе с отрицательной полярностью на электроде (фаза EN) производительность наплавки регулируется в зависимости от тепловложения. На данном этапе тепловложение гораздо ниже, чем в фазе EP, однако производительность наплавки такая же. По причине меньшей плотности линии переноса, силы отрыва капли в фазе EN влияния не имеют. Вследствие этого капля, образующаяся на конце электрода, имеет существенно больший размер.

Количество чередующихся циклов с положительной и отрицательной полярностью электрода может быть задано пользователем произвольно. Положительные фазы влияют, главным образом, на глубину проплавления. Отрицательные фазы значительно увеличивают производительность наплавки при неизменном уровне тепловложения. Таким образом, отрицательный проволочный электрод требует значительно меньшего сварочного тока и напряжения для наплавки аналогичного количества металла. Переключение

полярности между двумя фазами процесса осуществляется при возникновении короткого замыкания. Дуга в этот момент отсутствует, поскольку присадочный металл контактирует со сварочной ванной. Поэтому в момент переключения полярности гарантируется очень высокая стабильность процесса. Благодаря технологии СМТ Advanced впервые удалось добиться повышенной производительности наплавки при постоянно низком тепловложении и/или постоянной производительности наплавки при пониженном по сравнению с обычной технологией СМТ тепловложении. В результате могут быть заварены даже большие зазоры между деталями из тонкого и ультратонкого листового металла. Регулирование тепловложения, обеспечиваемое за счет переключений цикла, в значительной степени оптимизирует контроль за сварочной ванной. Поскольку в обеих фазах процесса перенос металла осуществляется при коротком замыкании, то необходимые ранее для переключения фазы инициализации больше не нужны.

В начале фазы EN–СМТ зажигание дуги происходит при коротком замыкании электрода с отрицательной полярностью. При постоянной длине дуги мощность замыкания на дополнительной проволоке гораздо выше мощности в последующей фазе EP–СМТ.

Размер капли незадолго до начала короткого замыкания четко отражает влияние полярности на производительность наплавки. В отрицательной фазе процесса размер капли и, соответственно, производительность наплавки, значительно увеличиваются. Для достижения аналогичного размера капли на электроде с положительной полярностью потребуются значительно более высокий сварочный ток. При амплитуде тока, соответствующей амплитуде тока в отрицательной фазе, пинч-эффект электрода с положительной полярностью намного выше. Поэтому силы отрыва капли стимулируют отделение капли, препятствуя дальнейшему нарастанию производительности наплавки. Количество циклов СМТ с электродами отрицательной полярности может быть задано пользователем таким образом, чтобы добиться нужной производительности наплавки в соответствии с производственными условиями. После завершения заданного количества циклов полярность сварочного тока инвертируется (при циклическом коротком замыкании), что и является основным нововведением. Для традиционных технологий AC–MIG (сварка плавящимся электродом в среде защитных газов с переменным сварочным током) характерна высокая нестабильность при переключении фаз. Технология СМТ Advanced полностью устраняет данную проблему, поскольку переключение полярности выполняется в течение определенной фазы короткого замыкания. После изменения полярности система управления СМТ отводит проволочный электрод из сварочной ванны и включает дугу с положительной полярностью. В фазе EP–СМТ точка контакта дуги на конце проволоки имеет малые размеры, т. е. дуга проникает в заготовку с повышенной интенсивностью. Кроме того, тепловложение в основной материал существенно выше, чем в фазе EN–СМТ. После достижения заданной длины дуги устройство подачи проволоки возобновляет подачу в направлении сварочной ванны. После завершения

заданного пользователем количества циклов с положительной полярностью полярность снова переключается в процессе короткого замыкания.

Если рассмотреть сварные швы, выполненные с применением технологий СМТ и СМТ Advanced в аналогичных условиях, нетрудно заметить, что производительность наплавки в случае применения технологии СМТ Advanced значительно выше.

В настоящее время все больший интерес вызывают технологии создания объемных твердотельных изделий способами аддитивного послойного наращивания. В отличие от традиционных, так называемых субтрактивных способов, предполагающих изготовление изделия путем отсекаания от заготовки «лишнего» материала, в случае аддитивных технологий, геометрия изделия создается послойно с минимальными затратами. При оценке эффективности технологии необходимо учитывать два параметра: возможность получения наплавки с максимально точными геометрическими параметрами, что позволит минимизировать трудоемкость последующей её обработки и, что более существенно, свойства наплавленного материала должны соответствовать предъявляемым к изделию требованиям по механическим свойствам и химическому составу [4].

Перспективным направлением является использование для послойной аддитивной наплавки металлических изделий дуговых сварочных технологий. Наиболее распространенными среди них являются три способа: GMAW (Gas Metal Arc Welding) – дуговая сварка плавящимся электродом в защитном газе; GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) – дуговая сварка неплавящимся вольфрамовым электродом в защитном газе; PAW (Plasma Arc Welding) – плазменно-дуговая сварка. Все они относятся к способам WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) – аддитивные технологии с использованием дугового источника нагрева и проволочного присадочного материала [5–8].

Наибольший интерес представляет разработка аддитивных технологий на основе способа GMAW, т. к. он является наиболее распространенным на предприятиях Республики Беларусь и других стран благодаря своей относительно высокой производительности, высокой степени механизации и возможностям управления процессом, а также широкой номенклатуры сварочных проволок для выполнения сварки и наплавки самых разнообразных материалов и сплавов.

Важным вопросом в случае её применения для целей аддитивных технологий является минимизация тепловложения в основной материал. В отличие от GTAW- и PAW- способов, в этом случае горение дуги происходит непосредственно между основным и присадочным материалом.

В результате этого присутствует перенос электродного металла через дуговой промежуток, характер которого определяет технологические особенности процесса и сильно зависит от параметров режима и состава защитной атмосферы. Развитие современных систем управления на базе инверторных источников питания для дуговой сварки открыло возможности для

управления этими параметрами с высокой частотой, что позволило осуществить контролируемый перенос электродного металла с фиксированными длительностями циклов горения дуги, образования капли расплавленного металла на торце электродной проволоки, времени её роста и короткого замыкания с поверхностью жидкой сварочной ванны.

Осуществить контроль переноса электродного металла позволяют системы с реверсивной подачей сварочной проволоки Fronius CMT (Cold Metal Transfer). Контроль стадии короткого замыкания капли электродного металла, минимизация силы сварочного тока совместно с реверсивным движением присадочной проволоки в противоположном направлении для инерционного перехода жидкого металла в расплавленную сварочную ванну, позволяет минимизировать тепловложение в основной металл и повысить коэффициент наплавки, что, как было сказано выше, является базовыми условиями для эффективного применения технологии.

Несмотря на предпринимаемые попытки выполнения аддитивных наплавки для создания изделий сложной геометрии и имеющиеся в этой области результаты исследований с зарубежных источников, существует недостаточно информации о возможностях технологии и особенностях, протекающих при этом металлургических процессов. В большинстве исследований основное внимание уделено геометрическим параметрам полученной наплавки.

При оценке эффективности технологии необходимо учитывать два параметра: возможность получения наплавки с максимально точными геометрическими параметрами, что позволит минимизировать трудоемкость последующей её обработки и, что более существенно, свойства наплавленного материала должны соответствовать предъявляемым к изделию требованиям по механическим свойствам и химическому составу.

В связи с этим были сформулированы следующие задачи исследований:

- полученная заготовка должна обладать не только необходимым комплексом механических характеристик, но и постоянством этих характеристик по всему сечению, что обуславливается однородностью химического состава и условиями воздействия термического цикла;

- разрабатываемая технология должна обеспечивать постоянство химического состава по сечению заготовки при отсутствии необходимости зачистки промежуточных валиков, что существенно снижало бы эффективность и повышало её трудоемкость;

- зона сплавления отдельных валиков не должна быть ослабленной выделением на этом участке легкоплавких примесей и шлаковых включений, являющихся концентраторами напряжений и провоцирующих снижение механических свойств и преждевременное разрушение заготовки [4].

6.2 Оборудование, приборы и материалы

6.2.1 Сварочный полуавтомат Fronius TransPuls Synergic 3200 с роботом Fanuc и системой СМТ.

6.2.2 Комплект ручного инструмента.

6.2.3 Весы.

6.2.4 Перчатки, комплект спецодежды.

6.2.5 Образцы тонколистового металла для сварки.

6.3 Порядок проведения работы

6.3.1 Подготовить оборудование для выполнения наплавки. В лабораторной работе выполняется наплавка вертикальной стенки на основание в виде пластины из низкоуглеродистой стали.

6.3.2 Выполнить наплавку (количество слоев не менее 30).

6.3.3 Подготовить образцы для проведения механических испытаний.

6.3.4 Визуально оценить качество наплавки.

6.3.5 Провести испытания наплавки на статическое растяжение поперек слоев и статический изгиб. При подготовке образцов для испытаний на статический изгиб волнистость боковой поверхности не снимать.

6.3.6 Оценить результаты испытаний.

6.3.7 Сделать выводы.

6.4 Содержание отчета

6.4.1 Цель работы.

6.4.2 Сущность технологии СМТ Advanced.

6.4.3 Краткая характеристика результатов экспериментов.

6.4.4 Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1 Что такое аддитивные технологии и какие основные пути их развития?

2 Что означает понятие синергетика и как этот принцип реализуется применительно к сварочному процессу?

3 Назовите основные технологии и отличительные особенности реализации программного управления процессом сварки короткой дугой.

4 Как осуществляется настройка сварочного аппарата на режим с использованием технологии Wise Penetration?

5 Сущность технологии Wise Penetration.

7 Правила техники безопасности при проведении лабораторных работ

Организация лабораторных экспериментов должна проводиться в соответствии с ССБТ ГОСТ 12.4.113–82 *Работы учебные лабораторные. Общие требования безопасности.*

При проведении лабораторных экспериментов должно быть устранено или доведено до безопасных значений величин действие опасных и вредных производственных факторов по ГОСТ 12.0.003–74.

Все производимые в лаборатории работы должны быть организованы так, чтобы полностью исключить образование взрывоопасных концентраций газо-, паро- и пылевоздушных смесей в объеме всего помещения и в отдельных рабочих зонах.

Оборудование, применяемое в учебных лабораториях, должно соответствовать требованиям ГОСТ 12.2.003–74 и ГОСТ 12.2.049–80.

Температура поверхности оборудования и технологических трубопроводов, к которым возможны прикосновения людей при проведении лабораторных экспериментов, не должна превышать 45 °С. Системы вентиляции и отопления в лабораторном помещении должны обеспечивать параметры микроклимата в соответствии с требованиями ГОСТ 12.1.005–76.

Предельно допустимая концентрация вредных веществ в воздухе рабочей зоны лаборатории не должна превышать значений, указанных в ГОСТ 12.1.005–76.

Допустимые уровни звукового давления в октавных полосах частот, уровни звука и эквивалентные уровни звука в децибелах на рабочих местах в лаборатории должны соответствовать требованиям ГОСТ 12.1.003–76, относящимся к помещениям лабораторий для проведения экспериментальных работ.

Предельно допустимые напряжённость электрической и магнитной составляющих и плотность тока энергии электромагнитного поля радиочастот на рабочих местах в лаборатории должны соответствовать требованиям ГОСТ 12.1.012–78.

Допустимый уровень вибрации на рабочих местах в лаборатории должен соответствовать требованиям ГОСТ 12.1.012–78. Защитные системы (зануление, защитное заземление, защитное отключение, выравнивание потенциала, двойная изоляция, малое напряжение) и мероприятия по защите от поражения электрическим током в лабораториях должны обеспечивать напряжение при прикосновении не выше 42 В – в помещениях без повышенной и с повышенной опасностью; 12 В – в особо опасных помещениях.

Питание лабораторного электрооборудования должно осуществляться от сети напряжением не более 380 В при частоте 50 Гц. В электроустановках должны быть предусмотрены разделительный трансформатор и защитно-отключающее устройство.

Сопротивление изоляции, токоведущих частей электроустановок до первого аппарата максимальной токовой защиты должно быть не менее 0,5 МОм, а сопротивление между заземляющим болтом и каждой доступной

прикосновению металлической нетоковедущей частью изделия, которая может оказаться под напряжением, – не более 0,1 Ом.

Требования к размещению оборудования и рабочих мест

Размещение оборудования в помещении лаборатории должно обеспечивать удобство выполнения всех видов исследований и работ.

Планировка помещения лаборатории должна обеспечивать освещение рабочих мест исследователей естественным светом.

Размещение средств отображения информации должно обеспечивать свободное восприятие общей сигнальной информации в интерьере лаборатории.

Геометрические размеры зоны досягаемости моторного поля на рабочих местах в лаборатории определяются требованиями ГОСТ 12.2.032–78 (для положения сидя) и ГОСТ 12.2.033–78 (для положения стоя).

Геометрические размеры оптимальной зоны информационного поля для размещения общих средств отображения информации в лаборатории должны быть: площадь зоны – 4,5 м²; высота верхней границы зоны от пола – 2,5 м; ширина зоны – 3,0 м; высота нижней границы зоны от пола – 1,0 м.

8 Действия на случай возникновения загорания, пожара

Каждый, обнаруживший пожар или загорание, обязан:

- немедленно обесточить помещение;
- немедленно сообщить о пожаре по телефону 101;
- немедленно сообщить о пожаре администрации;
- приступить к тушению очага пожара имеющимися на рабочем месте средствами пожаротушения (огнетушитель, кошма, песок, пожарный кран и т. д.);
- при тушении электроустановок огнетушителями не подходить ближе 1 м до очага горения;
- при применении углекислотных огнетушителей не братья голый рукой за раструб;
- тушение вертикальных конструкций производить сверху вниз.

Студент, находящийся в лаборатории, при получении сообщения об эвакуации обязан:

- немедленно прекратить занятие;
 - быстро и без паники в сопровождении преподавателя, проводящего занятие, покинуть здание в безопасное место, пройти перекличку у данного преподавателя и ждать последующих указаний;
 - сохранять выдержку и хладнокровие, не допускать паники.
- Студент, оставшийся во время пожара в лаборатории, обязан:
- прежде, чем открыть дверь лаборатории, потрогать ее руками. Если она нагрелась, не открывать ее, иначе огонь проникнет в помещение;

- при возможности, покинуть помещение через окно; оказавшись на верхнем этаже, заткнуть щели подручными средствами, чтобы дым не проникнул в помещение лаборатории;
- сообщить о своем местонахождении (по телефону или привлекая внимание с помощью рук и криков о помощи).

9 Действия на случай других аварийных ситуаций

При возникновении в рабочей зоне проведения лабораторной работы опасных условий труда (появление запаха гари и дыма, повышенное тепловыделение от оборудования, повышенный уровень шума при его работе, неисправность заземления, загорание материалов и оборудования, прекращение подачи электроэнергии, появление запаха газа и т. п.) необходимо немедленно прекратить работу, выключить оборудование, сообщить о происшествии преподавателю.

При несчастном случае необходимо быстро принять меры по предотвращению воздействия травмирующих факторов на потерпевшего, оказанию первой помощи пострадавшему, вызову на место происшествия медицинских работников или доставке потерпевшего в организацию здравоохранения. Сообщить о происшествии ответственному лицу за безопасное производство работ, обеспечить до начала расследования сохранность обстановки, если это не представляет опасности для жизни и здоровья людей.

При поражении электрическим током необходимо освободить пострадавшего от действия тока (выключить рубильник, перерубить провод, оттянуть или отбросить его сухой палкой, шестом). Не прикасаться к пострадавшему, пока он находится под действием тока. Доврачебную помощь оказывать сразу после прекращения воздействия электрического тока. Если пострадавший находится в бессознательном состоянии, то немедленно приступить к массажу сердца и искусственному дыханию до прибытия врача. Одновременно с этим применяется нашатырный спирт, растирание и согревание.

Список литературы

1 Технология сварки плавлением и термической резки: методические рекомендации к лабораторным работам для студентов специальности 1-36 01 06 «Оборудование и технология сварочного производства» дневной и заочной форм обучения / Сост. А. О. Коротеев. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2018. – Ч. 2. – 43 с.

2 Технология сварки плавлением и термической резки: методические рекомендации к лабораторным работам для студентов специальности 1-36 01 06 «Оборудование и технология сварочного производства» дневной и заочной форм обучения / Сост. А. О. Коротеев. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2018. – Ч. 1. – 45 с.

3 **Райский, В. Г.** Технология импульсного сварочного процесса: TwinPulse, SpedPulse, STT, HighSpeed [Электронный ресурс] / В. Г. Райский. – Режим доступа: <https://www.intertehno.ru/articles/c4/35/>. – Дата доступа: 24.01.2020.

4 **Коротеев, А. О.** Аддитивная технология создания объемных металлических изделий на основе дуговой сварки с импульсной реверсивной подачей присадочного материала / А. О. Коротеев, В. П. Долячко, В. П. Куликов // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2019. – № 4 (65). – С. 15–25.

5 Передовые технологии аддитивного производства металлических изделий / А. А. Осколков [и др.] // Вестн. ПНИПУ. Сер. Машиностроение, материаловедение. – 2018. – Т. 20, № 3. – С. 90–105.

6 Additive manufacturing with GMAW welding and CMT technology / J. González [et al.] // Materials Manufacturing Engineering Society International Conference 2017, MESIC 2017, 28–30 June 2017, Vigo (Pontevedra), Spain. – 2017. – P. 840–847.

7 **Prado-Cerqueira, J. L.** Preliminary development of a Wire and Arc Additive Manufacturing system (WAAM) / J. L. Prado-Cerqueira, J. L. Diéguez, A. M. Camacho // Materials Manufacturing Engineering Society International Conference 2017, MESIC 2017, 28–30 June 2017, Vigo (Pontevedra), Spain. – 2017. – P. 895–902.

8 Study on Arc Welding processes for High Deposition Rate Additive Manufacturing / I. Taberero, A. Paskual, P. Álvarez, A. Suárez // Materials 19th CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining, 23–27 April 2018, Bilbao, Spain. – 2018. – P. 358–362.