

Р. А. Мейстер  
А. Р. Мейстер

# СВАРОЧНЫЕ СВОЙСТВА ОДНОФАЗНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

Монография

Политехнический институт



СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
SIBERIAN FEDERAL UNIVERSITY

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Сибирский федеральный университет

**Р. А. Мейстер**  
**А. Р. Мейстер**

# **СВАРОЧНЫЕ СВОЙСТВА ОДНОФАЗНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ**

Монография

Красноярск  
СФУ  
2011

УДК 621.314.6  
ББК 34.264.5  
М 45

Рецензенты:

А. А. Михеев, д-р. техн. наук, проф. СибГАУ;

М. А. Лубнин, канд. техн. наук, проф. советник генерального директора ОАО «Красмаш» по науке и технике

**Мейстер, Р. А.**

М 45

Сварочные свойства однофазных выпрямителей: монография / Р. А. Мейстер, А. Р. Мейстер. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2011. – 170 с.

ISBN 978-5-7638-2145-1

В монографии описаны конструкции трансформаторов и выпрямителей с конденсаторным умножителем напряжения. Данные выпрямители простые, легче традиционных и имеют КПД и коэффициент мощности не ниже инверторных. Приведены сварочно-технологические свойства выпрямителей при сварке покрытыми электродами, в защитных газах плавящимся и неплавящимся электродом на малых токах.

Предназначено для студентов, обучающихся по специальности 150202.65 «Оборудование и технология сварочного производства».

**УДК 621.314.6  
ББК 34.264.5**

---

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Введение .....</b>	<b>5</b>
<b>Глава 1. Конструкции и технологические характеристики источников питания .....</b>	<b>8</b>
1.1. Сведения о применении выпрямителей с конденсаторным умножителем напряжения .....	8
1.2. Технология изготовления источников питания .....	15
1.3. Конструкции источников питания .....	23
1.3.1. Простейшая конструкция трансформатора .....	23
1.3.2. Трансформатор с тороидальным магнитопроводом.....	25
1.3.3. Расширение пределов регулирования сварочного тока трансформатора.....	28
1.3.4. Выпрямитель с умножителем напряжения.....	29
1.3.5. Выпрямитель с кольцевым магнитопроводом .....	31
1.3.6. Однофазный выпрямитель, изготовленный на основе трёхфазного трансформатора .....	35
1.3.7. Сварочный выпрямитель, изготовленный на основе утилизированного трансформатора .....	43
1.3.8. Приближенный расчет дросселя.....	47
1.3.9. Конструкции дросселей .....	50
<b>Глава 2. Сварочно-технологические свойства выпрямителей при ручной дуговой сварке.....</b>	<b>55</b>
2.1. Сведения о горении дуги при ручной дуговой сварке на малых токах .....	55
2.2. Сварочно-технологические свойства трансформаторов.....	58
2.3. Влияние конденсаторов на сварочно-технологические свойства источников питания .....	60
2.4. Влияние индуктивности на сварочно-технологические свойства выпрямителей .....	64
2.5. Особенности горения дуги при сварке покрытыми электродами на малых токах .....	67
2.6. Наплавка тремя электродами.....	74
<b>Глава 3. Особенности зажигания и горения дуги плавящимися электродами в защитных газах.....</b>	<b>78</b>
3.1. Зажигание сварочной дуги при сварке плавящимся электродом в защитных газах.....	78

3.2. Особенности зажигания дуги плавящимся электродом в защитных газах.....	82
3.3. Особенности сварки и наплавки на малых токах в углекислом газе.....	88
3.4. Сложности при сварке алюминия и алюминиевых сплавов .....	103
3.5. Особенности процесса сварки алюминия тонкой проволокой ...	108
3.6. Особенности наплавки стали аустенитного класса в защитных газах.....	119
<b>Глава 4. Сварка на малых токах неплавящимся электродом .....</b>	<b>125</b>
4.1. Сложности при сварке неплавящимся электродом тонкого металла .....	125
4.2. Особенности горения малоамперной дуги в защитных газах неплавящимся электродом.....	132
4.3. Сварка тонкого металла по отбортовке .....	138
4.4. Особенности сварки угольным электродом на малых токах .....	147
4.5. Оценка пульсации выпрямленного тока и напряжения на малых токах .....	152
<b>Заключение.....</b>	<b>157</b>
<b>Библиографический список .....</b>	<b>159</b>

---

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время сварочные источники питания являются одним из наиболее динамично развивающихся видов сварочного оборудования. Широкое распространение получили инверторные, транзисторные, импульсные источники питания сварочной дуги.

В последнее время возник новый класс источников для дуговой сварки – выпрямители с пониженным напряжением холостого хода и конденсаторными умножителями напряжения, обеспечивающие легкое возбуждение дуги. Благодаря пониженному вторичному напряжению (27–34 В) и большому коэффициенту трансформации первичный ток таких источников мал и по уровню приближается к току, потребляемому от сети инверторными источниками питания. Также мощность сварочных трансформаторов в таких источниках питания в 1,5–2 раза ниже, чем у традиционных с напряжением холостого хода 60–70 В. Поэтому по габаритам и потребляемому току выпрямители с конденсаторным умножителем напряжения приближаются к инверторным источникам питания, а по стоимости выигрывают, благодаря чему могут конкурировать с дорогостоящими инверторными источниками питания.

Указанные преимущества данных выпрямителей обеспечили их применение в различных отраслях промышленности и для бытовых целей.

Для сварки покрытыми электродами выпускается выпрямитель с конденсаторным умножителем напряжения Дуга 318М (ЗАО «Электроприбор», г. Новомосковск). В Институте электросварки им. Е. О. Патона разработаны однофазные источники питания для механизированной сварки плавящимся электродом с использованием конденсаторов и индуктивностей. Но подробные сведения о сварочно-технологических свойствах данных выпрямителей с различными схемными решениями отсутствуют.

Серийно выпускается много источников питания для бытовых целей, но в инструкциях к ним зачастую нет подробных сведений о сварочно-технологических свойствах [14, 27, 42]. В бытовых условиях встречаются источники питания, изготовленные с нарушениями технологий производства и техники безопасности.

В монографии рассмотрена технология изготовления источников питания, представлены опытные конструкции трансформаторов и выпрямителей с конденсаторным умножителем напряжения и их сварочно-технологические свойства.

Также приведены результаты исследований сварочно-технологических свойств выпрямителей с конденсаторным умножителем напряжения при ручной дуговой сварке и наплавке покрытыми электродами, плавящимся и неплавящимся электродом в защитных газах на малых токах.

В результате исследований выявлено устойчивое горение дуги при минимальном токе (1 А и более) покрытыми электродами, что позволило сваривать сталь толщиной 0,3–0,7 мм. Также при наплавке пучком электродов диаметром 1,6–3 мм, скомпонованных треугольником, получено устойчивое горение дуги и минимальная доля участия основного металла в наплавленном.

При питании дуги от однофазного выпрямителя с конденсаторным умножителем напряжения разработан способ зажигания дуги плавящимся электродом без длительных коротких замыканий. В сравнении с «горячим стартом» и способом бесконтактного зажигания дуги способ позволяет зажигать дугу при наличии на конце вылета застывшей капли, превышающей диаметр проволоки в 1,5–3 раза, с увеличением диаметра проволоки и её расположении параллельно изделию зажигание не ухудшается.

В случае использования традиционных источников питания минимальный ток для диаметра проволоки 0,8 мм в углекислом газе составляет 50 А, а для проволоки 1,2 мм – 80 А. Д. Х. Сагировым разработан самоорганизующийся (синергетический) процесс сварки короткой дугой, расширяющий минимальные режимы по току для диаметра электродной проволоки 0,8 мм – 18 А, а для диаметра 1,2 мм – 40 А.

В результате исследований, проведенных авторами данной монографии, обеспечивается формирование швов в углекислом газе проволоками диаметром 0,8 и 1,2 мм при силе тока 9–30 А. При минимальном напряжении дуги разбрызгивание практически отсутствует. Доля участия основного металла в наплавленном для проволоки диаметром 1,2 мм и силе тока 18–20 А составляет не более 5–6 %.

Плавящейся алюминиевой проволокой диаметром 0,8–1,2 мм в аргоне при силе тока 12–35 А обеспечивается формирование швов с полным проплавлением алюминия толщиной 0,35–0,7 мм. В аргоне и азоте высокой чистоты проволокой диаметром 0,8–1,2 мм аустенитного класса обеспечивается устойчивое горение дуги и формирование швов при силе тока 18–40 А.

В монографии приведены сведения о горении дуги между вольфрамовым электродом диаметром 1–6 мм в аргоне, гелии и азоте

и изделием при силе тока 1–5 А на обратной и прямой полярности. Устойчивое горение дуги позволяет сварить по отбортовке металл толщиной 0,05 мм и более. В случае прецизионной сборки обеспечивается формирование швов при сварке стыковых соединений толщиной 0,2–0,5 мм. На минимальных токах устойчивое горение дуги обеспечивается при применении угольных и графитовых электродов, например, обычного карандаша.

Книга предназначена для студентов обучающихся по специальности 150202.65, инженеров и научных работников; всех интересующихся данной проблемой и широкого круга читателей. В монографии есть материалы дискуссионного характера, по которым авторы с благодарностью примут сделанные читателями замечания.

---

## **Глава 1. КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ**

### **1.1. Сведения о применении выпрямителей с конденсаторным умножителем напряжения**

За рубежом и в России выпускаются традиционные сварочные трансформаторы и выпрямители. К их недостаткам следует отнести значительную массу, повышенное потребление тока из первичной сети и в связи с этим низкий КПД и коэффициент мощности.

При применении традиционных трансформаторов ухудшается устойчивость горения дуги электродами с основным покрытием. Также трансформаторы и выпрямители (особенно при тиристорном регулировании) не обеспечивают устойчивость горения дуги на малых токах.

Несмотря на увеличение объема выпуска инверторных источников за рубежом и в России, они имеют ряд недостатков:

- невысокая надежность при эксплуатации в условиях пониженных температур (менее  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), загрязнении воздуха цеха или повышенной влажности;
- невозможность использования импульсных режимов и низкую надежность инверторной сварочной техники при длинных соединительных кабелях (более 20 м от источника питания до подающего механизма);
- повышенная вероятность дефектов в сварном соединении при корневых проходах при использовании рекомендованных импульсных режимов. При небольших изменениях геометрии разделки или наличии загрязнения на поверхности разделки рекомендованные параметры импульсных режимов самопроизвольно изменяются;
- сложность реализации сварочного импульсного процесса при токах дуги более 300 А;
- дорогостоящее программирование параметров сварочного режима при необходимости сварки в необычном для инверторного выпрямителя режиме и сложность обслуживания [32].

Имеются сведения о неблагоприятном воздействии инверторных выпрямителей на организм сварщика. Так, при питании дуги током более 100–200 А магнитная индукция возле руки, предплечья и грудной клетки превосходит допустимые значения и для защиты сварщика тре-

буется костюм с экранирующими ферромагнитными вставками; также необходимо экранировать сварочный кабель и горелку [124].

Некоторые недостатки инверторных выпрямителей отмечаются в работе [83]. Будучи изделием, работающим на более высоких частотах, чем традиционное сварочное оборудование на основе традиционных трансформаторов, инвертор оказывает сильное воздействие на организм человека. В некоторых случаях производители умышленно комплектуют инверторные выпрямители короткими сварочными проводами, так как при длинных сварочных кабелях происходит сглаживание сварочных токов и пропадает возможность его регулирования.

В первичной сети наблюдаются большие импульсные токи, наличие гармоник, перегрузка сети, повышенное падение напряжения в подводящих проводах.

Стандартный инвертор при сварочном токе 160 А потребляет из первичной сети 2–3 А среднеквадратичного тока. Однако из-за импульсного потребления тока его амплитуда может достигать 90 А.

Государственные стандарты ограничивают допустимый процент гармонических составляющих, который в данном случае превышен. Устранение данных недостатков усложняет схемотехнические решения [83].

Стоимость инверторных источников питания превышает стоимость источников обычного типа, поэтому простые и надежные традиционные источники с улучшенными сварочными свойствами успешно конкурируют и будут конкурировать в будущем с инверторными источниками.

Поэтому разумно гармоническое развитие всех видов источников питания [54].

Выпрямители с конденсаторным умножителем напряжения имеют хорошие сварочно-технологические свойства, легче традиционных и благодаря пониженному вторичному напряжению потребляют ток от сети при сварке на уровне, близком к току, потребляемому инверторными источниками питания. Выпускаемые в настоящее время выпрямители с конденсаторным умножителем напряжения просты по устройству, легче традиционных и легко ремонтируются.

Схемы с умножителями напряжения в электрических устройствах известны [61]. Они стали применяться в сварочных выпрямителях с целью улучшения устойчивости горения дуги и уменьшения массы и тока из первичной сети при сварке. Но сведения о емкости конденсаторов, индуктивности дросселей и конкретные схематические решения не всегда связываются со сварочно-технологическими свойствами выпрямителей.

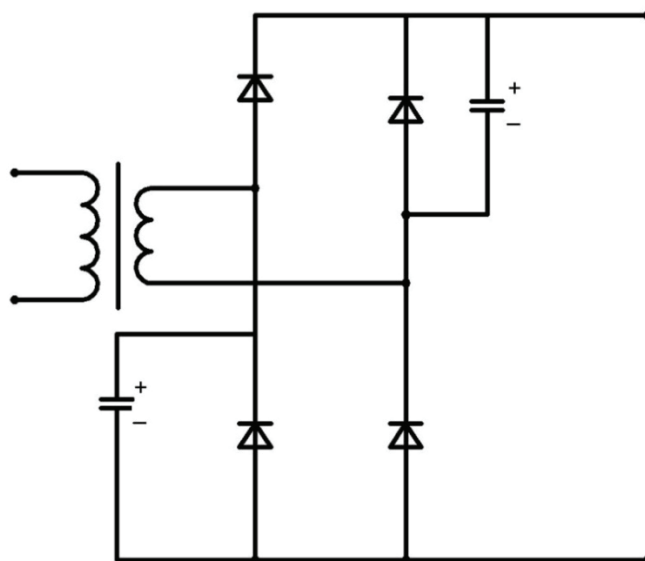


Рис. 1.1. Схема выпрямителя с умножителем напряжения

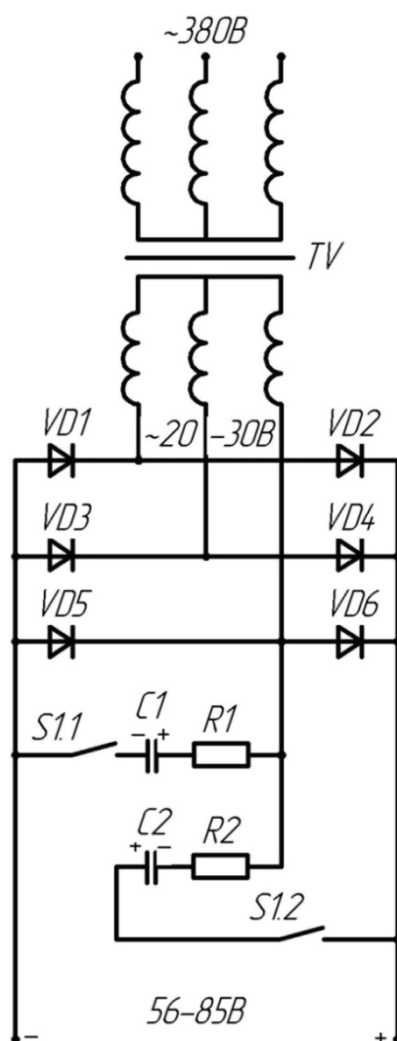


Рис. 1.2. Схема умножения напряжения

В патенте [61] приведена принципиальная электрическая схема (рис. 1.1), позволяющая уменьшить величину потребляемого тока при сварке и в связи с этим снизить массу выпрямителя.

Рекомендуемая емкость конденсатора

$$C = (1 - 5) \cdot 10^4 \cdot \frac{1}{E_2}, \quad (1.1)$$

где  $C$  – емкость конденсатора, мкФ;

$E_2$  – действующее значение ЭДС вторичной обмотки трансформатора, В.

Максимальное напряжение холостого хода равно утроенному действующему значению ЭДС вторичной обмотки трансформатора.

Схема удвоения напряжения в выпрямителе с трёхфазной мостовой схемой приведена в патенте [11].

Отличительными признаками данного изобретения является то, что с целью уменьшения массогабаритных показателей источника в него введены два резистора, при этом второй вывод каждого конденсатора подключен через соответствующий резистор с одной из вторичных обмоток силового трансформатора (рис. 1.2).

На рис. 1.3 представлена электрическая схема и вольт-амперная характеристика источника питания [8].

От источника питания на вход мостового выпрямителя подается переменное напряжение, величина которого соответствует напряжению горения дуги. В режиме холостого хода (при отсутствии нагрузки) одновременно происходит выпрямление напряжения с помощью диодов 1, 2 и заряд конденсаторов 5, 6, каждый из которых заряжается до напряжения, равного  $U_{вх} \cdot 2^{1/2}$ . Заряд конденсаторов 5, 6 осуществляется через дроссель 7, что обеспечивает отсутствие при их заряде реактивной составляющей. Поскольку конденсаторы 5, 6 соединены в цепочке последовательно, то на ее выводах формируется удвоенное напряжение. При этом диоды 3, 4, параллельно которым подключены конденсаторы 5, 6, закрыты. При касании электродом детали (режим зажигания, то есть нагрузки) конденсаторы 5, 6 разряжаются через узел 9 вольтовой дуги, открывая диоды 3, 4, обеспечивая при этом переход в режим мостового двухполупериодного выпрямителя с напряжением, величина которого уменьшилась в два раза и стала равной напряжению горения дуги. Сглаживание пульсаций осуществляется с помощью конденсаторов 5, 6 и дросселей 7, 8, при этом КПД составляет  $\approx 94\%$ .

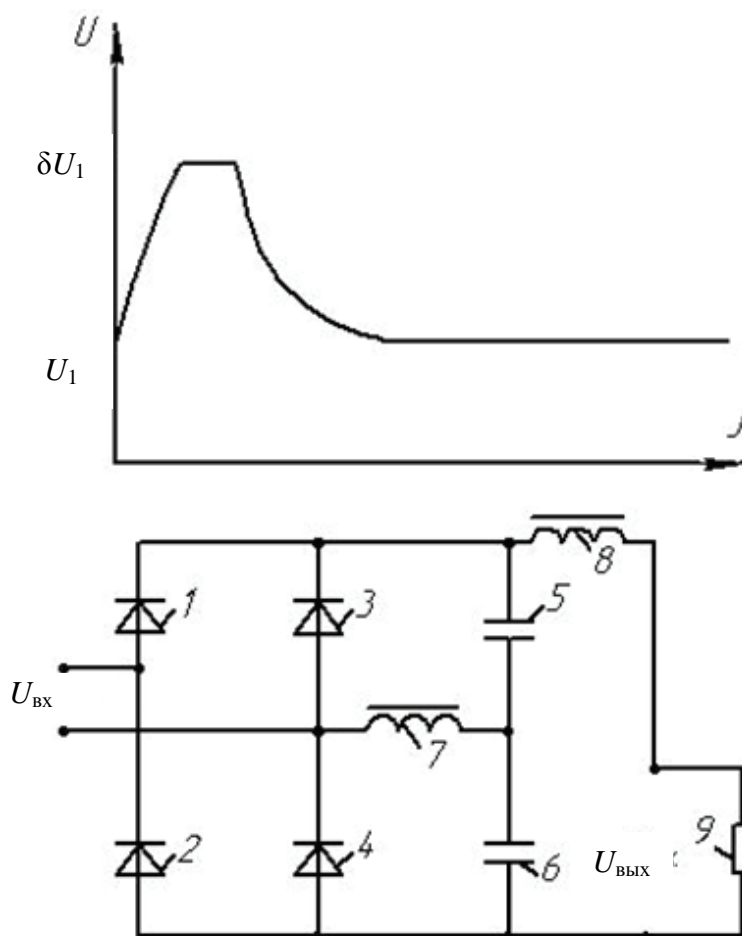


Рис. 1.3. Схема умножителя напряжения и вольт-амперная характеристика источника питания.

Изготавливаются выпрямители с конденсаторным умножителем напряжения «Дуга» 318 МА для ручной дуговой сварки [82] и сварки в углекислом газе. Способ формирования внешней характеристики и устройство для его осуществления запатентованы [9].

Электрическая схема выпрямителя при однофазном трансформаторе приведена на рис. 1.4 [9].

Вход однофазного мостового выпрямителя (2, 3, 4, 5) подключен к общей точке источника 1 исходного переменного напряжения и одному из его выходов, а выход – к дуговому промежутку. Первые выходы двух конденсаторов 7 и 8 объединены в общую точку, а вторые выводы присоединены соответственно к выходу мостового выпрямителя. Общая точка конденсаторов 7 и 8 подключена ко второму выходу источника 1 исходного переменного напряжения через регулятор тока 9. В сварочную цепь включен дроссель 6.

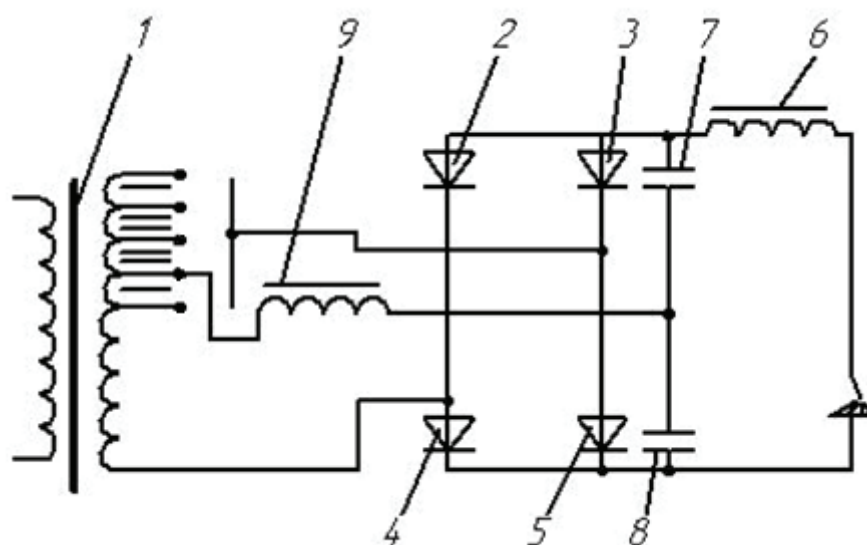


Рис. 1.4. Электрическая схема выпрямителя

Регулирование тока осуществляется за счет секционирования вторичной обмотки трансформатора при однофазной и трехфазной схеме трансформатора. В момент зажигания дуги характеристика источника питания крутопадающая и обеспечивается при разряде конденсаторов, а в процессе горения дуги характеристика источника питания пологопадающая.

К недостаткам выпрямителя следует отнести слишком пологий наклон внешней характеристики в процессе горения дуги [82]. Также отсутствуют сведения об индуктивности дросселей и практически отсутствуют сведения о сварочно-технологических свойствах данных выпрямителей при ручной дуговой сварке и при сварке в защитных газах плавящимся и неплавящимся электродом.

В работе [92] приведены сведения о выпрямителе с конденсаторным умножителем напряжения и напряжением холостого хода трансформатора 33–35 В. Характеристика источника питания в рабочем режиме сварки пологопадающая, при сварке электродами АНО-21 сварочные свойства высокие. Также в работе [93] отмечается, что уменьшением числа витков вторичной обмотки трансформатора возрастает жесткость вольт-амперной характеристики. В данных работах нет сведений о применении дросселей и емкости конденсаторов.

Предложено [4] совместить в едином схемотехническом решении однофазную мостовую схему выпрямителя и умножитель напряжения (рис. 1.5).

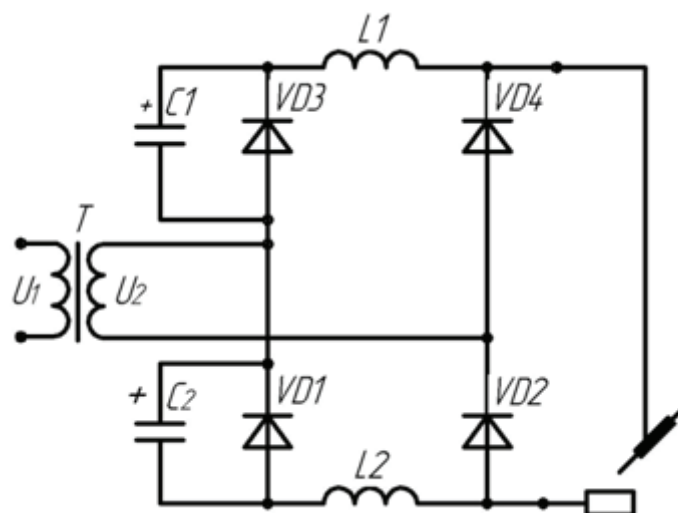


Рис. 1.5. Схема сварочного выпрямителя

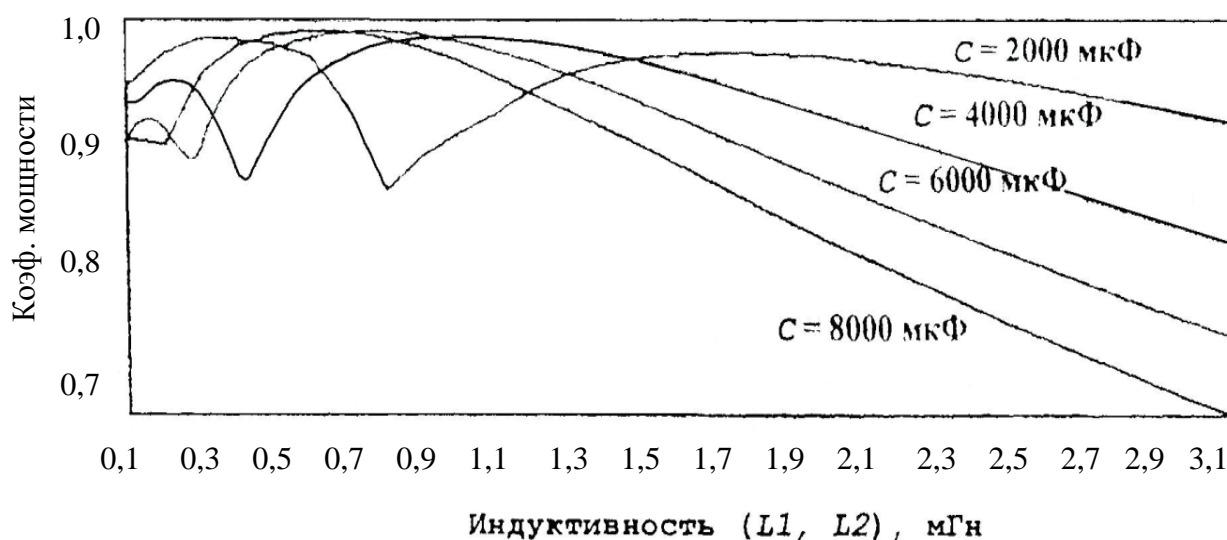


Рис. 1.6. Зависимость коэффициента мощности от индуктивности дросселей

Дроссели сглаживают пульсации тока нагрузки и переразрядные токи конденсаторов. Удвоение напряжения и компенсации реактивной мощности производится конденсаторами  $C_1$  и  $C_2$ . При емкости конденсаторов  $C_1 = C_2 = 6000$  мкФ и индуктивности дросселей  $L_1 = L_2 = 1$  мГн напряжение холостого хода больше удвоенного значения амплитуды напряжения вторичной обмотки трансформатора  $U_2$  на 47 %.

При сварке коэффициент мощности больше 0,98 и достигает оптимального значения при емкости конденсаторов 2000 мкФ и индуктивности дросселей 1,5–2,1 мГн (рис. 1.6).

Также для сварки в углекислом газе при питании от однофазной сети переменного тока рекомендуют разнообразные схемотехнические решения [49, 50]. Потери на разбрызгивание при сварке проволоками диаметром 0,8 мм и током 60–120 А составляют 8,6 и 3 %.

В работе [51] оценивали влияние накопительных конденсаторов при различных их включениях в схему источника тока на процесс сварки тонкой проволоки в углекислом газе. Отмечается положительное влияние конденсаторов на устойчивость горения дуги и сокращение времени, в течение которого расплавленная капля переходит в ванну.

В источниках с конденсатором, разряжающимся на дуговой промежуток, скорость нарастания тока, способствующего переносу капли, в несколько раз выше, чем у источников без конденсаторов. Дроссель и конденсатор снижают потери на разбрызгивание. С увеличением параметров режима эффективность влияния емкости снижается. Потери на разбрызгивание в зависимости от включения конденсатора совместно с дросселем составляют 4–5 %. Но при включении конденсаторов (и, по-видимому, без них) не обеспечивается нижний предел режимов с током дугового процесса ниже 45–50 А, а число коротких замыканий при возбуждении дуги – 2–3. Конкретные сведения об индуктивности дросселя и емкости конденсаторов не приведены. Рекомендуют индуктивности, обеспечивающие минимальные скорости нарастания тока короткого замыкания [51].

На основании вышеизложенного, сведения об оптимальных схемотехнических решениях и сварочно-технологических свойствах выпрямителей для ручной дуговой сварки и в углекислом газе противоречивые. По-видимому, оптимальная емкость конденсаторов, индуктивность дросселей с целью улучшения сварочно-технологических свойств при различных схемотехнических решениях не выявлены.

## **1.2. Технология изготовления источников питания**

При наличии электротехнической стали шириной 35–80 мм и толщиной 0,3–0,5 мм пластины необходимой длины нарезают ножницами или на ручной гильотине. Холоднокатаная электротехническая сталь режется легче. После резки края пластины в зоне реза необходимо отрихтовать молотком на массивной металлической подставке и после правки удалить заусенцы напильником или на фрезерном станке.

Наиболее распространенный вариант шихтовки сердечника магнитопровода показан на рис. 1.7.

Данную схему применяют для сборки пластинами одинаковой длины или разной, если собранный магнитопровод не квадратный.

Применение шихтованных сердечников (в переплет) (рис. 1.7) предпочтительнее стыковых сердечников, поскольку уменьшает намагничивающий ток. После шихтовки и выравнивания магнитопровод стягивают брусками согласно рис. 1.8.

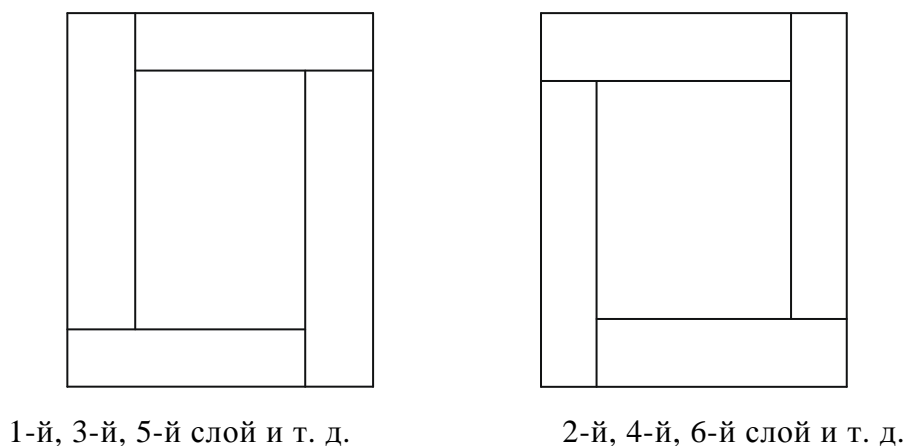


Рис. 1.7. Укладка листов стали в слоях шихтованного сердечника магнитопровода

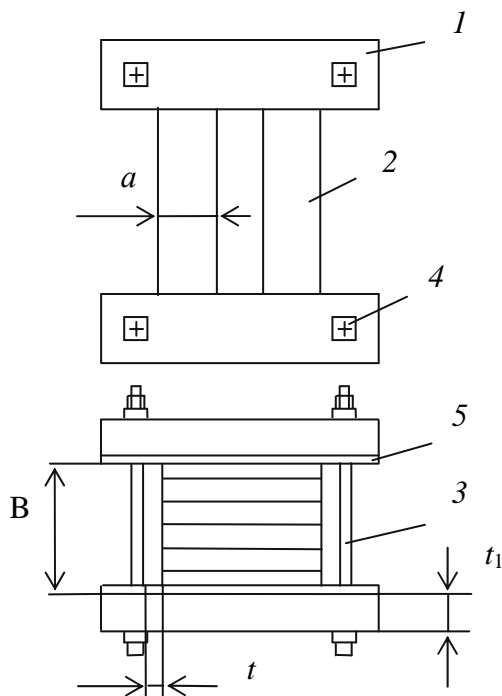


Рис. 1.8. Схема собранного магнитопровода: 1 – стягивающий брусок; 2 – магнитопровод; 3 – металлическая шпилька диаметром 5–8 мм; 4 – стальная пластина; 5 – прокладка из картона

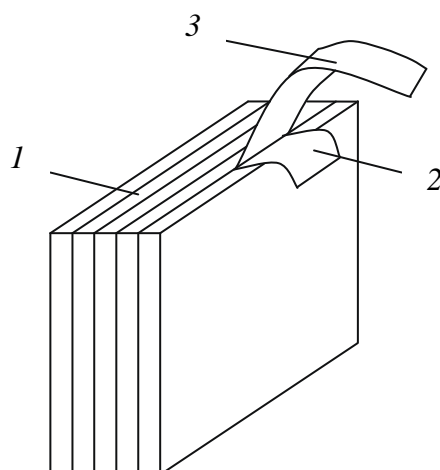


Рис. 1.9. Заземление магнитопровода: 1 – пластины магнитопровода; 2 – полоска электрокартона; 3 – медная лента

Желательно использовать породы дерева, не содержащие смол и кислот, такие как бук, береза и др.

Высоту набора магнитопровода  $B$  (рис. 1.8) определяют из соотношения  $B / a = 2-3$ , где  $a$  – ширина пластины. Расстояние  $t$  должно быть 20–25 мм, а толщина бруска  $t_1 = 45-50$  мм.

Между пластинами магнитопровода закладывают заземляющую ленту из меди вместе с полоской из электрокартона, предотвращающей замыкание торцов ярма (рис. 1.9) Толщина заземляющей ленты – 0,3 мм, ширина – 20 мм. При наличии брусков из термореактивной пластмассы (текстолит, эбонит и т. д.) толщина  $t_1$  может быть уменьшена. Применение неметаллических брусков облегчает крепление корпуса источника питания с магнитопроводом и уменьшает потери в металлическом корпусе из-за индуктивных токов.

Изготовление магнитопровода значительно облегчается и упрощается в случае применения ленты из электротехнической стали шириной 80–100 мм. Возможно изготовление магнитопровода и из ленты шириной 40–50 мм при условии изоляции двух частей с торца и намотки двух слоев одинаковой толщины.

Как и у шихтованных магнитопроводов, отношение  $B/a$  должно быть 2–3, где  $B$  – ширина ленты,  $a$  – толщина намотанного слоя.

Считается, что масса кольцевых магнитопроводов на 15–20 % меньше шихтованных и потери энергии тоже меньше. Также у трансформаторов с кольцевым магнитопроводом лучше сварочно-технологические свойства.

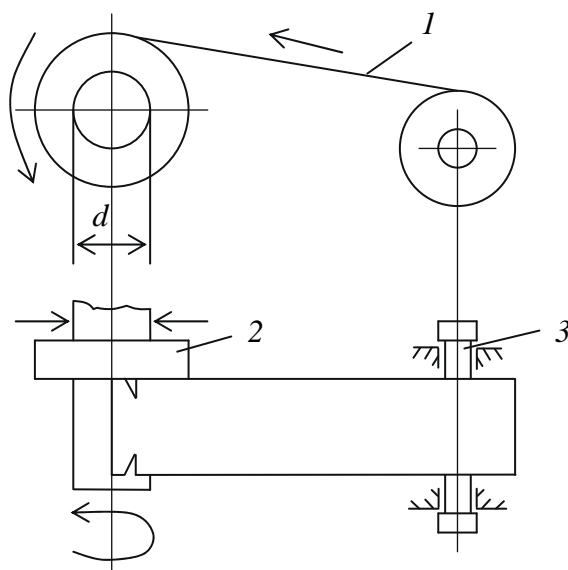


Рис. 1.10. Схема намотки ленты на оправку: 1 – лента, 2 – оправка, 3 – ось для ленты

Схема намотки кольцевого магнитопровода приведена на рис. 1.10. Наиболее просто намотка осуществляется на зажатую в патроне токарного станка оправку необходимого диаметра  $d$  (рис. 1.10). Лента перед намоткой закрепляется на оправке. В случае выполнения оправки из дерева лента крепится гвоздями или шурупами.

При условии натяжения ленты в процессе намотки обеспечивается плотный слой необходимой толщины. После этого магнитопровод скрепляется по длине окружности мотка мягкой проволокой или любым стягивающим устройством. Концы ленты прихватываются дуговой сваркой с внутренней и наружной стороны магнитопровода. Острые кромки магнитопровода желательно притупить.

Каркас изолирующей катушки для намотки первичной и вторичной обмотки на кольцевой магнитопровод можно не делать, если магнитопровод будет фиксироваться на деревянных опорах-стяжках и они будут препятствовать «сползанию» первичной обмотки при намотке на магнитопровод (рис. 1.11).

Перед сборкой кольцевого магнитопровода с опорами его необходимо изолировать. Наиболее просто изоляцию выполнить из электротехнического картона с вырезами (рис. 1.12) для улучшения плотного контакта с кольцевым магнитопроводом.

Дополнительно на слой изоляции из картона необходимо намотать хлопчатобумажную (киперную ленту) или другую гибкую ленту.

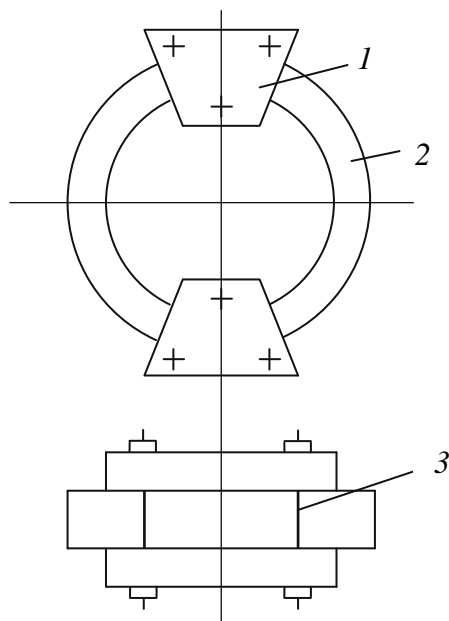


Рис. 1.11. Магнитопровод с опорами: 1 – опора; 2 – магнитопровод; 3 – шпильки (болты) для стягивания

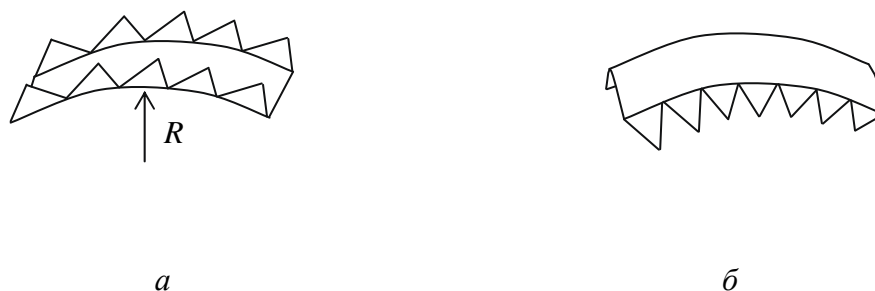


Рис. 1.12. Изоляция для кольцевого магнитопровода: а – для внутренней части; б – для наружной части

Перед намоткой первичной обмотки магнитопровод жестко фиксируется в зажимном приспособлении. В отверстие магнитопровода помещается разрезанный обод велосипедного или мотоциклетного колеса. Далее оба конца обода в зоне разреза скрепляются накладкой болтами (рис. 1.13).

На корытообразный обод колеса наматывается необходимое количество витков первичной обмотки (рис. 1.14), а слои увязываются хлопчатобумажной лентой, шпагатом и т. д. Далее при жесткой фиксации магнитопровода наматываются дальнейшие слои первичной обмотки (рис. 1.15).

Каждый намотанный слой изолируется (киперная лента, бумага изоляционная, лакоткань, стеклоткань и т. д.). При секционировании

обмоток следует изолировать начало и конец каждой секции обмотки. Секции обмоток необходимо наматывать в одном направлении.

Вторичная обмотка с числом витков 35–50 наматывается аналогично. При напряжении холостого хода 30 В и числе витков 25–35 (особенно в случае выполнения отвода для пуска двигателя) намотка легко осуществляется при сечении плоского алюминиевого или медного провода сечением до  $55 \text{ мм}^2$ , т. к. в данном случае каждая секция вторичной обмотки наматывается отдельно.

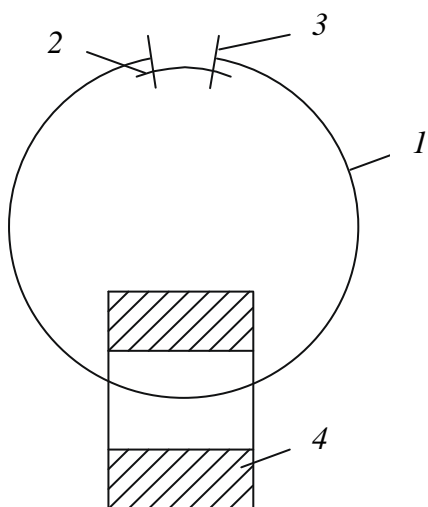


Рис. 1.13. Сборка обода относительно магнитопровода: 1 – обод колеса; 2 – накладка; 3 – болт; 4 – магнитопровод

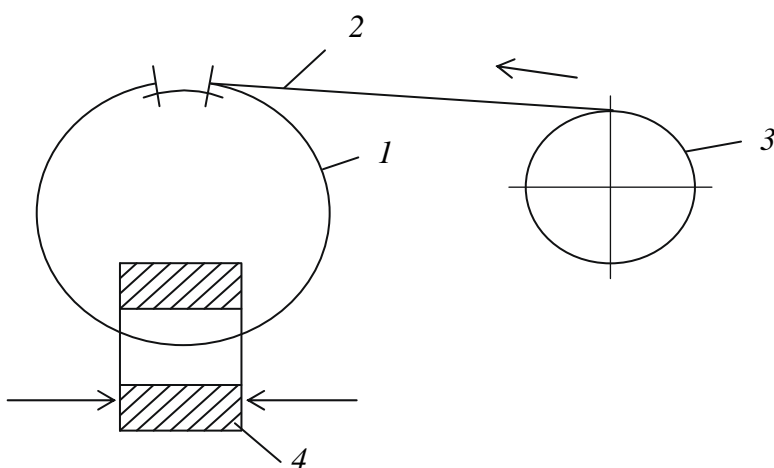


Рис. 1.14. Схема намотки первичной обмотки на обод колеса: 1 – обод; 2 – провод для первичной обмотки; 3 – катушка с проводом для первичной обмоткой; 4 – магнитопровод

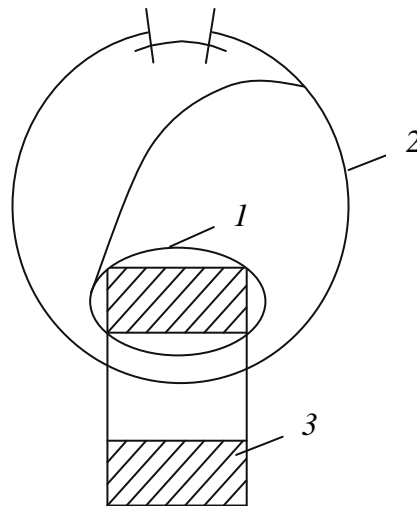


Рис. 1.15. Схема намотки первичной обмотки на кольцевой магнитопровод:  
1 – первичная обмотка; 2 – обод с проводами для первичной обмотки;  
3 – магнитопровод

Необходимое число витков секции вторичной обмотки «пропускается» через окно магнитопровода с диаметром витков до 1 м рядами, чтобы не было «переплетения» провода. Лучше при намотке провода его увязывать для гарантии устранения «переплетения». Далее одна секция вторичной обмотки наматывается над первичной обмоткой и плотно стягивается сверху киперной лентой. Вторая секция вторичной обмотки наматывается аналогично. Обязательно следует соединять конец одной секции с началом другой.

Вполне возможно собрать обмотки при расстоянии между витками, намотанными на противоположных стержнях магнитопровода, не более 5 мм.

Для лучшей изоляции проводов, помимо использования вместе с изоляцией из киперной ленты, необходимо пропитать электроизоляционным лаком и просушить.

По данным [90] в металлическом корпусе трансформатора тратится около 3 % полезной мощности. Поэтому корпус источника питания желательно выполнять из немагнитных материалов, а расстояние от металлических частей корпуса до магнитопровода и обмоток необходимо увеличивать.

По данным наших экспериментов при протекании по вторичной обмотке тока 80–180 А и расстоянии от металлического корпуса до магнитопровода и вторичной обмотки 1–1,5 см из-за вихревых токов наблюдаются локальный нагрев корпуса, его вибрация и шум (гудение). Для уменьшения потерь каркас корпуса, изготовленный из металлических

материалов, должен находиться на расстоянии 3–4 см от магнитопровода и вторичной обмотки.

Каркас корпуса для облегчения монтажа частей выпрямителя должен быть открытым, а крышки со всех сторон и сверху необходимо прикрепить винтами к корпусу. В этом случае в крышках корпуса легче выполнить расщепки и отверстия в местах минимального расстояния до магнитопровода и вторичных обмоток. Также боковые крышки можно выполнить из неметаллических материалов (с отверстиями для улучшения вентиляции источника питания).

В случае выполнения днища и крышки корпуса из металла необходимо в зоне соприкосновения магнитопровода с корпусом удалить из него металл.

Крепление опор, стягивающих магнитопровод с днищем и крышкой корпуса, осуществляется болтами и шурупами. Дроссель с подставкой из электроизоляционного материала фиксируется аналогично. Диоды с радиаторами присоединяются к корпусу через электроизоляционные прокладки. Блок конденсаторов крепится аналогично.

Переключатель секций первичной обмотки, выводы вторичной обмотки и тумблер включения конденсаторов размещаются на панели из текстолита или эбонита толщиной 6–10 мм, которая после монтажа всех комплектующих винтами крепится к корпусу.

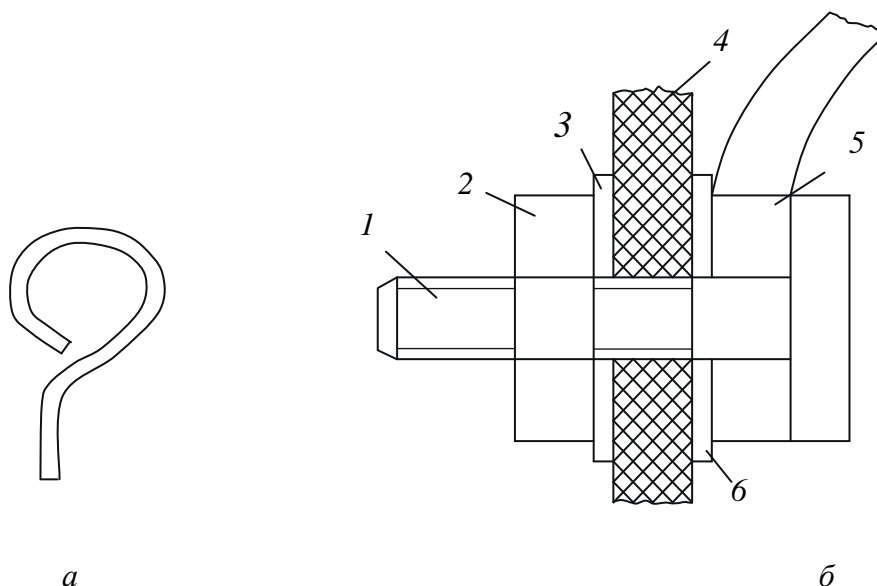


Рис. 1.16. Крепление выводов вторичной обмотки с изоляционной панелью: *а* – петля изогнутого конца вторичной обмотки; *б* – крепление выводов к изоляционной панели; *1* – болт; *2* – гайка; *3, 6* – шайбы; *4* – панель; *5* – петля вторичной обмотки

В случае выполнения вторичной обмотки из алюминия необходимо армировать медью выводы для присоединения сварочных проводов. В обычных условиях это сложно осуществить. Поэтому концы алюминиевых или медных проводов вторичной обмотки следует изгибать в виде петли (рис. 1.16). Соединение проводов, изогнутых петель, с болтами для присоединения сварочных проводов просто осуществить по схеме (рис. 1.16).

### 1.3. Конструкции источников питания

#### 1.3.1. Простейшая конструкция трансформатора

Простейшая конструкция трансформатора с регулировкой тока обеспечивается путем секционирования и размещения обмоток относительно магнитопровода.

На рис. 1.18 приведены размеры магнитопровода, собранного впереплет из горячекатаной стали, с высотой набора пакета 70 мм. После изоляции магнитопровода электротехническим картоном и киперной лентой на одном стержне намотано 196 витков медного провода сечением  $9 \text{ мм}^2$  (секция 1 на рис. 1.17). Каждый слой изолировался киперной лентой. Далее наматывается еще 23 витка первичной обмотки (секция 2 на рис. 1.17). При напряжении первичной сети 220 В ток холостого хода составил 4,5 А и 2,4 А.

Над первичной обмоткой наматывается 20 витков вторичной алюминиевой обмотки с площадью поперечного сечения  $59 \text{ мм}^2$  (секция 3 на рис. 1.17). Далее на другом стержне магнитопровода намотано 28 витков вторичной алюминиевой обмотки с площадью поперечного сечения  $33 \text{ мм}^2$  (секция 4 на рис. 1.17) и 22 витка вторичной обмотки (секция 5 на рис. 1.17).

В результате получено 6 ступеней регулирования сварочного тока, см. табл. 1.1.

При испытании данного трансформатора выявлено, что электродами для переменного тока (МИТ, АНО, МР) дуга горит с разрывной длиной не менее  $3 d_3$  (где  $d_3$  – диаметр стержня электрода). В случае применения электродов УОНИ дуга не горит.

Вольт-амперные характеристики источника питания приведены на рис. 1.19.

После намотки обмоток расстояние между ними составило 40–50 мм. Поэтому размер магнитопровода по горизонтали можно выбирать от 250 до 260 мм.

С целью увеличения токов на всех ступенях следует выполнить секцию вторичной обмотки 3 в количестве 25 витков, а секцию 4 уменьшить до 23 витков (рис. 1.18).

На первичной стороне число витков регулируется универсальным переключателем, а на вторичной – подключением сварочных проводов к выводам обмоток на панели из текстолита.

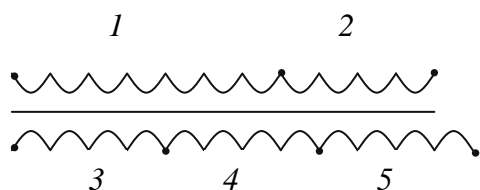


Рис. 1.17. Схема соединения обмоток

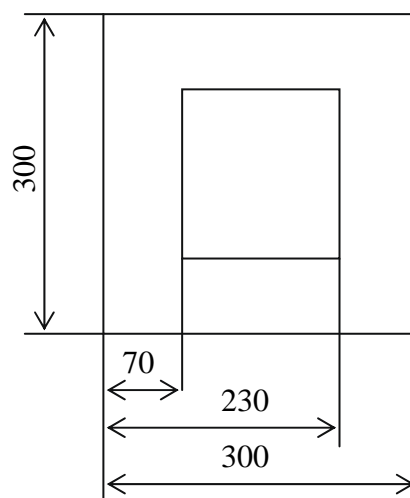


Рис. 1.18. Размеры магнитопровода

Таблица 1.1

### Техническая характеристика трансформатора

Первичные обмотки	Вторичные обмотки	Напряжение холостого хода, В	Сварочный ток, А
1 + 2	4; 5	50	45
1	4; 5	56	60
1 + 2	3; 4; 5	78	75
1	3; 4; 5	80	90
1 + 2	3; 4	49	145
1	3; 4	54	166

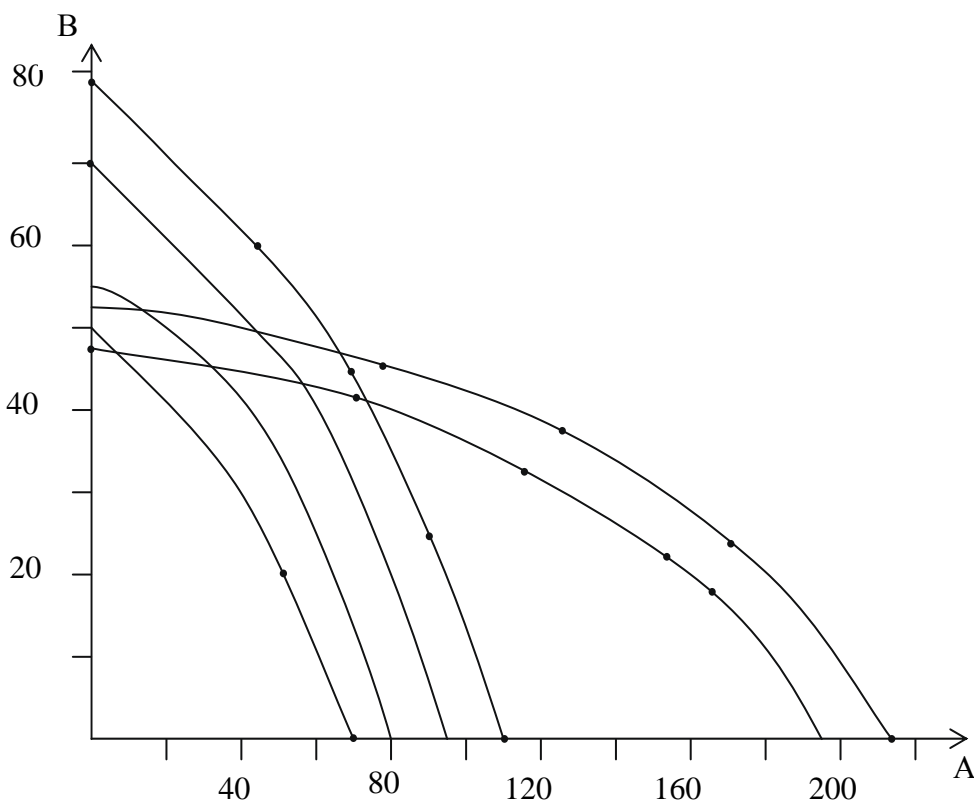


Рис. 1.19. Вольт-амперные характеристики сварочного трансформатора

К недостаткам данной конструкции следует отнести некоторое увеличение числа витков вторичной обмотки (секция 3 на рис. 1.18).

### 1.3.2. Трансформатор с тороидальным магнитопроводом

Считается, что трансформаторы с тороидальным магнитопроводом имеют меньший вес и габариты, а индукцию – в 1,2 раза больше.

Имеются сведения о применении магнитопроводов от электродвигателей для изготовления бытовых сварочных трансформаторов.

Сердечник статора асинхронного электродвигателя собирается из отдельных штампованных листов электротехнической стали толщиной 0,35–0,5 мм. Отдельные листы стали изолируются друг от друга слоем лака. После опрессовки листы статора стягиваются металлическими скобами. На рис. 1.20 приведен сердечник статора после удаления обмоток.

Перед намоткой обмоток необходимо удалить металл в зоне пазов и обеспечить цилиндрическую форму магнитопровода изнутри, а также удалить металлические стягивающие скобы и листы магнито-

провода стянуть электроизолирующими прокладками. Из-за плохой электроизоляции скоб от магнитопровода на холостом ходе магнитопровод может нагреваться.

При изготовлении трансформатора на основе сердечника статора магнитопровод после механической обработки имеет следующие размеры: длина – 150 мм; внутренний диаметр – 162 мм; толщина стенки – 21,4 мм.

С одной стороны магнитопровода наматывается 233 витка медным проводом с эмаливой изоляцией диаметром 2,65 мм, что соответствует току холостого хода – 1,5 А. Далее выполняется отвод и наматывается 20 витков первичной обмотки с током холостого хода 1 А. Все слои первичной обмотки изолируются друг от друга киперной лентой.

С противоположной стороны магнитопровода наматывается вторичная алюминиевая обмотка с бумажной изоляцией и площадью поперечного сечения 32 мм<sup>2</sup>, числом витков, равным 53; дополнительно наматывается 20 витков. Расстояние между первичной и вторичной обмоткой по длине окружности внутренней поверхности составляет 130 мм. Далее над первичной обмоткой размещаются две секции вторичной обмотки (20 и 15 витков соответственно).

В результате обеспечивается 10 ступеней регулировки тока (табл. 1.2). Витки 20\* и 15\* намотаны над первичной обмоткой. Режимы 3–4 следует использовать при падении напряжения в сети менее 200 В, что часто бывает в сельских отдаленных районах.

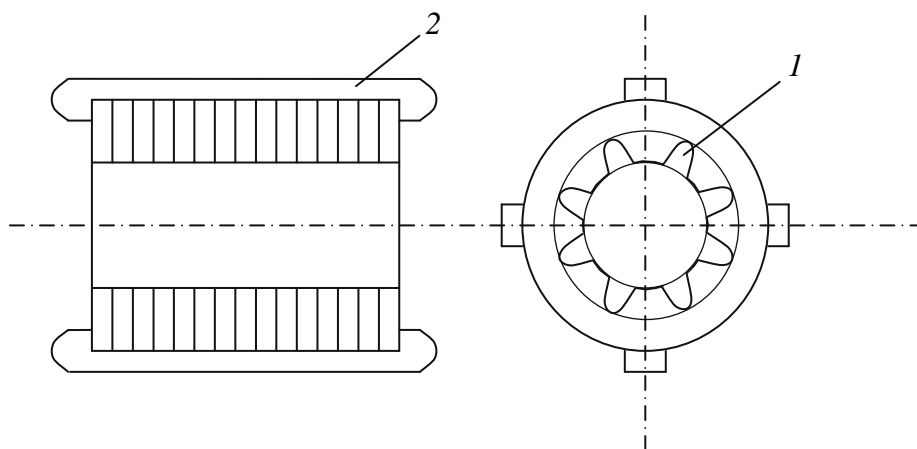


Рис. 1.20. Сердечник статора после удаления обмоток: 1 – пазы для обмоточных проводов электродвигателя; 2 – стягивающие скобы

Таблица 1.2

**Техническая характеристика трансформатора**

№ п/п	Число витков первичной обмотки, 220 В	Витки для регулирования тока	Напряжение холостого хода, В	Сварочный ток, А	Первичный ток, А
1	253	53	47	55	12,5
2	233		50,5	66	15
3	253	53 + 20* + 15*	83,5	108	40
4	233		90,3	114	47,5
5	253	53 + 20*	66,7	55	15,6
6	233		72	62	20
7	253	53 + 20	66,7	55	15,6
8	233		72	62	20
9	253	20 + 15* + 20*	56	180	48
10	233		60,5	195	52

При напряжении холостого хода 66–72 В горение дуги обеспечивается электродами с фтористо-кальциевым покрытием (УОНИ), что невозможно для трансформатора со стержневым магнитопроводом. Вольт-амперные характеристики трансформатора показаны на рис. 1.21.

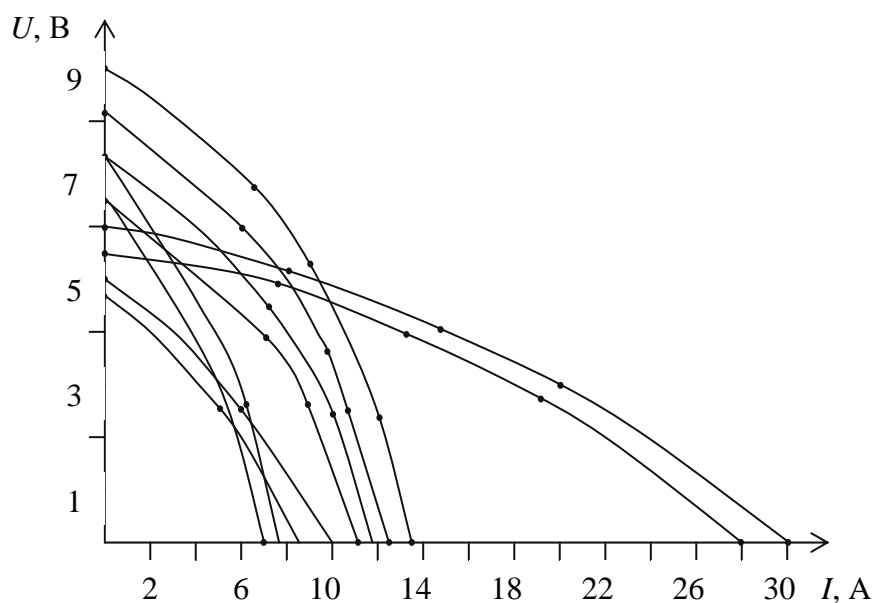


Рис. 1.21. Вольт-амперные характеристики трансформатора

Недостатком данной конструкции следует считать дополнительный расход проводов для вторичной обмотки и большое число выводов для регулировки тока.

### 1.3.3. Расширение пределов регулирования сварочного тока трансформатора

У трансформатора с питанием напряжением 220 В (рис. 1.22) на одном стержне имелось 80 витков первичной обмотки, а на другом – 120 витков первичной обмотки и 53 витка вторичной обмотки.

Трансформатор имел одну ступень сварочного тока (210 А) и ток холостого хода (1,9 А). Площадь поперечного сечения первичной алюминиевой обмотки – 15 мм<sup>2</sup>, а вторичной алюминиевой – 50 мм<sup>2</sup>.

С целью расширения диапазона регулирования сварочного тока на стержне с числом витков первичной обмотки, равным 80, дополнительно наматывалось 15 витков первичной обмотки, что обеспечивало напряжение холостого хода 55 В и сварочный ток 150 А.

На основе витого сердечника из двух половин с размерами, приведенными на рис. 1.23, для регулировки тока использовался отдельный дроссель.

Две секции обмотки дросселя с 32 и 13 витками наматывались алюминиевым проводом с площадью поперечного сечения 24 мм<sup>2</sup>. Индуктивность дросселя – 0,79 мГ (45 витков) и 0,25 мГ (32 витка).

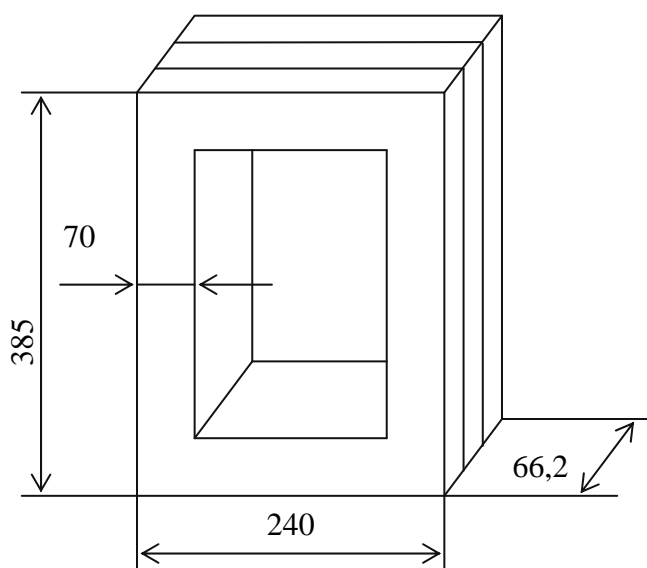


Рис. 1.22. Стержневой магнитопровод

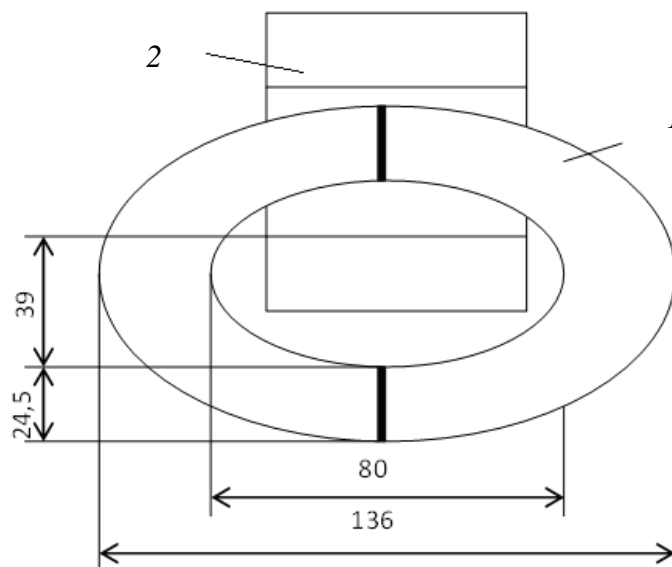


Рис. 1.23. Витой магнитопровод с обмоткой:  
1 – магнитопровод, 2 – обмотка

Таблица 1.3

#### Технические характеристики сварочного трансформатора

Число витков первичной обмотки	Число витков дросселя	Напряжение холостого хода, В	Сварочный ток, А	Первичный ток, А
215	45	55	55	15
200	45	59,5	72	20,5
215	32	55	100	28
200	32	59,5	135	38
215	—	55	150	42
200	—	59,5	210	60

Технические характеристики сварочного трансформатора приведены в табл. 1.3.

#### 1.3.4. Выпрямитель с умножителем напряжения

Для изготовления источника питания с умножителем напряжения используют магнитопровод с шириной пластин 40 мм, высотой набора пакета 130 мм и размером окна 80,5×70 мм.

После изоляции магнитопровода электротехническим картоном на одном стержне магнитопровода наматывают 177 витков медного

провода диаметром 2,3 мм, что соответствует первичному току 2,15 А. Далее число витков увеличивают до 201 с током холостого хода 1 А. На противоположной стороне магнитопровода наматывают 16 витков вторичной алюминиевой обмотки сечением 24 мм<sup>2</sup>, выполняют отпайку и наматывают дополнительно семь витков.

Для регулировки тока изготавливался отдельный дроссель, что при ступенчатой настройке режимов уменьшает число «перемычек» и клемм. Для изготовления дросселя используют витой магнитопровод, состоящий из двух половин, площадью поперечного сечения 8 см<sup>2</sup>. На одной стороне магнитопровода намотано 27 витков, сделан отвод и дополнительно намотано 27 витков. Величина зазоров в дросселе составила 2 мм. Ступенчатый дроссель с жестко стянутыми половинами не подвержен вибрации, что характерно для дросселей с подвижным шунтом. Масса трансформатора с обмотками – 23 кг, а дросселя – 3 кг.

При мостовой схеме выпрямления с диодами на 300 А используют схему включения конденсаторов согласно рис. 1.24.

Напряжение холостого хода трансформатора составило 31 и 35 В. Для умножения напряжения применены 4 оксидных конденсатора емкостью 4700 мкФ, соединенные последовательно. При полностью включенных конденсаторах напряжение холостого хода составило 86,8 В и 98 В, что допустимо для источников питания постоянного тока.

Технические характеристики выпрямителя с умножителем напряжения приведены в табл. 1.4.

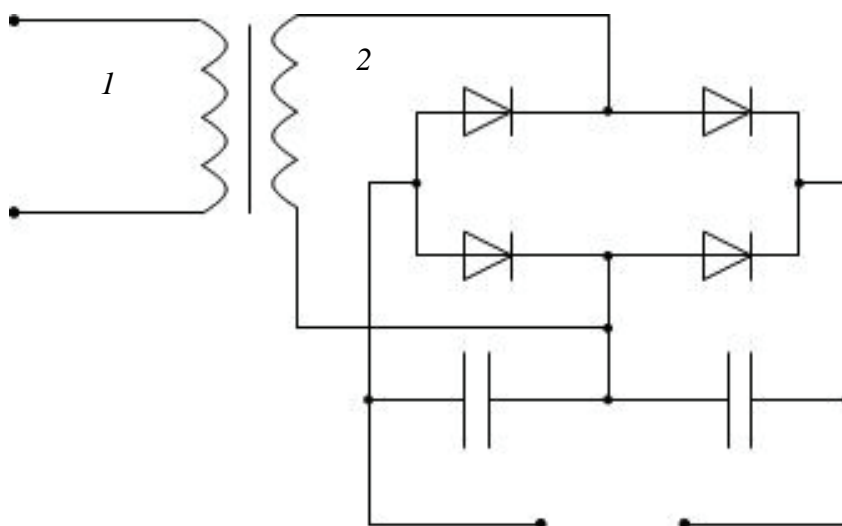


Рис. 1.24. Схема увеличения напряжения холостого хода источника питания:  
1 – первичная обмотка; 2 – вторичная обмотка

Таблица 1.4

**Технические характеристики выпрямителя**

№ п/п	Число витков первичной обмотки	Число витков дросселя	Напряжение холостого хода	Сварочный ток, А	Первичный ток, А
1	201	45	86,8	60	8
2	177		98	80	11
3	201	16	86,8	100	14
4	177		98	120	17
5	201	Нет	86,8	140	20
6	177		98	160	23

При подключении секции вторичной обмотки для запуска двигателя и выключенных конденсаторах напряжение холостого хода равно 12 и 14 В.

Электродами для переменного тока (МИТ-2, МР) дуга зажигается с одного-двух касаний, разрывная длина составляет более трех диаметров электрода.

В случае включения половины конденсаторов напряжение холостого хода составляет 57 и 67 В за полупериод, зажигание осуществляется несколько хуже и разрывная дуга уменьшается до трех диаметров электрода.

Без дросселя индуктивностью до 300 мкГн электродами УОНИ дуга зажигается, но гаснет. С дросселем, включенным в цепь постоянного тока, дуга горит при использовании электродов УОНИ.

**1.3.5. Выпрямитель с кольцевым магнитопроводом**

Из ленты шириной 40 мм наматываются две части магнитопровода с внутренним диаметром 132 мм и наружным 270 мм. При стыковке двух частей боковые поверхности магнитопровода изолируют друг от друга. После изоляции электрокартоном и киперной лентой магнитопровод фиксируют на деревянных опорах-стяжках (рис. 1.25).

На одной стороне магнитопровода намотано три секции первичной медной обмотки: первая секция (1) – 208 витков, третья (3) – 27 витков, четвертая (4) – 27 витков. На противоположной стороне намотано секция (2) – 18 витков. Площадь поперечного сечения секций 1, 2, 3 – 7 мм<sup>2</sup>, а секции 4 – 3,14 мм<sup>2</sup>.

Над секциями 1, 3, 4 первичной обмотки намотано 15 витков вторичной алюминиевой обмотки с площадью поперечного сечения 24 мм<sup>2</sup>

(8×3). Данная секция пригодна для пуска двигателя автомобиля и зарядки аккумуляторов. Далее алюминиевым проводом сечением  $24 \text{ мм}^2$  выполнено пять витков и на другой стороне магнитопровода намотано 12 витков вторичной обмотки.

В выпрямителе для улучшения динамических свойств использовались два отдельных дросселя, соединенные последовательно.

Размеры магнитопровода дросселя, с одной стороны которого намотано 32 витка алюминиевого провода с площадью поперечного сечения  $24 \text{ мм}^2$ , приведены на рис. 1.26.

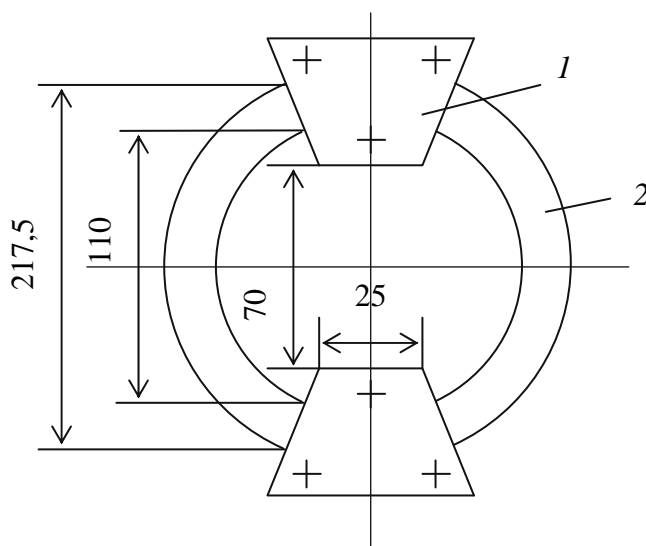


Рис. 1.25. Магнитопровод с опорами: 1 – опора; 2 – магнитопровод

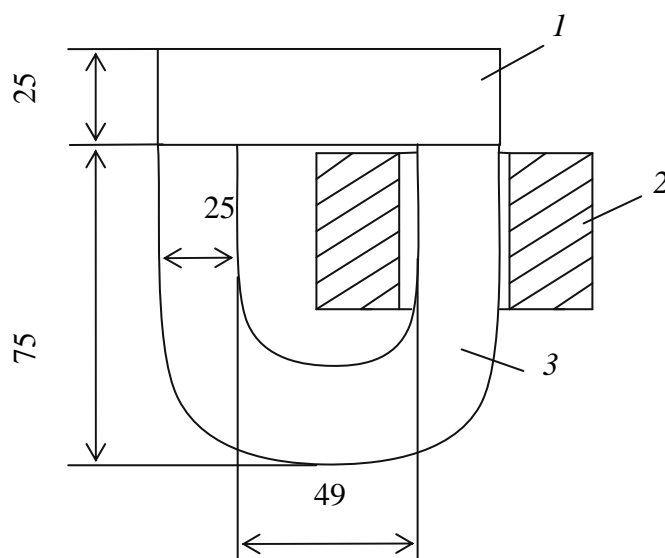


Рис. 1.26. Дроссель 1: 1 – пакет; 2 – обмотка; 3 – магнитопровод

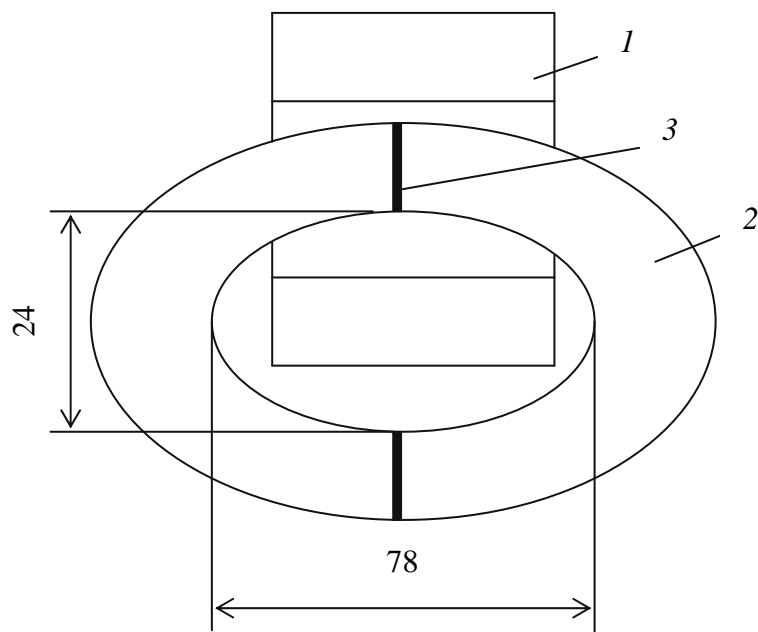


Рис. 1.27. Дроссель 2: 1 – обмотка; 2 – магнитопровод, 3 – изолирующая прокладка

Таблица 1.5

#### Техническая характеристика выпрямителя

№ п/п	Секции первичной обмотки	Напряжение холостого хода, В	Свароч- ный ток	Первичный ток, А		Секции дросселя
				Холо- стой ход	При сварке	
1	1; 3; 4	80	32	0,5	5,5	1; 2
2	1; 3	88	60	1	10	1; 2
3	1; 2	93	80	1,3	14	1
4	1	100	120	2,1	21	1
5	1	100	180	2,1	30	–

Индуктивность дросселя 1 – 290 мкГ; у дросселя 2 на одной стороне магнитопровода намотан 71 виток медного провода сечением  $10 \text{ мм}^2$  (4×2,5). Индуктивность составила 261 мкГ (рис. 1.27).

Для удвоения напряжения применялись электролитические конденсаторы емкостью 2000 мкФ.

Принципиальная схема источника питания изображена на рис. 1.28.

В табл. 1.5 приведено напряжение холостого хода в зависимости от секций первичной обмотки при 15 витках вторичной обмотки.

Вольт-амперные характеристики выпрямителя представлены на рис. 1.29.

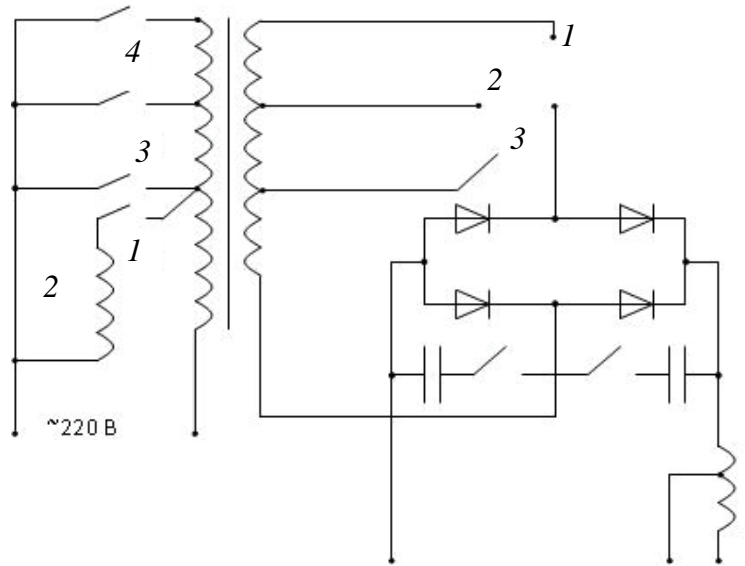


Рис. 1.28. Электрическая схема выпрямителя. 1, 2, 3, 4 – секции первичной обмотки

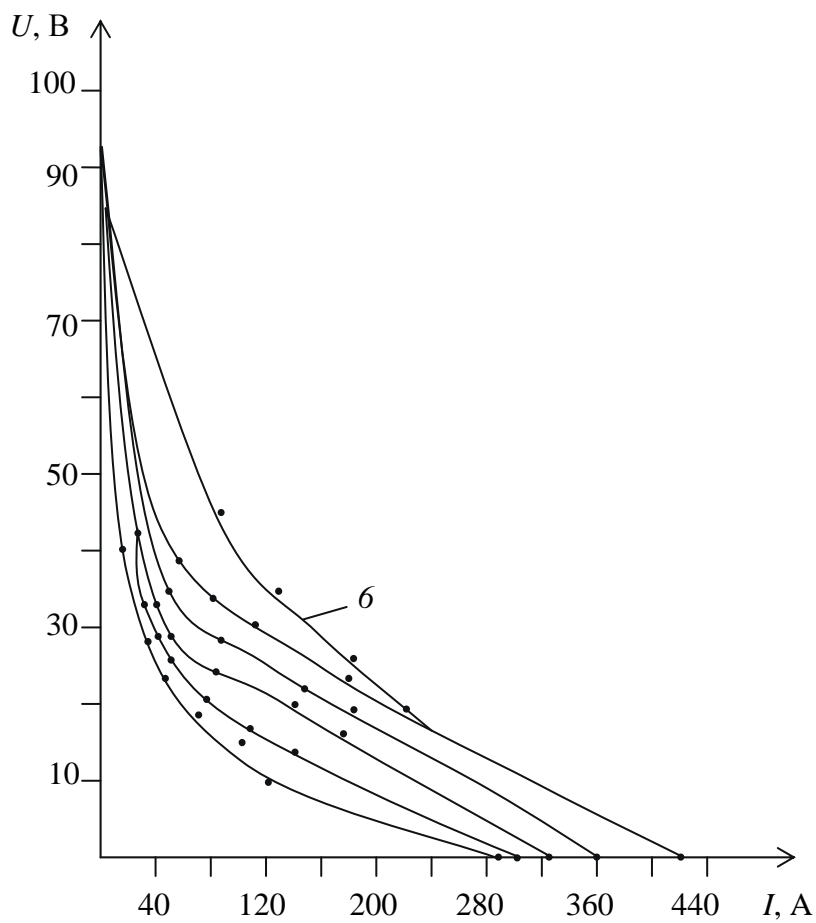


Рис. 1.29. Вольт-амперные характеристики выпрямителя: б – емкость конденсаторов 8000 мкФ, секции первичной обмотки – 1, 3

Таблица 1.6

**Напряжение холостого хода для пуска двигателя  
легкового автомобиля**

Секции первичной обмотки	Напряжение холостого хода, В
1; 3; 4	13
1; 3	14,5
1; 2	15
1	17

Положение переключателя *1* (рис. 1.28) соответствует режимам ручной дуговой сварки, положение *2* – сварке в защитном газе тонкой проволокой, *3* – пуску двигателя легкового автомобиля.

**1.3.6. Однофазный выпрямитель, изготовленный  
на основе трехфазного трансформатора**

Для изготовления однофазного выпрямителя используют утилизированный трехфазный трансформатор с шихтовкой магнитопровода и расположением обмоток, представленными на рис. 1.30.

После резки пластин разобранного магнитопровода осуществляют шихтовку магнитопровода однофазного трансформатора с высотой набора пакета 50 мм (рис. 1.31).

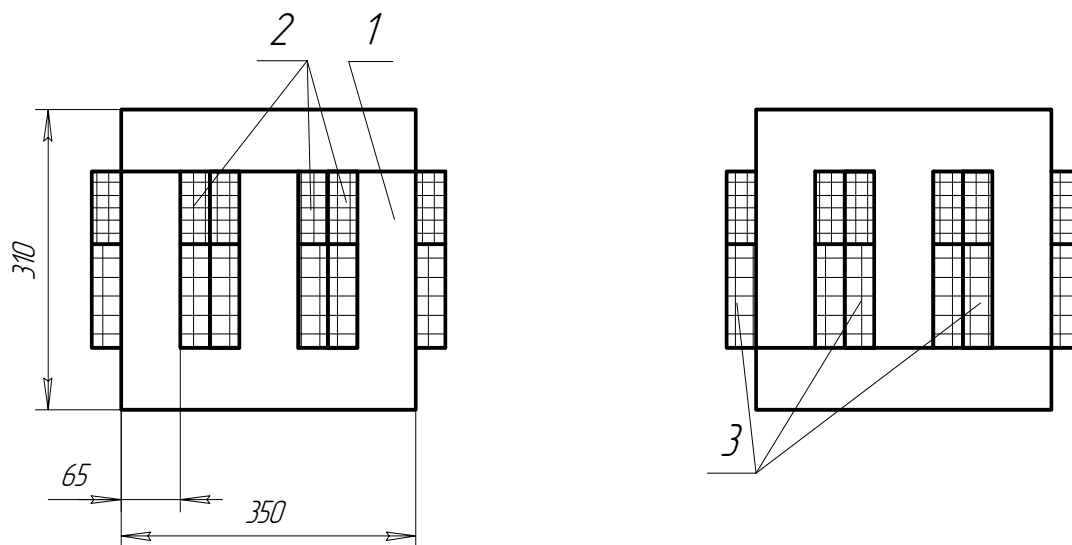


Рис. 1.30. Шихтовка магнитопровода и расположение обмоток: *1* – магнитопровод; *2* – первичные обмотки; *3* – вторичные обмотки

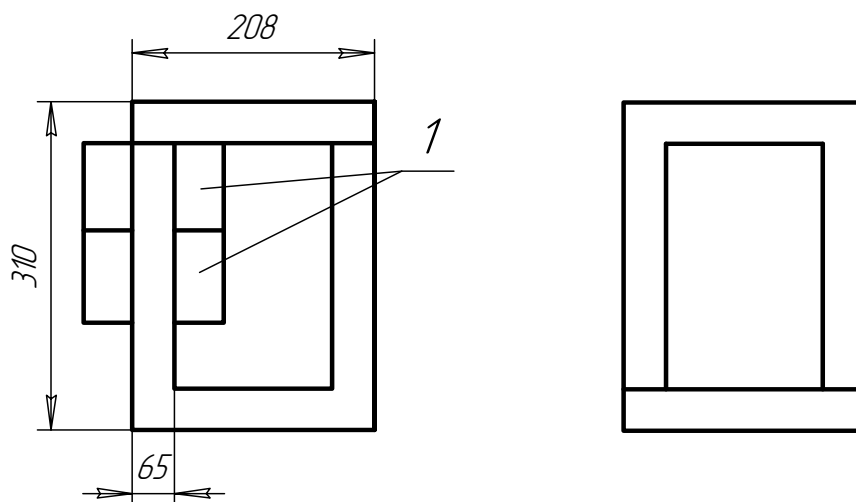


Рис. 1.31. Схема шихтовки магнитопровода. 1 – секция первичной обмотки

На одном стержне магнитопровода фиксируют две катушки первичной обмотки с диаметром медного провода 2,3 мм, числом витков 180 (секция 1) и током холостого хода 5,1 А при питании обмоток напряжением 220 В. Далее на каждую катушку секции 1 наматывают по 25 витков медного провода диаметром 2,3 мм (секция 3), и ток холостого хода уменьшается до 2,9 А. После изоляции катушек киперной лентой обматывают секцию 4 двумя медными проволоками диаметром 2,3 мм в количестве 26 витков, что соответствует току холостого хода 2 А.

С другой стороны магнитопровода наматывают 19 витков медного провода с площадью поперечного сечения  $7,2 \text{ мм}^2$  (секция 2). Над секциями 1, 3, 4 наматывают 26 витков медного провода диаметром 2,3 мм (секция 5). После изоляции первичных обмоток над секциями 1, 3, 4, 5 наматывают 15 витков вторичной алюминиевой обмотки с площадью поперечного сечения  $44 \text{ мм}^2$ , выполняют отвод для пуска двигателя и наматывают еще 10 витков, на другом стержне магнитопровода над секцией 2 наматывают 6 витков вторичной алюминиевой обмотки сечением  $44 \text{ мм}^2$ .

Магнитопровод дросселя имеет форму и размеры согласно рис. 1.32.

На одной стороне магнитопровода (зазор составил 1 мм) наматывают параллельно 36 витков медного провода с площадью поперечного сечения  $16 \text{ мм}^2$ . При последовательном соединении обмоток индуктивность дросселя – 1,8 мГн, а при параллельном – 0,8 мГн.

Для удвоения напряжения холостого хода применялись 4 оксидных конденсатора (К50-3Б; 50 В; 2000 мкФ), соединенные последовательно.

Внешние статические характеристики выпрямителя приведены на рис. 1.33.

Размещение органов управления на текстолитовой панели выпрямителя изображено на рис. 1.34, где 1–6 – режимы сварки; Т – тумблер переключения конденсаторов; V – вольтметр; (О–С) – положение переключки при сварке; (О–Д) – положение переключки при пуске двигателя.

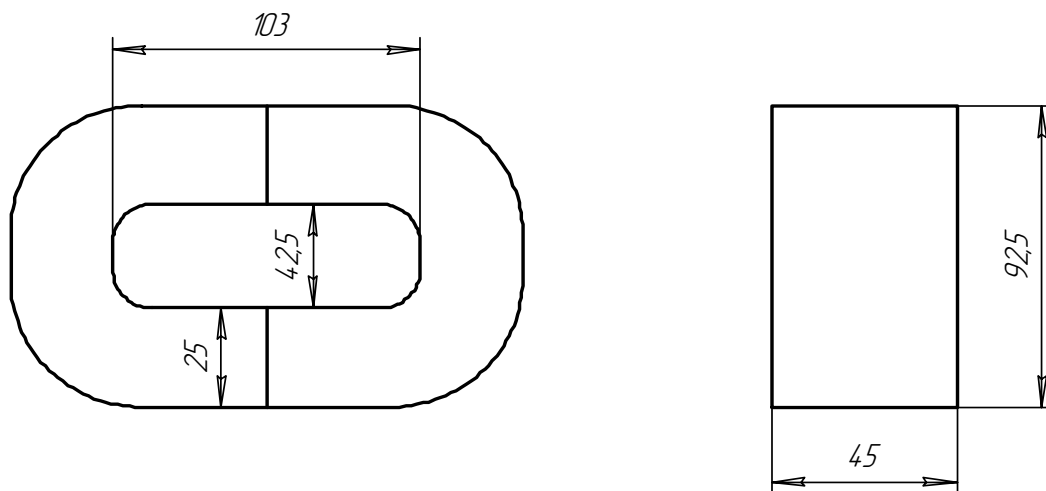


Рис. 1.32. Размеры магнитопровода дросселя

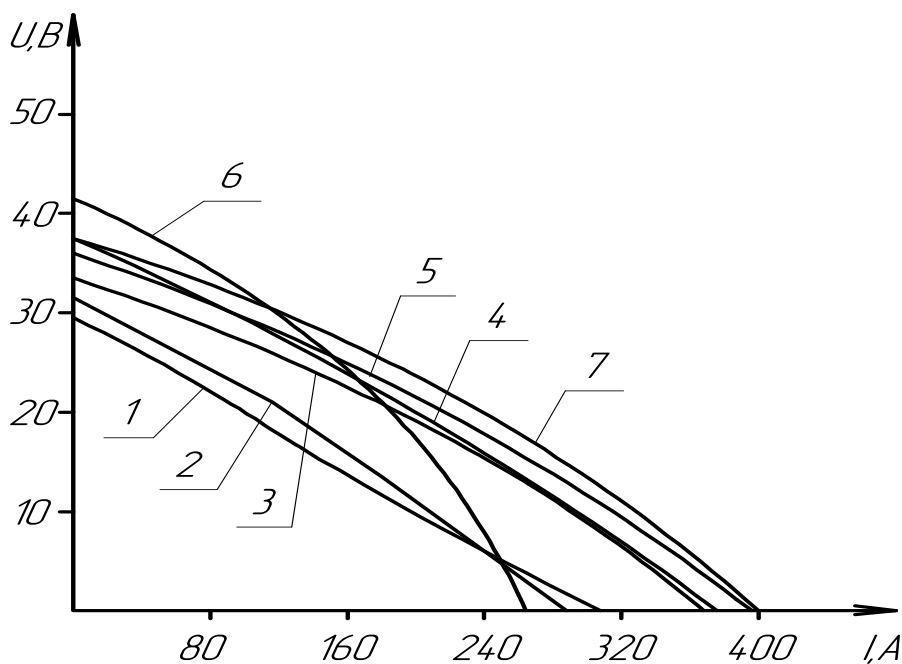


Рис. 1.33. Внешние статические характеристики источника питания при выключенных конденсаторах: 1–7 – ступени регулирования сварочного тока

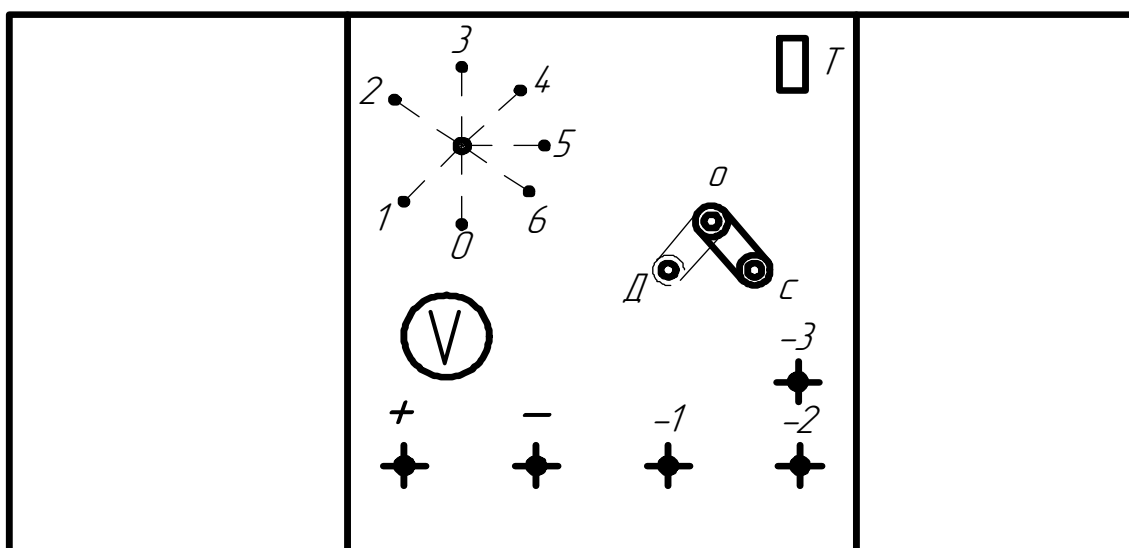


Рис. 1.34. Органы управления выпрямителем

Клеммы (+ ; - ; -1; -2; -3) предназначены для подключения сварочных проводов: (-) – клемма без дросселя в сварочной цепи; (-1; -2) – соединение клемм перемычкой при последовательном соединении обмоток дросселя; (-1; -2), (-2; -3) – клеммы соединены перемычками при параллельном соединении обмоток дросселя.

При включении конденсаторов за весь период напряжение холостого хода повышается в 2,8 раза.

Технические характеристики выпрямителя приведены в табл. 1.7.

На обычных режимах сварки и при включенных конденсаторах за весь период показатели устойчивости горения дуги соответствуют [19]. По данным [101] оптимальные значения минимального возможного тока следующие: 40 А для  $d_3 = 2$  мм; 70 А –  $d_3 = 3$  мм; 120 А –  $d_3 = 4$  мм. На первой ступени регулирования  $I_d = 35\text{--}45$  А дуга горит электродами УОНИ диаметром 3 мм и электродами МР-3 диаметром 4 мм.

Ступень регулирования 6 была выполнена в связи с тем, что секции первичной обмотки 1, соединенные параллельно, обеспечивали приемлемый ток холостого хода 5,1 А. Эту ступень регулирования лучше использовать в случае резкого падения напряжения в сети и при выключенных конденсаторах. Для электродов УОНИ диаметром 3 мм и последовательно включенных обмотках дросселя разрывная длина дуги без конденсаторов равна  $3\text{--}4 d_3$ .

Увеличение  $U_{xx}$  до 120 В (конденсаторы включены полностью) обеспечивает горение дуги без дросселя, но разрывная длина дуги составляет не более  $2 d_3$ . При включении конденсаторов за половину пе-

риода ( $U_{xx} = 80$  В) электродами УОНИ дуга без дросселя не зажигается. При данном напряжении холостого хода включение обмоток дросселя последовательно увеличивает разрывную длину дуги до  $4 d_3$ .

При напряжении холостого хода 120 В и последовательном включении обмоток дросселя разрывная длина дуги увеличивается до  $6 d_3$ .

Также при положении переключки О–Д (рис. 1.34) возможен пуск двигателя легкового автомобиля, а при подключении в цепь дополнительного активного сопротивления – зарядка аккумуляторов (табл. 1.8).

Из оставшейся части магнитопровода трехфазного трансформатора новый магнитопровод собирался по схеме (рис. 1.35).

Таблица 1.7

**Технические характеристики выпрямителя на основе трёхфазного трансформатора**

Степень регулирования тока	Секции первичной обмотки	Напряжение холостого хода $U_{xx}$ , В	Сварочный ток $I$ , А	Конденсаторы включены
1	1; 2; 3; 4; 5	80	35	Весь период
2	1; 3; 4; 5	85	75	Весь период
3	1; 3; 4	94	120	Весь период
4	1; 3	98	150	Весь период
5	1; 2	105	170	Весь период
5	1; 2	74	168	Половина периода
6	1	80	160	Половина периода
6	1	41	158	Выключены
7	1; 2	105	200	Весь период
		74	198	Половина периода

Примечание. На ступенях регулирования тока 1, 2 секции дросселя включены последовательно, на ступенях регулирования тока 3, 4, 5, 6 секции дросселя включены параллельно. На ступени регулирования 7 дроссель отключен.

Таблица 1.8

**Напряжение холостого хода и первичный ток при пуске двигателя легкового автомобиля**

Номер ступени	1	2	3	4	5	6
Напряжение холостого хода, В	11	12	12,2	12,5	13,5	15,5
Первичный ток холостого хода, А	0,5	1	1,65	2	2,9	5,1

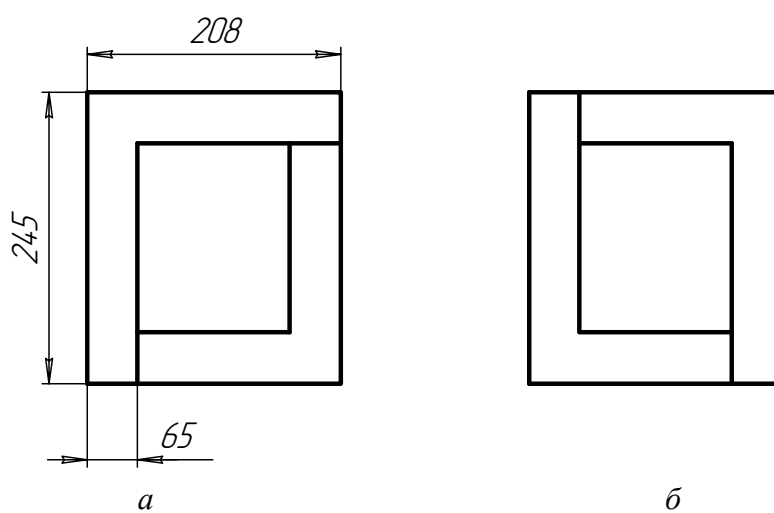


Рис. 1.35. Схема шихтовки магнитопровода: *а* – 1-й, 3-й, 5-й и т. д. слои; *б* – 2-й, 4-й, 6-й и т. д. слои

При высоте набора пакета магнитопровода 70 мм и его изоляции на одной его стороне намотку ведут так: секция 1 – 173 витка; секция 3 – 23 витка; на другой стороне – секция 2 – 19 витков. Все секции наматывают медным проводом с хлопчатобумажной изоляцией и площадью поперечного сечения 4,8 мм<sup>2</sup>. Над секциями 1, 3 наматывают 23 витка секции 4 медным проводом с эмалевым покрытием диаметром 2 мм. При включении секции 1 (напряжение 220 В) ток холостого хода составляет 1,3 А, при включении последующих секций первичной обмотки – менее 1 А.

После изоляции над секциями 1, 3, 4 наматывают 14 витков вторичной алюминиевой обмотки для пуска двигателя и выполняют отвод; наматывают шесть витков (для сварки плавящимся электродом в углекислом газе); предусматривается отвод; над секцией 2 наматывают 10 витков. Последовательное соединение обмоток предназначено для сварки покрытыми электродами. Площадь поперечного сечения вторичной алюминиевой обмотки с бумажной изоляцией составила 24 мм<sup>2</sup> (8x3).

Размеры витого магнитопровода дросселя, состоящего из двух половин, показаны на рис. 1.36.

На одной стороне магнитопровода дросселя наматывают 57 витков медным проводом с площадью поперечного сечения  $16 \text{ мм}^2$ . Индуктивность дросселя составила  $0,576 \text{ мГн}$ . Немагнитный зазор в месте стыковки двух половин магнитопровода –  $1 \text{ мм}$ .

Принципиальная электрическая схема выпрямителя приведена на рис. 1.37, а внешние статические характеристики – на рис. 1.38.

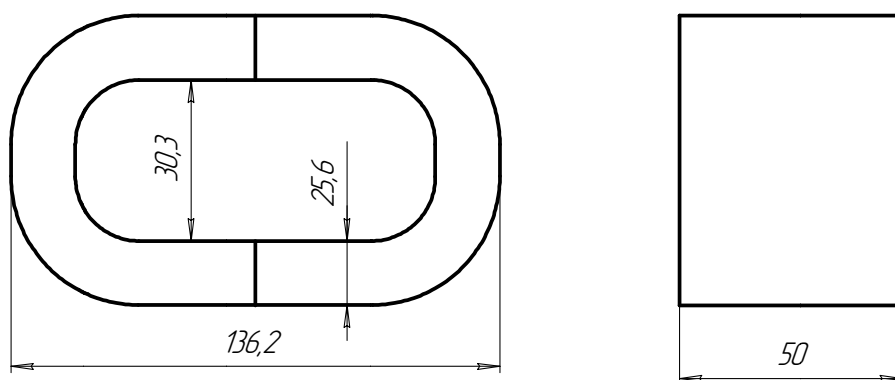


Рис. 1.36. Размеры магнитопровода дросселя

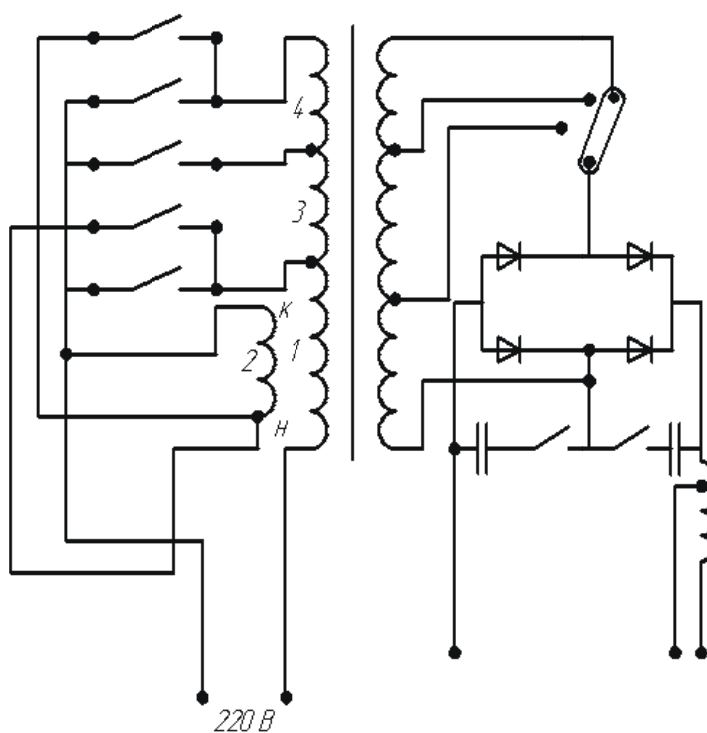


Рис. 1.37. Принципиальная электрическая схема выпрямителя: 1–4 – секции первичной обмотки

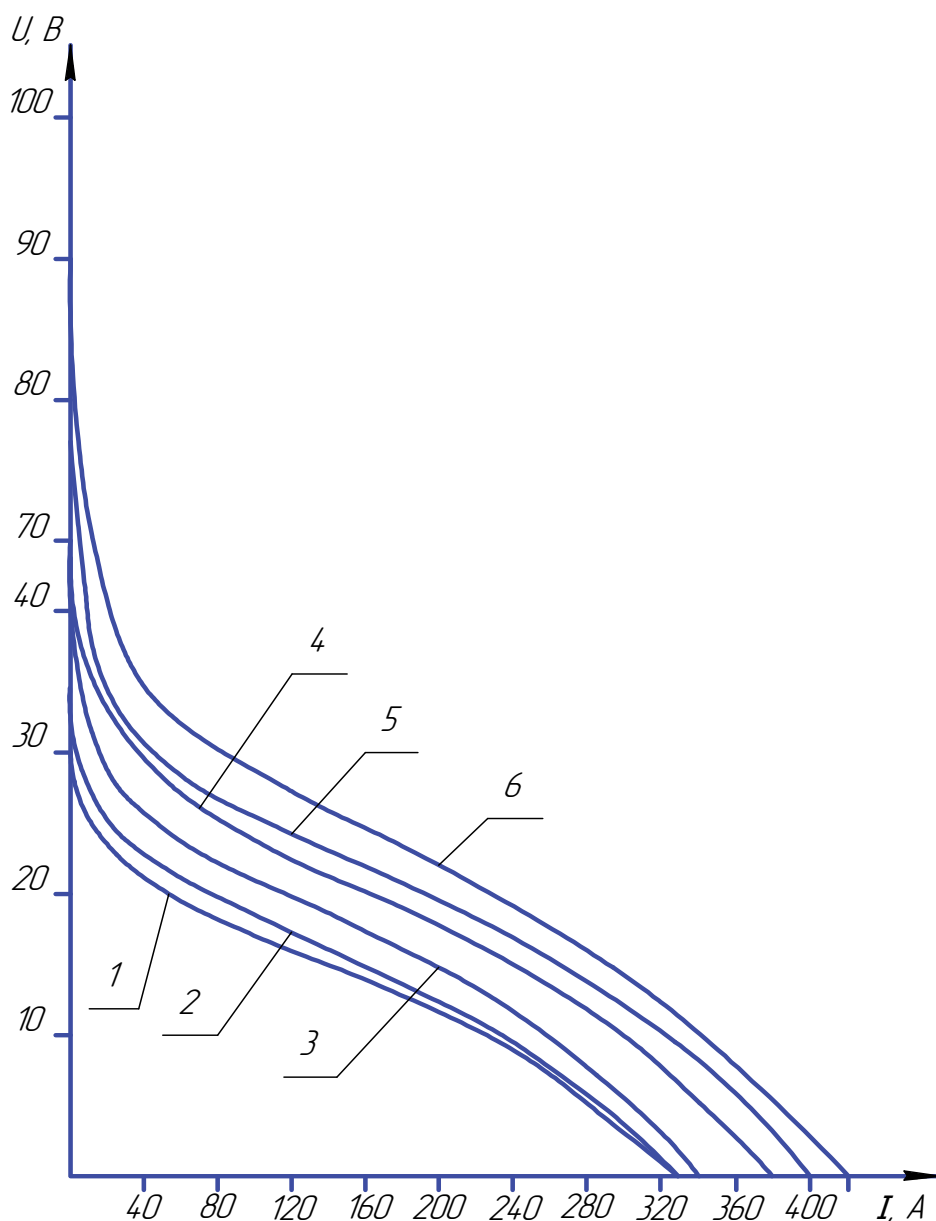


Рис. 1.38. Вольт-амперные характеристики выпрямителя с конденсаторами, включенными за весь период: 1–6 – ступени регулирования

На ступени регулирования 1 (табл. 1.9) обеспечивается горение дуги электродами МР-3 диаметром 2 мм, а на ступени 5 – горение дуги электродами УОНИ диаметром 3 мм с разрывной длиной  $2,5-3 d_3$ . На ступени 6 дроссель отсутствует и горение дуги электродами УОНИ затрудняется, но обеспечивается горение дуги электродами МР-3 диаметром 4 мм.

При числе витков вторичной обмотки 14 осуществляется пуск двигателя легкового автомобиля, а при 20 витках вторичной обмотки – сварка в защитном газе тонкой проволокой.

Таблица 1.9

**Технические характеристики выпрямителя  
с умножителем напряжения**

Степень регулиру- рования	Секции первич- ной об- мотки	Напряже- ние холо- стого хода	Сварочный ток, А	Первичный ток, А	Конденса- торы вклю- чены
1	1; 2; 3; 4	52	19	3	Половина периода
		75	20	3,1	Весь период
2	1; 3; 4	56	31	4,25	Половина периода
		81	32	4,35	Весь период
3	1; 3	64	55	9,2	Половина периода
		88	56	9,3	Весь период
4	1; 2	62,5	99	11,7	Половина периода
		89	100	11,8	Весь период
5	1	66,5	111	20,8	Половина периода
		96	112,5	21	Весь период
6	1	66,5	172	31	Половина периода
		96	175	32	Весь период

Монтаж трансформатора, диодов с радиаторами, дросселя, конденсаторов и остальных комплектующих осуществлялся в корпусе. Предпочтительнее корпус из алюминиевых сплавов, т. к. их масса меньше и сокращаются потери из-за вихревых токов.

**1.3.7. Сварочный выпрямитель, изготовленный  
на основе утилизированного трансформатора**

Часто трансформаторы с незначительными неисправностями утилизируются. На основе утилизированного трансформатора с жесткой характеристикой, сечением вторичной обмотки 25–35 мм<sup>2</sup> и напряжением холостого хода 30–36 В достаточно просто изготовить сварочный выпрямитель с регулировкой тока от 60 до 170 А. Для этого необходимо изготовить дроссель для регулировки сварочного тока и дроссель для улучшения сварочно-технологических свойств, дополнить конст-

рукцию выпрямительным блоком и конденсаторами для умножителя напряжения.

В результате электрического пробоя изоляции на крайнем стержне магнитопровода трехфазный трансформатор ТСЗИ-1,6 вышел из строя. Площадь поперечного сечения первичной медной обмотки составляет  $1,8 \text{ мм}^2$ , вторичной алюминиевой –  $15,2 \text{ мм}^2$ , напряжение холостого хода при питании обмотки напряжением  $220 \text{ В}$  –  $16 \text{ В}$ , а первичный ток –  $1,75 \text{ А}$ .

Размеры магнитопровода после удаления крайнего стержня с дефектной первичной обмоткой показаны на рис. 1.39. Высота набора пакета магнитопровода составляет  $47 \text{ мм}$ .

Стальные уголки, стягивающие ярма магнитопровода, при сварочном токе  $60\text{--}165 \text{ А}$  образуют замкнутый контур и из-за вихревых токов нагреваются, что снижает КПД. Поэтому ярма магнитопровода скреплялись брусками из дерева ( $50 \times 50 \text{ мм}$ ), что улучшает монтаж магнитопровода в корпусе и уменьшает потери на нагрев металлического корпуса.

Со стержня с дефектной первичной обмоткой сматывали вторичную обмотку и после ее разделения на две части на стержни наматывали дополнительно 18 витков вторичной обмотки. После соединения обмоток последовательно напряжение холостого хода трансформатора повысилось до  $35 \text{ В}$ . Первичные и вторичные обмотки соединяли параллельно. В результате площадь поперечного сечения первичной обмотки составила  $3,6 \text{ мм}^2$ , а вторичной –  $30,4 \text{ мм}^2$ .

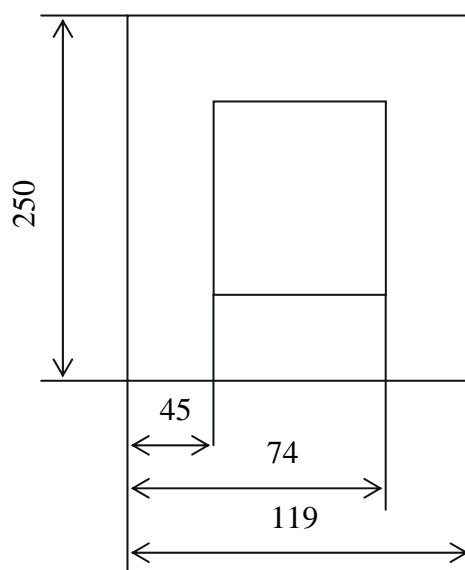


Рис. 1.39. Магнитопровод трансформатора

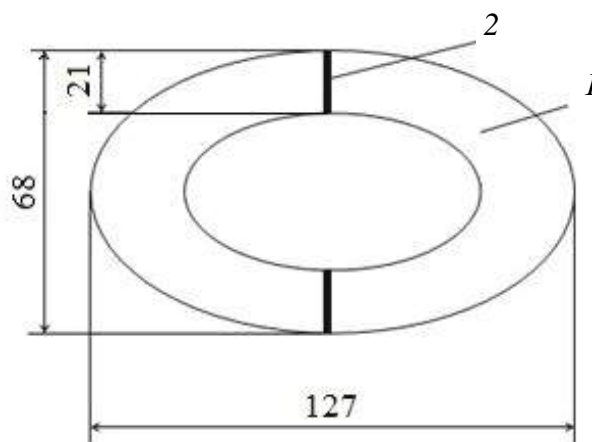


Рис. 1.40. Дроссель: 1 – магнитопровод, 2 – изолирующая прокладка

Намотанные вторичные обмотки скрепляли киперной лентой и пропитывали изоляционным лаком.

Для ступенчатой регулировки тока и увеличения крутизны внешней характеристики источника питания был изготовлен отдельный дроссель. Витой магнитопровод дросселя состоял из двух половин с размерами, показанными на рис. 1.40. Ширина ленты магнитопровода дросселя – 42,5 мм.

Для уменьшения вероятности насыщения магнитопровода между его половинами помещали прокладки из электротехнического картона толщиной 1 мм и магнитопровод изолировали при помощи изоляционной и киперной ленты.

Далее одну часть магнитопровода фиксировали в тисках и на другой стороне магнитопровода наматывали две секции алюминиевым проводом с площадью поперечного сечения  $24 \text{ мм}^2$  и числом витков 12 и 6. Третью секцию наматывали медным проводом с площадью поперечного сечения  $11,84 \text{ мм}^2$  и числом витков 9.

Обе части магнитопровода жестко фиксировали в корпусе. Секционирование обмоток дросселя облегчает намотку проводов, которые соединяются последовательно.

Принципиальная электрическая схема выпрямителя показана на рис. 1.41.

Вольт-амперные характеристики выпрямителя с выключенными конденсаторами емкостью 2000 мкФ приведены на рис. 1.42.

При включении конденсаторов напряжение холостого хода выпрямителя увеличивается в 2,82 раза.

Техническая характеристика выпрямителя дана в табл. 1.10.

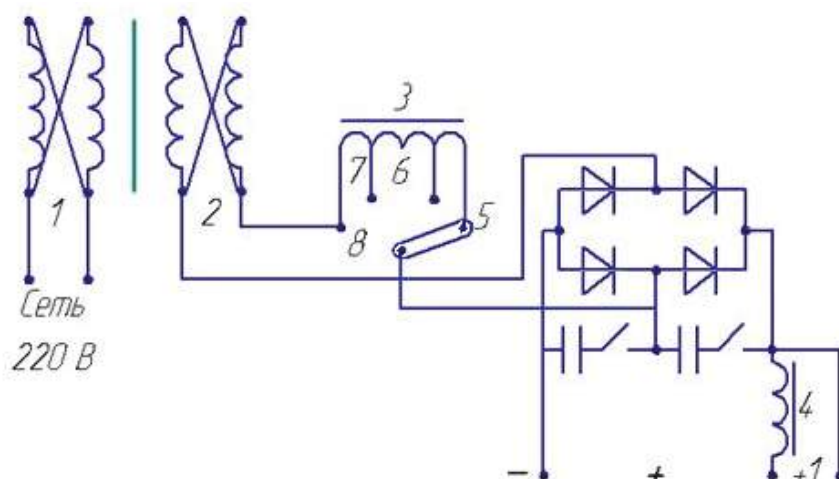


Рис. 1.41. Принципиальная электрическая схема выпрямителя: 1 – первичные обмотки; 2 – вторичные обмотки; 3 – регулировочный секционный дроссель; 4 – сглаживающий дроссель; 5, 6, 7, 8 – секции дросселя для регулировки тока

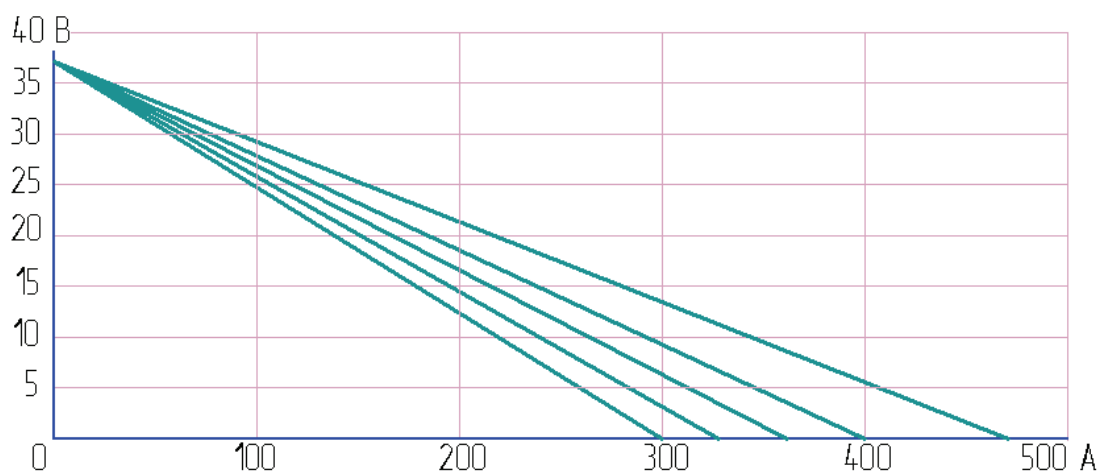


Рис. 1.42. Вольт-амперные характеристики выпрямителя

Таблица 1.10

### Техническая характеристика выпрямителя

Степень регулирования	$U_{xx}$ , В	$I_2$ , А	Степень регулировки дросселя	Клеммы для сварки
1	35	60	5	+, –
2	35	75	6	+, –
3	35	85	7	+, –
4	35	150	8	+, –
5	35	165	8	+1, –

Примечание.  $U_{xx}$  – напряжение холостого хода,  $I_2$  – сварочный ток.

На всех рабочих режимах сварки отношение сварочного тока к первичному  $K_T = 5,8$  и не менее, чем у инверторных источников питания.

Без сглаживающего дросселя 4, см. рис. 1.41, электродами с фтористо-кальциевым покрытием (УОНИ) дуга зажигается плохо и не горит.

Сглаживающий дроссель индуктивностью 0,2 мГн обеспечивает горение дуги любыми электродами. С увеличением индуктивности дросселя более 0,2 мГн устойчивость горения дуги улучшается, но увеличивается масса и уменьшается сварочный ток.

На первой ступени с дросселем 4 ( $I_d = 60$  А) дуга диаметром 5 мм зажигается электродом МР-3 и горит. Для сварки и регулировки тока менее 60 А можно применить дополнительно активное (балластное) сопротивление.

При напряжении холостого хода трансформатора 16 В (без дополнительной обмотки секций вторичной обмотки) возможны пуск легкового автомобиля и (при наличии дополнительного сопротивления) зарядка аккумуляторов, но усложняется коммутация вторичной цепи.

На всех режимах сварки разрывная длина дуги превышает диаметр электрода более чем в три раза, зажигание осуществляется практически с первого касания электродом изделия. Из-за хороших динамических свойств повышенный ток короткого замыкания не препятствует горению дуги электродами диаметром 2 мм.

При площади поперечного сечения магнитопровода  $21,5 \text{ см}^2$  не ухудшается устойчивость горения дуги, что, по-видимому, объясняется отсутствием насыщения при параллельном соединении обмоток.

Монтаж магнитопровода с проводами следует вести при расстоянии до металлических частей корпуса не менее 3 см, так как при отсутствии в корпусе «рассечек» наблюдаются его локальный нагрев и шум (гудение). При перерывах в работе для разрядки конденсаторов необходимо накоротко замкнуть сварочную цепь. Для выпрямления тока возможно применение вентиля на 200 А без традиционных охладителей, что уменьшает массу и габариты выпрямителя [67].

### 1.3.8. Приближенный расчет дросселя

В трансформаторах с нормальным магнитным рассеянием дроссель с изменяющимся воздушным зазором обеспечивает плавную регулировку тока [80]. Кроме того, дроссель сдвигает фазы тока и напряжения, что улучшает зажигание дуги и устойчивость горения дуги переменного тока [90].

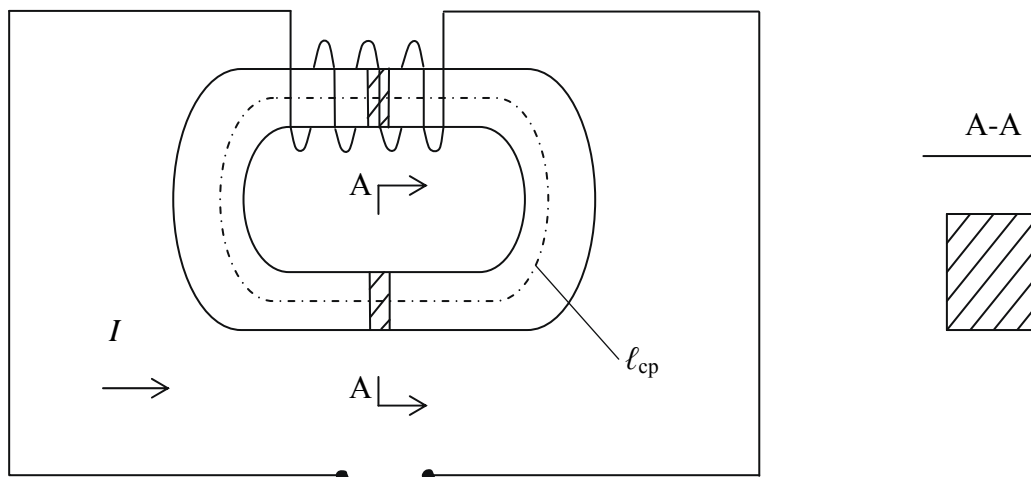


Рис. 1.43. Расчетная схема дросселя

Выпускаемые ранее дроссели с изменяющимся воздушным зазором для регулировки тока в сварочных трансформаторах имели большие габариты и массу, подвижные части регулировочных устройств были подвержены вибрации [104].

В выпрямителях для сварки в защитных газах плавящимся электродом применяются дроссели индуктивностью до 0,005 Гн, которые включаются в сварочную цепь после выпрямительного блока и улучшают переходные процессы переноса металла в дуге и уменьшают потери на разбрызгивание при сварке покрытыми электродами. С технологической точки зрения не выявлены пределы, ограничивающие электромагнитную инерцию сварочной цепи.

Расчеты по определению реактивных сопротивлений сварочных дросселей приведены в [90, 97], а для дросселей в электротехнических устройствах – в [113, 105].

Индуктивность дросселя определяют по методике [105] (рис. 1.43).

Напряженность магнитного поля  $H$  во внутренней полости катушки выразится так:

$$H = \frac{I \cdot W}{\ell_{\text{ср}}}, (\text{А/м}), \quad (1.2)$$

где  $I$  – ток, А;  $W$  – число витков обмотки;  $\ell_{\text{ср}}$  – длина сердечника катушки по средней линии, м.

Зависимость магнитной индукции  $B$  от  $H$  для стали является величиной нелинейной, а абсолютная магнитная проницаемость стали –

величина переменная. Поэтому магнитную индукцию нельзя определить по формуле

$$B = \mu_a \cdot H, \quad (1.3)$$

где  $\mu_a$  – магнитная проницаемость стали.

Для определения магнитной индукции нужно воспользоваться характеристиками намагничивания стали, заданными в виде кривых намагничивания.

Магнитный поток  $\Phi$ , Вб, определяется по формуле

$$\Phi = B \cdot S, \quad (1.4)$$

где  $S$  – площадь сечения магнитопровода,  $\text{м}^2$ ;  $B$  – индукция (Тл).

Индуктивность дросселя  $L$ , Гн, определяется по формуле

$$L = \frac{W \cdot \Phi}{I}, \quad (1.5)$$

где  $W$  – число витков,  $I$  – ток, А.

Следует иметь в виду, что для стали  $\mu_a$  – величина непостоянная, зависящая от степени намагниченности, поэтому индуктивность дросселя будет непостоянной и определенное значение имеет только при заданном токе. Данный расчет не учитывает зазоры в магнитопроводе (0,5–1) мм и является приближенным.

Более сложный расчет сварочного дросселя приводится в [90, 97]. Для изготовления дросселей с целью регулирования режимов при сварке покрытыми электродами и улучшения динамических свойств источников питания возможно применение разнообразных по форме магнитопроводов. Рационально применять простейшие по устройству дроссели минимальной массы.

Экспериментально реактивное сопротивление дросселей определялось по следующим формулам:

$$X_{\tau} = \frac{U_0}{I_{\text{кз1}}}; \quad X_{\text{p}} = \frac{\sqrt{U_0^2 - U_{\text{д}}^2}}{I_{\text{кз2}}}; \quad (1.6)$$

$$X_{\text{др}} = X_{\text{p}} - X_{\tau}; \quad (1.7)$$

$$L_{\text{д}} = X_{\text{др}} / 2\pi f, \quad (1.8)$$

где  $U_0$  – напряжение холостого хода трансформатора источника питания, В;  $I_{кз1}$  – ток короткого замыкания трансформатора, А;  $I_{кз2}$  – ток короткого замыкания трансформатора с дросселем, А;  $U_d$  – падение напряжения на дросселе, В;  $f$  – частота переменного тока, 50 Гц;  $L_d$  – индуктивность дросселя, Гн;  $X_{др}$ ,  $X_p$ ,  $X_T$  – индуктивное сопротивление дросселя, трансформатора с дросселем, трансформатора, Ом.

Экспериментально индуктивность дросселя можно определить следующим образом.

В цепь сварочного трансформатора включается балластный реостат  $R_b$ , дроссель  $L$ , трансформатор тока с амперметром  $A$ , вольтметр  $V$ , фиксирующий падение напряжения  $U_L$  на дросселе (рис. 1.44).

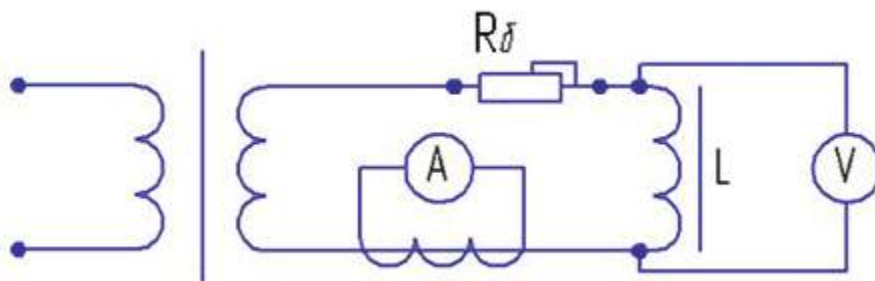


Рис. 1.44. Схема подключения дросселя

Индуктивное сопротивление дросселя  $X_L$ , Ом определяется по формуле

$$X_L = \frac{U_L}{I}. \quad (1.9)$$

Индуктивность дросселя  $L$ :

$$L = \frac{X_L}{\omega}, \quad (1.10)$$

где  $\omega = 2\pi f$ .

### 1.3.9. Конструкции дросселей

Дроссели индуктивностью 200–500 мкГн возможно изготовить с шихтовкой магнитопроводов по схемам (рис. 1.45), где:

*а* – витой магнитопровод, состоящий из двух половин;

*б* – витой магнитопровод с приставным пакетом;

$\epsilon$  – магнитопровод шихтованный из пластин прямоугольной формы с приставным пакетом;

$z$  – броневой магнитопровод (обмотка наматывается на средний стержень) с приставным пакетом;

$\partial$  – тороидальный магнитопровод из ленты.

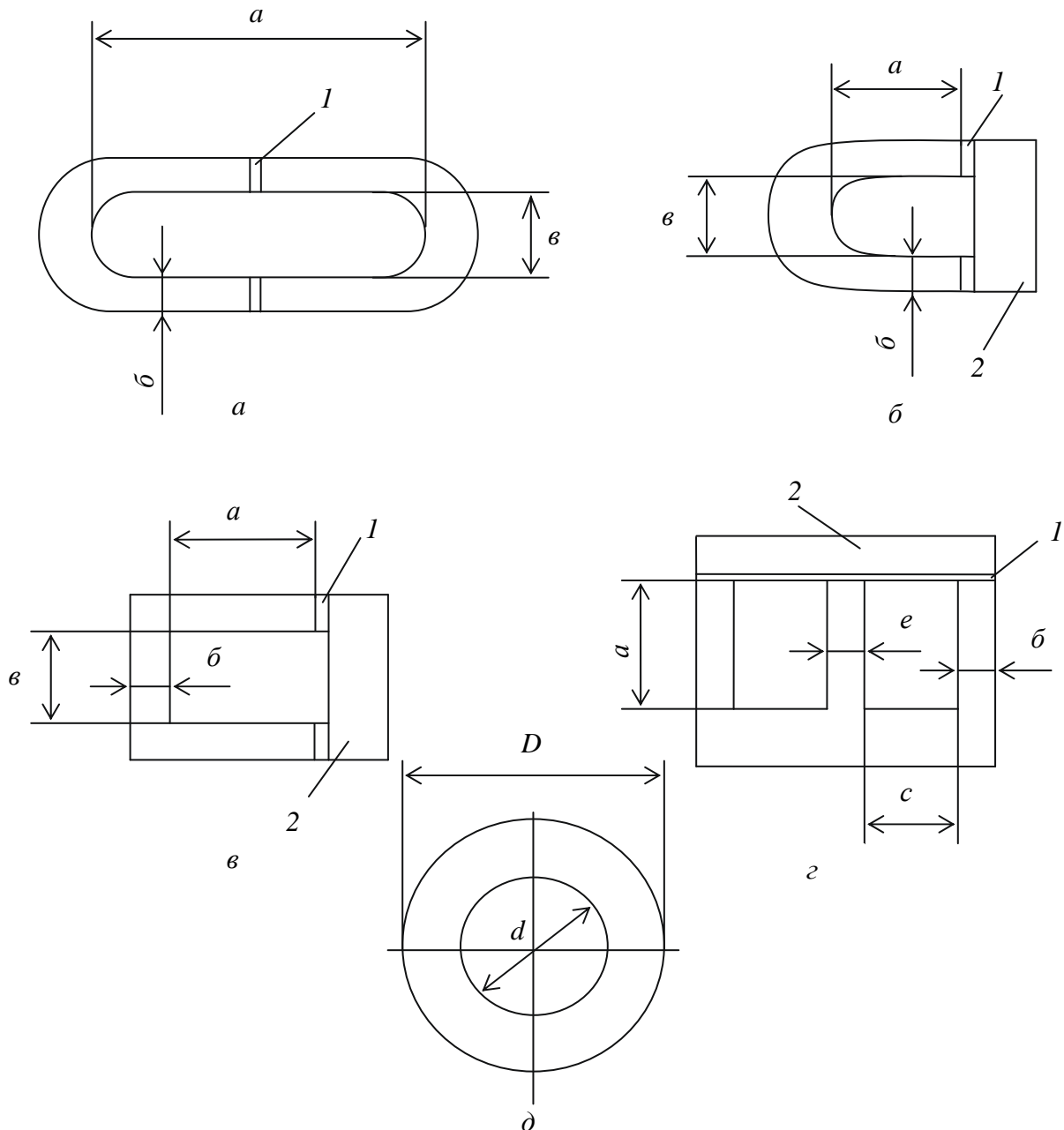


Рис. 1.45. Магнитопроводы для изготовления дросселей:  $1$  – немагнитная прокладка;  $2$  – приставной пакет магнитопровода

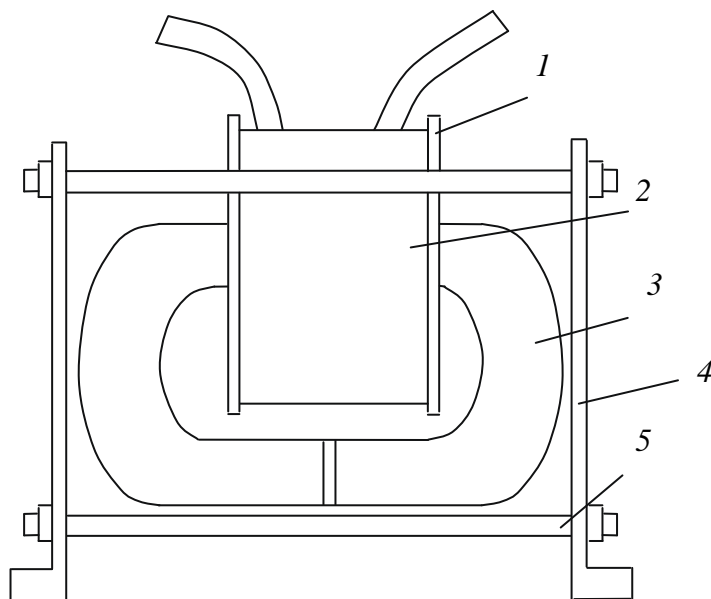


Рис. 1.46. Дроссель, изготовленный из двух навитых половин магнитопровода: 1 – каркас катушки; 2 – обмотка дросселя; 3 – магнитопровод; 4 – металлические пластины; 5 – стальные шпильки

Дискуссионным является вопрос о величине немагнитного зазора и применении кольцевых магнитопроводов для дросселей без магнитного зазора. В результате проведенных нами экспериментов выяснилось, что кольцевые дроссели не ухудшают устойчивость горения дуги, но их насыщение при включении после выпрямительного блока не определялось.

Изготовление дросселей с витым магнитопроводом (рис. 1.45, *а*) и с кольцевым (рис. 1.45, *д*) упрощается. Первую секцию дросселя можно изготовить с площадью поперечного сечения провода  $24\text{--}32\text{ мм}^2$  и индуктивностью  $350\text{ мкГн}$ , а остальную часть обмотки выполнить проводом с индуктивностью дросселя  $600\text{--}1000\text{ мкГн}$  и площадью поперечного сечения  $8\text{--}10\text{ мм}^2$  с целью улучшения зажигания дуги на токах  $15\text{--}40\text{ А}$ .

Изготовление дросселя по схеме 1.45, *а* осуществляется следующим образом. Лучше перед намоткой изготовить каркас катушки из электроизоляционного материала. Далее катушка помещается на оправку с размерами  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и на катушку наматывается необходимое количество витков обмотки дросселя ( $c$  – ширина ленты). После этого катушка с обмоткой собирается с магнитопроводами и магнитопровод стягивается металлическими шпильками (рис. 1.46).

Обмотку можно наматывать на оправку с размерами  $(a, b, c) + 3\text{ мм}$ . После намотки обмотка снимается с оправки и собирается с изолированными частями магнитопровода. При площади поперечного сечения

провода  $24\text{--}32\text{ мм}^2$  нужно просто намотать несколько витков обмотки с толщиной слоя не более  $b$ .

Возможна намотка витков дросселя без изоляционной катушки с последующей фиксацией приставного пакета на магнитопроводы (рис. 1.45, б–г) после изоляции.

В табл. 1.11 и 1.12 приведены технические данные дросселей, применяемых для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения и регулировки тока. В основном применялись магнитопроводы от утилизованной машины ЕС. Толщина немагнитной вставки составляла 0,5–1 мм.

Таблица 1.11

**Дроссели с шихтовкой магнитопроводов, впереплет  
и с витыми магнитопроводами**

Схема шихтовки (рис. 1.45)	$a$	$b$	$c$	$x$	$e$	Площадь поперечного сечения, $\text{мм}^2$ ; материал	Число витков основной секции	Индуктивность, мГн	Площадь поперечного сечения дополнительной обмотки, $\text{мм}^2$ ; материал	Число витков дополнительной обмотки	Суммарная индуктивность, мГн
1.45, а	78	15	24	30	–	10; медь	72	0,267			
1.45, б	50	25	32	46	–	24; алюминий	32	0,290			
1.45, а	80	24,5	39	50	–	24; алюминий	45	0,79			
1.45, а	100	25,7	40	45	–	24; алюминий	54	0,740	9,8 $\text{мм}^2$ ; медь	24	1,18
1.45, а	100	25	40	50	–	32; алюминий	60	0,737			
1.45, а	95	24,3	30,8	50,2	–	32; алюминий	48	0,53			
1.45, г	85	30	32,3	45	48	32; алюминий		0,748			

Примечание. Здесь  $x$  – высота набора шихтованного магнитопровода.

Таблица 1.12

**Дроссели с кольцевым магнитопроводом**

$d$	$D$	$c$	Площадь поперечного сечения обмотки, мм <sup>2</sup> ; материал	Число витков основной обмотки секции	Индуктивность, мГн	Площадь поперечного сечения дополнительной обмотки, материал	Число витков дополнительной обмотки	Суммарная Индуктивность, мГн
52	105	32	17, 5; медь	52	0,327	–	–	–
95	170	40	32; алюминий	43	0,443	13, 5; медь	35	2,75

Примечание. Здесь  $c$  – ширина кольцевого магнитопровода.

---

## **Глава 2. СВАРОЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ ПРИ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКЕ**

### **2.1. Сведения о горении дуги при ручной дуговой сварке на малых токах**

При ручной дуговой сварке сварочно-технологические свойства источников определяются по пяти показателям, и каждый показатель оценивается по пяти баллам. Окончательная оценка одного из пяти показателей сварочных свойств в два или менее балла, а также суммарная оценка всех пяти показателей менее пятнадцати баллов является неудовлетворительной [19].

Следует отметить, что для ручной дуговой сварки оценка сварочных свойств является субъективной вследствие отсутствия комплексного показателя сварочно-технологических свойств источника питания.

По [19] показатель разбрызгивания металла не указывает предельно допустимые потери на разбрызгивание в процентах от наплавленного металла.

Авторы [101] предлагают более объективную оценку сварочно-технологических свойств источников питания для ручной дуговой сварки. При определении значимости сварочных свойств источника питания дополнительно учитывают минимально возможный ток, при котором еще возможен процесс без обрыва дуги и «примерзаний» электрода, и коэффициент, учитывающий потери на угар и разбрызгивание в процентах от расплавленного электродного стержня.

Интенсивность разбрызгивания при ручной дуговой сварке зависит от многих факторов, и данных из литературы по вопросу разбрызгивания явно недостаточно. Величина набрызгивания на поверхность свариваемых изделий при ручной дуговой сварке составляет 2–11 % и зависит от марки электрода (вида покрытия, составляющих компонентов покрытия).

По данным [123] (дуга питалась от выпрямителя ВД-306) при сварке электродами диаметром 3 мм марок УОНИ-13/45 (основное покрытие) и МР-3 (рутиловое покрытие) с увеличением силы тока от 20 А до 150 А потери на разбрызгивание возрастают и составляют 2–12,3 %. У электродов FOXA-0594 диаметром 4 мм (целлюлозное покрытие) с увеличением силы тока от 120 А до 175 А потери составляют 13–19 %.

При сварке электродами АНО-5 диаметром 5 мм в интервале токов от 270 А до 300 А коэффициент набрызгивания составляет 2,9–7,3 % [102].

Также сведения о потерях на разбрызгивание приведены в монографии С. Н. Жизняка и З. А. Сидлина. Для электродов МР-3 и АНО-4 потери достигают 10–15 %, а у электродов УОНИ-13/55 – 5–10 %.

Перенос металла в дуге изучался многими исследователями, но до сих пор не существует единого мнения о силах, вызывающих перенос с электрода в ванну. От характера переноса металла зависят устойчивость горения дуги и разбрызгивание при сварке [62]. Экспериментальные данные о величине сил, действующих на каплю при сварке покрытыми электродами, отсутствуют, и мнения исследователей о роли тех или иных сил расходятся [102].

Основные силы, влияющие на перенос электродного металла в дуге, следующие: сила тяжести и поверхностного натяжения, электродинамическая сила пинч-эффекта, силы реактивного давления паров, газов и давления газовых потоков [62].

При обычных режимах сварки покрытыми электродами разбрызгивание электродного металла обусловлено выбросом частиц металла из капель на электроде из-за интенсивного давления газов, расширяющихся при нагреве и плавлении электродов внутри капель, и разрушения жидкой перемычки, соединяющей электрод и ванну при коротком замыкании. Разбрызгивание связано с пиками сварочного тока в момент короткого замыкания и зависит от статических и динамических характеристик источника питания. Потери на угар и разбрызгивание рассматривались совместно с переходными процессами, зависящими от динамических свойств источников питания и их внешних статических характеристик [115]. По осциллограммам сварочного процесса подсчитывалось процентное распределение числа коротких замыканий  $m_i$  при сварке при различных отношениях  $n_i = \frac{I_{\text{кз max}}}{I_{\text{св. ср}}}$

и  $n_{\text{ср}}$  для каждого режима, где  $n_{\text{ср}} = \sum_1^k n_i \frac{m_i}{100}$ . По данным [115] сварка электродами диаметром 6 мм протекает устойчиво у всех схем выпрямления. В диапазоне изменения  $n_{\text{ср}} = 1,35–1,55$  увеличение разбрызгивания с ростом пиков тока при коротком замыкании дугового промежутка незначительно. При дальнейшем росте  $n_{\text{ср}}$  свыше значений 1,35–1,55 разбрызгивание увеличивается. Подобное явление характерно для схем с более пологими внешними характеристиками источников питания. Введение дросселя с индуктивностью 150 мкГн и 500 мкГн при значительном времени корот-

кого замыкания при сварке током 300 А уже не влияет на разбрызгивание. Зависимость между разбрызгиванием и пиками сварочного тока при сварке электродами диаметром 5 мм и силе тока около 200 А аналогично зависимости при токе 300 А.

При сварке токами 60 А и 100 А электродами диаметром 2 мм и 3 мм наблюдаются другие зависимости. При токе 100 А имеется зона незначительной зависимости разбрызгивания от пиков тока при  $n_{\text{ср}} = 1,1\text{--}1,4$ . Но в указанной зоне при  $n_{\text{ср}} = 1,35$  и ниже имеют место «приморозание» электрода и нарушение процесса сварки. Авторы [115] утверждают, что при ручной дуговой сварке электродами 2 мм и 3 мм при силе тока 60 А и 100 А существенное значение имеет нарушение устойчивости процесса сварки при снижении пиков сварочного тока за счет введения индуктивности в сварочную цепь. С учетом вышеизложенного [115] считают, что одним из основных параметров, обеспечивающих связь между динамическими свойствами выпрямителей для ручной дуговой сварки и разбрызгиванием, является амплитуда тока короткого замыкания при коротком замыкании капель металла дугового промежутка. Устойчивость горения дуги и процесс возбуждения дуги связаны с разрывной длиной дуги, которая, в свою очередь, зависит от схемы выпрямления. Наибольшая разрывная длина дуги обеспечивается у выпрямителей с трехфазной мостовой схемой выпрямления [115].

По данным [115] (применялись электроды УОНИ-13/45) разрывная длина дуги для электрода диаметром 2 мм в шесть раз превышает диаметр стержня, для электрода диаметром 3 мм – в 5,25 раз, а для электрода диаметром 5 мм – в 2,6 раза. Обрывы дуги наблюдались при токах, близких к 7–8 А.

Разбрызгивание может быть уменьшено выбором оптимальных режимов сварки. Например, потери на угар и разбрызгивание при плавлении электродов током 180 А и 190 А в нижнем положении составляют 0,4–5,8 %, а уменьшение тока до 170 А резко снижает разбрызгивание [15]. Также при сварке в потолочном положении разбрызгивание не происходит при оптимальном токе. При плотности тока 10–14 А/мм<sup>2</sup> (125–170 А для электродов диаметром 4 мм) плавление электродов происходит без разбрызгивания. Авторы [15] объясняют уменьшение разбрызгивания тем, что в капле постепенно повышается давление газов до некоторого критического значения, а силы поверхностного натяжения вытягивают каплю в сварочную ванну. «Согласованное» взаимодействие давления газов и сил поверхностного натяжения обеспечивает переход металла в сварочную ванну без разбрызгивания.

Влияние динамических свойств источников питания ПСО-300, ВСС-300 и ВСК-300 на потери электродного металла определялось в работе [55]. Включение в сварочную цепь преобразователя ПСО-300 индуктивного сопротивления (для электродов УОНИ-13/45 диаметром 3 мм и 5 мм) уменьшает потери на разбрызгивание до 1 %. По мнению авторов [55], разбрызгивание снижается в результате уменьшения электродинамического воздействия тока на каплю расплавленного металла, замыкающую дуговой промежуток, особенно на последней стадии ее перехода с электрода в сварочную ванну. Увеличение индуктивности до 2,2 мГн не ухудшило первоначальное возбуждение дуги. При включении в сварочную цепь выпрямителя ВС-400, имеющего пологопадающую характеристику индуктивного сопротивления, потери на угар и разбрызгивание уменьшаются до 1 % без существенного ухудшения зажигания дуги [55].

Также считается, что с технологической точки зрения при сварке покрытыми электродами пока не выявлены пределы, ограничивающие электромагнитную инерцию сварочной цепи. Вопрос об оптимальной индуктивности дросселя может быть решен только посредством соответствующего экономического расчета [90].

Таким образом, при питании дуги от сварочных выпрямителей без обратных связей их сварочно-технологические свойства определяются схемами выпрямления, динамическими свойствами, выбором оптимальных режимов, увеличением электромагнитной инерции сварочной цепи.

В связи с этим можно обеспечить необходимые сварочно-технологические свойства при питании дуги от однофазного выпрямителя с конденсаторным умножителем напряжения и пологопадающей характеристикой за счет увеличения напряжения холостого хода, выбора оптимальной ёмкости конденсаторов и индуктивности дросселя.

При питании дуги необходимо, чтобы дуговой разряд существовал непрерывно при заданных значениях силы тока и напряжения показатели сварочно-технологических свойств соответствовали параметрам, указанным в [19, 101], с минимальными потерями на угар и разбрызгивание.

## **2.2. Сварочно-технологические свойства трансформаторов**

У изготовленных экспериментально трансформаторов ток короткого замыкания на 20–40 % превышает сварочный ток. Напряжение холостого хода является наиболее важным параметром, влияющим на по-

казатели устойчивости горения. Но с увеличением напряжения холостого хода уменьшается  $\cos \varphi$  и увеличивается масса трансформатора.

У кольцевых магнитопроводов индукция в 1,2–1,4 больше, поэтому облегчается их изготовление без отходов.

В опытных конструкциях трансформаторов с кольцевым магнитопроводом из ленты и от электродвигателей напряжение и ток регулируются секционированием и размещением обмоток относительно магнитопровода.

Считается, что горение дуги электродами УОНИ возможно при повышении напряжения холостого хода до 120–140 В, а трансформаторы с напряжением холостого хода 75 В не в состоянии обеспечить надежное повторное возбуждение дуги [59]. Возможность горения дуги электродами УОНИ-13/55 оценивалась при питании дуги от трансформатора ТС-300, ТСД-1000 с регулировкой тока балластным реостатом, но стабильного горения дуги данные источники не обеспечивают. В опытной конструкции трансформатора со стержневым магнитопроводом и напряжением холостого хода 48, 60 и 68 В дуга при использовании УОНИ не горит.

Сварочно-технологические свойства опытных трансформаторов с кольцевыми магнитопроводами оценивались по минимальному напряжению холостого хода и току, при котором еще возможен процесс без обрывов дуги и «примерзаний» электрода; определялись потери на угар и разбрызгивание, коэффициент наплавки и разбрызгивания, длина дуги. Использовались электроды МР-3 и УОНИ-13/55.

Выявлено, что при  $U_{xx} = 45$  В дуга зажигается электродами УОНИ плохо и не горит. В случае повышения  $U_{xx}$  до 58 В дуга зажигается, но периодически угасает. Устойчивое зажигание и горение дуги электродами УОНИ обеспечивается при  $U_{xx} = 60$  В и более. В табл. 2.1 даны устойчивые режимы горения дуги электродами УОНИ, соответствующие разрывной длине дуги более  $2 d_3$ . При режимах  $I_d = 105$  А,  $U_d = 25$  В,  $U_{xx} = 71$  В,  $d_3 = 3$  мм коэффициент наплавки составляет 7,96 г/А·ч, потери на угар и разбрызгивание – 5,7 %. При  $U_{xx} 44–45$  В электродами МР-3 дуга зажигается и горит. В табл. 2.2 приведены «предельные» режимы, соответствующие разрывной длине дуги менее  $2 d_3$ .

По данным [101], оптимальное значение минимального тока для  $d_3 = 4$  мм – 120 А, а для  $d_3 = 5$  мм – 150 А. С повышением тока до средних, рекомендованных в литературе значений для электродов МР-3 коэффициент наплавки и потери не превышают паспортных значений. С повышением  $U_{xx}$  минимальный ток горения дуги уменьшается и увеличивается разрывная длина дуги. Так, при  $U_{xx} = 70$  В,  $I_d = 80$  А,  $U_d = 26,6$  В,  $d_3 = 4$  мм дуга горит при разрывной длине не менее  $2d_3$ .

Таблица 2.1

**Устойчивые режимы сварки**

$U_{xx}$	$I_d$	$U_d$	$d_э$
60	115	28,5	3
62	105	28	3
73,5	105	24,5	3
66	135	25	4
68,5	138	25	4

Таблица 2.2

**Предельные режимы сварки**

$U_{xx}$	$I_d$	$U_d$	$d_э$
48	120	22	4
44	105	30	4
61	120	22,5	5
50,5	129	25	5
61	105	26,5	5

На осциллограммах в различные полупериоды напряжение зажигания и горения дуги электродами УОНИ отличается на 30–50 %, а при сварке электродами МР-3 асимметрии нет.

По-видимому, устойчивое горение дуги электродами УОНИ на переменном токе объясняется улучшением динамических свойств во время повторного возбуждения [59].

### **2.3. Влияние конденсаторов на сварочно-технологические свойства источников питания**

В опытных выпрямителях с напряжением холостого хода 26–35 В внешние характеристики имеют наклон 0,05–0,1 В/А. С увеличением жесткости внешней характеристики источника питания возрастает ток короткого замыкания при зажигании дуги и в процессе переноса капель металла с электрода в сварочную ванну. Увеличение пиковых значений тока короткого замыкания при переносе металла в дуге способствует возрастанию потерь на разбрызгивание и нагреву электродного стержня при сварке электродами диаметром 2–3 мм.

Отсутствуют подробные сведения о влиянии емкости конденсаторов на сварочно-технологические свойства и технико-экономические показатели [4, 92].

Сварочно-технологические свойства однофазных выпрямителей с мостовой схемой выпрямления и регулировкой режимов сварки за счет секционирования обмоток оценивали по [19]. Дополнительно определяли потери на угар и разбрызгивание и коэффициент наплавки.

Так как применение индуктивности в сварочных выпрямителях улучшает сварочно-технологические свойства, после выпрямительного блока в сварочную цепь включали дроссель.

Для удвоения напряжения емкость конденсаторов изменяли от 100 до 80 000 мкФ.

Коэффициент мощности  $\cos\varphi$  и  $\eta$  (КПД) определялись по формулам:

$$\cos\varphi = P_1 / U_1 \cdot I_1; \quad (2.1)$$

$$\eta = I_2 \cdot U_2 / P_1,$$

где  $P_1$  – активная мощность первичной цепи по показаниям ваттметра;  $U_1$  – напряжение первичной сети;  $I_1$  – первичный ток;  $I_2$  – вторичный (сварочный) ток;  $U_2$  – напряжение вторичной цепи.

Коэффициент токов  $I_2 / I_1$  определяли до выпрямления  $k_{T1}$  и после выпрямления  $k_{T2}$ . Дополнительно технико-экономические показатели –  $\eta$ ,  $\cos\varphi$  и  $k_T$  – определяли при подключении источника питания к балластному реостату. При этом значения  $I_2$  и  $U_2$  на каждой ступени регулирования тока поддерживали аналогично сварочным.

Выявлено, что с увеличением емкости конденсаторов напряжение холостого хода источника питания постепенно возрастает и увеличивается в 2,82 раза.

При пульсации выпрямленного напряжения холостого хода без конденсаторов и ее величине на экране электронного осциллографа 30–40 мм ( $U_{xx} = 30$  В) увеличение емкости сглаживает пульсации, а при емкости конденсаторов 1000 мкФ и более пульсации исчезают.

В случае включения конденсаторов за половину периода пульсации приобретают вид, показанный на рис 2.1.

Считается, что при включении трансформатора последовательно со вторичной обмоткой трансформатора емкость конденсатора определяют из условия 300 мкФ на один ампер тока [125]. Тогда при известном токе короткого замыкания общая емкость конденсатора, мкФ, определяется по формуле

$$C_k = 300 \cdot I_{кз}, \quad (2.2)$$

где  $I_{кз}$  – ток короткого замыкания источника питания.

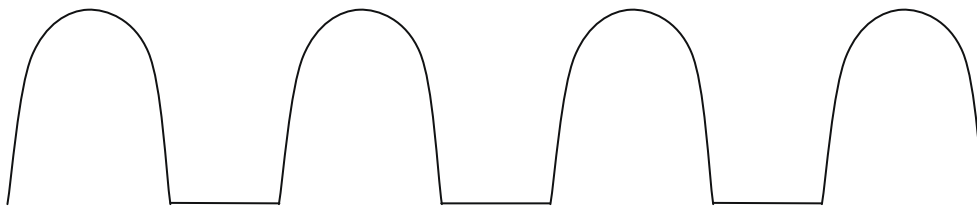


Рис. 2.1. Напряжение холостого хода при включении конденсаторов за половину периода

Выявлено, что при увеличении емкости конденсаторов до определенного значения сварочно-технологические свойства источника питания улучшаются. В испытанных источниках питания действующее значение напряжения холостого хода трансформатора составляло 26–34 В, т. к. при подключении конденсаторов напряжение холостого хода увеличивается в 2,8 раза и не должно превышать 100 В.

В случае емкости конденсаторов менее 100 мкФ дуга на обычных режимах по току и напряжению зажигается с нескольких касаний, разрывная длина дуги и другие показатели устойчивости неудовлетворительные.

Например, при емкости конденсаторов К 75–406 100 мкФ дуга зажигается электродами МР-3 и АНО с нескольких касаний и для электродов диаметром 2 мм разрывная длина дуги составляет 6–7 мм.

Увеличение емкости конденсаторов до 2000 мкФ обеспечивает зажигание до одного-двух касаний и разрывная длина дуги возрастает до 12–15 мм. Потери на угар и разбрызгивание составляют 7,7 %, а  $\alpha_n$  – 8,57 г/А·ч.

У испытанных выпрямителей с напряжением холостого хода 26–34 В, при рабочих токах 25–220 А и индуктивности 300–500 мкГ КПД составляет 0,65–0,8, а  $\cos\varphi$  – 0,85–0,98.

Включение конденсаторов емкостью 1000–2000 мкФ незначительно уменьшает КПД, а  $\cos\varphi$  с включением конденсаторов увеличивается. Например, без конденсаторов на режимах ( $U_{xx} = 30$  В;  $I_2 = 75$  А;  $U_2 = 24$  В)  $\eta = 0,795$ ;  $\cos\varphi = 0,88$ ;  $k_{T_2} = 7,43$ . На данном режиме с емкостью конденсаторов 2300 мкФ  $\eta = 0,773$ ;  $\cos\varphi = 0,94$ ;  $k_{T_2} = 7,3$ . Поэтому увеличивать емкость конденсаторов более 3000 мкФ нецелесообразно.

Но увеличение емкости конденсаторов более 10 000 мкФ позволяет осуществлять сварку покрытыми электродами при действующем напряжении холостого хода трансформатора 17–24 В, что без конденсаторов осуществить, по-видимому, невозможно.

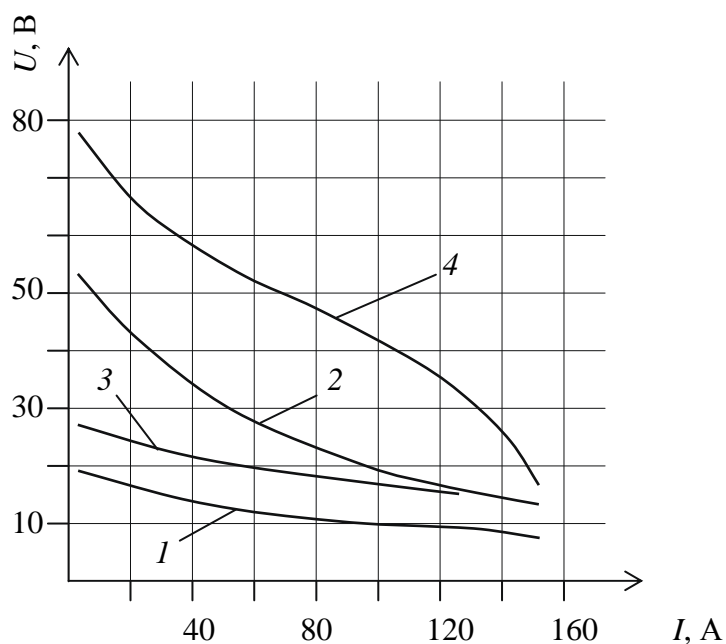


Рис. 2.2. Внешние статические характеристики без конденсаторов (1, 3) и с конденсаторами 10 000 мкФ (2, 4)

В данном случае внешняя характеристика смещается в область рабочих режимов и сварочный ток значительно увеличивается (рис. 2.2).

Характеристика 1 на рис. 2.2 соответствует напряжению холостого хода 18,5 В, а характеристика 2 обеспечивается после включения конденсаторов. Аналогично: 3 – без конденсаторов и 4 – с конденсаторами.

Характеристике 2 соответствуют следующие режимы сварки электродами АНО диаметром 2 мм:  $I_d = 70$  А;  $U_d = 24$  В;  $\eta = 0,89$ ;  $\cos\varphi = 0,72$ ;  $k_{T_1} = 7,76$ ;  $k_{T_2} = 5,93$ .

Разрывная длина дуги с дополнительно включенной индуктивностью 750 мкГ составляет 10 мм.

С конденсаторами емкостью 47 000 мкФ и индуктивностью 750 мкГ при горении дуги электродом МР-3 диаметром 2 мм потери на угар и разбрызгивание составляют 8,29 %, а  $\alpha_n = 8,6$  г/А·ч. Дуга зажигается с первого касания, разрывная длина дуги – 18–20 мм. Но  $\cos\varphi = 0,73$ ;  $\eta = 0,43$   $k_{T_1} = 6,64$ ;  $k_{T_2} = 3,07$ .

Но следует учесть, что  $k_{T_2} = 3,07$  – обычное явление при напряжении холостого хода без конденсаторов 60–65 В, а в нашем случае напряжение холостого хода трансформатора – 21 В.

Увеличение емкости конденсаторов до 80 000 мкФ с индуктивностью дросселя 300 мкГ способствует «взрывному» зажиганию дуги, потери на угар и разбрызгивание возрастают и уменьшается КПД источника питания.

Следует помнить, что на клеммах для подключения сварочных проводов после отключения выпрямителя от электрической сети остается напряжение. Поэтому после отключения источника питания необходимо для разрядки конденсаторов накоротко замкнуть сварочную цепь.

## **2.4. Влияние индуктивности на сварочно-технологические свойства выпрямителей**

Считается, что при сварке покрытыми электродами чем больше индуктивность, тем благоприятнее условия для переноса расплавленного металла, стабильнее горение сварочной дуги и меньше разбрызгивание. При использовании выпрямителя ВС-400 на токе 100 А, индуктивности 6–10 мГн и диаметре электрода УОНИ-13/45 3 мм потери на разбрызгивание составляют не более 2 % [55].

Отсюда следует, что необходимо обосновать применение дросселей, обеспечивающих минимальные потери на разбрызгивание, отсутствие перегрева электрода при повышенной жесткости источника питания и устойчивое горение дуги на малых токах.

В литературе нет данных о сварочно-технологических свойствах конденсаторных источников питания для электродов УОНИ.

Как показали эксперименты авторов настоящей монографии, у однофазных сварочных выпрямителей с мостовой схемой выпрямления, напряжением холостого хода без конденсаторов 26–35 В и с конденсаторами 70–100 В без дросселя в сварочной цепи, горение дуги электродами УОНИ затрудняется. Подключение к сварочному трансформатору ТДС-1000 и однофазному трансформатору с напряжением холостого хода 55–60 В выпрямительного блока также не обеспечивает горение дуги электродами УОНИ.

Считается, что при частоте тока, равной нулю (постоянный ток), индуктивное сопротивление равно нулю, потому что в этом случае нет явления самоиндукции.

В процессе горения дуги и при переносе электродного металла с короткими замыканиями наблюдаются значительные колебания тока,

поэтому индуктивное сопротивление уменьшает пиковые значения токов и сглаживает пульсации выпрямленного напряжения.

С увеличением индуктивного сопротивления, включенного после выпрямительного блока, токи короткого замыкания уменьшаются и при определении вольт-амперной характеристики источника питания. Поэтому с увеличением индуктивного сопротивления возрастает крутизна вольт-амперной характеристики.

На рис. 2.3 показана зависимость тока короткого замыкания выпрямителя от индуктивности цепи выпрямленного тока. Трансформатор с кольцевым магнитопроводом, напряжение холостого хода после выпрямления равно 27,5 В. Индуктивные сопротивления после выпрямительного блока включались последовательно.

По результатам экспериментов авторов, с увеличением индуктивности в цепи выпрямленного тока при сварке покрытыми электродами сварочно-технологические свойства источников питания улучшаются.

Включение индуктивности 300–500 мкГн в цепь выпрямленного тока обеспечивает горение дуги на стандартных режимах электродами с фтористо-кальцевым покрытием с разрывной длиной дуги 2,5–3  $d_z$ .

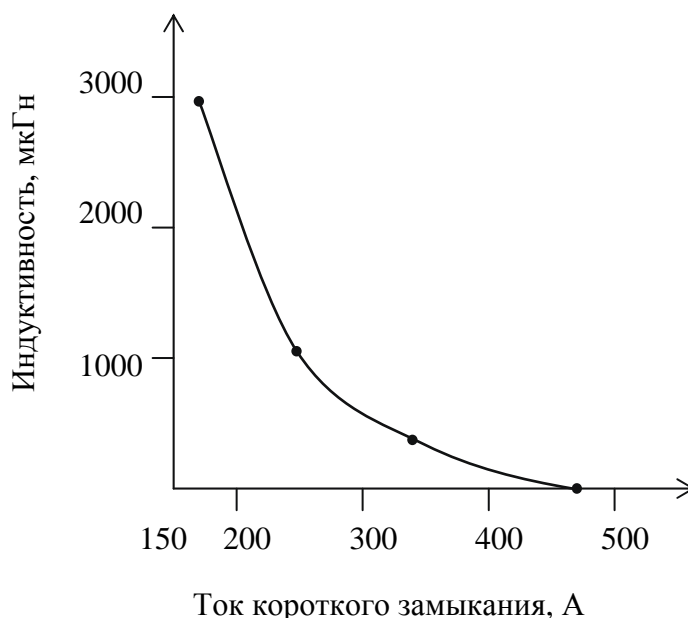


Рис. 2.3. Ток короткого замыкания в зависимости от индуктивности цепи выпрямленного тока

При индуктивности в сварочной цепи 3000 мкГ дуга горит между любым электропроводным (металлическим) материалом при силе тока 10–12 А. В данных условиях и с конденсаторным множителем напряжения дуга горит между голой стальной проволокой диаметром 5, 8, 10 мм; латунным прутком диаметром 8 мм с плоской торцевой поверхностью; голой алюминиевой шиной  $15 \times 5$  мм и т. д. Дуга горит электродом АНО диаметром 2 мм при силе тока 2–3 А. Также дуга горит между электродами МР диаметром 6 мм и стальной пластиной при силе тока 3–5 А. На обычных режимах дуга зажигается легко (мягко) и уменьшаются потери на разбрызгивание.

По-видимому, пульсации, наблюдаемые в электрической цепи, после выпрямления переменного тока при включении индуктивного сопротивления обеспечивают накопление в дросселе энергии.

В процессе угасания дуги происходит передача энергии на дуговой промежуток, что способствует длительному существованию дугового разряда на малых токах.

Также с увеличением индуктивности дросселя у выпрямителей без конденсаторного множителя улучшаются показатели устойчивости горения дуги. Например, выпрямитель без конденсаторного множителя с напряжением холостого хода 37,5 В, наклоном внешней характеристики 0,07 В·А, индуктивностью 290 мкГ обеспечивает зажигание дуги с двух–трех касаний электродом МР–3 диаметром 3 мм при силе тока 120 А и разрывную длину  $2,5 d_3$ .

Включение дополнительного дросселя с индуктивностью 745 мкГ обеспечивает более легкое зажигание дуги, и разрывная длина дуги увеличивается до  $3–3,5 d_3$ . Также с дополнительным дросселем зажигается дуга при напряжении холостого хода 31–32 В и силе тока 70–80 А.

Потери на угар и разбрызгивание на стандартных режимах электродами МР, АНО и УОНИ с дросселем индуктивностью 400–700 мкГн и конденсаторами емкостью 2000 мкФ составляют 8,5–5,5 %. С увеличением индуктивности в цепи выпрямленного тока потери на разбрызгивание уменьшаются.

По данным [59] только при силе тока 3–5 А, по-видимому, дуговой разряд между плавящимися электродами становится дуговым и при меньших токах невозможен.

На режиме, когда  $U_{xx} = 81$  В, наклон внешней характеристики источника питания 0,057 В/А, встроенная индуктивность 0,5 мГн, конденсаторы емкостью 1000 мкФ при включении дополнительной индуктивности 4,5 мГн и регулировании тока балластными сопротивлениями при

силе тока 0,8–1 А и короткой дуге ( $\approx 1,5$ –2 мм), существует дуговой разряд между электродами МР-3 диаметром 3 и 5 мм на обратной полярности и сталью.

На малых токах (ток регулировался балластным реостатом) включение индуктивности оказывает положительное влияние на устойчивое горение и при питании дуги от выпрямителя ВДУ-504. С индуктивностью 3 мГн дуга горит между вольфрамовым электродом диаметром 2 мм, электродом МИТ-2 диаметром 3 мм и малоуглеродистой сталью при силе тока 2–4 А. Без индуктивности дуга зажигается хуже и угасает. Также при сварке электродом МР-3 диаметром 2 мм при силе тока 20–30 А с дополнительной индуктивностью дуга лучше (мягче) зажигается и возрастает ее разрывная длина.

## **2.5. Особенности горения дуги при сварке покрытыми электродами на малых токах**

Устойчивые режимы горения дуги на малых токах обеспечивают возможность сварки тонкого металла, но сведения об устойчивом горении дуги покрытыми электродами током 10–15 А и сварке ограничены.

Например, для комплексной оценки сварочно-технологических свойств источников питания, предназначенных для сварки покрытыми электродами, предлагается показатель, учитывающий минимальный ток, при котором еще возможен процесс сварки без обрывов дуги и «примерзаний». Оптимальные минимальные токи для электродов из малоуглеродистой стали следующие: 40 А для  $d_3 = 2$  мм; 70 А для  $d_3 = 3$  мм; 120 А для  $d_3 = 4$  мм [101].

При питании дуги от однофазного выпрямителя со вспомогательной цепью питания устойчивость горения дуги, оцениваемая по разрывной длине дуги, улучшается с увеличением напряжения холостого хода. Дуга с покрытым электродом может гореть при токе равном 2,5 А, а при токе 3,5 А разрывная длина дуги электродами УОНИ-13/55 диаметром 3 мм составляет 5 мм [59].

По данным [21] процесс дуговой сварки покрытыми электродами на малых токах может протекать устойчиво, если продолжительность коротких замыканий не более 0,025 с и ток короткого замыкания превысит определенное значение, которое пропорционально квадрату диаметра электрода.

Для электродов диаметром 3 мм минимальный ток короткого замыкания составляет 154 А, а для электродов диаметром 2 мм – 68 А. Авторы [21] считают, что устойчивый процесс сварки на малых токах невозможно обеспечить при использовании стандартного оборудования. Устойчивый процесс обеспечивается за счет принудительной активации разрушения перемычек между электродом и сварочной ванной. Из-за принудительной активации разрушение перемычки в сравнении со стандартным выпрямителем происходит при минимальном токе в 3–5 раз ниже, чем при сварке без разрушения перемычки, и для электродов УОНИ-13/55 диаметром 4 мм минимальный критический ток при сварке в нижнем положении составляет 25 А.

При питании дуги от выпрямителя ВДУ-506МТУЗ, имеющего цепь высоковольтной подпитки и сглаживающий дроссель индуктивностью 0,96 мГн, минимальный ток устойчивого горения дуги для электродов диаметром 2–6 мм составляет от 17 до 50 А при коэффициенте разбрызгивания 0,3–5,6 % и разрывной длине дуги от 12 до 22 мм [81].

Из вышеизложенного следует, что минимальный ток при сварке покрытыми электродами зависит от напряжения холостого хода источника питания, индуктивности сварочной цепи, динамических свойств источника питания, что определяется конструктивными особенностями источников питания.

Сведения о переносе металла в дуге многочисленны, но до сих пор не существует единого мнения о силах, вызывающих перенос расплавленного электродного металла с покрытого электрода в сварочную ванну. При обычных режимах сварки покрытыми электродами процесс протекает с короткими замыканиями и разбрызгивание зависит от динамических свойств источника питания [62]. Данные о переносе металла в дуге при сварке покрытыми электродами током менее 20 А практически отсутствуют.

В данной работе при проведении экспериментов питание дуги осуществлялось от однофазного выпрямителя с конденсаторным умножителем напряжения и дросселем в сварочной цепи с индуктивностью 1,25 мГн и напряжением холостого хода 27–34 В. При включении электролитических конденсаторов емкостью 2000 мкФ напряжение холостого хода увеличивалось в 2,82 раза, в диапазоне 1–14 А ток регулировался балластным сопротивлением. Применяли электроды МР-3, ОЗС-12 диаметром 2 мм и электроды Lincoln Electric E6013 (США) диаметром 1,6 мм. Сварку выполняли током обратной полярности.

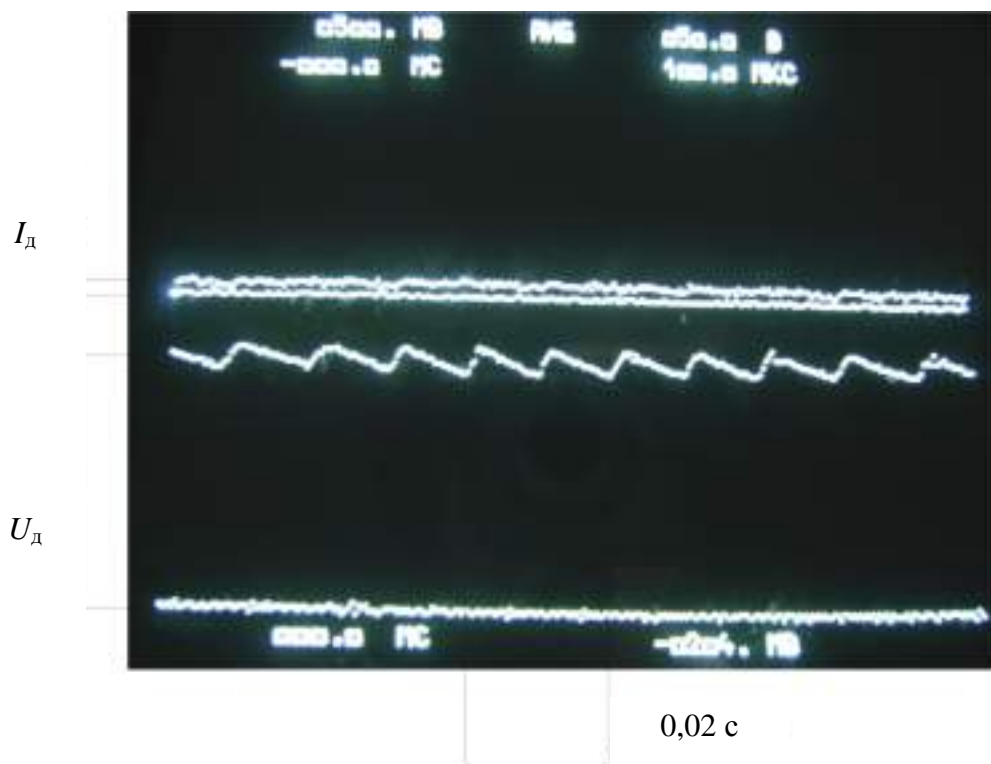


Рис. 2.4. Осциллограмма процесса дуговой сварки покрытыми электродами МР-3 диаметром 2 мм ( $I_d = 1$  А,  $U_d = 35$  В)

При токе 1 А обеспечиваются зажигание и горение дуги электродом МР-3 диаметром 2 мм (рис. 2.4). При сварке данным током дуга зажигается любыми электродами. Так, при неподвижном вертикально расположенном электроде ОЗС-12 диаметром 2 мм и расстоянии от электрода до детали 1 мм при токе 1,8–2,0 А и напряжении дуги 25–30 В дуга горит длительно и непрерывно без угасания. За данный промежуток времени конец электрода нагревается и покрывается раскаленным шлаком, но плавление металлического стержня не наблюдается. При увеличении тока до 4–6 А дуга зажигается и горит, но при толщине низкоуглеродистой стали 0,6 мм энергии на плавление основного и электродного металла недостаточно, ухудшается смачиваемость изделия каплями электродного металла.

Горение дуги на малых токах позволяет определить показатели переноса электродного металла визуально и стандартной кинокамерой через светофильтры без подсветки. Время перехода капли от момента зажигания дуги до ее отрыва от электрода при токе 5,5 А составляет 45 с. При измерении разрывной дуги по методике К. К. Хренова отрыв капли при токе 6 А происходит за 38 с, а разрывная длина дуги составляет 15,5 мм.

Диаметр капли, покрытой шлаком, составляет 3,5–4,0 мм; в процессе роста и сужения шейки капля не совершает колебаний и стабильно переходит в сварочную ванну соосно с осью вертикально расположенного электрода. При силе тока 10–12 А зажигание дуги легкое (рис. 2.5), нагрев и расплавление изделия осуществляются в процессе роста капли на торце электрода (рис. 2.6).

При горении дуги диаметр капли, покрытой жидким шлаком, составляет 3–4 мм. Визуально фиксируется вращение жидкого металла в капле на торце электрода, что видеосъемкой зафиксировать не удалось. Рост капли наблюдается при удлинении дуги и отрыве капли без принудительных касаний сварочной ванны. В процессе роста капли отсутствуют ее колебания и заметные отклонения от оси электрода на его боковую поверхность. В момент принудительного касания каплей изделия или при ее естественном отрыве взрывные явления не наблюдаются (рис. 2.7).

Капля, покрытая жидким шлаком, переходит в ванну без угасания дуги (рис. 2.8). Через маску «Хамелеон» и без маски наблюдается выделение мелких искр из капли и ванны, но заметные брызги на поверхности изделия не зафиксированы. По-видимому, выделение искр объясняется металлургическими процессами в капле и ванне.



Рис. 2.5. Осциллограмма процесса зажигания дуги электродом МР-3 диаметром 2 мм ( $I_d = 10\text{--}12$  А;  $U_d = 24$  В)

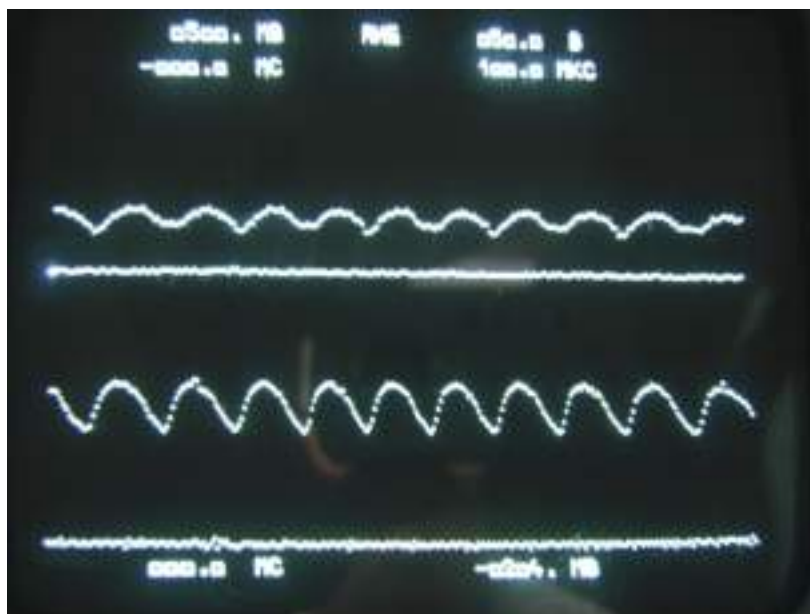


Рис. 2.6. Осциллограмма тока и напряжения дуги в процессе роста капли на электроде ( $I_d = 12$  А,  $U_d = 24$  В)

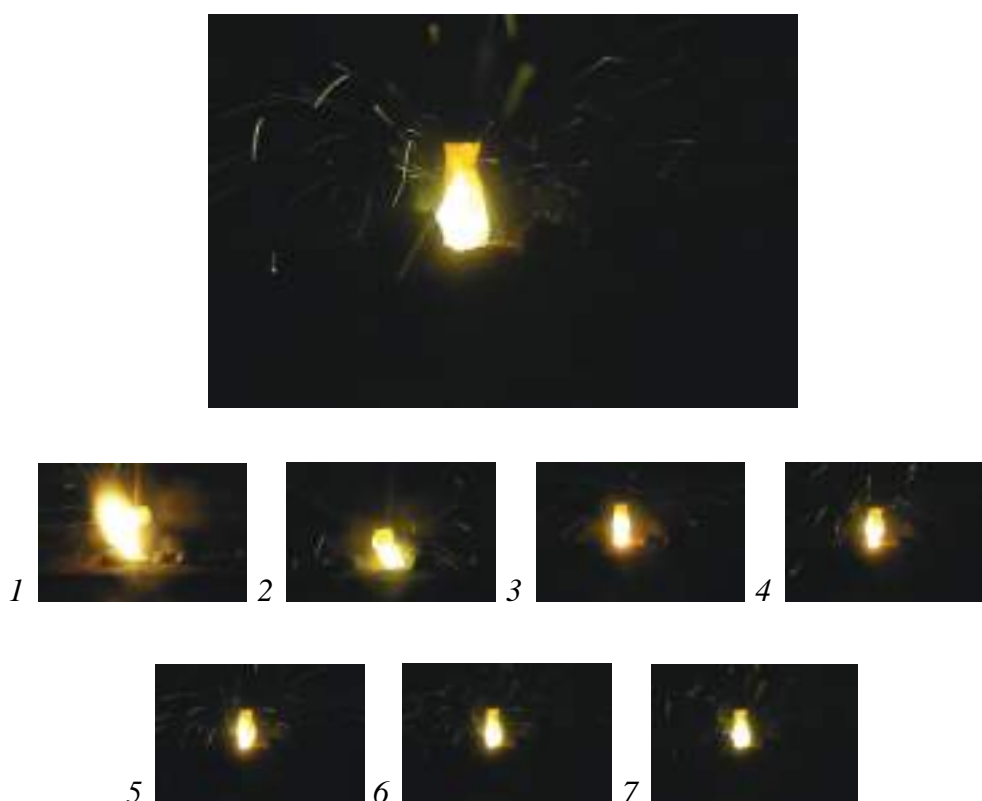


Рис. 2.7. Принудительное касание капель свариваемого изделия:  
1–7-кадры

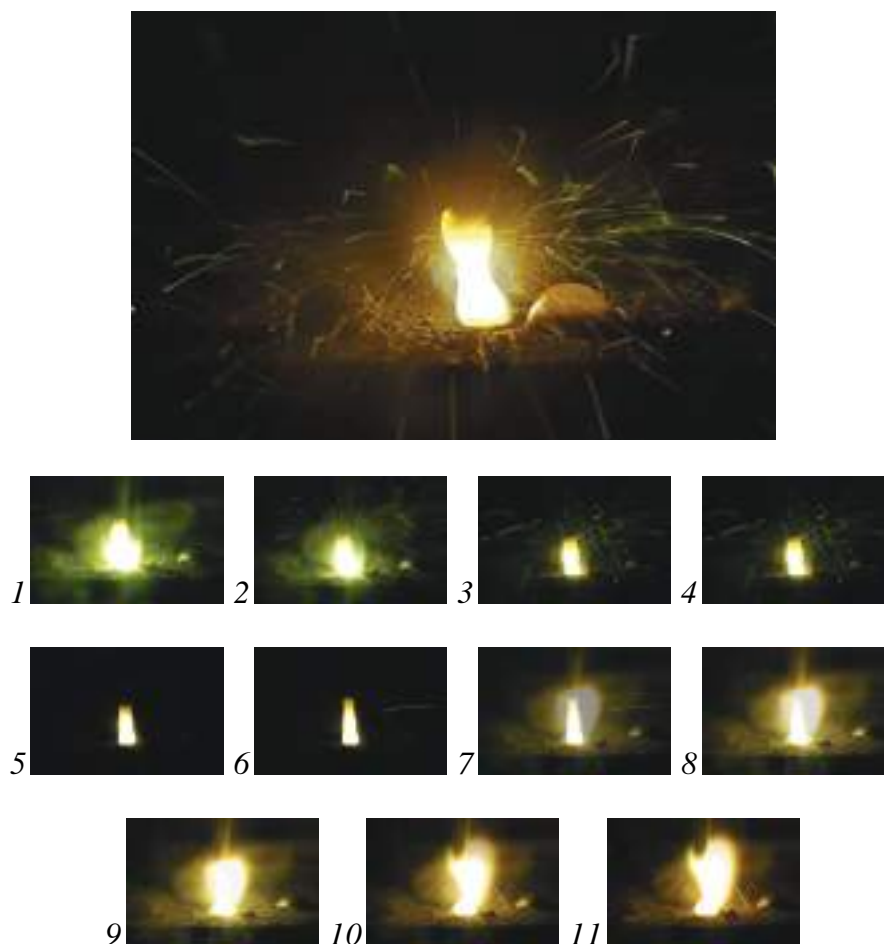


Рис. 2.8. Последовательность перехода капли с электрода на изделие:  
1–11-кадры

При сварке током 15 А электродом LincolnElectric диаметром 1,6 мм обрыв дуги наблюдается при ее удлинении до 19,8 мм, время перехода капли от момента зажигания дуги до ее отрыва от электрода составляет 17 с. Так как при неподвижном электроде и его перемещении капля не совершает колебаний и не наблюдаются взрывные явления, можно утверждать, что на малых токах перенос осуществляется за счет силы тяжести и сил поверхностного натяжения.

По данным работы [23] допустимые зазоры в соединении и смещение кромок не должны превышать 10–20 % толщины основного материала. При сварке однофазной дугой прожоги возникают с зазором в стыке, равном 0,1 толщины материала [117].

На практике данные требования к точности сборки обеспечить нелегко. В связи со сложностью стыковки образцов толщиной 0,6–0,7 мм (например кузовов легковых автомобилей) их готовили следующим образом.

Лакокрасочное покрытие удаляли на ширине 10–15 мм. Металл в зоне шва разрезали ножницами, но не до конца. Для устранения зазора и превышения кромок в зоне выполнения шва образцы подвергали незначительной пластической деформации с помощью молотка на металлическом основании. Величина зазора и превышение кромок при толщине стали 0,6 мм составляли 0,1–0,2 мм, что выше рекомендованных [23, 117].

При сварке током 12–13 А обеспечивается формирование шва шириной 3,5–4,0 мм с полным проплавлением на весу. По-видимому, из-за малой величины сварочной ванны шов формируется за счет сил поверхностного натяжения. При остановке перемещения дуги и увеличении силы тока до 15–16 А вероятность прожогов возрастает.

В связи с отсутствием сведений о сварке покрытыми электродами диаметром менее 1,6 мм и силой тока менее 10 А проводились исследования с целью установления возможности сварки тонкого металла толщиной менее 0,6 мм. Проволоку Св-08Г2С диаметром 1,2 мм разрезали на куски длиной 150–200 мм, после резки куски проволоки правили. При длине прутка 300 мм из-за его недостаточной жесткости при попытках зажечь дугу наблюдается колебание конца электрода в зоне зажигания дуги.

Также из-за недостаточной жесткости стержня диаметром 1,2 мм усложняется его зажим в стандартных вилочных и пружинных электрододержателях. Для улучшения фиксации стержня электрода зажимные губки в стандартных пружинных электрододержателях необходимо заменить на плоскопараллельные.

Для изготовления электродов применяли тонкоизмельченный мел и сухую шихту, изготовленную для выпуска электродов МР-3 в заводских условиях. Тонкоизмельченный мел просеивали через сито и разводили в воде до сметаноподобного состояния. Прутки обмакивали в пасту, сушили на воздухе в вертикальном положении и прокаливали в печи при температуре 200–220 °С в течение двух часов. Покрытие с меловой обмазкой после прокалики не вздувалось.

Сухая шихта для изготовления электродов МР-3 смешивалась до пастообразного состояния. Стержни окунались в пасту и подсушивались на воздухе. При форсированной прокатке наблюдалось вспучивание обмазки. Поэтому для устранения вспучивания необходим медленный подъем температуры при прокатке электродов. Но равномерную толщину покрытия окунанием на электродный стержень диаметром 1,2 мм обеспечить сложно.

Выявлено, что при наплавке валиков на малоуглеродистую сталь толщиной 0,3–0,6 мм и сварке электродом диаметром 1,2 мм дуга зажи-

гается уверенно и горит устойчиво. Разбрызгивание практически не наблюдается. Из ванны и капли выделяются мелкие искры, по-видимому, металлургического характера. При силе тока 6–8 А визуально наблюдается рост капли на торце электрода. В момент принудительного касания накапливающейся раскаленной каплей изделия дуга не гаснет и капля за счет силы тяжести и силы поверхностного натяжения сливается с подогретым дугой металлом в зоне выполнения шва. Следующая капля переходит в сварочную ванну аналогично и сливается с предыдущей [68]. Переход капель во время принудительных коротких замыканий, осуществляемых сварщиком, обеспечивает их перекрытие с образованием шва. С уменьшением толщины изделия до 0,3 мм вероятность появления прожогов увеличивается, но они легко устраняются подваркой.

При напряжении холостого хода выпрямителя 100 В, индуктивности дросселя 0,05 Гн и силе тока 6–8 А разрывная длина дуги достигает 25–30 мм.

## 2.6. Наплавка тремя электродами

Однодуговой способ наплавки покрытыми электродами имеет широкое применение, но для получения наплавленного металла без примесей основного необходимо наносить пять–шесть слоев [69].

При ручной дуговой наплавке покрытыми электродами из малоуглеродистой стали доля участия основного металла в наплавленном возрастает с увеличением мощности дуги и составляет 30 % [62, 116]. Также при наплавке медными электродами «Комсомолец» доля участия основного металла в наплавленном достигает 25–50 % [12].

Применение плазменной наплавки с токоведущей присадочной проволокой (и при наплавке сплавов на медной и никелевой основе) уменьшает долю участия основного металла в наплавленном до 1–2 % [40, 114]. Но при наплавке сплавов на основе железа потери порошка достигают 20 %. Также в случае наплавки токоведущими сварочными проволоками (Св-08А, Св-08Г2С, Нп-65-С) не обеспечиваются качественное формирование слоев и минимальная доля основного металла в наплавленном [114]. При плазменно-порошковой наплавке потери порошка могут быть уменьшены до 2–3 % [40], но данный способ относительно сложен и для его осуществления необходимо специализированное и дорогое оборудование.

За последние десятилетия в научно-технической литературе отсутствуют сведения о многоэлектродной наплавке дугой постоянного тока. В связи с разработкой в России и за рубежом электродов диаметром 1,6–3,0 мм появилась возможность уменьшить массу электрододержателя и подводящих проводов для многоэлектродной наплавки.

Авторы определяли оптимальные режимы многоэлектродной наплавки дугой постоянного тока, обеспечивающие формирование наплавленных валиков без зашлаковок.

Питание дуги осуществлялось от однофазного выпрямителя с конденсаторным умножителем напряжения и пологопадающей ВАХ. Напряжение холостого хода 80–95 В, индуктивность сварочной цепи 0,5–0,8 мГн. Устойчивость горения дуги оценивали согласно ГОСТ 25616-83, измеряли потери на угар и разбрызгивание. Долю участия основного металла в наплавленном (отн. ед.) определяли после фотографирования протравленных образцов в программе Photoshop. Электроды связывали медной проволокой диаметром 0,2 мм при расстоянии между местами крепления 35–40 мм.

При наплавке тремя электродами ОЗС-12, МР-3 диаметром 2 мм, скомпонованными треугольником, доля участия основного металла в наплавленном, равная 5–6 %, получена при следующих режимах:  $I_d = 40\text{--}50$  А;  $U_d = 25$  В; обратная полярность. Потери на угар и разбрызгивание составили 3–4 %, коэффициент наплавки – 6,8 г/А·ч, производительность – 0,42 кг/ч. Ширина валика – 9,3 мм, высота – 4 мм, переход от основного металла к наплавленному плавный (рис. 2.9).

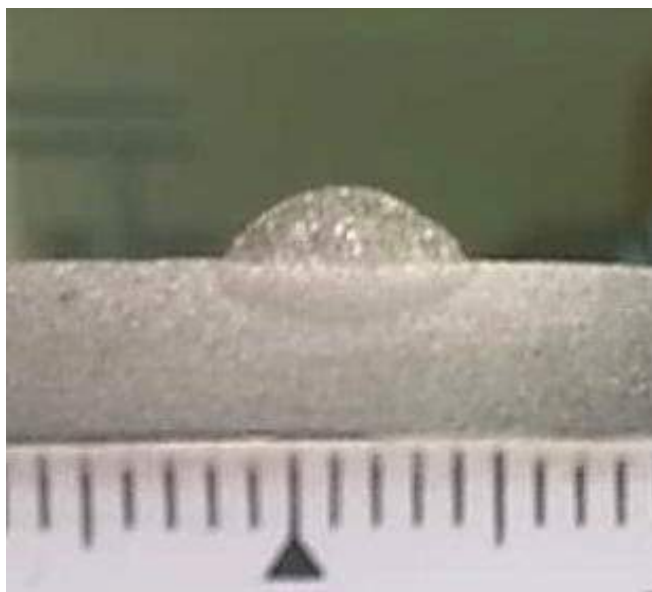


Рис. 2.9. Поперечное сечение шва ( $I_d = 45$  А;  $U_d = 25$  В, обратная полярность)

При применении аналогичных режимов швы формируются при сварке током прямой полярности. При погружении электрода в расплавленный шлак дуга угасает, поэтому необходимо поддерживать длину дуги постоянной, без касания электродами расплавленного шлака.

Наплавка током менее 40 А ухудшает смачиваемость основного металла наплавленным и формирование валиков.

При наплавке тремя электродами НЖ-13 диаметром 3 мм на низкоуглеродистую сталь обеспечивается доля участия основного металла в наплавленном 3–5 %. Режимы наплавки:  $I_d = 100$  А;  $U_d = 28$  В; обратная полярность (рис. 2.10, а). Также при наплавке аустенитными электродами диаметром 2,5 мм (ОК 61.30/308L-17, фирма ESAB), скомпанованными треугольником, на малоуглеродистую сталь, зачищенную до металлического блеска, при режимах  $I_d = 80$  А,  $U_d = 25–27$  В получено минимальное участие основного металла в наплавленном (рис. 2.10, б).

В связи с отсутствием в России покрытых электродов из медных сплавов диаметром менее 3 мм проводились опыты по наплавке бронзы Бр. КМц 3-1 тремя голыми проволоками диаметром 2 мм.

При наплавке бронзы Бр. КМц 3-1 на сталь в атмосфере воздуха выгорания марганца и кремния не происходит. Защита металла от окисления обеспечивается за счет образования окисной пленки кремния на поверхности жидкого металла. Также в наплавленной бронзе не наблюдается заметной пористости [87].

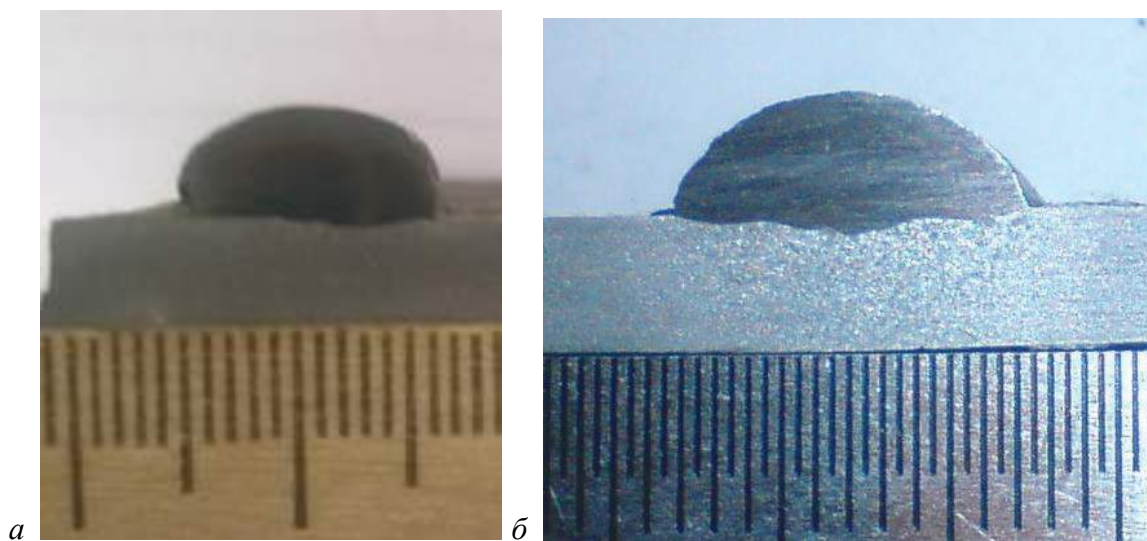


Рис. 2.10. Макрошлиф шва: а – наплавленного электродами НЖ-13 током обратной полярности, б – наплавленного электродами ОК 61.30/308L-17

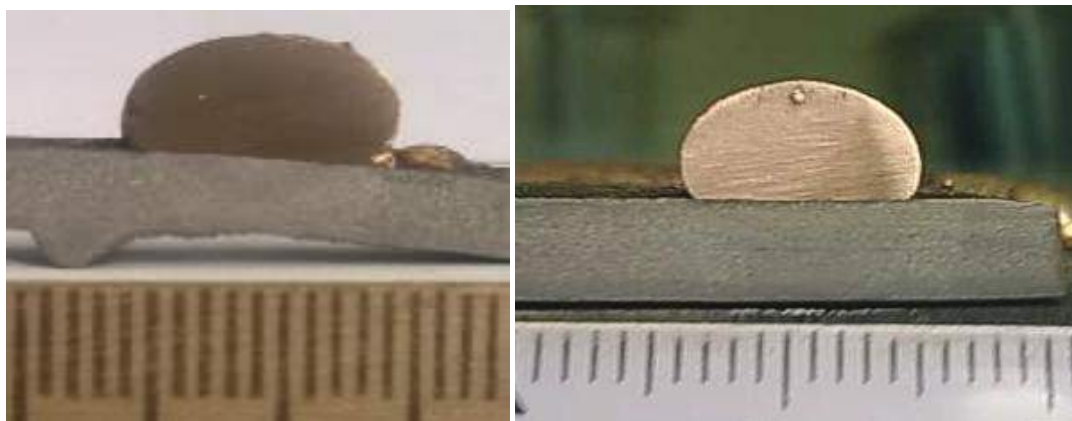


Рис. 2.11. Поперечные сечения швов ( $I_d = 80$  А,  $U_d = 25$  В, обратная полярность)

В случае наплавки бронзы Бр. КМц-1 (в сравнении с бронзой Бр. АМц 9–2) в аргоне обеспечивается наплавленный металл с меньшим количеством дефектов [41, 70]. Содержание железа в первом слое при наплавке проволокой диаметром 1,4 мм в аргоне составляет 4,2–7 % [41].

Перед наплавкой проволоки из бронзы Бр. КМц 3–1 диаметром 2 мм связывались тонкой медной проволокой и наплавлились в условиях атмосферы на малоуглеродистую сталь, зачищенную до металлического блеска. При напряжении холостого хода выпрямителя 80–95 В и индуктивности сварочной цепи 0,8 мГн обеспечивается формирование наплавленных валиков с минимальной долей участия основного металла в наплавленном (рис. 2.11). Но смачиваемость стали наплавленным металлом неудовлетворительная.

---

## **Глава 3. ОСОБЕННОСТИ ЗАЖИГАНИЯ И ГОРЕНИЯ ДУГИ ПЛАВЯЩИМИСЯ ЭЛЕКТРОДАМИ В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ**

### **3.1. Зажигание сварочной дуги при сварке плавящимся электродом в защитных газах**

Наибольшее применение в настоящее время получила сварка плавящимся электродом диаметром до 2,5 мм в среде защитных газов с постоянной скоростью подачи электрода в зону горения дуги.

В процессе дуговой сварки, состоящей из начала (установления) процесса, стабильного течения и его окончания, под началом процесса понимают время установления стабильного процесса сварки, включающее зажигание дуги и переход к заданным параметрам режима сварки.

Существуют две основные разновидности механизированной сварки плавящимся электродом: сварка длинной дугой (процесс с непрерывным горением дуги) и сварка короткой дугой (процесс с частыми короткими замыканиями дугового промежутка).

При сварке длинной дугой под установлением стабильного процесса сварки понимают переход к заданным параметрам режима сварки при непрерывном горении дуги.

При сварке короткой дугой признаком установления стабильного процесса является не непрерывность ее горения после ее зажигания, а непрерывность тока и периодичность процесса. Термины «зажигание» и «возбуждение» дуги являются эквивалентными [109].

Явления и процессы, происходящие при зажигании дуги, подробно освещены в работах [13, 57, 84, 109].

Элементы теории зажигания дуги изложены в работе [109], авторами которой делается вывод: «таким образом, следует признать, что в настоящее время отсутствует сколько-нибудь удовлетворительная теория, описывающая зажигание дуги при размыкании электродов, а также для случая электрического пробоя межэлектродного промежутка» [109, с. 15].

При автоматической и механизированной сварке в защитных газах зажигание дуги осуществляется контактным способом путем замыкания на изделие непрерывно подаваемой проволоки, находящейся под напряжением.

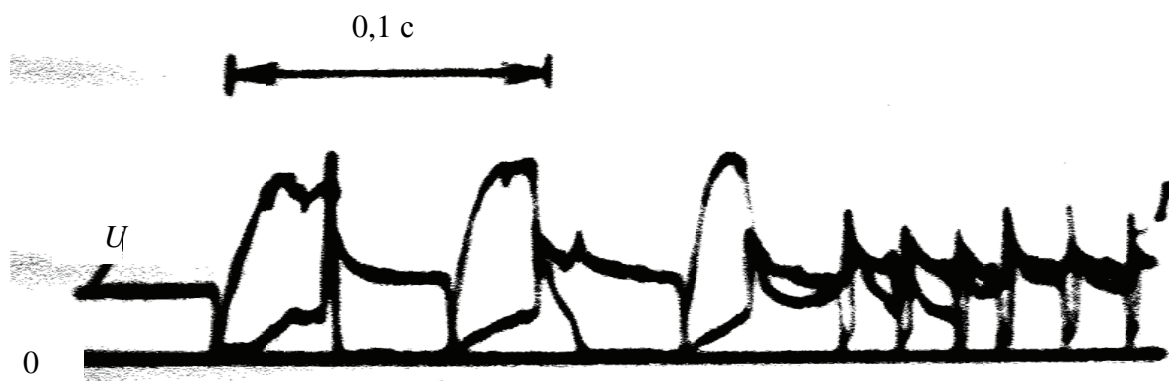


Рис. 3.1. Осциллограмма установления процесса сварки

Установление процесса сварки для систем с постоянной скоростью подачи электрода (рис. 3.1) происходит в несколько стадий: замыкание электрода с изделием и нагрев электрода протекающим током; перегорание электрода на участке вылета, зажигание, горение и угасание дуги; перемещение электрода к основному металлу до следующего замыкания.

На первой стадии момент соприкосновения электрода с изделием («утыкание электрода») характеризуется резким падением напряжения между электродами и нарастанием тока короткого замыкания, который в этом случае (при первом замыкании), как правило, достигает установившегося значения.

Электрод на участке между изделием и токоподводящим наконечником за время короткого замыкания нагревается проходящим током. При первом замыкании электрода с изделием наибольшее количество тепла выделяется на участке вблизи токоподводящего наконечника, а затем нагрев распространяется по всему вылету, поэтому перегорание электрода происходит у токоподводящего наконечника [109].

На второй стадии в месте перегорания электрода, на участке вылета, образуется дуга, которая горит между электродом и отделившейся его частью, что приводит к резкому возрастанию длины дуги. При этом возможны два случая:

- 1) если расстояние от изделия до точки разрыва меньше разрывной длины дуги, то образовавшаяся дуга не гаснет и устанавливается устойчивый процесс сварки;
- 2) если расстояние от изделия до точки разрыва больше разрывной длины дуги, то ток быстро уменьшается и дуга гаснет.

На третьей стадии оставшаяся часть электродной проволоки с жидким металлом на торце, приближаясь к изделию, остывает до тех пор,

пока не произойдет очередное замыкание. За время следующего короткого замыкания процесс нагрева и перегорания электрода с образованием дуги повторяется. Если расстояние от изделия до точки разрыва окажется больше разрывной длины дуги, то она снова гаснет, а непрерывное перемещение остывающего электрода приведет к очередному замыканию.

От замыкания к замыканию увеличивается время нагрева дуги от момента возникновения дуги до ее гашения, нагрев торца электрода и уменьшается длина дуги, образующейся в момент перегорания электрода на участке вылета. В случае значительного нагрева твердой части электрода или образования капли при очередном замыкании происходит разрыв перемычки между электродом и изделием. В этом случае зажигается дуга и наблюдается гарантированное установление процесса сварки [109].

Число замыканий электрода с изделием до установления устойчивого процесса меняется случайным образом от двух и более раз и зависит главным образом от случайных значений температуры электрода у токоподводящего наконечника.

По [19] допускается возбуждение после трех соприкосновений электрода с изделием. У сварочных выпрямителей ВДУ число коротких замыканий может быть от одного до четырех [82, 89], а у однофазных – два–пять [51].

Анализ распределения температуры по вылету электрода [57] позволил наметить пути улучшения установления процесса: создание условий для поддержания горения дуги, образующейся при перегорании вылета у токоподводящего наконечника; уменьшение количества теплоты, выделяющейся в электроде у токоподводящего наконечника; локальное увеличение сопротивления электрода на расстоянии от его торца, меньшем, чем разрывная длина дуги.

Чаще всего перегорание электрода происходит у токоподводящего наконечника и образующийся дуговой промежуток значительно превышает разрывную длину дуги. В связи с тем, что сварка в защитных газах осуществляется от источников питания с жесткими или пологопадающими характеристиками, напряжение, приложенное к электродам, оказывается недостаточным для поддержания горения дуги, а потому она угасает.

Устойчивость горения дуги на промежутке, равном расстоянию между изделием и токоподводящим наконечником, возможно в том случае, если на межэлектродный промежуток подается повышенное напряжение.

Также считается [57], что процесс сварки устанавливается, если температура у торца электрода составит не менее 673 К.

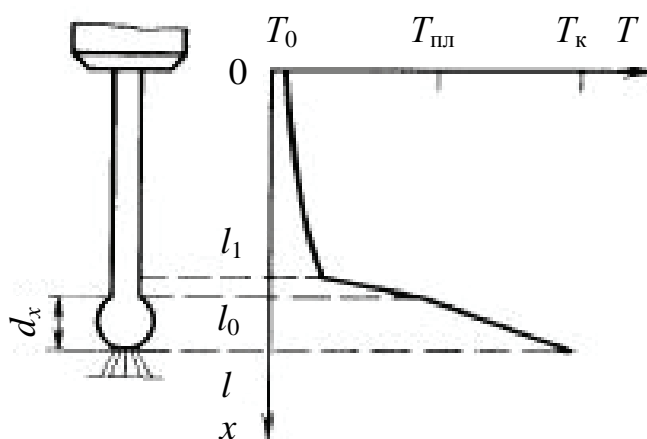


Рис. 3.2. Распределение температуры по вылету электрода:  $T_k$  – температура кипения металла,  $T_{пл}$  – температура плавления металла,  $d_k$  – диаметр капли

В идеале для зажигания дуги перед подачей проволоки дуговой промежуток должен быть ионизирован при наличии на торце электрода раскаленной и кипящей капли, а температура по вылету электрода распределена согласно рис. 3.2.

Но перед зажиганием дуги распределение температуры согласно рис. 3.2 до настоящего времени реализовано не было.

В большинстве отечественных и зарубежных источников питания таких фирм, как ВНИИЭСО, Lincoln, KEMPPI, Cemont, Messer, ESAB и др., для улучшения зажигания сварочной дуги применяются «горячий старт» (Hot Start) и изменение скорости подачи электродной проволоки или их комбинация.

Особенности зажигания дуги низковольтным импульсным разрядом подробно освещены [84, 109].

Но и данный способ зажигания имеет недостатки: индуктивность источника питания должна быть минимальной; с увеличением диаметра электрода зажигание ухудшается; диаметр застывшей капли на торце электродной проволоки не должен превышать полутора – двух диаметров проволоки; зажигание ухудшается с увеличением диаметра проволоки и скорости ее подачи; с увеличением угла между изделием и горелкой зажигание ухудшается; необходимое расстояние от электрода до детали не менее 3–5 мм; применение данной схемы зажигания осложняется у выпрямителей с диодами и преобразователей.

По мнению автора [84], ни «горячий старт», ни программное изменение скорости подачи электродной проволоки не решают задачу надежного и управляемого зажигания сварочной дуги. «Горячий старт» подразумевает подход электрода к изделию с повышенным

напряжением и полной индуктивностью источника питания. В момент зажигания дуги напряжение падает до величины, определяемой режимом сварки; поэтому условие превышения скорости развития межэлектродного промежутка над скоростью его сокращения не выполняется и процесс переходит в короткое замыкание.

В работе [36] отмечается, что ртутная дуга может самопроизвольно угасать при токах менее 7–8 А. При нормальных условиях разряда этого типа с беспорядочно перемещающимся по катоду пятном область токов 3–7 А является переходной или пороговой, при меньших токах разряд не может быть осуществлен, а при больших токах уже вполне устойчив.

Пороговые токи возникновения дуги при различных материалах приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

**Пороговые токи возникновения дуги при различных материалах**

Материал электродов	Значение порогового тока, А
Zn	0,3
AL	1
Fe	1,5
W	1,6
Cu	1,6
Ti	2,5
Cr	2,5

По данным [57] для дуги в углекислом газе проволокой Св-08Г2С диаметром 1,6 и 2 мм минимальный ток составляет 2–3 и 3–4 А. Для дуги в аргоне электродной проволокой Св-АМг61 минимальный ток равен 2–3 А. В данном случае за минимальный принимается ток, при котором еще наблюдается непрерывное горение дуги в течение 20 мс.

### **3.2. Особенности зажигания дуги плавящимся электродом в защитных газах**

При питании дуги от однофазного выпрямителя с конденсаторным умножителем напряжения применялась следующая методика исследования: напряжение холостого хода выпрямителя составляло 45–100 В, в цепь питания дуги включался дроссель индуктивностью 1,2–2 мГн, ток менее 10 А регулировался балластным сопротивлением.

На обратной полярности дуга защищалась углекислым газом, азотом, аргоном с расходом газа 4–6 л в минуту. Применялись проволоки различного диаметра и химического состава.

В углекислом газе использовали проволоку Св-08Г2С диаметром 0,8 мм (омедненную); 1,2 мм; 1,6 мм. В азоте и аргоне использовали проволоку Х18Н9Т диаметром 1,2 мм, проволоку Бр.КМц 3-1 диаметром 2 мм. Перед зажиганием дуги проволока очищалась от загрязнений. Также использовалась алюминиевая и медная проволока с удаленной изоляцией.

Для зажигания дуги применялись пластины из горячекатаной и холоднокатаной стали. Перед зажиганием дуги пластины из меди и алюминия от оксидных пленок не зачищались.

Торцом неподвижного вылета зафиксированного в токоподводящем наконечнике держателя полуавтомата (путем касания торцом вылета изделия и последующего отрыва) зажигалась дуга. Вылет электродной проволоки был 10–15  $d$ , ( $d$  – диаметр проволоки) и располагался перпендикулярно поверхности изделия, расход газа составлял 5–6 л/мин.

Электрические параметры режимов фиксировались на электроизмерительных приборах, цифровом осциллографе с памятью С 9–8. Для определения размеров капли и длины дуги применялась видеосъемка через светофильтр с частотой 30 кадров/с.

Выявлено, что дуга зажигается с первого касания, при плавлении проволоки образуется капля. В процессе горения дуги и роста капли нет ее резких колебаний и взрывных явлений. После роста капли и при принудительном касании изделия дуга не гаснет.

В табл. 3.2 представлены результаты, полученные при горении дуги проволоками разного химического состава в различных газах. Дуга горела на обратной полярности.

При коротком замыкании вылет не нагревается в зоне контакта с токоподводящим наконечником, т. к. характеристика источника питания крутопадающая.

Техника зажигания дуги при неподвижном вылете в защитном газе подобна технике ручной дуговой сварки. При колебаниях токоподводящего наконечника относительно изделия изменяются длина дуги и напряжение дуги. В процессе плавления электрода на его торце накапливается капля и ее диаметр значительно превышает диаметр электрода. В процессе зажигания рост диаметра капли фиксируется визуально и не наблюдается заметных колебаний капли и взрывных явлений.

Таблица 3.2

**Результаты, полученные при горении дуги проволоками  
разного химического состава в различных газах**

№ п/п	$U_{xx}$ , В	$D_{пр}$ , мм	$I_d$ , А	$U_d$ , В	Газ	Материал изделия	Проволока
1	100	1,5	1,2–1,4	25–30	Азот	Сu	Сu
2	100	1,5	0,8–0,9	25–30	Азот	Сu	Сu
3	100	1,2	0,6	30	Азот	X18H9T	X18H9T
4	100	1,2	1,2–1,4	25–30	Азот	X18H9T	X18H9T
5	100	1,2	1,2–1,4	20–25	Аргон	X18H9T	X18H9T
6	100	1,6	1,2–1,4	22–28	Без защиты	Al	Al
7	100	1,6	1,2–1,5	30	Азот	Al	Al
8	100	1,6	1–1,6	20–30	Аргон	Al	Al
9	100	0,8–1,6	1–2	25–30	Воздух	Сталь	Св-08Г2С
10	100	0,8–1,6	1–4	25–28	Углекис- лый газ	Сталь	Св-08Г2С
11	100	2	2–3	22–28	Воздух	Сталь	Бр.КМц3-1

Осциллограммы зажигания и горения дуги представлены на рис. 3.3, 3.4. На рис. 3.5, 3.6 показаны кинокадры моментов горения дуги между торцом вылета проволоки Св-08Г2С и изделием из малоуглеродистой стали, видеосъемка выполняется через маску «Хамелеон».

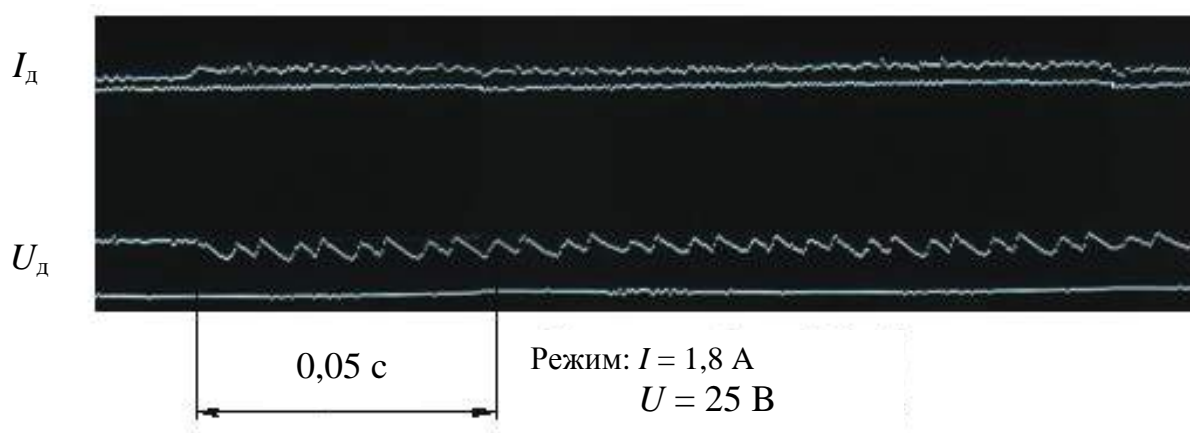


Рис. 3.3. Горение дуги в углекислом газе  
при неподвижном вылете



Рис. 3.4. Осциллограммы зажигания и горения дуги:  $I_d = 2,8 \text{ A}$ ,  $U_d = 30 \text{ B}$

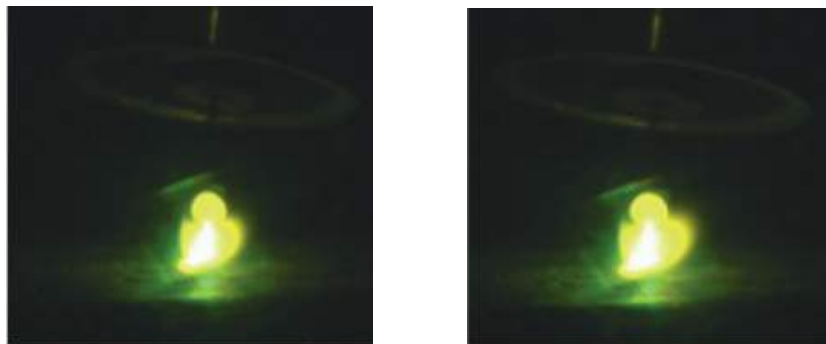


Рис. 3.5. Горение дуги в условиях атмосферы:  $d_э = 0,8 \text{ мм}$ ,  $I_d = 2 \text{ A}$ ,  $U_d = 25\text{--}28 \text{ B}$

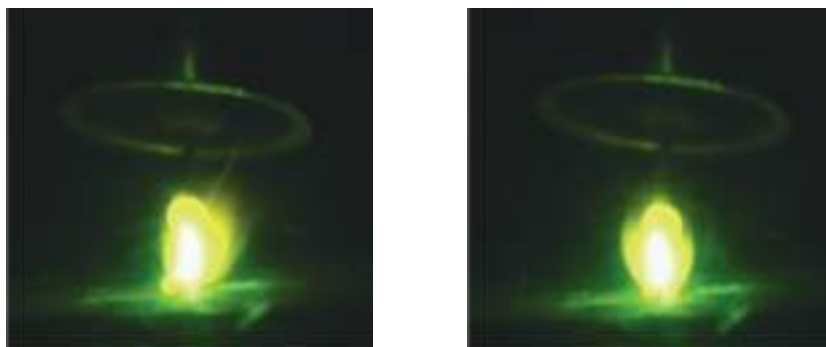


Рис. 3.6. Защита углекислым газом:  $d_э = 1,6 \text{ мм}$ ,  $I_d = 3\text{--}4 \text{ A}$ ,  $U_d = 25\text{--}27 \text{ B}$

Ионизация дугового промежутка и наличие раскаленного торца проволоки или капли обеспечивает горение основной дуги (после подачи проволоки) без коротких замыканий (рис. 3.7).

После нагрева торца электрода и появления жидкой прослойки через 0,5–1 с кнопкой на рукоятке сварочной горелки включаются контакт К2 и двигатель подачи проволоки, зажигается основная дуга между торцом подогретого электрода и изделием при силе тока, которая зависит от скорости подачи проволоки [71].

Цепь вспомогательной дуги отключается контактом К1 через 0,1–0,2 с после включения контакта К2. При перерывах в горении дуги капля, застывшая на торце проволоки и превышающая ее диаметр в 1,5–2,5 раза, не препятствует последующему зажиганию дуги.

Таким же образом дуга зажигается при диаметре проволоки 3–4 мм.

При наличии на торце электрода холодной капли дуга зажигается и при расположении оси электродной проволоки параллельно изделию (рис. 3.8).

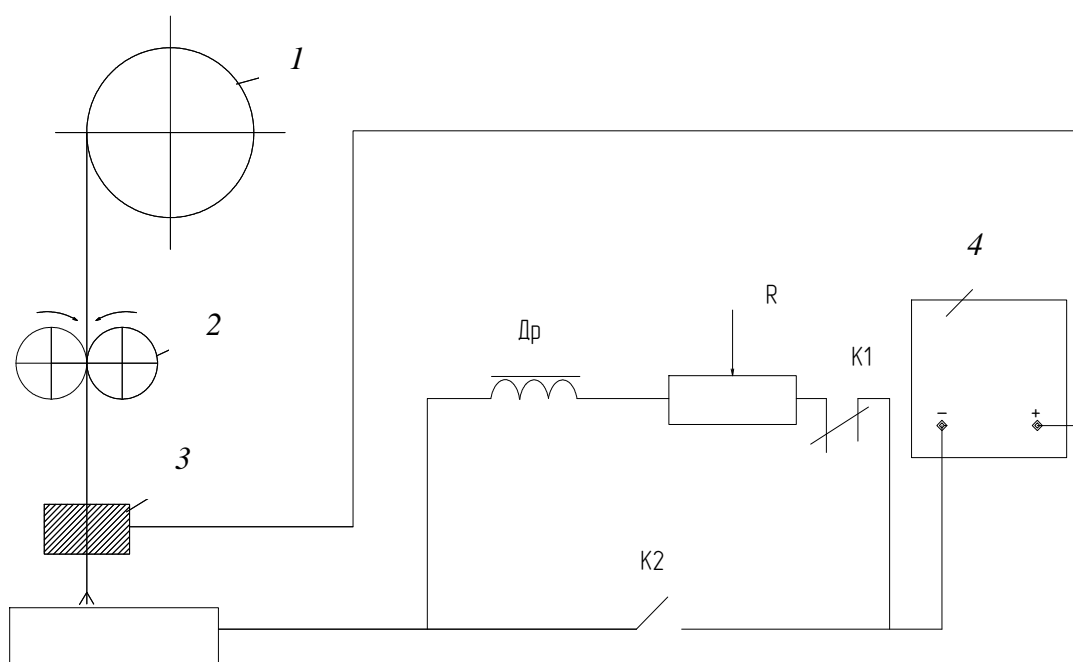


Рис. 3.7. Схема зажигания дуги: 1 – кассета с проволокой; 2 – тянущие ролики; 3 – скользящий токоподвод; 4 – источник питания; Др – дроссель; R – реостат; К1, К2 – замыкающие и размыкающие контакты

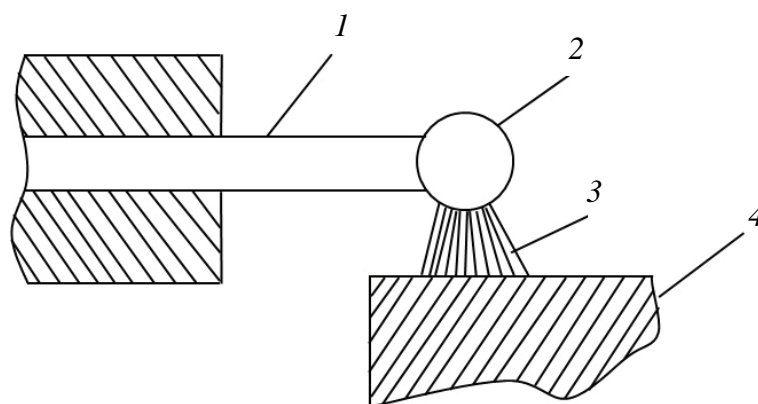
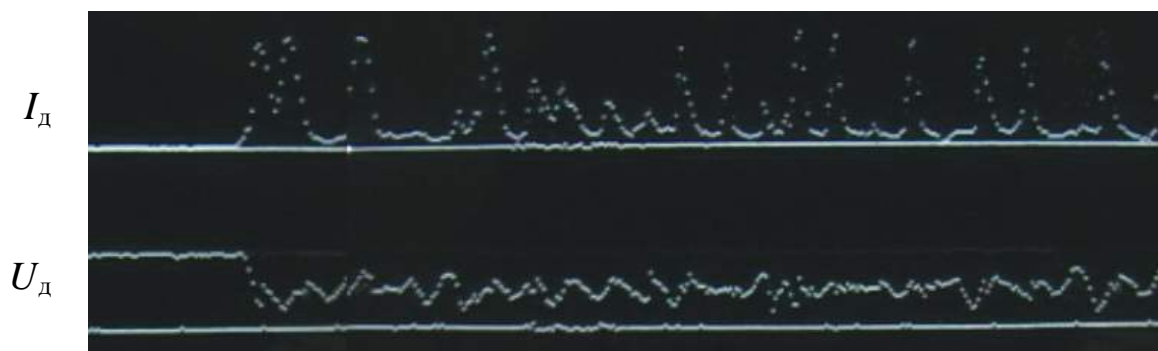
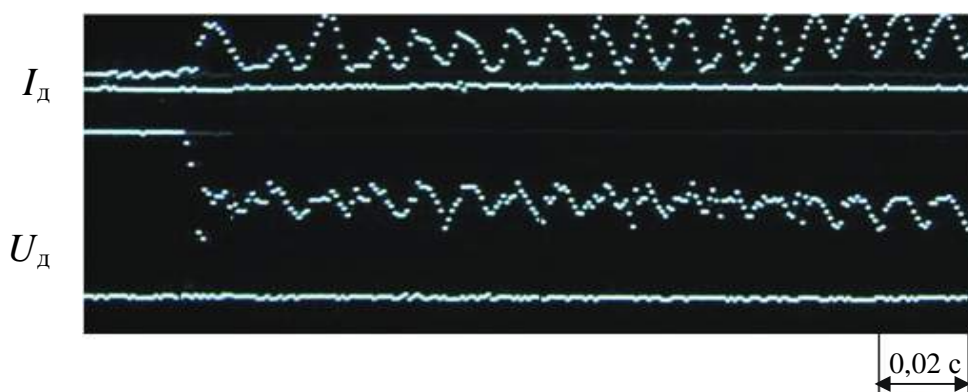


Рис. 3.8. Проволока с расположением вылета параллельно изделию: 1 – вылет; 2 – холодная капля; 3 – дуга; 4 – изделие

Рис. 3.9. Осциллограмма начала процесса сварки:  $I_d = 50$  А;  $U_d = 19,5$  ВРис. 3.10. Осциллограмма начала процесса сварки:  $I_d = 160$  А,  $U_d = 20$  В,  $d_s = 1,2$  мм

На рис. 3.9 показана осциллограмма начала процесса сварки проволокой диаметром 0,8 мм в углекислом газе.

Также на малых токах дуга зажигалась от выпрямителя, изготовленного на основе однофазного трансформатора ОСМ-0,25У3 мощностью 0,25 KVA. Для удвоения напряжения применялись электролитические конденсаторы емкостью 2000 мкФ, после выпрямительного блока в сварочную цепь включался дроссель индуктивностью 0,7 мГн, ток регулировался активным сопротивлением.

В автоматическом варианте (проволока подавалась от автомата АБС) дуга зажигалась следующим образом.

Торец вылета электродной проволоки Св-08Г2С диаметром 1,2 мм устанавливался на расстоянии 1–1,5 мм от изделия. Далее дуговой промежуток замыкался вольфрамовым стержнем, зажигалась дуга при силе тока 2–4 А и включались подача проволоки и основная сварочная цепь. После подачи проволоки цепь маломощной дуги отключалась и зажигалась основная дуга.

Осциллограмма начала процесса сварки показана на рис. 3.10.

### **3.3. Особенности сварки и наплавки на малых токах в углекислом газе (CO<sub>2</sub>)**

Сварка короткой дугой в CO<sub>2</sub> – естественный импульсный процесс, протекающий самопроизвольно в виде автоколебаний в системе «дуга – источник питания».

Процесс сварки короткой дугой успешно применяется в промышленности и получил широкое распространение благодаря возможности сварки во всех пространственных положениях, высокому качеству механических свойств сварных соединений и наплавленного металла, простоте механизации процесса. Как известно, процесс имеет недостатки: узкий диапазон стабильных режимов, разбрызгивание и набрызгивание металла. Решению указанной проблемы посвящены работы Б. Е. Патона, В. К. Лебедева, А. Г. Потапьевского, И. И. Зарубы, Ю. Н. Сараева, Н. Г. Дюргерова, А. И. Акулова, К. В. Любавского, А. Л. Хейфеца, Н. М. Новожилова, А. М. Попкова, А. Ф. Князькова, М. В. Карасева, Д. Х. Сагирова, A. A. Smit, Tathill и др.

Неоднократно предпринимались попытки совершенствования этого процесса.

В настоящее время наметились два пути создания технологии управляемого переноса электродного металла в сварочную ванну для решения этой проблемы [110].

В работе [47] проведен обзор публикаций по автоматическому управлению процессом сварки в CO<sub>2</sub> с короткими замыканиями дугового промежутка, а также даны алгоритмы управления на каждом этапе цикла сварки.

Основными задачами систем управления для сварки в CO<sub>2</sub> с короткими замыканиями дугового промежутка являются уменьшение разбрызгивания, повышение стабильности процесса сварки, компенсация возмущений, действующих на процесс сварки.

Наиболее общепризнанная точка зрения о причинах разбрызгивания при сварке в CO<sub>2</sub> впервые приведена И. И. Зарубой. При разрыве перемычки между электродом и каплей в момент ее перехода в сварочную ванну происходят электрический взрыв и газодинамический удар, оказывающий основное воздействие на сварочную ванну. Кроме брызг, вызванных взрывом перемычки при большой мощности взрыва, происходят выплескивание краев сварочной ванны и образование околошовных выплесков, которые могут составлять основную массу потерь.

Для уменьшения потерь на разбрызгивание следует уменьшать ток через перемычку при ее разрыве.

Автор [47] в хронологической последовательности излагает работы по проблеме снижения разбрызгивания и отмечает первые работы И. И. Зарубы в этом направлении. После И. И. Зарубы следующий шаг осуществил С. И. Пинчук с соавторами в 1976 г. С тех пор ничего принципиально нового не было предложено и во всех следующих публикациях использован способ И. И. Зарубы в чистом виде либо усовершенствованный С. И. Пинчуком; основные усовершенствования касались оборудования [47].

В работах [60, 111] приводятся сведения о разработках адаптивных импульсных технологий и оборудования для сварки в различных пространственных положениях в защитных газах.

Разработанный в России процесс сварки в CO<sub>2</sub> с принудительными короткими замыканиями дугового промежутка получил за рубежом название «процесс STT» – процесс с переносом электродного металла за счет сил поверхностного натяжения, – что, однако, не совсем точно определяет суть процессов, протекающих при плавлении и переносе каждой капли электродного металла, а также при формировании металла шва в различных пространственных положениях [112]. Схема «процесса STT» приведена [80] и в авторском изложении [35].

Используя идеи А. Г. Потапьевского, Ю. Н. Сараева, опыт Ростовской школы сварщиков и STT-процесс, разработана серия новых отечественных выпрямителей с индексом «ДК» (Дистанционное управление; комбинированная ВАХ – ВД-306 ДК, ВД-506 ДК серии 03, 04 и выпрямители ВДУ-511). В этих выпрямителях внешние вольт-амперные характеристики обеспечивают режим работы, когда каждый их участок определяет любую стадию плавления и переноса капли электродного металла при ручной дуговой сварке и механизированной сварке плавящимся электродом. В них осциллограммы тока и напряжения сменяются на угол, обеспечивающий минимум тока в момент короткого замыкания, что приводит к перетеканию капли электродного металла в сварочную ванну под действием сил поверхностного натяжения при минимуме тока короткого замыкания и электродинамических сил, действующих на каплю.

Это делает сварочный процесс близким STT-процессу и обеспечивает схожие технологические возможности по формированию сварных соединений, особенно при сварке в защитных газах.

Новый процесс получил название «вынужденные короткие замыкания (ВКЗ)» и имеет ряд технологических возможностей, недостижимых ранее при полуавтоматической сварке.

Его отличия от импульсно-дугового процесса объясняются тем, что при течении процесса ВКЗ значительно уменьшается как время контакта капли электродного металла с дугой, так и время горения дуги (на длительность коротких замыканий) и размеры сварочной ванны [32].

В работе [33] приведены типовые осциллограммы тока и напряжения дуги совместно с переносом металла в дуге.

При сравнении форм кривых тока и напряжения при сварке в углекислом газе по традиционной технологии (рис. 3.11, *а*), при сварке методом ВКЗ (рис. 3.11, *б*) и при STT (рис. 3.11, *в*) очевидно, что основное отличие процессов ВКЗ и STT заключается в улучшении динамических свойств.

У традиционных источников питания (ВДУ-506, ВС-300 и др.) время короткого замыкания составляет 10–20 мс, для установок типа ДК (рис. 3.11, *б* метод ВКЗ) – 5–7 мс, для установки InvertecSTT, см. рис. 3.11, *в*, по методу STT, оно составляет 2–5 мс.

В традиционных установках (рис. 3.11, *а*) частота коротких замыканий составляет не более 30–50 Гц и значительно изменяется при сварке. Разрыв жидкой перемычки между сварочной проволокой и ванной при завершении короткого замыкания происходит при близком к максимальному току дуги, и разбрызгивание составляет более 5 %.

В установках типа ДК (рис. 3.11, *б*) разрыв жидкой перемычки между сварочной проволокой и ванной происходит при токе дуги до 40–50 А и разбрызгивание снижается до 3 % и менее; частота коротких замыканий составляет 70–150 Гц, размер капель электродного металла стабилизируется и управляется.

В установках STT разрыв жидкой перемычки между сварочной проволокой и ванной происходит при меньшем токе в сравнении с ВКЗ и разбрызгивание не превышает 2 %, частота коротких замыканий примерно 130–140 Гц, процесс стабилен и легкоуправляем [33].

Особенностью установки ВД-506 ДК является то, что на ней стабильно осуществляются процесс сварки длинной дугой, т. е. струйный процесс (напряжение более 21 В), процесс сварки в диапазоне напряжений от 17,5 до 20 В, получивший название «захоложенная струя», и процесс сварки короткой дугой в диапазоне напряжений от 13 до 17 В (процесс ВКЗ).

Понятие «захоложенная струя» – это специфический термин, означающий работу в среднем диапазоне напряжений, когда процесс сварки является очень похожим на струйный, но с элементом коротких замыканий продолжительностью не более 5 мс, следующих с частотой

100 Гц. Наличие коротких замыканий является существенным фактором, стабилизирующим сварочную ванну в различных пространственных положениях.

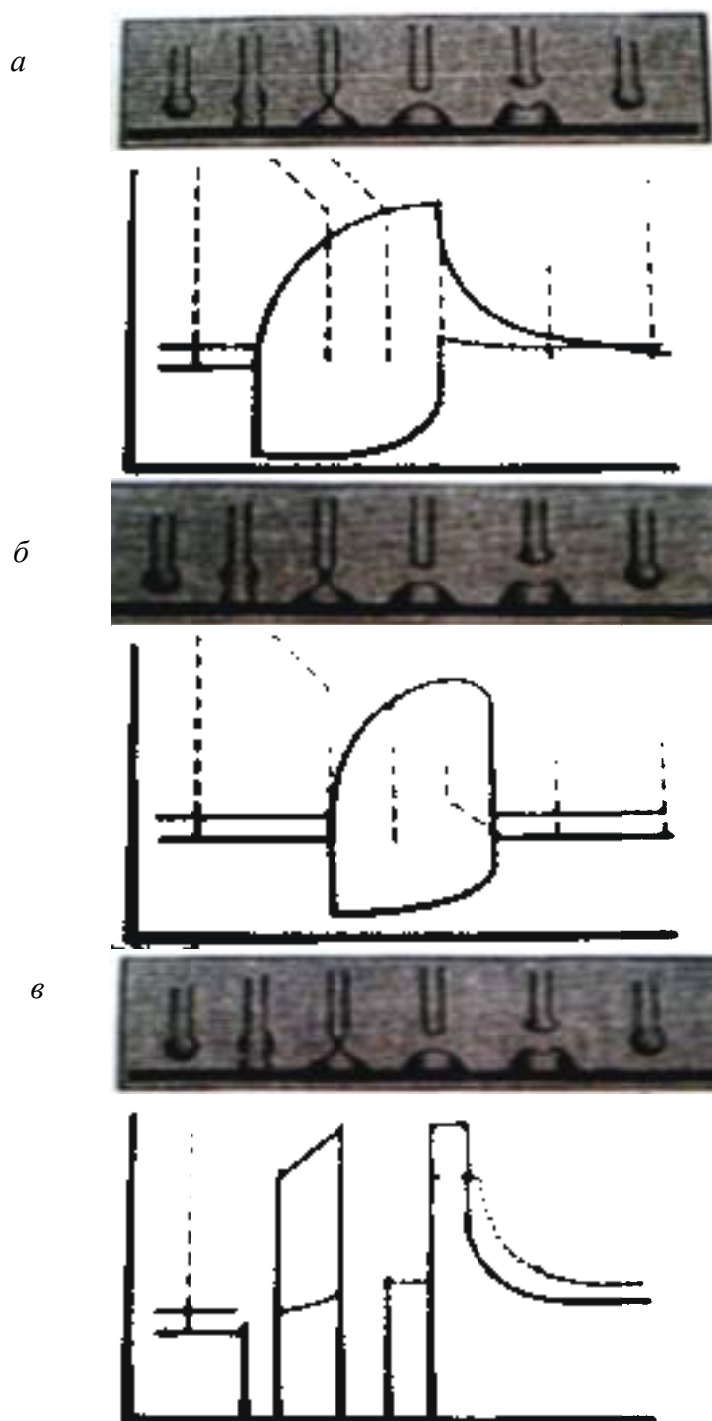


Рис. 3.11. Типичные формы кривых тока (жирная линия) и напряжений (штриховая): *а* – при традиционной сварке в углекислом газе; *б* – при сварке ВКЗ; *в* – при процессе STT

Процесс ВКЗ позволяет дозировать тепловложение и количество присадочного металла в сварочной ванне [34].

Несмотря на определенные успехи в автоматическом управлении процессом сварки плавящимся электродом в  $\text{CO}_2$  с периодическими короткими замыканиями дугового промежутка, плавление расходуемого электрода и формирование капли расплавленного металла определяются сложным комплексом электромагнитных и гидродинамических сил в гравитационном поле и, следовательно, в полной мере могут быть описаны только с привлечением законов теплофизики, электростатики, электродинамики, электромагнетизма и гидродинамики. Эта задача в настоящее время не решена, но теоретически и экспериментально исследованы некоторые ее аспекты [47].

Например, по мнению авторов [2], электрический взрыв жидкой перемычки между электродом и каплей в момент ее перехода в ванну маловероятен и возможны благоприятные условия для ее плавления, когда ток частично шунтируется столбом дуги и почти не попадает в жидкую перемычку и каплю, а перемычка расплавляется теплом дуги, поступающим в нее из столба дуги [2].

Также во многих работах, например в [111], приведена схема сил, действующих на каплю электродного металла при сварке в  $\text{CO}_2$  короткой дугой. Эти силы имеют различную природу, действуют одновременно в условиях высоких градиентов температур, давлений, скоростей, электрических и магнитных полей. Но достоверные расчеты, связанные с учетом всего многообразия сил, действующих при переносе металла, в настоящее время практически невозможны. Ввиду чрезвычайной сложности и многообразия процессов, протекающих в сварочной дуге, основой ее изучения являются различные экспериментальные методы [25].

Следует согласиться, что под термином «стабильный процесс сварки» понимают процесс, обеспечивающий получение качественно сформированного сварного шва с достаточно гладкой поверхностью и практически неизменными по всей длине основными параметрами: глубиной провара, шириной и высотой валика [103].

Исходя из этого определения правомерно утверждать, что сварка с короткими замыканиями, как и импульсно-дуговая сварка и любой процесс, также могут быть стабильными, если получаемый сварной шов отличается высоким качеством.

При импульсном процессе в  $\text{CO}_2$  и использовании проволоки диаметром 0,8 мм ток дуги может быть 8–12 А [100], но подробные сведения о применении данной технологии отсутствуют.

За счет применения так называемых сдвоенных источников питания, состоящих из выпрямителей с жесткой и крутопадающей характеристикой, можно достичь повышения устойчивости горения дуги на малых токах (10–50 А). Разработанный на этом принципе процесс микродуговой сварки плавящимся электродом в CO<sub>2</sub> обеспечивает качественные соединения металла толщиной 0,5–1,5 мм на малых токах проволокой диаметром 0,8–1,2 мм [16].

В обзорной статье [47] приводятся сведения о снижении тока до 2–12 А на период 0,7–1 мс в начале короткого замыкания, и при силе тока 6–12 А переход капли происходит за счет сил поверхностного натяжения.

В работе [52] приведены тенденции развития механизированной сварки с управляемым переносом электродного металла в России и за рубежом. Отмечается, что при импульсной подаче алюминиевой и стальной электродной проволоки улучшается качество швов при наплавке на тонколистовой металл, но не указаны толщина металла и режимы наплавки.

Данных о переносе металла при длительно горящей дуге в CO<sub>2</sub> на токах 10–18 А в литературе нет.

Минимальный ток горения дуги – один из параметров, характеризующих ее физическую устойчивость, – расширяет технологические возможности при сварке плавящимся электродом и в сравнении со сваркой неплавящимся электродом увеличивает производительность.

При питании дуги от однофазного выпрямителя с конденсаторным умножителем напряжения и дросселем индуктивностью 0,3–0,4 мГн проволокой Св-08Г2С диаметром 1,2 мм в углекислом газе обеспечивается формирование швов, удовлетворяющих [19] на следующих режимах:  $I_d = 50\text{--}200$  А;  $U_d = 19\text{--}24$  В; вылет 12–15 мм; расход газа 15 л/мин;  $V_{св} = 15\text{--}25$  м/ч; полярность обратная; наклон внешней характеристики 0,03–0,06 В/А.

Процесс протекает с короткими замыканиями дугового промежутка, которые фиксируются на осциллограммах и кинограммах.

Отличительной особенностью процесса является повышение напряжения холостого хода, которое при включении конденсаторов увеличивается в 2,82 раза.

Совместное влияние конденсаторов и дросселя улучшает формирование швов и уменьшает потери на разбрызгивание.

На осциллограммах пики токов коротких замыканий уменьшаются. Внешний вид наплавленных валиков показан на рис. 3.12, 3.13.



Рис. 3.12. Внешний вид наплавленного валика:  $I_d = 150$  А;  $U_d = 20$  В;  
 $V_{св} = 16$  м/ч



Рис. 3.13. Внешний вид наплавленного валика:  $I_d = 120$  А;  $U_d = 20$  В;  
 $V_{св} = 16$  м/ч

Технологические характеристики процесса сварки определялись с использованием стандартных сварочных установок.

Для механизированной сварки и наплавки при силе тока более 50 А применялся сварочный полуавтомат ПДГ-508 УЗ. При автоматической сварке держатель полуавтомата фиксируется в зажимном устройстве и подвешивается к головке АБС.

В связи с тем, что минимальная скорость подачи проволоки у полуавтомата ПДГ-508 УЗ 108 м/ч и минимальный ток для проволок диаметром 0,8–1,2 мм 50–80 А, для сварки при силе тока менее 50 А применяется подающий механизм сварочной головки АБС.

В автомате АБС уменьшался диаметр колёс механизма передвижения и диаметр тянущего ролика увеличивался до 50 мм, переделывалось прижимное устройство для подачи проволоки, газ подавался от полуавтомата ПДГ-508 УЗ, использовались мундштуки от горелок для сварки в защитных газах.

Электрические параметры режимов определялись на электроизмерительных приборах класса 0,1–0,5 и фиксировались цифровым осциллографом с памятью С 9–8.

Для оценки переноса металла в дугу применяли видеокамеры и цифровые фотоаппараты.

При автоматической сварке в углекислом газе стыковых соединений толщиной 3–5 мм и сварочном токе 180–200 А скорость сварки составляет 20–22 м/ч [99]. В литературе отсутствуют подробные сведения о наплавке и сварке в углекислом газе металла толщиной 0,6–1,5 мм при силе тока 9–15 А.

В работе [56] отмечается: «...от сил, возникающих при дуговой сварке, зависят такие важные технические параметры, как глубина проплавления металла, глубина погружения дуги в ванну, интенсивность перемешивания металла в ванне, степень обжатия дуги, интенсивность плазменных потоков, характер формирования валика и т. д. Однако до сих пор не достигнуто единство взглядов по вопросам, касающимся количественной оценки рассматриваемых сил. Причины этого следует искать в трудностях теоретического описания объемных сил, действующих как в реальной дуге, так и в сварочной ванне, а также в сложности проведения «чистого» эксперимента по определению силового воздействия дуги».

Одним из необходимых условий нормального протекания процесса сварки и наплавки является сохранение в системе «дуга – сварочная ванна» динамического равновесия между силами давления дуги  $P_d$ , гидростатического давления и поверхностного натяжения  $P_n$ . При определении геометрических параметров швов и, в первую очередь, глубины проплавления необходимо учитывать эти силы [91]. В работе [114] приведена формула, связывающая глубину проплавления с упомянутыми силами:

$$h = (P_d - P_n) / q, \quad (3.1)$$

где  $q$  – плотность металла.

Рассчитать глубину проплавления по этой формуле не представляется возможным из-за трудности определения  $P_d$  и  $P_n$ . Из формулы следует, что чем меньше  $P_d$  и больше  $P_n$ , тем меньше глубина проплавления. При дуговых способах сварки и наплавки сила давления дуги пропорциональна квадрату тока:

$$P_d = k \cdot I^2, \quad (3.2)$$

где  $k$  – коэффициент, зависящий от способа сварки и наплавки и других факторов.

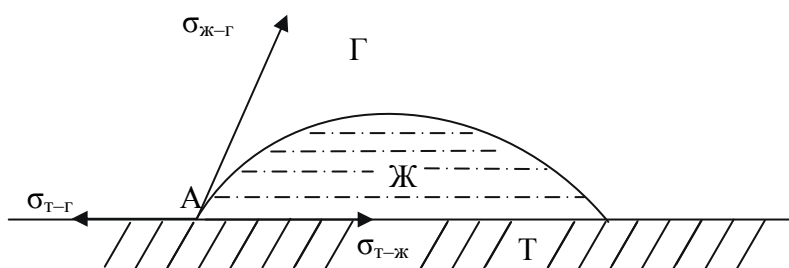


Рис. 3.14. Модель контакта трех фаз, применяемая для анализа процесса формирования усиления шва: Г – газовая фаза, Ж – жидкая фаза, Т – твердая фаза

По мнению автора [3], в настоящее время отсутствуют представления о влиянии поверхностных явлений, в частности смачивания жидких металлов сварочной ванны поверхности основного металла, на форму сварочного шва.

Автор [3] опровергает мнение, что при сварке и пайке условия растекания жидкого металла по поверхности основного металла одинаковы [91], и считает невозможным использование уравнения Юнга как для качественного, так и для количественного анализа формирования шва при дуговой сварке.

Модель жидкой капли, лежащей на поверхности твердого тела (рис. 3.14), основывается на уравнении Юнга, определяющем краевой угол смачивания:

$$\cos \gamma_k = \frac{\sigma_{Т-Г} - \sigma_{Т-Ж}}{\sigma_{Ж-Г}}, \quad (3.3)$$

где  $\sigma_{Т-Г}$ ,  $\sigma_{Т-Ж}$ ,  $\sigma_{Ж-Г}$ , – удельная межфазная поверхностная энергия соответственно на границах «твердый металл – газ», «твердый металл – жидкий металл», «жидкий металл – газ».

Уравнение (3.3), определяющее постоянство краевого угла для одних и тех же контактирующих фаз, предполагает существование термодинамического равновесия и справедливо для равновесных или близких к ним систем, однако сварочная ванна лишь приближенно может считаться системой, находящейся в термическом, механическом и химическом равновесии. Конвективные потоки жидкого металла, протекание химических реакций и значительная неравномерность распределения температуры в сварочной ванне, вызывающая изменение поверхностного натяжения металла и его термокапиллярное движение, обуславлива-

ют значительную неравномерность процесса смачивания при формировании шва.

В условиях сварки не существует определенных величин краевых углов смачивания; значительные изменения краевого угла объясняются главным образом особенностями кристаллизации сварочной ванны.

Угол перехода от поверхности шва к основному металлу изменяется в широких пределах и не может считаться исходным параметром при расчете формы и размеров сварных швов; важнейшими факторами, определяющими форму и размеры швов при сварке, являются зона проплавления и количество наплавленного металла [3].

Также при сварке нередко наблюдаются резкие изменения параметров процесса, вызываемые либо случайными, либо систематическими причинами. Так, при коротком замыкании дугового промежутка капель электродного металла происходит быстрое увеличение силы тока, заканчивающееся взрывообразным разрушением перемычки и волнообразными движениями поверхности ванны. При сварке на весу возможен прорыв жидкого металла и образование прожога.

При сварке тонколистовых конструкций прожоги образуются в результате вытекания в зазор металлической сварочной ванны. Появление прожогов обычно связывают с чрезмерными зазорами в стыке или превышением кромок [118].

С целью определения устойчивых режимов, обеспечивающих качественное формирование швов, в полуавтоматическом (механизированном) и автоматическом варианте на образцы из стали толщиной 0,3–3 мм наплавливались одиночные валики.

Применялись проволоки Св-08Г2С диаметром 0,8 и 1,2 мм.

Режимы наплавки были следующие:  $U_{xx} = 18,5\text{--}45$  В (при включенных конденсаторах напряжение холостого хода в 2,82 больше);  $V_{п} = 42\text{--}125$  м/ч; вылет – 6–10 мм;  $V_{св} = 4\text{--}15$  м/ч; наклон внешней характеристики – 0,037 В/А; индуктивность дросселя – 0,6–2 мГн; расход углекислого газа – 6–8 л/м.

На рис. 3.15 показан валик, наплавленный на сталь толщиной 0,6 мм при следующих режимах:  $\phi_{пр} = 0,8$  мм;  $U_{xx} = 57,8$  В;  $I_d = 14$  А;  $U_d = 17,5$  В;  $V_{св} = 3,74$  м/ч; полярность обратная.

При минимальных напряжениях формируются наплавленные валики на образцах из углеродистой стали толщиной 0,6 мм (рис. 3.16). В случае расположения образцов на подложке из малоуглеродистой стали наблюдаются деформации. Поэтому при автоматической наплавке необходимо их жестко закреплять.



*a*



*б*

Рис. 3.15. Валик, наплавленный на малоуглеродистую сталь: *a* – лицевая сторона; *б* – обратная сторона



*a*



*б*

Рис. 3.16. Валик, наплавленный на малоуглеродистую сталь: *a* – лицевая сторона; *б* – обратная сторона:  $I_d = 12,5$  А;  $U_d = 21$  В;  $V_{св} = 3,74$  м/ч

Наблюдение за процессом сварки выявило, что совершаются короткие замыкания накапливающейся на торце электрода каплей сварочной ванны и ее переход в ванну. Ванна застывает «циклически» в момент перехода капли. Капля не совершает заметных колебаний, и не наблюдается взрывных явлений.

С увеличением напряжения дуги частота переноса в дуге уменьшается и формируется крупночешуйчатый валик с перекрытием закристаллизовавшихся капель (рис. 3.17).

Хорошее формирование швов обеспечивается при наплавке проволокой диаметром 1,2 мм.

На рис. 3.18 показан наплавленный валик на образец толщиной 1 мм.

С уменьшением холостого хода и при минимальном напряжении дуги формируются наплавленные валики при силе тока 25–30 А (рис. 3.19) и толщине подложки 1 мм.



*a*



*б*

Рис. 3.17. Валик, наплавленный на малоуглеродистую сталь: *a* – лицевая сторона; *б* – обратная сторона:  $I_d = 10$  А;  $U_d = 25$  В;  $V_{св} = 3,74$  м/ч



Рис. 3.18. Валик, наплавленный на малоуглеродистую сталь:  $I_d = 26\text{--}28$  А;  $U_d = 18$  В;  $V_{св} = 6,75$  м/ч



Рис. 3.19. Внешний вид наплавленного валика:  $I_d = 25$  А;  $U_d = 18,5$  В;  $V_{св} = 6,75$  м/ч

Также швы формируются при силе тока 18–19 А и толщине изделия 1 мм (рис. 3.20).

При визуальном наблюдении за дугой происходят короткие замыкания капель сварочной ванны, и при минимальном напряжении разбрызгивание минимальное.

При режиме  $I_d = 28$  А,  $U_d = 19$  В,  $V_{св} = 6,75$  м/ч были зафиксированы осциллограммы процесса сварки, выявлено, что процесс протекает с периодическими короткими замыканиями, что наглядно показано на рис. 3.21.

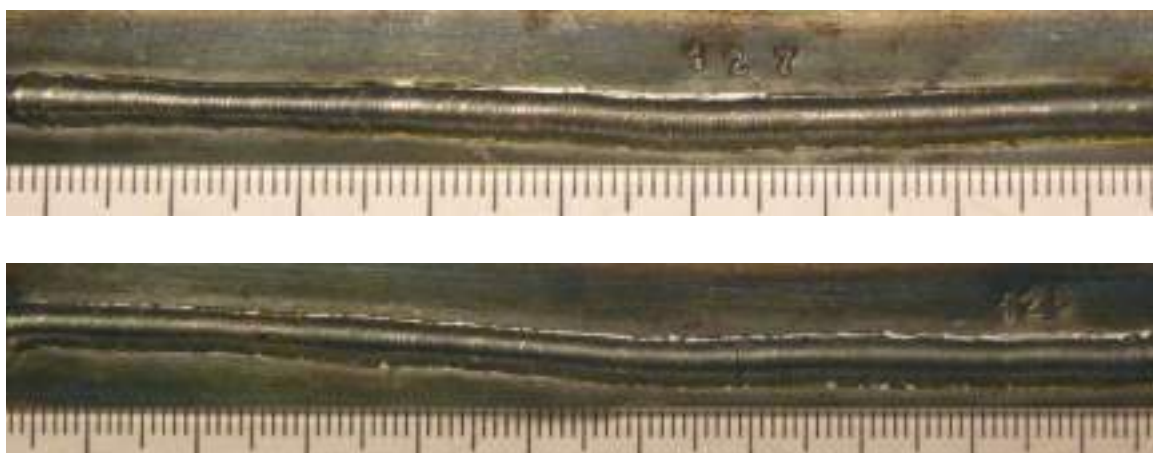


Рис. 3.20. Внешний вид наплавленных валиков:  $I_d = 18,5\text{--}20$  А;  $U_d = 19$  В;  $V_{св} = 6,75$  м/ч

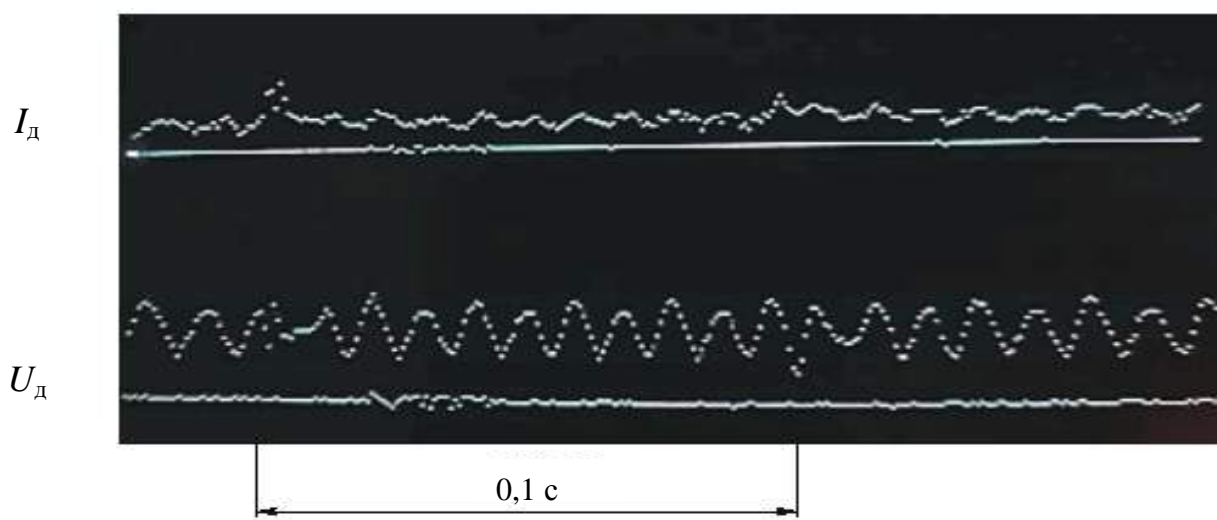


Рис. 3.21. Осциллограмма токов и напряжений.  $I_d = 28$  А;  $U_d = 19$  В

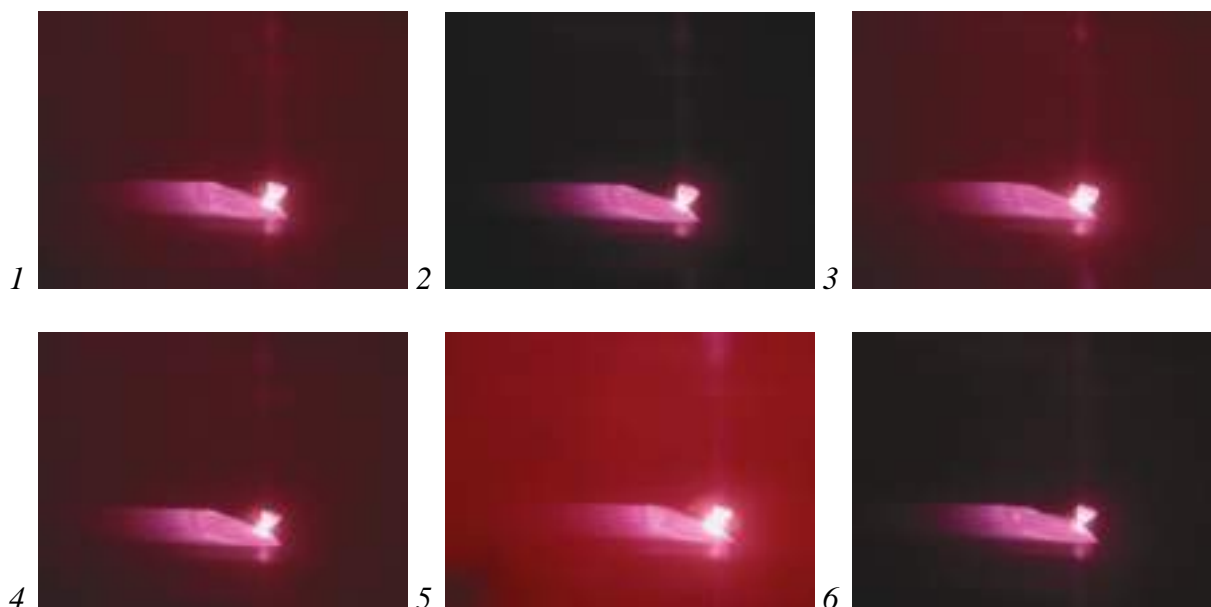


Рис. 3.22. Кадры (1–6) из киносъемки наплавки валика на образец, режим:  $I_d = 28$  А;  $U_d = 19$  В; 1–6 – кадры видеосъемки

Также во время процесса сварки велась киносъемка, и наиболее характерные кадры представлены на рис. 3.22. Переход капли происходит без взрывных явлений.

На рис. 3.22 мы можем отчетливо наблюдать, как происходит накопление капли (кадры 1 и 2), висящую каплю на кадре 3, процесс перехода капли на кадре 4, момент перехода капли на кадре 5 фиксируется, но взрыв переключки при данной частоте киносъемки зафиксировать не удалось; на кадре 6 – нарастание новой капли после перехода предыдущей. Также на кинокадрах отчетливо показано хорошее формирование сварочной ванны. Разбрызгивание минимально.

Осциллограмма с электрическими параметрами режимов была показана на рис. 3.21. В табл. 3.3 представлены показатели переноса металла в дуге.

Таблица 3.3

#### Показатели переноса металла в дуге

Характеристика переноса	
Сварочный ток, А	28
$U_d$ , В	19
Скорость подачи проволоки диаметром 1,2 мм, м/ч	53,8
Число капель, переходящих с электрода за 1 с	11

Окончание табл. 3.3

Характеристика переноса	
Максимальный диаметр капли, мм	1,5
Длительность, с:	
накопления капли	0,075
перехода капли	0,015
общей жизни капли	0,09



Рис. 3.23. Поперечное сечение наплавленных валиков проволокой диаметром 1,2 мм:  $I_d = 28$  А;  $U_d = 19$  В;  $V_{св} = 6,75$  м/ч

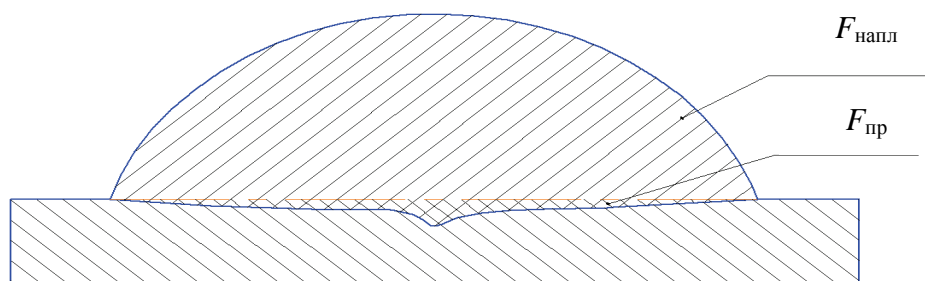


Рис. 3.24. Эскиз наплавленного валика

При силе тока 28 А проплавление изделия минимальное (рис. 3.23) и доля участия основного металла в наплавленном не более 10 %.

Для большей точности был произведен расчет доли участия наплавленного металла в основном (рис. 3.24).

Из расчета соотношения доли участия

$$\gamma = \frac{F_{\text{пр}}}{F_{\text{напл}} + F_{\text{пр}}} = \frac{21}{230} = 0,093$$

было получено, что участие наплавленного металла составляет 9,3 %.

---

### 3.4. Сложности при сварке алюминия и сплавов на его основе

При сварке алюминия и его сплавов возникают затруднения металлургического характера, а также связанные с устойчивым горением дуги.

К металлургическим проблемам при сварке алюминия следует отнести также:

- 1) необходимость удаления тугоплавкой и плотной окисной пленки  $Al_2O_3$  в зоне сварки;
- 2) повышенную склонность металла к образованию пор;
- 3) пониженную стойкость металла к образованию кристаллизационных трещин.

Также имеются трудности, связанные с тепловым воздействием на основной металл. К их числу относятся существенные изменения свойств металла в зоне термического влияния для ряда сплавов алюминия, повышенный коэффициент линейного расширения, большая теплопроводность и теплоемкость металла, способствующие развитию значительной деформации последнего в процессе охлаждения.

Потеря прочности и вязкости алюминия и его сплавов при температурах, близких к температуре плавления, может привести к разрушению металла в зоне нагрева под действием собственного веса.

Металлургические проблемы при сварке алюминия подробно рассмотрены в работах [86, 106].

На воздухе алюминий и сплавы на основе алюминия покрываются прозрачной тонкой, но плотной пленкой окиси алюминия  $Al_2O_3$ , защищающей металл от коррозии в воздушной среде, морской воде и в ряде окислительных сред слабой агрессивности. Окись алюминия имеет температуру плавления  $2050^\circ C$ , которая почти в три раза превышает температуру плавления самого алюминия, равную  $660^\circ C$  [37].

При сварке алюминиевых сплавов существенные затруднения возникают в связи с необходимостью удаления с поверхности свариваемых кромок окисной пленки.

Окисная пленка препятствует сплавлению металла сварочной ванны с основным металлом и, попадая в шов, становится неметаллическим включением.

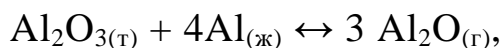
При комнатной температуре за семь дней толщина окисной пленки достигает 50–100 ангстрем, а при нагреве до температуры плавления алюминия может достигать 0,2 мкм. При трехмесячном хранении толщина

окисной пленки достигает  $7 \cdot 10^{-3}$  мкм, а затем увеличивается со скоростью не более  $(0,2-0,3) \cdot 10^{-3}$  мкм в месяц [37].

Перед сваркой алюминия и его сплавов кромки детали и прилегающие к ним участки зачищают от окисной пленки. Для зачистки применяют химическую обработку [86, 106] и механический способ с помощью проволочных щеток. Щетки должны быть изготовлены из нержавеющей проволоки диаметром не более 0,15 мм. После зачистки детали можно считать подготовленными к сварке в течение 3–4 дней не более [18].

При сварке в защитных газах (аргоне, гелии) окисная пленка удаляется за счет катодного распыления при бомбардировке катода тяжелыми положительными ионами. В аргоне разрушение окисной пленки идет очень интенсивно на обратной полярности, а в гелии в этих условиях нет очистки. Наоборот, в аргоне на прямой полярности нет очистки, а в гелии разрушение протекает гораздо менее интенсивно и только в узкой полосе по оси шва [106]. Автор [106] сопоставляет механизм катодного распыления в дуге с отделением группы стоящих шаров при ударе о них кия или шара при игре в бильярд.

По данным [10] в результате взаимодействия окисной пленки с расплавленным алюминием возможны протекание химических реакций в расплавленном алюминии и разрушение оксидов в сварочной ванне:



где т, ж, г – соответственно твердая, жидкая и газообразная фазы.

Автор [10] считает, что разрушение окисной пленки при сварке алюминия происходит при высоких значениях температуры расплавленного металла и вряд ли возможно развитие реакции во всем объеме сварочной ванны. Им установлено, что при сварке в гелии превышение температуры по всей глубине ванны составляет 200–300 К по сравнению со сваркой в аргоне. Непосредственно под дугой измеренная температура жидкого металла при сварке в гелии составляет 2000–2100 К, и поэтому в приэлектродном слое разрушается основная масса оксидной пленки.

Данный факт позволяет объяснить и недостаточное разрушение оксидов при использовании аргона.

Получить качественную поверхность швов можно при высокой концентрации энергии дуги, которая достигается при сварке в гелии. Разрушение оксидной пленки зафиксировано и при сварке в аргоне, но при дуговом промежутке, близком по длине короткому замыканию.

Сварка в гелии тоже требует небольшой длины дуги, но это требование менее жесткое, чем при использовании аргона [10].

История создания и совершенствования способов и технологий дуговой сварки алюминия, проведенных в ИЭС им. Е. О. Патона за полстолетия, приведена в [22, 28].

В [22] отмечается, что способ сварки плавящимся электродом (в отличие от сварки неплавящимся электродом) менее чувствителен к размерам зазора и превышению толщин соединяемого металла, обеспечивает более высокую скорость сварки и незначительный уровень остаточных деформаций в соединениях.

Разработка в ИЭС им. Е. О. Патона способа импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом явилась значительным достижением в области сварки плавлением. Данный способ повышает стабильность горения дуги, уменьшает разбрызгивание металла и испарение легколетучих элементов, снижает количество и размеры оксидных включений и пор в швах [28]. В работе [29] отмечается, что замена гелий-аргоновых смесей на готовые гелий-неоновые смеси при сварке алюминиевых сплавов приводит к повышению напряжения дуги, росту глубины проплавления металла, увеличению ширины шва, уменьшению его выпуклости и снижению пористости наплавленного металла.

По данным, указанным в работе [37], не удалось наблюдать окисные включения в сварных швах алюминиевых сплавов, выполненных автоматической сваркой плавящимся электродом в защитных газах. Этому способствует более интенсивное перемешивание сварочной ванны, поэтому в первый момент неразрушенные окисные пленки могут повторно оказаться на поверхности и подвергнуться разрушению.

В работе [30] сопоставлена эффективность некоторых известных и новых способов предотвращения грубых включений оксидной пленки в металле швов. Установлено, что протяженность оксидной пленки резко сокращается при уменьшении зазора между свариваемыми кромками; этому также способствуют шабрение кромок и применение подкладок с формирующими канавками. Лучшие результаты с точки зрения предотвращения грубых включений оксидной пленки в швах достигаются при сварке асимметричным разнополярным током прямоугольной формы и при плазменно-дуговой сварке.

При сварке алюминиевых сплавов плазменной дугой в металле шва и околошовной зоне отсутствуют поры, оксидные включения и другие дефекты [85].

Для сварки алюминиевых сплавов применяют проволоку диаметром не менее 1,2–1,5 мм, так как из-за недостаточной жесткости сварка алюминиевой проволокой меньшего диаметра затруднена. При использовании проволок указанных диаметров устойчивый процесс можно получить при токах не менее 130–140 А, позволяющих сваривать за один проход металл толщиной 4–5 мм [88]. По данным, указанным в [108], при сварке плавящимся электродом диаметром 1,2–1,6 мм сила сварочных токов равна 120–250 А. При диаметре проволоки 1,2–1,6 мм и толщине изделия из алюминия и его сплавов 2,5–3 мм минимальная сила тока составляет 40–50 А [53, 99].

В литературе нет данных о сварке плавящимся электродом при силе тока менее 40–50 А, и в связи с этим отсутствуют сведения о переносе металла в дуге при минимальных токах.

При сварке алюминиевой проволокой диаметром 1,2 мм и силе тока 95 А наблюдается крупнокапельный перенос металла в дуге [96].

Сварку алюминия плавящимся электродом со струйным переносом рекомендуют при толщине свариваемых листов от двух до нескольких десятков миллиметров [140].

Имеются сведения о дуговой сварке с импульсной подачей проволоки (процесс СМТ – ColdMetalTransfer), предложенной фирмой «Фрониус». Процесс СМТ (перенос холодного металла) обеспечивает сварку стыковых швов (Al + Al) толщиной 1 мм со скоростью до 250 см/мин без разбрызгивания [5]. Цифровая система процесса фиксирует возникновение короткого замыкания и путем отвода проволоки помогает отделению капли (рис. 3.25).

В данном процессе перенос металла происходит под действием сил инерции. В условиях короткого замыкания вылет проволоки автоматически отводится. В течение фазы горения сама дуга вводит тепло только кратковременно, затем ввод тепла уменьшается.

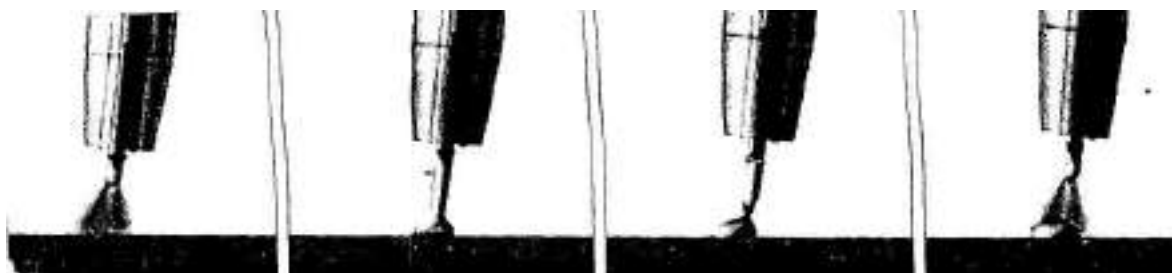


Рис. 3.25. Обратное движение проволоки, способствующее отрыву капли

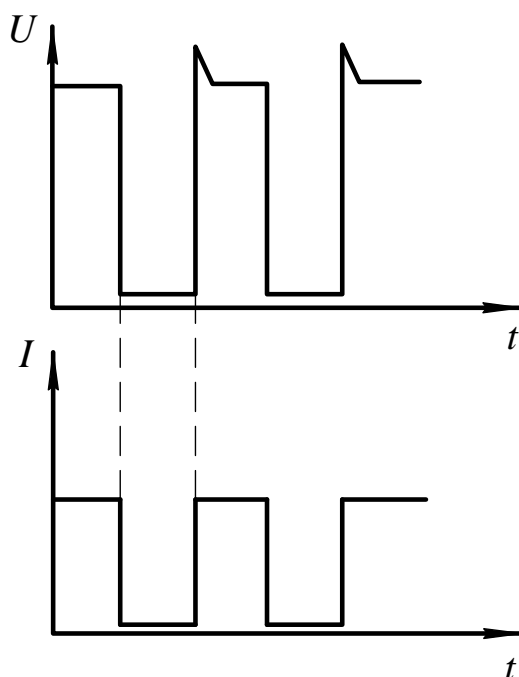


Рис. 3.26. Переход материала в шов, осуществляемый почти без тока

Перенос металла без образования брызг достигается отводом проволоки в момент короткого замыкания, что помогает отделению капли. Короткое замыкание происходит под контролем, его ток незначителен (рис. 3.26), что обеспечивает перенос металла без брызг.

Процесс позволяет осуществлять сварку сверхтонкого листа толщиной 0,3 мм даже стыковым швом без технологической подкладки. По нашему мнению, на представленных макрошлифах сварного соединения, выполненных процессом СМТ, смачивание основного металла не совсем удовлетворительное.

При толщине основного металла 0,6 мм и диаметре проволоки 1,2 мм обеспечиваются крупночешуйчатые швы [6].

В работе [48] отмечается, что несмотря на видимые достижения, определенные успехи в области дуговой сварки металлов толщиной менее 0,5 мм наблюдаются лишь при использовании микроплазмы. Недостатками микроплазменной сварки следует считать высокое давление дуги и чрезвычайно жесткие требования к точности сборки. Но по ряду причин, в том числе из-за недостаточной надежности аппаратуры, в последние годы отмечается замедление темпов внедрения данного способа.

Из вышеизложенного следует, что в отечественной литературе отсутствуют сведения о сварке плавящимся электродом алюминиевых сплавов проволокой диаметром 0,8 мм при силе тока менее 50 А.

### 3.5. Особенности процесса сварки алюминия тонкой проволокой

Для оценки устойчивого горения дуги и качественного формирования наплавленных валиков применялась следующая методика исследования.

Проволока диаметром 0,8 мм подавалась гладкими роликами с минимальной глубиной клиновидной канавки и между тянущими роликами зажималась с усилием, исключающим ее сплющивание. Перед наплавкой проволока диаметром 0,8 мм не зачищалась.

Образцы перед наплавкой обезжиривались, зачищались вращающейся металлической щеткой и фиксировались на подложке из малоуглеродистой стали. Диаметр цилиндрического сопла для подачи газа составлял 20 мм, расстояние от среза сопла до изделия было 10–12 мм.

Для питания дуги применялся однофазный выпрямитель с конденсаторным множителем напряжения и наклоном внешней характеристики 0,035 В/А. В цепь питания дуги включался дроссель индуктивностью 1,5–2,5 мГн. Электрические параметры режимов фиксировались цифровым осциллографом С9-8. Для оценки переноса металла в дуге использовали цифровой фотоаппарат. Видеосъемка осуществлялась через светофильтры без подсветки дуги.

Режимы наплавки проволокой 0,8 мм были следующими:  $U_{xx} = 16$  В (с включенными конденсаторами – в 2,82 раза больше);  $V_n = 109,5$ –285 м/ч;  $I_d = 12$ –40 А;  $U_d = 13$ –15 В; вылет 9 мм;  $V_{св} = 3,74$ ; 6,78 м/ч; расход аргона 7–8 л/мин; полярность обратная.

В начале наплавленных валиков имелся участок выхода на стационарный режим сварки, где размеры шва не достигали оптимального значения [37]. В случае недостаточно плотного прижатия образца из алюминия толщиной 0,5 мм к подложке из стали из-за деформаций в процессе наплавки трудно обеспечить минимальный зазор между обратной стороной шва и стальной подложкой. Наплавленные валики имеют плавный переход от основного металла к наплавленному, и прожоги отсутствуют (рис. 3.27).

При всех равных параметрах режима уменьшение расхода газа до 2–3 л/мин приводит к неудовлетворительному внешнему виду наплавленного валика (рис. 3.28).

С увеличением тока до 25–30 А и толщине изделия 0,8 мм наплавленный валик формируется (рис. 3.29).

Но с увеличением толщины изделия до 1,5 мм и силе тока 25 А ухудшается смачиваемость изделия расплавленным электродным металлом (рис. 3.30).

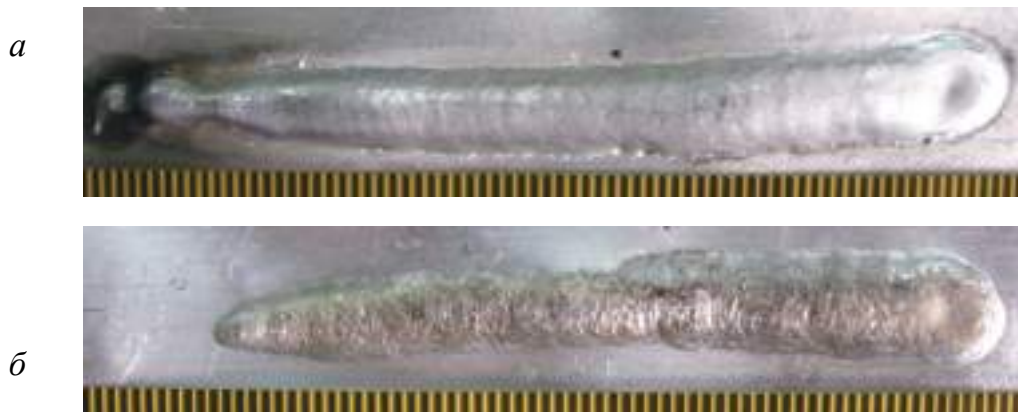


Рис. 3.27. Наплавленный валик (а) и его обратная сторона (б):  $I_d = 20$  А;  $U_d = 15$  В;  $V_{св} = 3,74$  м/ч; толщина изделия 0,5 мм



Рис. 3.28. Внешний вид шва при неудовлетворительной защите.  $I_d = 20$  А;  $U_d = 15$  В



Рис. 3.29. Внешний вид наплавленного валика:  $I_d = 25$  А;  $U_d = 14$  В;  $V_{св} = 3,7$  м/ч



Рис. 3.30. Наплавленный валик:  $I_d = 25$  А;  $U_d = 15$  В;  $V_{св} = 3,74$  м/ч

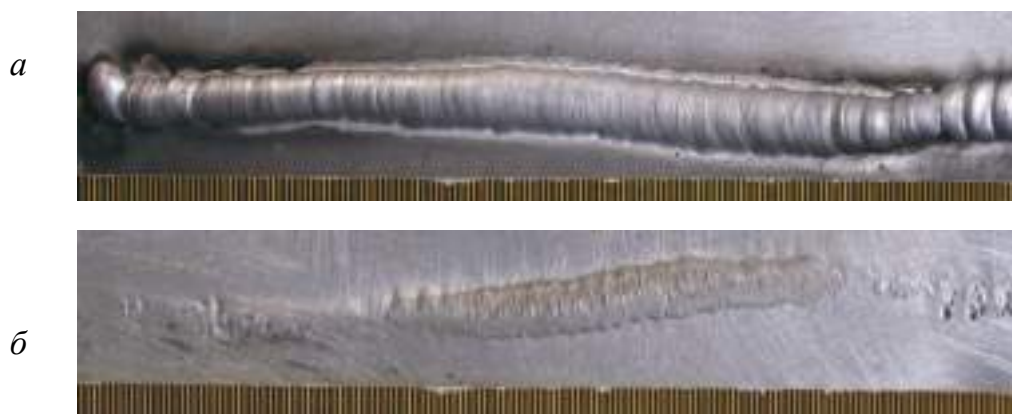


Рис. 3.31. Наплавленный валик (а) и его обратная сторона (б).  $I_d = 32,5$  А;  
 $U_d = 15$  В

С увеличением тока до 30–35 А и скорости сварки 6,78 м/ч при толщине изделия 1,2 мм обеспечивается формирование наплавленных валиков (рис. 3.31).

По данным, указанным в работе [23], допустимые зазоры в соединении и смещение кромок не должны превышать 10–20 % толщины основного материала. При сварке однофазной дугой прожоги возникают с зазором в стыке, равном 0,1 % толщины материала [121].

На практике данные требования к точности сборки обеспечить не легко. В связи со сложностью стыковки образцов толщиной 0,5–1,2 мм образцы для сварки стыковых швов, как и ранее для сварки стали, готовили следующим образом.

Металл в зоне шва резался ножницами, но не до конца (рис. 3.32).

Для устранения зазора и превышения кромок в зоне выполнения шва образцы подвергали незначительной пластической деформации с помощью молотка на металлическом основании. Величина зазора и превышение кромок при толщине образца 0,35–1 мм составили 0,2–0,4 мм, что выше рекомендованных [23, 121].

При размерах алюминиевых образцов 250x80 мм и менее сложно обеспечить минимальный зазор между образцом и подложкой (рис. 3.33).

В процессе наплавки и сварки алюминиевые образцы деформируются. В связи с жидкотекучестью ванны с обратной стороны шва (в сравнении с образцами из стали) металл вытекает в большей степени. Нарушение зазора в процессе деформации способствует подсосу воздуха в зазор, и может наблюдаться окисление с обратной стороны шва.

Все образцы, представленные выше, сваривались по схеме (рис. 3.33), и зазор между образцом и подложкой в процессе сварки был в пределах 0,5–1 мм.

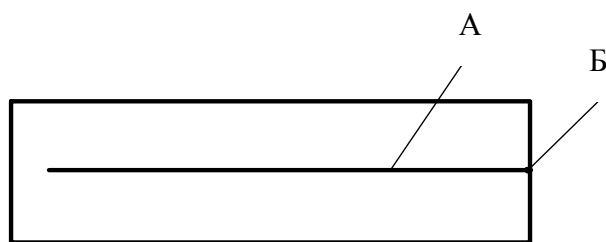


Рис. 3.32. Образец для сварки (А – рез; Б – прижим)

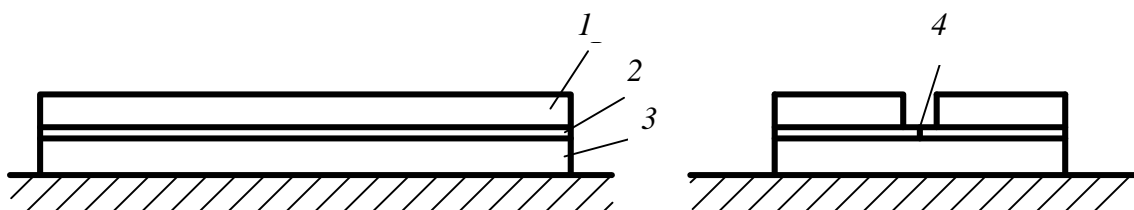


Рис. 3.33. Схема фиксации образцов: 1 – стальная пластина; 2 – образец из алюминия; 3 – подложка; 4 – стык

Поэтому для фиксации образцов толщиной 0,5–1 мм следует применять прецизионную оснастку с удобными зажимными устройствами. При сборке необходимо обеспечивать минимальные величины зазоров и превышений кромок.

Попытки обеспечить более плотное поджатие алюминиевых образцов к стальной подложке постоянными магнитами не дали положительных результатов из-за ухудшения устойчивости горения дуги.

Для плотного поджатия свариваемых образцов к подложке и уменьшения деформаций было изготовлено приспособление из плоскопараллельных стальных пластин толщиной 5 мм (рис. 3.34).

На рис. 3.34 стрелками обозначены места прижатия и зажима образцов в приспособлении.

Перед сборкой образцов обеспечивалось плотное поджатие образцов к подложке из нержавеющей стали и устранялось превышение кромок. Но при диаметре защитного сопла 20 мм и расстоянии от среза сопла до свариваемых образцов 8–9 мм расстояние между прижимами менее ширины шва 6–10 мм при условии хорошей защиты шва газом обеспечить не удалось.

На рис. 3.35 изображен валик, выполненный в аргоне на следующих режимах: диаметр проволоки 0,8 мм;  $V_{\text{под.пр}} = 104,5$  м/ч;  $V_{\text{св}} = 3,74$  м/ч; расход аргона 7 л/мин.

После наплавки черный налет отсутствовал.

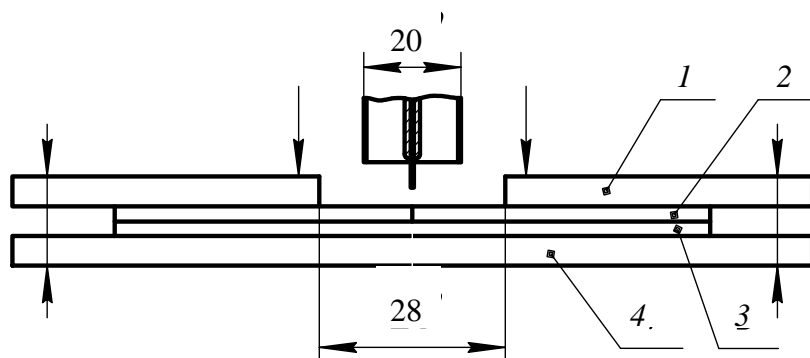


Рис. 3.34. Приспособление из плоскопараллельных стальных пластин:  
1, 4 – стальные пластины; 2 – свариваемые образцы; 3 – подложка из нержавеющей стали

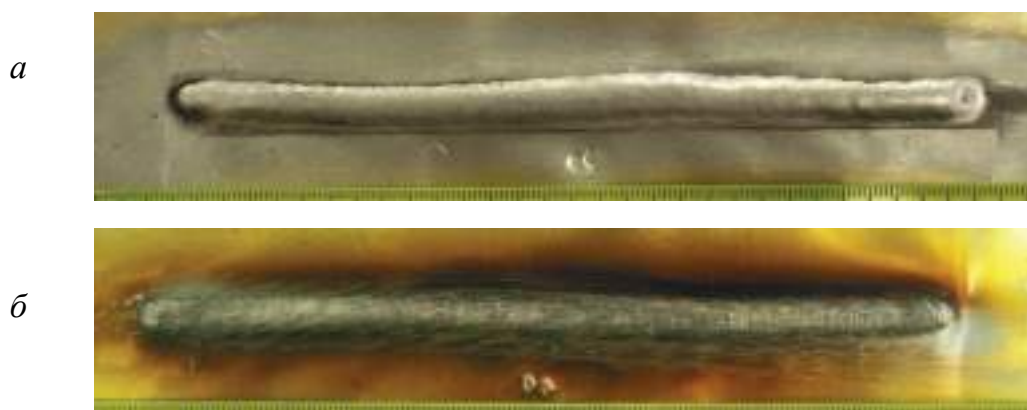


Рис. 3.35. Наплавленный валик (а) и его обратная сторона (б):  $I_d = 15$  А;  
 $U_d = 12,5$  В; толщина изделия 0,35 мм

Несмотря на плотное поджатие образца перед наплавкой, в зоне выполнения шва наблюдается «домик» высотой 1,5–2 мм.

На рис. 3.36 показан наплавленный валик при толщине алюминия 0,5 мм.

На рис. 3.37 представлен наплавленный валик при толщине алюминия 0,35 мм.

При визуальном наблюдении за дугой видны короткие замыкания, но разбрызгивания нет.

«Домики» – в пределах 1,5–2 мм, и черный налет в случае минимального расстояния от среза сопла до изделия в зоне выполнения шва отсутствует.

На рис. 3.38 показан образец, сваренный встык при толщине алюминия 1,1 мм.

«Домик» отсутствует, но при силе тока 30 А не обеспечивается полное проплавление образца.

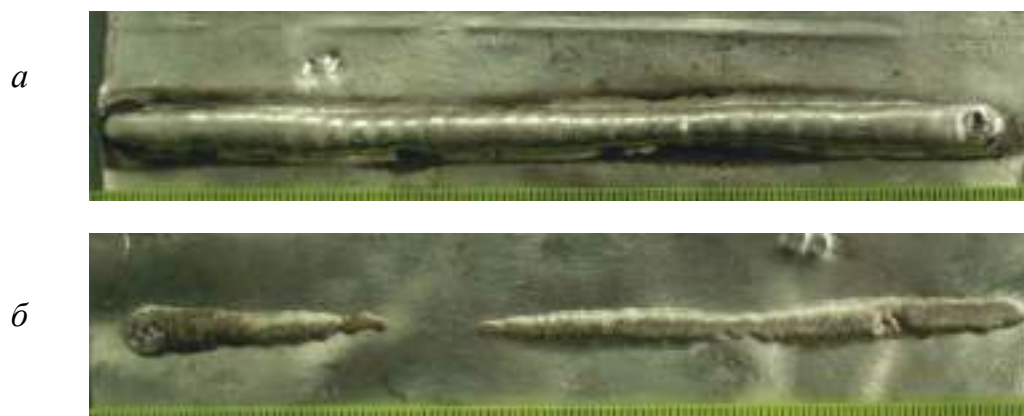


Рис. 3.36. Наплавленный валик (а) и его обратная сторона (б):  $I_d = 26$  А;  $U_d = 13$  В;  $V_{св} = 3,74$  м/ч; вылет 9–10 мм; толщина изделия 0,5 мм

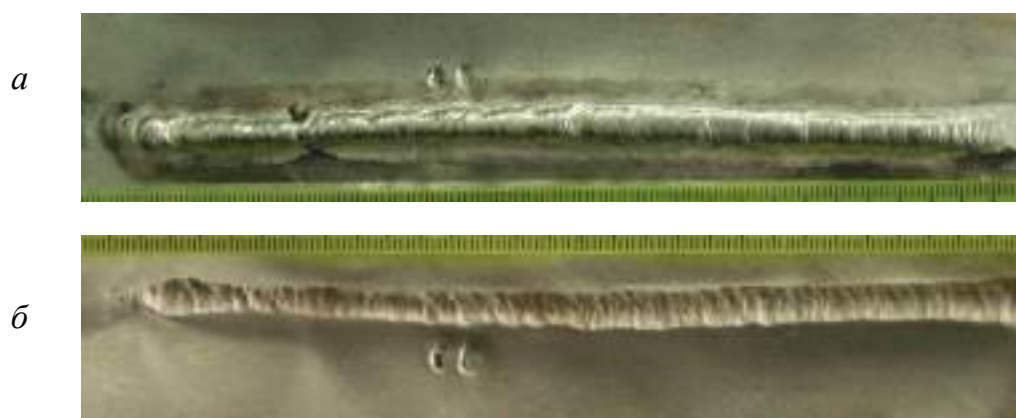


Рис 3.37. Наплавленный валик (а) и его обратная сторона (б):  $I_d = 11,25$  А;  $U_d = 12$  В;  $V_{св} = 3,74$  м/ч; вылет 9–10 мм; толщина изделия 0,35 мм



Рис. 3.38. Наплавленный валик (а) и его обратная сторона (б).  $I_d = 30$  А;  $U_d = 15$  В;  $V_{св} = 6,7$  м/ч; вылет 9–10 мм; толщина изделия 1,1 мм

При автоматической сварке стыковых швов из алюминия толщиной 0,35–0,5 мм проволокой диаметром 0,8 мм сложно обеспечить точное направление вылета по оси шва.

Также из-за образования «домика» высотой более 3 мм возможно короткое замыкание между токоподводящим наконечником и изделием, и из-за неплотного поджатия образца к изделию сварка выполняется на весу.

Для устранения «домика» перед дугой в зоне выполнения шва необходимо прижимать стык к изделию прижимом, перемещающимся со скоростью сварки.

При механизированной сварке алюминия толщиной 0,4–1,1 мм алюминиевая проволока диаметром 0,8 мм подавалась механизмом автомата АБС роликом с мелкой насечкой без канавки. Использовалась горелка «Пульсар» с длиной шлангового провода 2,6 м.

Перед сборкой образцов обеспечивалось плотное поджатие образцов к подложке из нержавеющей стали и устранялось превышение кромок.

Выявлено, что в процессе наплавки и сварки стыковых соединений формируются швы при следующих режимах:  $I_d = 16\text{--}30\text{ А}$ ;  $U_d = 12\text{--}15\text{ В}$ ; вылет 8–10 мм, расход аргона 6–7 л/мин; расстояние от среза цилиндрического сопла до детали 10–12 мм. При внутреннем диаметре защитного сопла 15 мм предпочтительнее горелку перемещать слева направо (углом назад), т. к. при этом лучше видно формирование валика. В начале шва из-за неустановившегося стационарного теплоотвода его размеры не достигают оптимального значения.

По-видимому, из-за малой толщины образцов и широкой ванны лучше осуществляется ее дегазация и в швах не выявлено заметной пористости.

При сварке и наплавке образцов толщиной 0,4–0,5 мм необходимо равномерно перемещать горелку с небольшими (1,5–2 мм) поперечными колебаниями. В случае остановки горелки возможны прожоги. Визуально в дуговом промежутке фиксируются капли, но брызг на изделии и внутреннем диаметре сопла практически нет. На внутренней поверхности сопла наблюдается светлый налет, напоминающий мелкую пыль.

На подложке из стали аустенитного класса при механизированной сварке встык алюминия толщиной 0,5 мм форма канавки была выполнена, согласно рекомендациям [86], глубиной 0,4–0,5 мм.

На рис. 3.39 показан шов, сваренный встык на подложке из нержавеющей стали с глубиной канавки 0,4–0,5 мм. Толщина образца 0,5 мм,  $\varnothing_{пр.} = 0,8\text{ мм}$ ,  $I_d = 22\text{ А}$ ,  $U_d = 12\text{ В}$ , вылет 8–9 мм, расход аргона 8 л/мин.

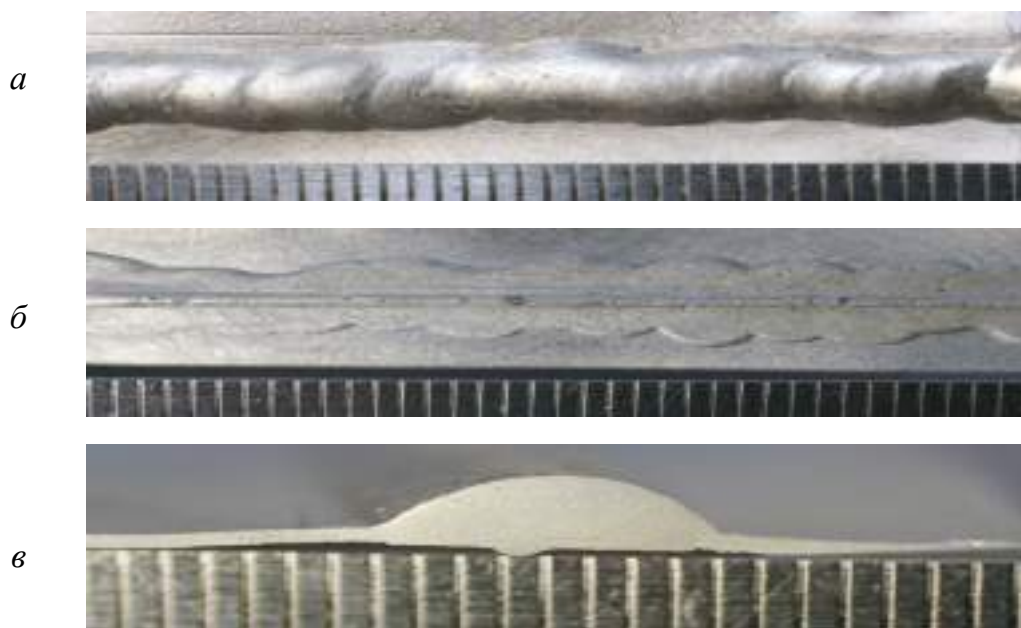


Рис. 3.39. Шов: *а* – вид сверху, *б* – вид снизу, *в* – поперечное сечение шва

Из-за деформаций металл вытекает с двух сторон от центра шва, но канавку заполняет узкой полосой (рис. 3.39, *б*).

На подложке без канавки с обратной стороны шва металл из-за деформаций вытекает также с двух сторон от центра шва.

Имеются сведения о режимах сварки алюминиевых сплавов проволокой диаметром 1,2 мм. Отмечается, что для проволоки диаметром 1,2 мм при силе тока 60 А, длине дуги 10 мм и вылете 10–20 мм диаметр капли достигает 5–6 мм, частота переноса – 1 капля/с. Но нет сведений о напряжении дуги, потерях на угар и разбрызгивание [139].

В работе [99] для алюминиевой проволоки диаметром 1,2 мм при силе тока 100 А частота переноса металла в дуге составляет 10 капель/с, а для проволоки диаметром 1,6 мм – 2 капли/с.

В работе [106] (ссылки на иностранных авторов) приводится зависимость напряжения дуги от тока в аргоне для алюминиевой проволоки диаметром 1,6 мм. Минимальное напряжение на обратной полярности при силе тока 80–100 А составляет 13–16 В.

Авторы [18, 108] не приводят сведений о напряжении дуги менее 19 В при сварке алюминия плавящимся электродом.

По-видимому, это связано с отсутствием регулирования напряжения дуги менее 15–18 В у источников питания с жесткой и пологопадающей характеристикой, выпускаемых в СССР. Также нет сведений о зажигании дуги при напряжении холостого хода источника питания напряжением менее 15–17 В.

Выявлено, что при механизированной наплавке валиков на алюминий толщиной 1–4,2 мм проволокой Св-АК5 диаметром 1,2 мм на обратной полярности формируются швы на следующих режимах:  $U_{xx} = 17–21$  В;  $I_d = 12–40$  А;  $U_d = 12–16$  В, вылет 8–10 мм, расход аргона 9–10 л/мин.

При силе тока 12–20 А визуально фиксируются нарастание капли на торце электродной проволоки и её переход в сварочную ванну. Внутренний диаметр защитного сопла для подачи газа составлял 14 мм, а токоподводящий наконечник был «утоплен» на 4–5 мм от среза сопла. При минимальном расстоянии от сопла до изделия чёрный налёт и пористость отсутствуют.

На рис. 3.40 показано поперечное сечение шва, выполненного на режимах: а)  $U_{xx} = 21$  В;  $I_d = 40$  А,  $U_d = 16–17$  В; толщина образца 2 мм; б)  $U_{xx} = 17,5$  В;  $I_d = 40$  А;  $U_d = 15,5$  В; толщина образца 2,8 мм.

С уменьшением тока до 12–13 А визуально фиксируется крупнокапельный перенос металла в дуге и шов формируется с перекрытием капель.

Валик, наплавленный на алюминиевую пластину толщиной 1,2 мм при режимах  $U_{xx} = 17,5$  В,  $I_d = 12,5$  А,  $U_d = 16,5$  В, показан на рис. 3.41.

Швы лучше формируются на минимальных напряжениях, что также уменьшает чёрный налёт и улучшает плотность швов. С уменьшением напряжения холостого хода зажигание дуги проволокой диаметром 1,2 мм ухудшается.

С первого касания дуга зажигается при касании и последующем отрыве торца неподвижного вылета от изделия с напряжением холостого хода вспомогательного источника питания 85–95 В, падающей характеристикой и силе тока 5–6 А. После зажигания вспомогательной дуги, ионизации дугового промежутка, появления жидкой прослойки на торце вылета подается сварочная проволока, а цепь вспомогательной дуги отключается [71].

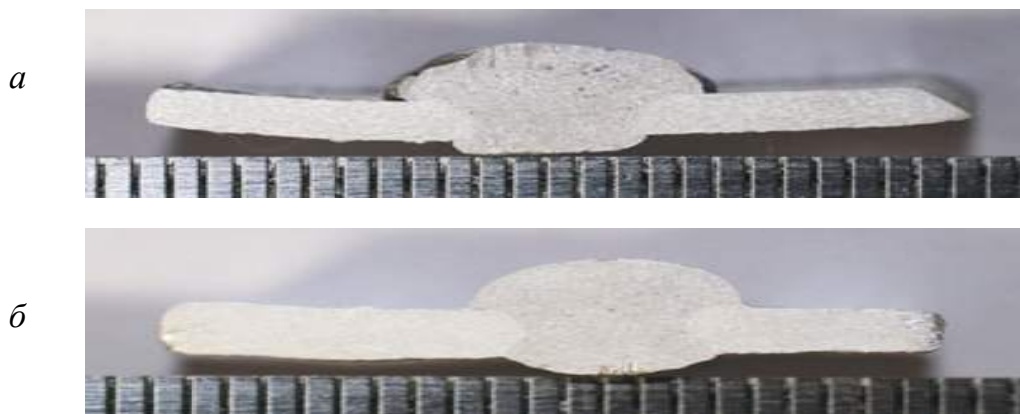


Рис. 3.40. Поперечные сечения швов



Рис. 3.41. Шов: *а* – вид сверху; *б* – обратная сторона

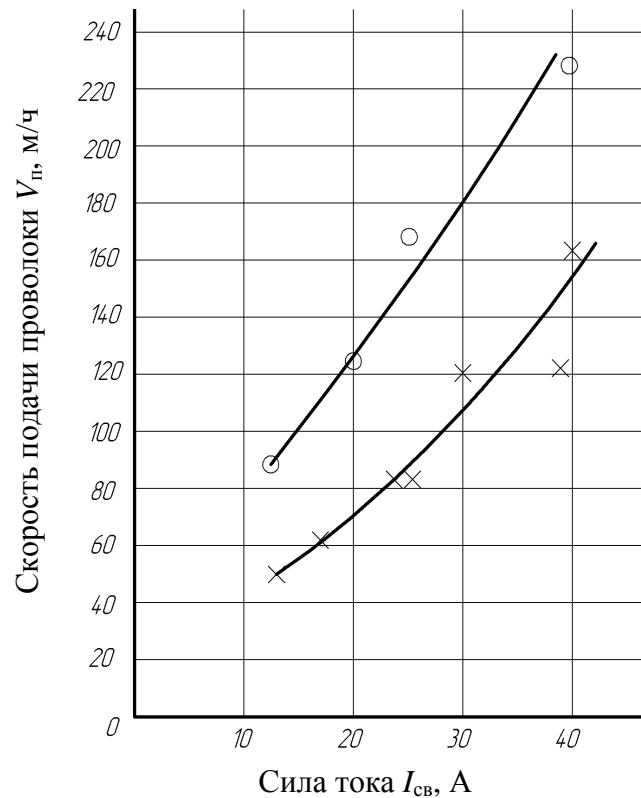


Рис. 3.42. Зависимость сварочного тока ( $I_{св}$ ) от скорости подачи проволоки ( $V_p$ )  $\circ$  –  $\varnothing_{пр} = 0,8$  мм;  $\times$  –  $\varnothing_{пр} = 1,2$  мм

Швы, показанные на рис. 3.40, 3.41, формировались на подложке из малоуглеродистой стали без жесткого поджатия к подложке.

На рис. 3.42 приведена зависимость сварочного тока от скорости подачи алюминиевой проволоки диаметром 0,8 и 1,2 мм.

На осциллограммах и кинограммах наблюдаются короткие замыкания и при силе тока 12–30 А фиксируются визуально (рис. 3.43, 3.44).

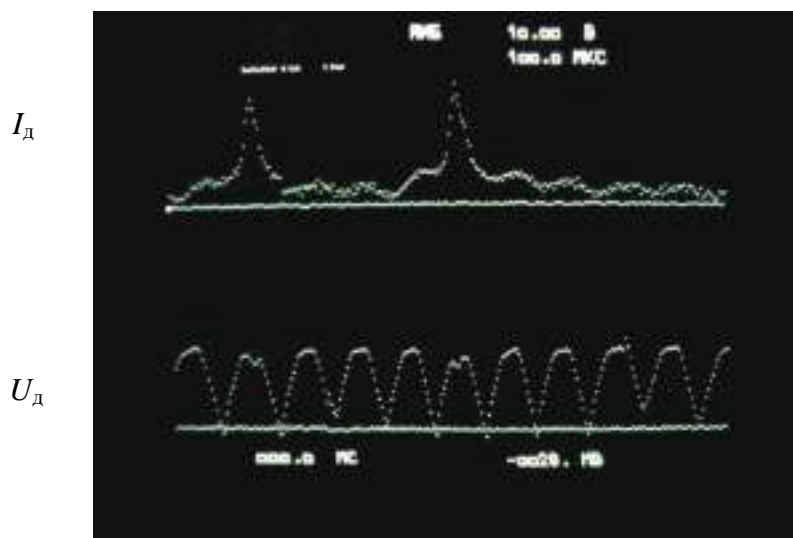


Рис. 3.43. Горение дуги и короткие замыкания в процессе перехода капли в ванну:  $I_d = 26,25$  А,  $U_d = 12,5$  В

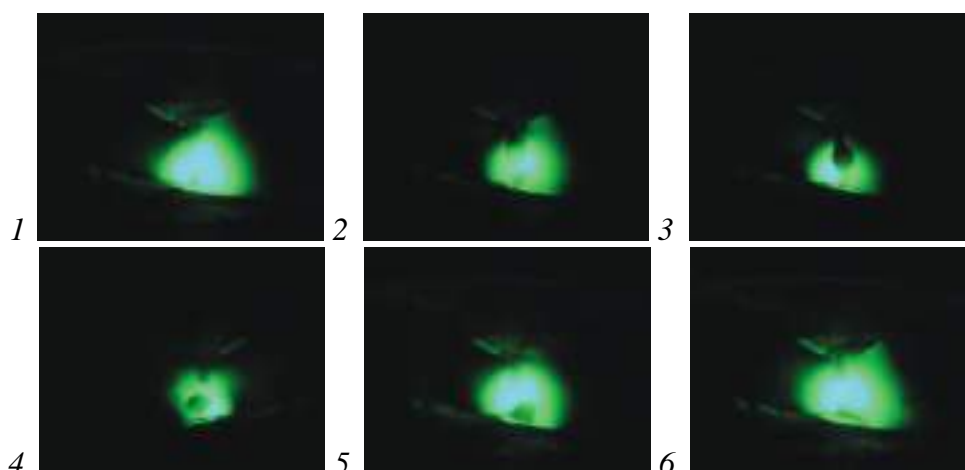


Рис. 3.44. Типичные кадры (1–6) переноса металла в дуге. Частота видеосъемки – 30 кадров/с;  $I_d = 20$  А;  $U_d = 15$  В;  $\phi_{пр} = 0,8$  мм

Показатели переноса металла в дуге даны в табл. 3.4.

Таблица 3.4

**Показатели переноса металла в дуге**

Характеристика переноса	
Сила сварочного тока, А	20
Скорость подачи электродной проволоки, м/ч	135
Число капель, переходящих с электрода за 1 с	14
Максимальный диаметр капли, мм	1,5

Окончание табл. 3.4

Характеристика переноса	
Длительность, с:	
накопления капли	0,06
перехода капли	0,01
общей жизни капли	0,07

По-видимому, улучшение горения дуги на малых токах в аргоне объясняется повышенным напряжением холостого хода и в связи с этим увеличением разрывной длины дуги. Также при коротких замыканиях происходит накопление энергии в индуктивном сопротивлении, а после перехода капли энергия выделяется в процессе горения дуги. Минимальное разбрызгивание может быть объяснено более благоприятными условиями плавления перемычки из-за частичного шунтирования тока столбом дуги и расплавлением перемычки теплом дуги, поступающим в нее из столба дуги [2].

### 3.6. Особенности наплавки стали аустенитного класса в защитных газах

Многочисленные исследования по сварке в защитных газах указывают на существенную зависимость устойчивости горения дуги от природы защитного газа.

Влияние защитных газов на температуру и устойчивость дугового разряда определяется охлаждающей способностью этих газов, зависящей от их теплофизических свойств. Несмотря на то, что эффективный потенциал ионизации у азота меньше, чем у аргона, устойчивость горения дуги в азоте хуже, что объясняется большей теплопроводностью и термической диссоциацией азота. Охлаждение дуги приводит к сжатию ее и активных пятен, что обуславливает отсутствие струйного переноса при сварке в среде многоатомных газов (азота, углекислого газа, водорода, гелия, паров воды) [26, 57].

При сварке в азоте могут быть получены процессы с крупнокапельным переносом электродного металла и с частыми короткими замыканиями. Длина дуги в азоте меньше, чем в аргоне, а давление больше. В результате дуга приподнимет каплю на конце электрода и смещает её к оси электрода. Капли на электроде вырастают до больших размеров. Процесс сварки с крупнокапельным переносом сопровождается повышенным

разбрызгиванием, которое объясняется невозможностью получения мелкокапельного переноса при сварке дугой постоянного тока в азоте.

Мелкокапельный и струйный перенос в среде газов возможен при нанесении на сварочную проволоку активирующих покрытий и снижении давления окружающей среды. Для объяснения струйного переноса существует ряд гипотез, которые даны в [57].

Например, расширение токоведущего канала дуги за счет отражения плазменного факела от изделия может улучшить перенос металла в дуге [58]. Автор работы [127] считает, что основной причиной перехода электродного металла к струйному при сварке током обратной полярности в аргоне является изменение поверхностного натяжения жидкого металла на торце электрода; при этом диаметр капли линейно зависит от диаметра электрода и при малых диаметрах электрода (0,5 мм; 0,8 мм) струйный перенос получить невозможно.

При наплавке бронзы БрАМц 9-2 в азоте первого сорта проволокой диаметром 2 мм трехфазной дугой при минимальных напряжениях и плотности тока 90–100 А/мм<sup>2</sup> наступает мелкокапельный и струйный перенос [78]. По-видимому, данному явлению способствуют взаимная облученность столбов и активных пятен и сжатие дуги между торцами электродов. При минимальных напряжениях в азоте мелкокапельный перенос наблюдал В. М. Илюшенко.

Содержание азота в аустенитных азотосодержащих сталях составляет 0,3–0,4 % и достигает 2 %.

Разработана технология сварки сталей с содержанием азота 1 %, обеспечивающая качественные сварные конструкции [135].

Положительное влияние азота на свойства жаропрочных сталей отмечается в работах Б. И. Медовара. При сварке стали 1Х18Н9Т проволокой Св-06Х18Н9Т в результате взаимодействия с азотом феррит в шве исчез и вместо него появились нитриды. При содержании азота в стали 0,198 % жаропрочность швов изменилась мало [64].

Также при сварке стали Х25Н20С2 проволокой Х25Н20С2Р диаметром 2 мм ( $I_d = 290$  А,  $U_d = 27–28$  В,  $V_{св} = 30$  м/ч, расход технического азота 14,5 л/мин) горение дуги происходит более устойчиво, чем в углекислом газе. Швы, сваренные в техническом азоте, по прочности не уступают таким же швам, выполненным в углекислом газе, но пластичность их несколько ниже при содержании азота в шве: 0,0275 % [65]. При сварке в азоте проволокой Св-06Х18Н9Т содержание азота в электродных каплях на обратной полярности составляет 0,1 %, а на прямой – 0,16 %, а с ростом тока оно незначительно уменьшается [102].

Применение азота для целей сварки оправдывается его дешевизной и меньшей дефицитностью. Кроме того, диссоциация азота в дуге и последующая ассоциация на поверхности свариваемого изделия с выделением теплоты способствуют увеличению глубины проплавления по сравнению со сваркой в аргоне.

В связи с отсутствием сведений о сварке и наплавке аустенитной стали при силе тока 50 А в аргоне и азоте аустенитной проволокой на сталь наплавлились одиночные валики. Дуга питалась от преобразователя ПСГ-500 и однофазного выпрямителя с конденсаторным умножителем напряжения.

Определялся минимальный ток при наплавке стали 1X18H9T проволокой диаметром 0,8–1,2 мм на малоуглеродистую сталь в аргоне и азоте.

Выявлено, что при наплавке проволокой 1X18H9T диаметром 1,2 мм в аргоне на обратной полярности и при скорости сварки 18,5 м/ч минимальный ток, обеспечивающий формирование, составляет 50 А. Напряжение холостого хода преобразователя ПСГ-500 было 18–19 В, напряжение на дуге 19–20 В, расход аргона 15 л/мин, вылет 10–12 мм. С увеличением сварочного тока потери на угар и разбрызгивание уменьшаются (рис. 3.45).

Макрошлифы валиков, наплавленных на сталь 45, показаны на рис. 3.46.

При прямой полярности при силе тока 125–160 А потери на угар и разбрызгивание составляют 6–9 % и ухудшается смачиваемость основного металла наплавленным.

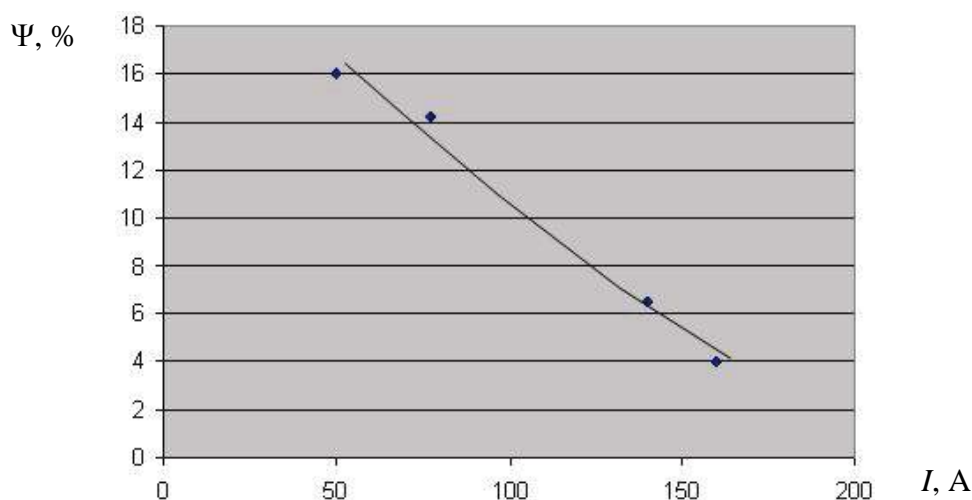


Рис. 3.45. Потери на угар и разбрызгивание  $\psi$  от тока в аргоне

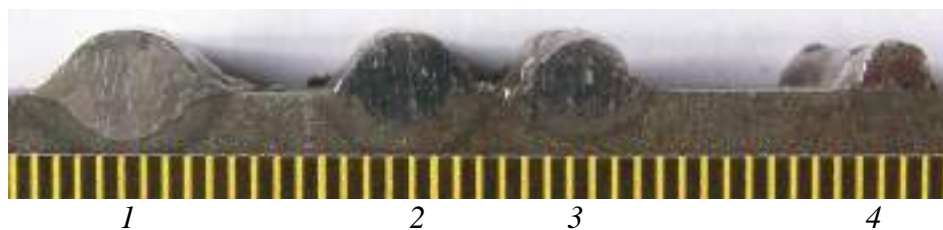


Рис. 3.46. Макрошлифы валиков, наплавленных на сталь 45:  
1 – ток 160 А; 2 – ток 140 А; 3 – ток 85 А; 4 – ток 50 А



Рис. 3.47. Валики, наплавленные на малоуглеродистую сталь в состоянии поставки без зачистки: *а* – обратная полярность, *б* – прямая полярность. Сварочный ток 120 А

При наплавке в азоте второго сорта и в азоте без примесей кислорода при режиме, в условиях которого  $V_{\text{п}} = 134\text{--}288$  м/ч,  $U_{\text{д}} = 22\text{--}25$  В  $d_{\text{пр}} = 1,2$  мм, вылет 12–15 мм, скорость сварки 15–25 м/ч; наклон внешней характеристики выпрямителя с конденсаторным умножителем напряжения 0,037 В/А, полярность обратная, обеспечиваются формирование швов и минимальные потери на угар и разбрызгивание. При прямой полярности также обеспечивается формирование наплавленного металла, но не обеспечивается плавный переход от основного металла к наплавленному (рис. 3.47).

Также получено формирование швов при наплавке в азоте высокой чистоты нержавеющей стали (802051) проволокой диаметром 0,8 мм

на малоуглеродистую сталь толщиной 1 мм (рис. 3.48). Наплавка осуществлялась при следующих режимах:  $U_{xx} = 64,2$  В (без конденсаторов 22,5 В);  $V_{п} = 73,5$  м/ч;  $I_{д} = 18,5$  А;  $U_{д} = 21$  В, вылет 8–10 мм; скорость сварки 4 м/ч; индуктивность дросселя 1,8 мГн.

На рис. 3.49 показан валик, наплавленный проволокой 1Х18Н9Т диаметром 1,2 мм в чистом азоте, на подложке из малоуглеродистой стали толщиной 2,5 мм.

В аргоне проволокой 1Х18Н9Т на изделии из малоуглеродистой стали также формируются наплавленные валики (рис. 3.50).

При горении дуги визуально наблюдаются короткие замыкания при переходе капли с электродной проволоки на изделие. На рис. 3.51 показан переход капли с электрода на изделие в аргоне.



Рис. 3.48. Валики, наплавленные в чистом азоте на малоуглеродистую сталь толщиной 1 мм: *a* –  $U_{д} = 22,5$  В; *б* –  $U_{д} = 17,5$  В



Рис. 3.49. Валик:  $I_{д} = 35$  А;  $U_{д} = 17$  В



Рис. 3.50. Валик:  $I_{д} = 40–45$  А;  $U_{д} = 18–19$  В

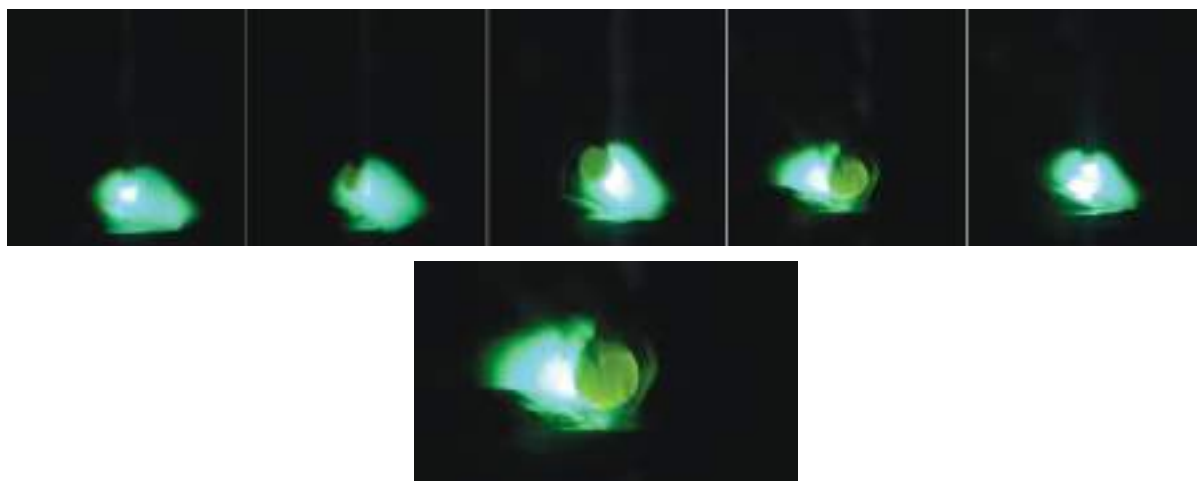


Рис. 3.51. Переход капли с электрода на изделие:  $I_d = 40$  А;  $U_d = 18-19$  В;  $d_{пр} = 1,2$  мм

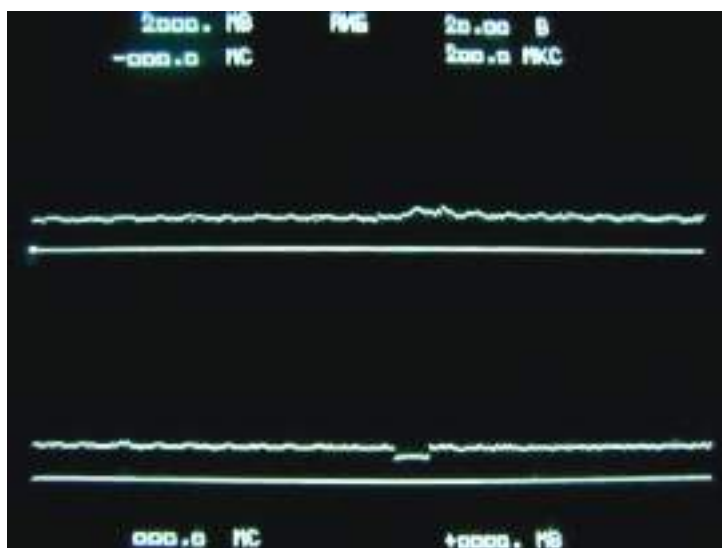


Рис. 3.52. Осциллограмма горения дуги в аргоне и момент перехода капли с электрода на изделие

Момент горения дуги перед и короткое замыкание во время перехода капли показаны на рис. 3.52.

При выключенных конденсаторах и отсутствии дросселя в сварочной цепи формирование наплавленных валиков не обеспечивается.

По-видимому, улучшение горения дуги при малых токах объясняется повышенным напряжением холостого хода и в связи с этим увеличением разрывной длины дуги. Также при коротком замыкании происходит накопление энергии в индуктивности, а после разрыва переключки и зажигания дуги эта энергия выделяется в дуге. Разбрызгивание при минимальных напряжениях практически не наблюдается.

---

## **Глава 4. СВАРКА НА МАЛЫХ ТОКАХ НЕПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ**

### **4.1. Особенности сварки тонкого металла неплавящимся электродом**

Сварку неплавящимся электродом целесообразно применять при работе с изделиями толщиной до 6–8 мм. При сварке на постоянном токе прямой полярности используют металлы без окисных пленок, которые препятствуют сплавлению кромок.

В дуге между электродами из чистого вольфрама 50 % общего количества теплоты выделяется на аноде, 25 % – в столбе, а 25 % – на катоде. Примерно такое же распределение теплоты при обычных режимах горения дуги получается на электродах с добавками оксидов редкоземельных металлов. Малое количество теплоты, выделяющейся на вольфрамовом катоде, можно объяснить эффектом «подстуживания» электрода вследствие затрат энергии на эмиссию электронов (на работу выхода). Видимо, с этим обстоятельством связана высокая стойкость вольфрамовых электродов при сварке на прямой полярности в инертном газе [106].

При обратной полярности напряжение дуги выше, чем при прямой полярности. На аноде-вольфраме выделяется большое количество тепла и происходят чрезмерный разогрев электрода и оплавление его конца. Во избежание разрушения вольфрамового электрода приходится снижать сварочный ток и производительность сварки. Поэтому сварка вольфрамовым электродом при постоянном токе обратной полярности практически не применяется.

Большинство исследователей считают, что причиной разрушения пленки окислов является процесс катодного распыления, который возникает при бомбардировке катода положительными ионами.

Однако этот механизм не является основным и единственным, поскольку на активных пятнах электродов при определённой плотности мощности развивается термический механизм разрушения пленок.

Разрушая окисную пленку на поверхности ванны, не избавляются от основного недостатка при сварке алюминия – окисных включений в металле шва, которые являются следствием оставшихся на торцах деталей пленок. Движение расплавленного металла ванны оказывает значительное влияние на разрушение пленок [133].

Ширина полосы катодной зачистки с увеличением скорости сварки уменьшается, а с ростом тока увеличивается. Повышение расхода защитного газа способствует увеличению ширины распыления окисной пленки [17].

При сварке в аргоне при переменном токе очистка поверхности свариваемого металла идет в полупериоде обратной полярности. В этом полупериоде электрод нагревается. При перемене полярности (минус на электроде) очистка не происходит, а электрод остывает. Эти обстоятельства способствовали распространению применения переменного тока для сварки алюминия в аргоне.

Сведения об истории развития сварки алюминия неплавящимися электродами приведены в [22, 28].

Создание иттрированных электродов позволило увеличить плотность мощности столба в 1,5–2 раза без опасного перегрева электродов, добиться существенного повышения эффективности плавления свариваемого металла. С помощью иттрированных электродов диаметром 10 мм появилась возможность сваривать за один проход однофазной высокоамперной дугой (до 960–1000 А) алюминиевые сплавы до 20 мм, а трехфазной дугой – до 30–40 мм. Использование трехфазной дуги позволяет снизить дефектность сварных соединений за счет сокращения пористости в металле шва, что происходит из-за уменьшения попадания водорода в сварочную ванну с присадочной проволокой, расход которой минимален при сварке с глубоким проплавлением неразделанных кромок, по технологическому бурту или нахлестке.

Также в трехфазной дуге устранение окисных включений в шве обеспечивается более эффективным катодным распылением трехфазной дуги и более интенсивным перемещением металла в глубокой сварочной ванне [119].

Значительное уменьшение оксидных пленок достигнуто при сварке неплавящимся электродом пульсирующей дугой. При этом за счет интенсификации перемешивания металла сварочной ванны и одновременно дегазации удалось уменьшить в три раза относительную протяженность включений окисной пленки в сварных швах сплава АМгб и вероятность образования ее протяженных включений. Резкие изменения амплитуды в период импульса и паузы (модулированный ток) обеспечили снижение в 7–10 раз суммарного объема пустот в сварных соединениях.

Также была установлена более высокая эффективность применения асимметричного разнополярного тока для дуговой и плазменной сварки. Благодаря сокращению времени протекания тока обратной по-

лярности до 10–30 % общего цикла снижается нагрузка на вольфрамовый электрод, а в периоды прямой полярности достигается более глубокое проплавление основного металла [28, 98].

В работе [38] осуществляли сварку алюминиевого сплава АМгб толщиной 18 мм в гелии погруженным вольфрамовым электродом на прямой полярности. Сварка производилась на подкладке из стали 1Х18Н9Т. Для качественного выполнения шва необходимо выдерживать зазор между кромками в пределах 0–0,6 мм, смещение кромок не более чем 0,5 мм и неприлегание к подкладке не более 0,5 мм. По данным, приведенным в [10], к недостаткам данного процесса следует отнести необходимость выполнять сварку на небольшой глубине дугового промежутка, что требует автоматического управления.

Приводятся результаты исследований катодной очистки и наплавки валиков на пластины из сплавов АМгб и АМц толщиной 0,5–1,5 мм, которые проплавлились на всю толщину сжатой малоамперной трехфазной дугой. Обеспечивается устойчивость режимов при токах в электродах и детали более 5 А. Зона ширины катодной очистки при силе тока более 5 А в зависимости от режимов шире в сравнении с двухдуговой наплавкой и при сварке разнополярными импульсами увеличивается [95, 120]. Но нет сведений о сварке алюминиевых сплавов толщиной менее 0,5 мм.

Сведений о применении азота для сварки неплавящимся электродом мало. Выполнены исследования по влиянию режимов сварки и чистоты газа на стойкость вольфрамового электрода при сварке меди в аргоне, азоте и их смесях с кислородом. При использовании электровакуумного азота, по ГОСТ 9293–59, потери вольфрамового электрода в 2–3 раза ниже, чем при аргонодуговой сварке. Это объясняется тем, что размеры катодного пятна при сварке в азоте значительно меньше, чем в аргоне, а также образованием нитридов лантана и вольфрама, уменьшающих потери электрода на испарение. Также примеси кислорода в азоте в сравнении со смесью аргона с кислородом не увеличивают потери вольфрама, так как менее резко увеличивается парциальное давление кислорода в газовой фазе из-за образования окислов азота NO, обладающих высокой стойкостью в интервале температур 2500–4000 К. При расходе азота от 9 до 18 л/мин потери вольфрамового электрода не изменяются [20].

В работе [43] отмечается, что из-за недостаточной устойчивости дуги в аргоне со стандартным вольфрамовым электродом при токе ниже 10–20 А аргонодуговая сварка не может конкурировать с микроплазменной в тех случаях, когда требуемый ток не превышает указанных значений. Исследованиями установлено, что устойчивость малоамперной дуги

в аргоне повышается, если применять ультратонкие (диаметром до 0,3 мм) вольфрамовые электроды, и дуга с электродом диаметром 0,16 мм устойчива при токе 1 А. Сваривались листы из стали 0X18H10T толщиной от 0,17 до 0,47 мм. Требования к сборке менее жесткие, чем указанные в работе [23]. При сварке малоамперной дугой с ультратонким вольфрамовым электродом также хорошо выражен эффект «самослежения», заключающийся в том, что анодное пятно и соответственно сварочная ванна перемещаются вдоль кромки соединяемых листов вслед за осевым перемещением горелки, не реагируя на случайные движения ее поперек оси шва. Этот эффект играет положительную роль, позволяя снизить требования к точности сборки и слежению за осью шва.

Зажигание дуги с ультратонким вольфрамовым электродом при помощи осциллятора оказалось неэффективным, и зажигать дугу рекомендуют касанием или с применением вспомогательной дуги [44].

Также осцилляторы препятствуют нормальному функционированию электронных блоков и требуют защиты компьютеров от воздействия импульсов тока значительной величины, которые возникают при возбуждении дуги осциллятором [138]. При зажигании дуги между вольфрамовым электродом и изделием осциллятор выключается далеко не сразу после возникновения дуги. В течение всего времени работы высокочастотного поджига на материале остаются отметины, из которых впоследствии развиваются микротрещины [35]. Для облегчения зажигания дуги зачастую используют функцию «горячего старта». В продолжении действия этой функции управляемый выпрямитель формирует импульсы тока, превышающие 100 А, длительностью и напряжением, достаточными для разогрева вольфрамового электрода и ионизации зазора между электродом и заготовкой. Однако для сварки тонких материалов этот метод малоприменим, т. к. приводит к выжиганию изделия. Приходится подкладывать медные пластинки, чтобы дать возможность дуге устояться перед переносом её на материал заготовки [35]. Для зажигания дуги вспомогательным электродом рекомендуют аккумуляторную батарею, обеспечивающую минимальную силу тока 5 А, или вспомогательный источник питания при силе тока 10 А и более [138].

Автор [45] считает, что устойчивость малоамперной дуги можно повысить, уменьшив теплоотвод от рабочего конца вольфрамового электрода, т. е. увеличив термическое сопротивление его вылета.

Недостатком сварки ультратонкими электродами следует считать невозможность применения стандартных горелок с диаметром вольфрамовых электродов 1–5 мм.

Не вызывает сомнений факт, что токовая нагрузка на анод резко возрастает с увеличением его поперечных размеров [1]. При обычных режимах с увеличением диаметра электродов токовая нагрузка увеличивается.

В настоящее время нет четких критериев, оценивающих устойчивое горение дуги на малых токах неплавящимся электродом. По-видимому, к ним следует отнести надежное зажигание дуги, длительное горение без угасания дуги, разрывную длину дуги, отсутствие блуждания активных пятен.

Устойчивое горение дуги при силе тока менее 10 А вольфрамовым электродом диаметром 1–5 мм может расширить технологические возможности малоамперной дуги.

По мнению авторов [59], исходные предпосылки для построения маломощных дуг пока не сформулированы, а единственным методом их изучения является эксперимент. Устойчивость горения дуги постоянного и переменного тока зависит от процессов, происходящих в катодной области. Но существует еще много явлений в дуге, которые современная физика не может истолковать исчерпывающим образом и с точными количественными расчетами.

Также дуговая сварка в защитных газах материалов толщиной менее 0,6 мм имеет ряд особенностей, которые обуславливаются трудностями, возникающими при изготовлении тонкостенных конструкций. Основные особенности сварки плавлением тонколистовых материалов следующие [23].

1. Высокие требования к точности сборки кромок для сварки. Допустимые зазоры и смещения кромок не должны превышать 10–20 % толщины основного металла. Для материалов толщиной менее 0,5 мм допустимые зазоры и смещения кромок составляют десятые и сотые доли миллиметра. Обеспечение такой точности подготовки соединения является сложной технической задачей.

2. Высокая чувствительность процесса к колебаниям теплового режима из-за небольшого теплосодержания сварочной ванны. Изменение тепловой мощности дуги, условий теплоотвода с места сварки нарушает термическое равновесие в сварочной ванне, что приводит к изменению размеров шва, а в ряде случаев к прожогам и непроварам.

3. Значительное влияние сил поверхностного натяжения сварочной ванны на формирование шва. При сварке тонколистового материала сварочная ванна находится в состоянии динамического равновесия под действием сил поверхностного натяжения, веса жидкого металла и давления

дуги. При этих условиях формирование шва в основном обуславливается поверхностным натяжением. При плотном стыке силы поверхностного натяжения оказывают благоприятное влияние на формирование шва. При увеличении зазоров поверхностное натяжение может способствовать нарушению формирования шва и несплавлению кромок.

4. Повышенная склонность к деформациям при сварке. Значительную трудность при сварке тонколистовых материалов представляют временные и остаточные деформации свариваемого изделия в результате местной потери устойчивости кромок. Деформация кромок в процессе сварки может являться причиной прожогов.

В связи с этим приводим литературные данные о реальных процессах, наблюдаемых при сварке материалов малой толщины неплавящимся электродом.

Основными недостатками сварки вольфрамовым электродом в инертных газах считают трудность зажигания дуги и общую неустойчивость дуги при сварке на малом токе. Основные параметры режима сварки для электродов диаметром 0,5 и 1 мм определяют исходя из следующих соображений:

- на каждые 0,025 мм толщины листов из нержавеющей стали, подлежащих сварке, берется сила тока, равная 1 А;
- расстояние между электродом и деталью устанавливается равным 0,025 мм на каждые 0,025 мм толщины листов [136].

В работе [137] при сварке вольфрамовым электродом в инертных газах алюминиевых сплавов толщиной 0,08–1 мм приведены сведения, относящиеся к сборке, и режимы сварки. При толщине фольги 0,2 и 0,4 мм допустимая высота заусенцев 0,02 и 0,05 мм, т. е. эта высота не должна превышать 10 % толщины фольги. Сварку ведут встык или узким перекрытием кромок. Сварку встык рекомендуют при толщине фольги менее 0,4 мм, если материал обладает достаточной жесткостью. Зазор между кромками должен быть меньше 10 % от толщины фольги. Диаметр электрода при толщине фольги 0,2 и 0,4 мм равен 1 и 1,5 мм.

При толщине фольги 0,08 мм и диаметре электрода 1 мм – сила тока 3 А. При толщине 0,4 мм рекомендуемая сила тока – 17 А [137].

Автор [39] считает, что отклонение дуги, обусловленное перемещением анодного пятна сварочной ванны, является результатом недостаточной собственной электродинамической устойчивости столба дуги, противодействующей возмущающим силам. По его данным, при сварке различных материалов (сваривались плоские образцы, имитирующие стыковые соединения и торцы тонких пластин, имитирующих

отбортованные соединения) толщиной 0,05–1 мм дуга стабилизируется газодинамическим и магнитным способом.

По данным [134], трудно обеспечить качественную сварку металла толщиной 0,3–0,9 мм. Часто встречаются неустраняемые дефекты в виде прожогов, причем с уменьшением толщины металла их вероятность возрастает. Причина – сборка стыков под сварку с зазорами, превышающими 15–20 % толщины металла, а также деформация кромок вследствие сварочного нагрева и повышенной жесткости свариваемых полос из меди, легированной бериллием. Для сварки полос из меди, легированных бериллием, рекомендуют сварку в импульсном режиме неплавящимися электродами в аргоне.

Коробление кромок наиболее эффективно устраняется качеством прижимов и расстоянием до сварочной ванны: чем тоньше металл, тем ближе должны быть расположены прижимы. Для получения хорошего качества соединений полос толщиной 0,3–0,9 мм, а также разнотолщинного металла в пределах 0,3–2,5 мм рекомендуется сборка кромок внахлестку, а для равнотолщинного металла от 0,9 до 2,5 мм – стыковая сборка. При этом оптимальные параметры процесса сварки обеспечивают достаточные прочностные и пластические свойства сварных соединений [134].

В работе [24] теоретически определены допустимые зазоры при импульсно-дуговой сварке торцевых соединений различных материалов малой толщины без применения присадочного металла. По мере уменьшения толщины металла для получения надежного сварного соединения увеличивается действие сил поверхностного натяжения. При сварке с зазором на каждой из соединяемых кромок первоначально образуются капли расплавленного металла, которые для получения монолитного шва должны затем слиться в одну общую каплю – сварочную ванну.

При наличии между кромками зазора и ограниченной мощности дуги процесс образования шва происходит следующим образом: 1 – раздельный рост капли; 2 – касание капель; 3 – образование общей капли при сохранении прежних границ смачивания кромок; 4 – кристаллизация и остывание общей капли (сварочной ванны). В случае толщины металла не более 0,5 мм рекомендуемые зазоры составляют 35 % и более от толщины кромки и превышение одной кромки над другой в среднем – 150 % от толщины кромок [24]. Также для повышения устойчивости сварочной ванны рекомендуют стабилизацию положения свариваемых кромок, уменьшение давления дуги и его более равномерное распределение по пятну нагрева [121].

Но авторы [24, 121] не рассматривают особенности волнообразного формирования швов.

При толщине торца пластин 0,6–1,8 мм и сварке плазменной дугой прямой полярности максимальным считается ток, при котором сохраняется нормальное формирование оплавленного слоя. (Местные превышения закристаллизовавшегося металла не превышают 10 % толщины образца.) С увеличением тока волновая поверхность занимает весь торец образца [128]. Также, по мнению авторов [129, 130, 131], в настоящее время отсутствуют четкие представления о закономерностях волнового формирования швов тонколистовых соединений.

Проведенный литературный обзор показал, что сварка алюминия толщиной менее 0,5 мм возможна только микроплазменной сваркой малоамперной сжатой дугой. Автором отмечается [48], что при силе тока менее 10 А стандартными электродами диаметром 1 мм и более не обеспечивается устойчивое горение дуги. При сварке током более 1 А применяли вольфрамовые электроды диаметром 0,1–0,3 мм, что не позволяет использовать стандартные горелки и усложняет технологию [48].

#### **4.2. Особенности горения малоамперной дуги в защитных газах неплавящимся электродом**

Для оценки устойчивости горения малоамперной дуги выполнялись следующие эксперименты. Оценивали влияние защитных газов – аргона, азота и гелия – на устойчивость горения дуги при сварке током 1–10 А вольфрамовым электродом диаметром 1–6 мм. Результаты исследований далее использовали для выбора реальных режимов сварки изделий малой толщины.

Питание дуги осуществлялось от однофазного выпрямителя с конденсаторным умножителем напряжения [66], для удвоения напряжения применяли электролитические конденсаторы емкостью 1000–2000 мкФ. После выпрямительного блока в сварочную цепь включали дроссель индуктивностью 0,6 мГн и при токе менее 4–5 А дополнительно индуктивные сопротивления [72]. Для плавной регулировки тока до 5 А применяли активные сопротивления. Горелку фиксировали над изделием с возможностью ее перемещения по вертикали. Дуга зажигалась замыканием дугового промежутка вольфрамовым или угольным электродом.

Перед возбуждением дуги и после ее прерывания в течение 3–5 с защищали электрод и зону горения дуги защитным газом.

Горение дуги считали устойчивым при ее возбуждении в момент замыкания дугового промежутка и горении при стабильных показаниях электроизмерительных приборов класса 0,1–0,5. Следует отметить, что при сварке в аргоне током менее 1 А наблюдалось интенсивное блуждание активных пятен, закономерности перемещения которых не выявлены. Например, при сварке током прямой полярности наблюдали активное пятно на боковой поверхности электрода и искривление столба дуги. Формы внешнего столба дуги, плазменных факелов на различных режимах отличались.

На рис. 4.1 приведены статические ВАХ дуги при горении без ее перемещения. Дуга горит на алюминиевой подложке. Напряжение холостого хода 82–95 В, вылет электрода 15–20 мм, падение напряжения на вылете не учитывали, диаметр электрода 1 мм, длина дуги 1 мм, расход газа 5 л/мин.

При сварке в аргоне током 1 А и менее вольфрамовым электродом диаметром 1 мм дуга зажигается и горит при включении в сварочную цепь постоянного тока дросселя индуктивностью 5–10 мГн. С уменьшением индуктивности до 0,6 мГн дуга возбуждается и горит при токе более 3–3,5 А.

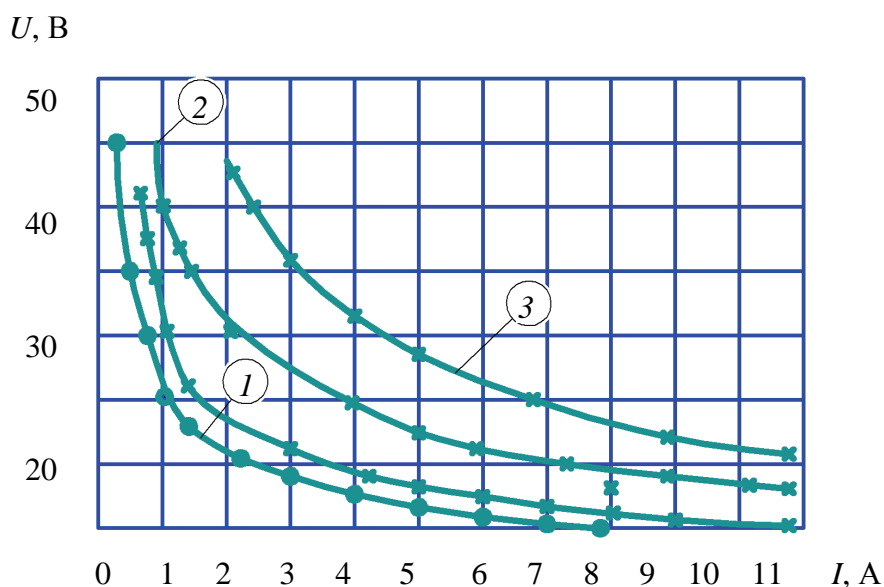


Рис. 4.1. ВАХ дуги при сварке в аргоне (1), азоте (2) и гелии (3): • – обратная полярность; × – прямая полярность

В азоте и гелии при токе 1 А и более 2 А соответственно дуга возбуждается и горит при индуктивности дросселя 5–10 мГн. С уменьшением индуктивности дуга в азоте и гелии возбуждается при токе не менее 5–6 А. С увеличением напряжения холостого хода источника питания свыше 95 В возбуждение дуги в азоте и гелии улучшается.

При горении дуги на токе обратной полярности 5–6 А остро заточенный конец электрода диаметром 1 мм из-за оплавления приобретает шаровидную поверхность. В аргоне дуга горит на токе менее 1 А обратной полярности и на алюминии заметны следы катодного распыления. При сварке в аргоне также наблюдаются следы катодного распыления и на алюминиевой фольге толщиной 0,1 мм без ее проплавления.

При сварке током обратной полярности при защите дуги гелием наблюдаются следы катодного распыления. В зоне горения дуги в азоте высокой чистоты при токе обратной полярности 5–6 А катодное распыление не обнаружено. При зажигании дуги в аргоне на графите с переходом на алюминий наблюдается черный налет.

На рис. 4.2 приведены статические ВАХ дуги при сварке в аргоне вольфрамовым электродом диаметром 6 мм и алюминиевым электродом диаметром 5,5 мм с углом заточки 65–70°. Дуга существует на токе менее 1 А и легко возбуждается. При токе прямой полярности 0,4–0,6 А наблюдаются блуждание катодного пятна выше заточки электрода и фиксирование анодного пятна на подложке на расстоянии 5–6 мм от оси электрода. При токе прямой полярности на поверхности алюминиевого электрода обеспечивается катодная зачистка.

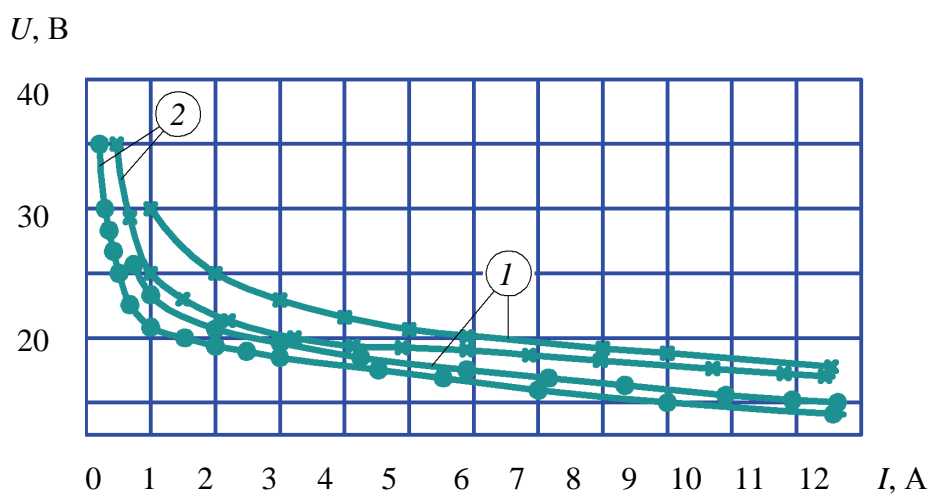


Рис. 4.2. ВАХ дуги при сварке в аргоне: 1, 2 – вольфрамовый и алюминиевый электроды соответственно (обозначения см. на рис. 4.1)

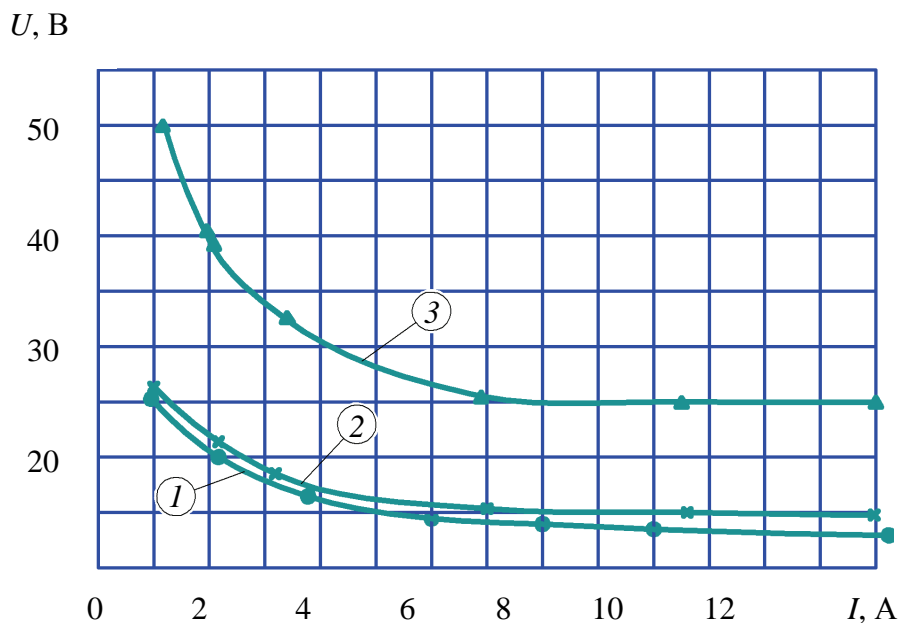


Рис. 4.3. ВАХ дуги при сварке стали (1) и меди (2) в аргоне и меди в азоте высокой чистоты (3)

При сварке алюминия в азоте вольфрамовым электродом диаметром 6 мм дуга горит непрерывно при токе более 1,5–2 А.

При сварке вольфрамовым электродом диаметром 6 мм и алюминиевым электродом диаметром 5,5 мм при токе менее 1 А дуга горит в аргоне при включении в сварочную цепь дополнительной индуктивности 5–10 мГн. Уменьшение индуктивности до 0,6 мГн не обеспечивает горения дуги при токе менее 1 А.

На рис. 4.3 приведены статические ВАХ дуги при диаметре вольфрамового электрода 1 мм и длине дугового промежутка 1 мм. При этом минимальный ток горения дуги в аргоне на стали и меди составляет 0,6–0,65 А. Дуга на токе менее 0,6 А возбуждается, но через 2–3 с прерывается. Для изделия из меди вследствие увеличения теплоотвода напряжение дуги в аргоне выше и значительно выше при защите дуги азотом высокой чистоты, минимальный ток при этом составляет 1,5 А.

На рис. 4.4 приведены статические ВАХ дуги при сварке вольфрамовым электродом диаметром 6 мм с углом заточки 65–70 градусов и длине дугового промежутка 1 мм и защите дуги аргоном, азотом высокой чистоты и гелием. Дуга в гелии на стали горит при силе тока более 2 А, а в азоте на меди – при силе тока более 1,5 А.

На рис. 4.5 отражена зависимость напряжения дуги при сварке в аргоне от расстояния между вольфрамовым электродом диаметром 1 мм и алюминиевой подложкой. Ток дуги составляет 1,5 А, дуга зажигалась

вольфрамовым и графитовым электродами, индуктивность дросселя – 5–10 мГн. Предельная длина дуги при неподвижном электроде 7–8 мм.

При сварке алюминия, стали, графита и меди дуга горит и при перемещении горелки вручную при индуктивности дросселя 5–10 мГн и токе 0,5–1,0 А; зажигание при этом осуществляется касанием изделия вольфрамовым электродом диаметром 0,5–6,0 мм.

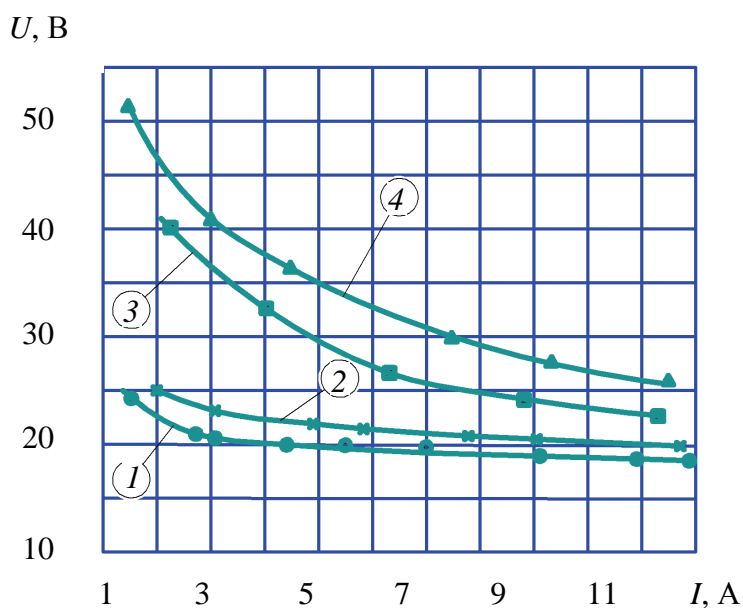


Рис. 4.4. ВАХ дуги при сварке стали (1) и меди (2) в аргоне, стали в гелии (3) и меди в азоте высокой чистоты (4)

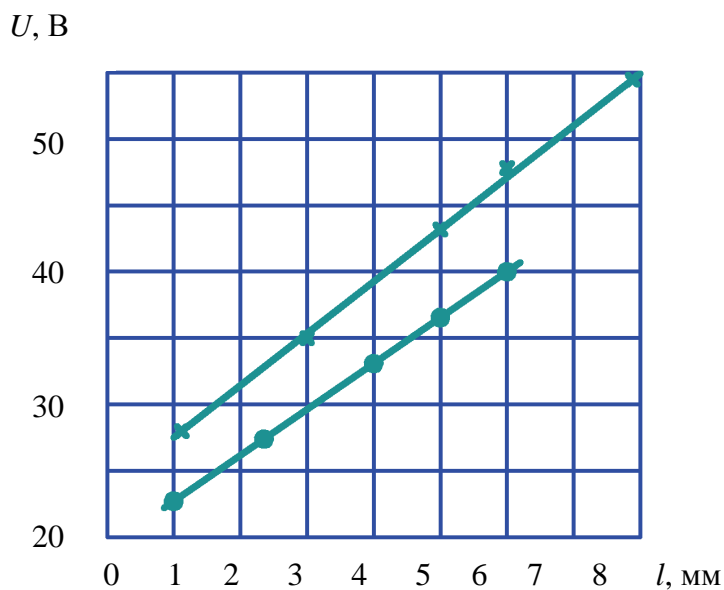


Рис. 4.5. Зависимость напряжения дуги при сварке в аргоне от длины дугового промежутка: • – обратная полярность; × – прямая полярность

По-видимому, горение дуги при токе не более 1 А при питании от выпрямителя с конденсаторным умножителем напряжения и индуктивностью сварочной цепи постоянного тока 5–10 мГн объясняется накоплением энергии в дросселе и передачей ее на дуговой промежуток в моменты угасания дуги. Также при сварке на малых токах использование дросселя и конденсатора уменьшает пульсацию выпрямленного напряжения, что способствует устойчивому возбуждению и горению дуги [73].

Также проводились исследования при передвижении дуги относительно изделия.

С целью исключения влияния на результаты опытов качества сборки выполняли наплавку на алюминиевые образцы толщиной 0,18; 0,5; 1 мм вольфрамовым электродом диаметром 2 мм в аргоне.

Образцы толщиной 0,5 и 1 мм перед наплавкой зачищались вращающейся металлической щеткой.

На рис. 4.6 показана катодная зачистка на образце толщиной 0,5 мм при следующих режимах: полярность обратная,  $I_d = 7-8$  А,  $U_d = 17$  В,  $V_{св} = 3,78$  м/ч.

На прямой полярности при минимальной длине дуги ( $I_d = 11$  А,  $U_d = 16,5$  В,  $V_{св} = 3,78$  м/ч,  $t = 0,5$  с) катодной зачистки нет (рис. 4.7).



Рис. 4.6. Катодная зачистка в зоне горения дуги в аргоне

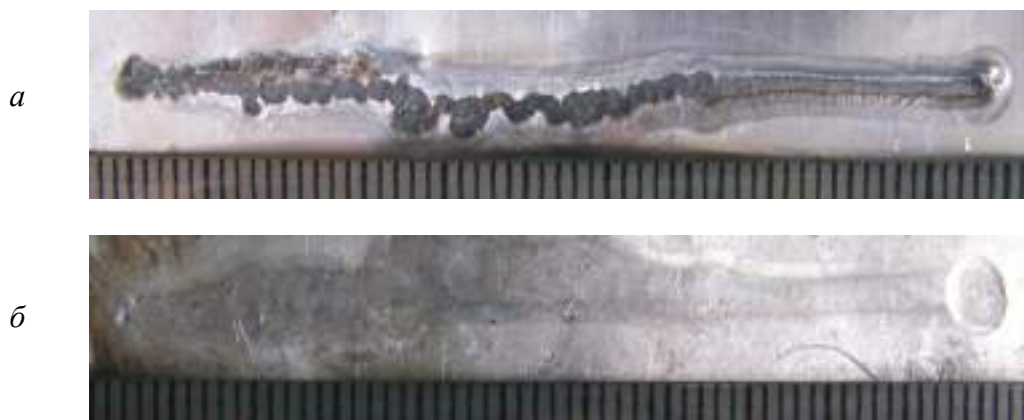


Рис. 4.7. Отсутствие катодной зачистки на прямой полярности. Наплавленный валик (а) и его обратная сторона (б)

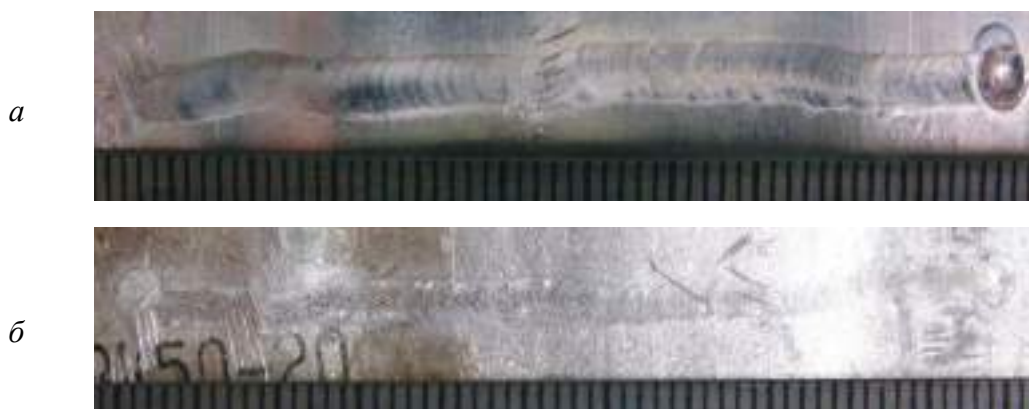


Рис. 4.8. Катодное распыление в зоне горения дуги:  $I_d = 10\text{--}11\text{ А}$ ;  $U_d = 16,5\text{ В}$ ; толщина образца 0,5 мм. Наплавленный валик (а) и его обратная сторона (б)

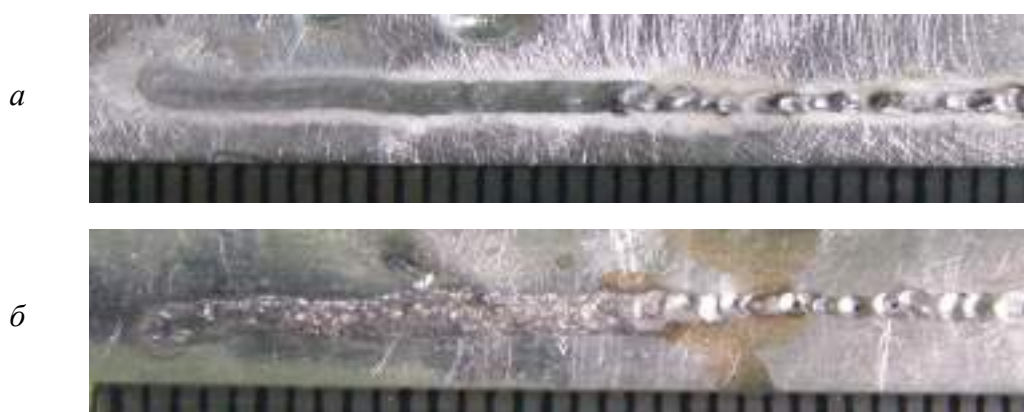


Рис. 4.9. Лицевая сторона шва (а); обратная сторона шва (б)

Катодное распыление на обратной полярности с небольшим оплавлением в конце шва показано на рис. 4.8.

При толщине алюминиевого образца 0,18 мм и без плотного поджатия к подложке при силе тока 4 А и напряжении дуги 15 В обеспечивается полное проплавление образца без вытекания из ванны (рис. 4.9).

### 4.3. Сварка тонкого металла по отбортовке

В связи со сложностью сборки стыковых соединений толщиной 0,05–0,3 мм производилась сварка различных материалов по отбортовке вольфрамовым электродом. Перед сваркой образцы фиксировали в зажимном приспособлении с высотой отбортовки 1,5–3 мм. Напряжение холостого хода выпрямителя с конденсаторным умножителем напряже-

ния было 75–100 В. Для обеспечения крутопадающей характеристики выпрямителя и регулирования силы тока менее 30 А применялись активные балластные сопротивления. Дуга зажигалась касанием изделия вольфрамовым электродом диаметром 1–2 мм, сварочная горелка перемещалась относительно изделия вручную и автоматически.

Сваривали образцы из малоуглеродистой стали, стали X18H9T, меди, латуни, алюминия. Для защиты сварочной ванны применяли аргон и азот высокой чистоты. Расход газа составлял 5 л/мин, поддерживалась длина дуги 1–1,5 мм. Проплавление кромок обеспечивалось на режимах, представленных в [74, 75]. Применялась прямая полярность, а для сварки алюминия – обратная. Результаты показаны в табл. 4.1.

При недостаточной скорости сварки увеличиваются наплывы по свариваемым кромкам и наблюдается «пилообразность» шва, но в связи с устойчивым горением дуги проплавление обеспечивается. Перед сваркой образцы из алюминия зачищались наждачной шкуркой и обезжиривались.

Устойчивость горения оценивалась осциллографированием электрических параметров и видеосъемкой через светофильтры.

Кинограммы горения дуги в аргоне между вольфрамовым электродом диаметром 2 мм и алюминиевой подложкой показаны на рис. 4.10.

Осциллограмма процесса горения дуги, соответствующая кинограмме рис. 4.11, показана на рис. 4.12.

На прямой и обратной полярности наблюдаются искривление столба дуги и блуждание активного пятна.

Таблица 4.1

### Результаты экспериментов

Материал	Толщина, мм	Сила сварочного тока, А	Защитный газ
Малоуглеродистая сталь	0,1	2,5	Аргон
	0,2	5,2	Аргон
Сталь X18H9T	0,2	5	Аргон
	0,2	3	Азот
Медь	0,1	7,5	Аргон
	0,1	4,5	Азот
	0,05	3,5	Азот
Латунь	0,06	5	Аргон
Алюминий	0,16	9,4	Аргон

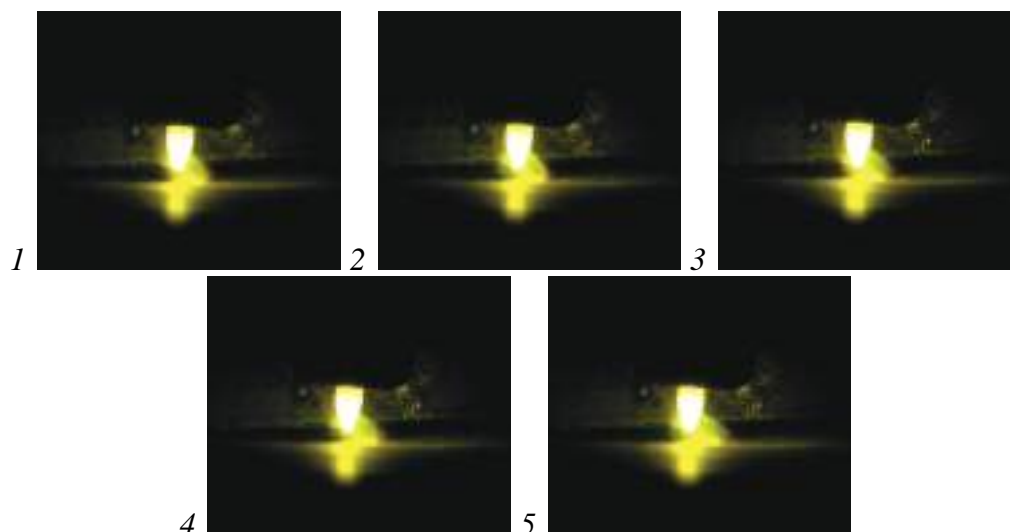


Рис. 4.10. Обратная полярность:  $I_d = 11$  А,  $U_d = 17$  В

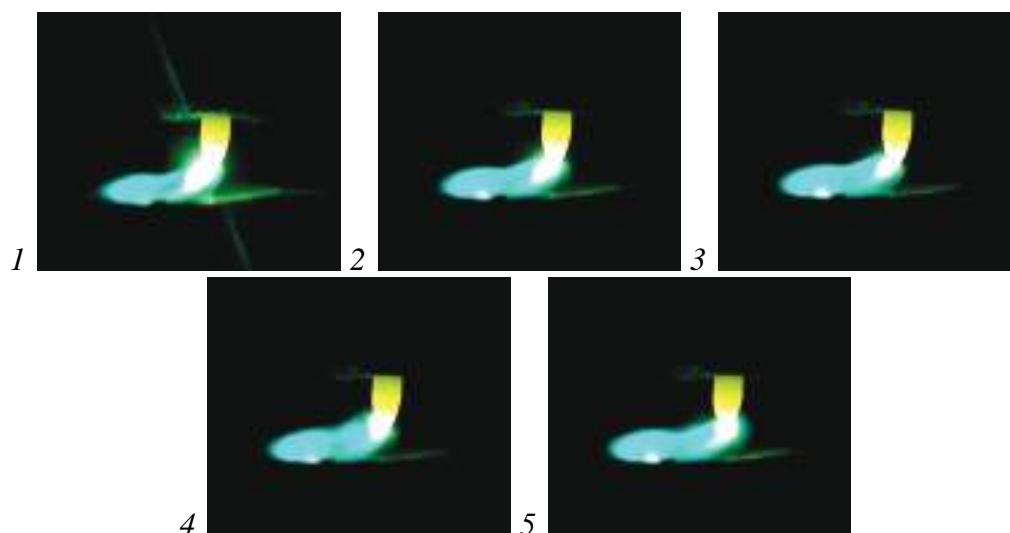


Рис. 4.11. Прямая полярность:  $I_d = 9$  А,  $U_d = 16$  В

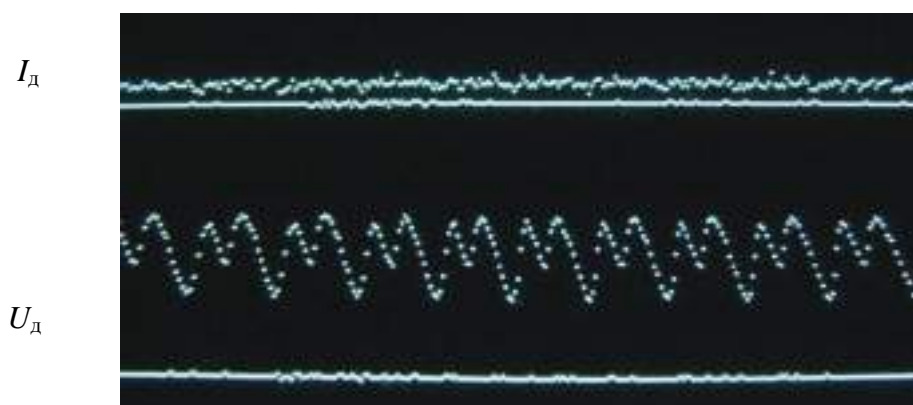


Рис. 4.12. Осциллограмма горения дуги на прямой полярности:  $I_d = 9$  А;  $U_d = 16$  В

Также при горении на прямой полярности в азоте наблюдаются блуждание пятен и искривление столба дуги на изделии из нержавеющей стали (рис. 4.13).

Кинограмма горения дуги в аргоне и осциллограмма показаны на рис. 4.14.

Вопросу блуждания активных пятен и искривления столба дуги при горении дуги плавящимся электродом посвящен ряд работ [36, 46, 57]. Эти явления на протяжении многих лет объясняются на уровне гипотез.

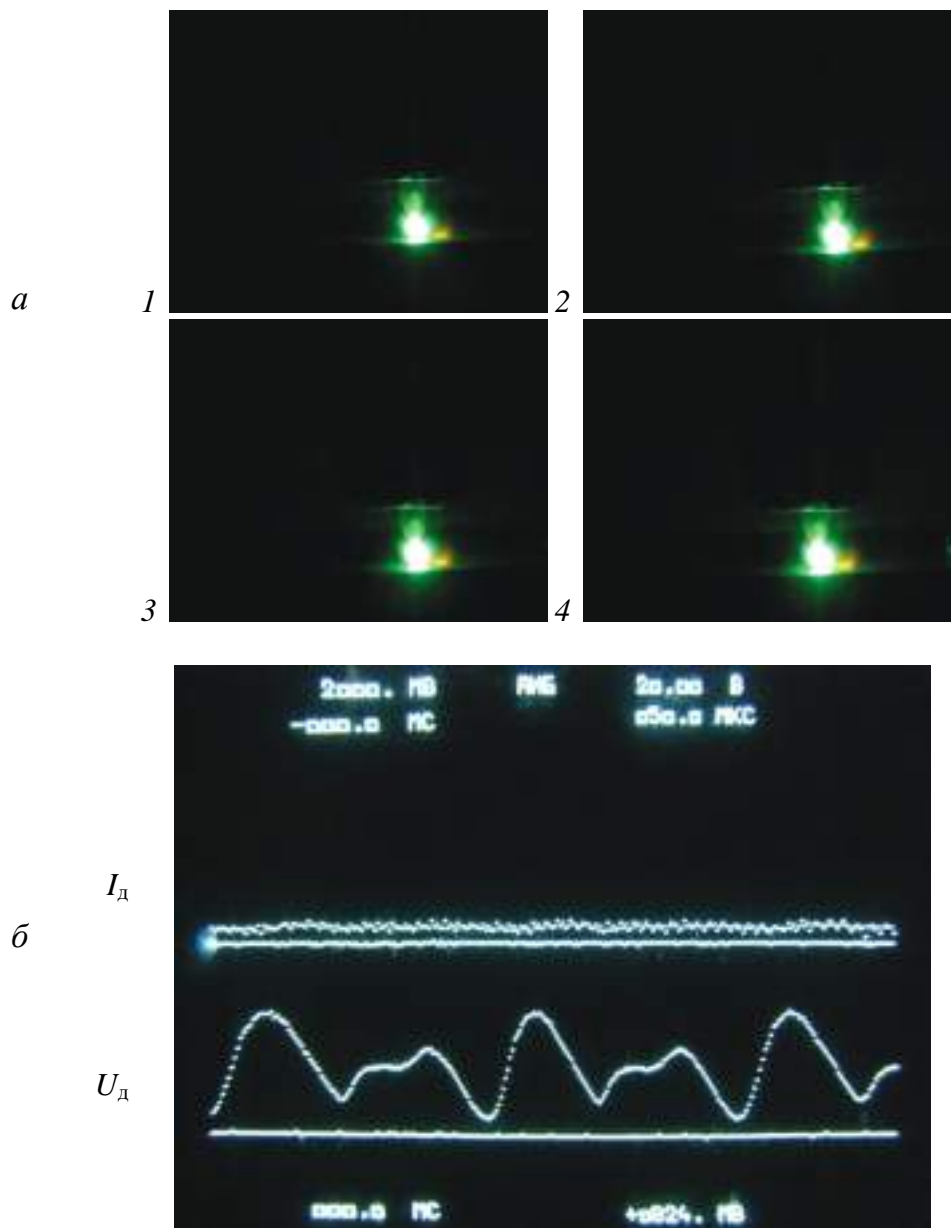


Рис. 4.13. Дуга: *а* – кинограмма, азот,  $I_d = 5$  А,  $U_d = 35$  В;  
*б* – осциллограмма, азот

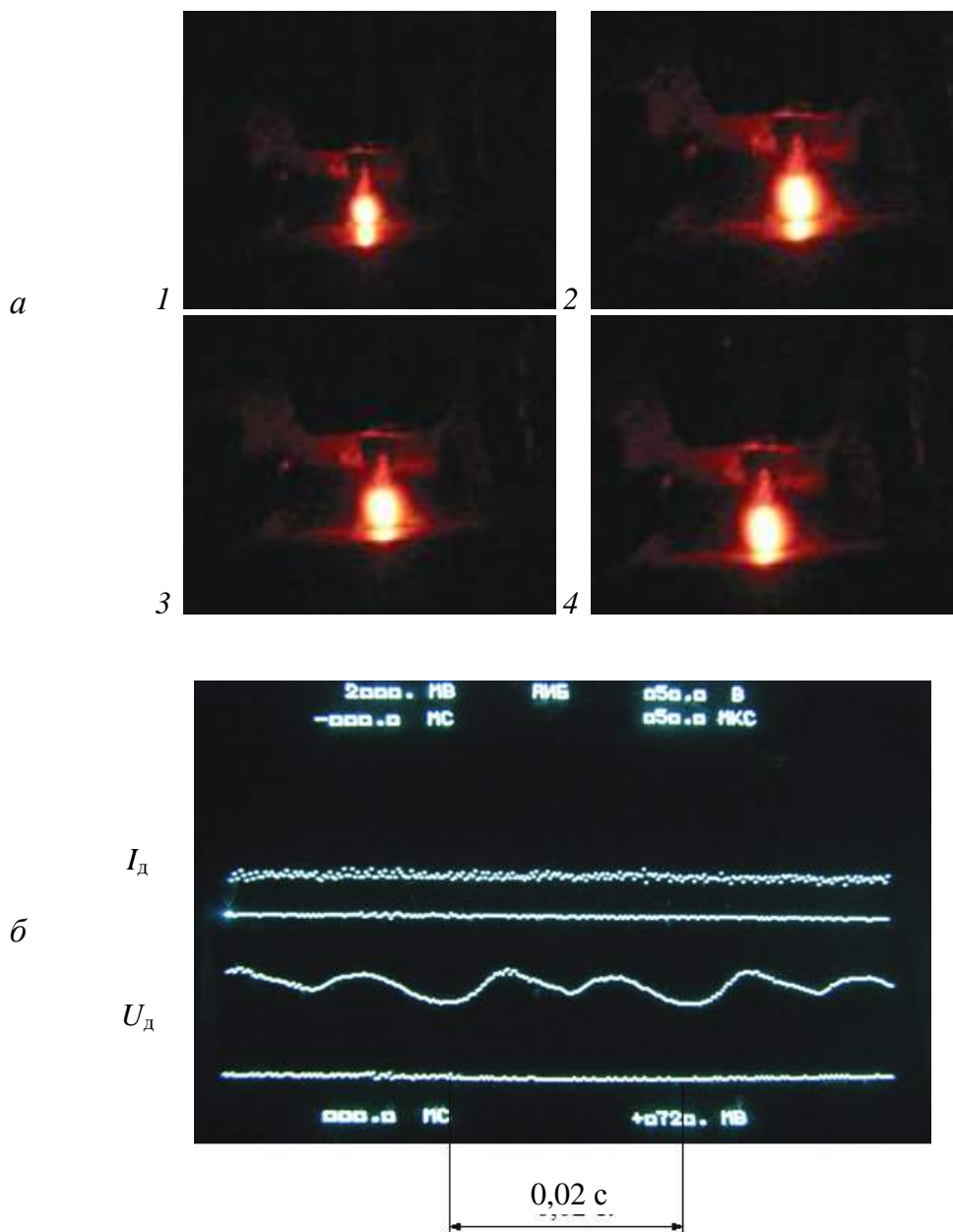


Рис. 4.14. Дуга: *а* – кинограмма, аргон,  $I_d = 5$  А,  $U_d = 22,5 - 25$  В;  
*б* – осциллограмма, аргон

При автоматической сварке горелка для сварки неплавящимся электродом хомутами крепилась к мундштуку головки АБС.

При толщине изделия 0,05–0,2 мм точное направление вольфрамового электрода вдоль линии сварного шва обеспечить сложно. Поэтому при автоматической сварке по отбортовке смещение электрода от оси шва колебалось и составляло 0,2–0,5 мм. При ручной дуговой сварке длину дуги в пределах 1–1,5 мм и равномерное перемещение горелки поддерживать еще труднее.

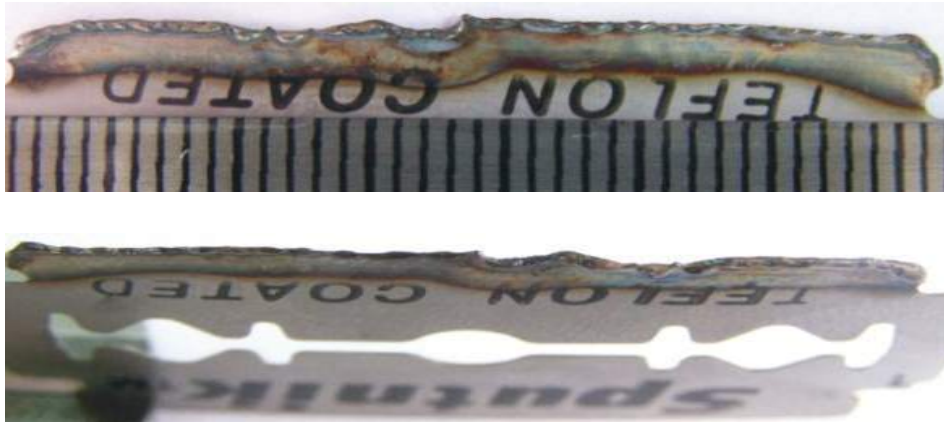


Рис. 4.15. Бритвенное лезвие, сваренное вручную:  $I_d = 3 \text{ A}$ ;  $U_d = 30 \text{ B}$



Рис. 4.16. Образцы из стали 1X18H9T:  $I_d = 3 \text{ A}$ ;  $U_d = 28 \text{ B}$

На рис. 4.15 изображено сварное соединение бритвенных лезвий, выполненное вручную в аргоне. Острые кромки лезвий перед сваркой не обрабатывались.

Наблюдаются «пилообразность» шва и неравномерность по его высоте в случае неравномерного перемещения горелки.

Образцы из стали 1X18H9T толщиной 0,2 мм, сваренные в чистом азоте, показаны на рис. 4.16.

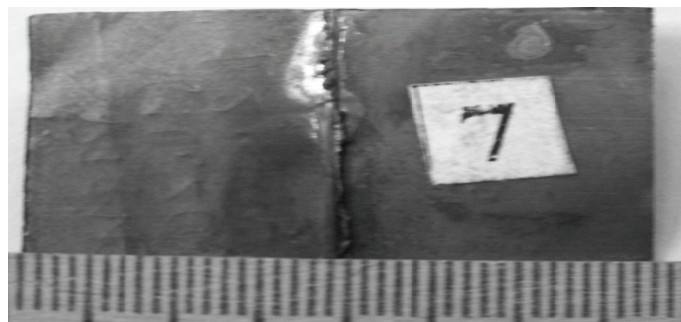
«Пилообразность» шва наблюдается при сварке вручную на минимальном токе, а также при сварке меди толщиной 0,1 мм в аргоне и азоте (рис. 4.17).

На рис. 4.18 изображен шов в аргоне при сварке латуни Л62 толщиной 0,06 мм.

Для уменьшения «пилообразности» сварку необходимо выполнять при минимальной силе тока.

При автоматической сварке малоуглеродистой стали толщиной 0,1 мм в аргоне и при минимальной силе тока также не удалось избежать «пилообразности» шва. На рис. 4.19 показан образец толщиной 0,1 мм.

*а*



*б*

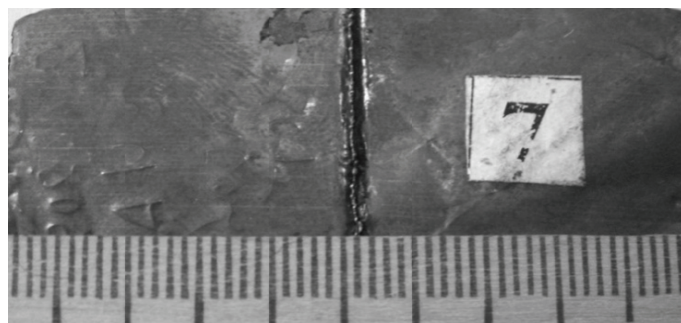


Рис. 4.17. Шов: *а* – аргон,  $I_d = 5$  А; *б* – азот  $I_d = 3,8$  А

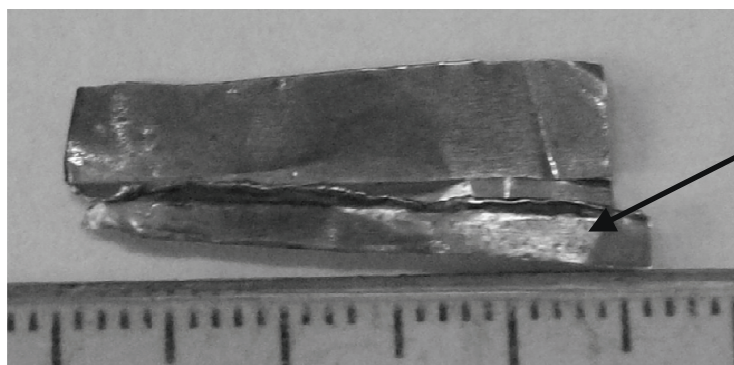


Рис. 4.18. Шов при сварке латуни:  $I_d = 5$  А

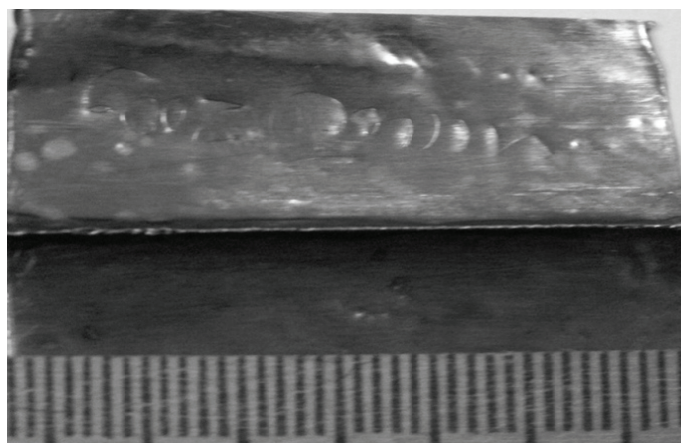


Рис. 4.19. Шов:  $I_d = 4,5$  А,  $U_d = 29$  В

Для облегчения сборки образец из латуни Л62 толщиной 0,016 мм изгибается (рис. 4.20, *а*) и подвергается пластической деформации (рис. 4.20, *б*).

Образец после сварки показан на рис. 4.21.

С уменьшением тока «пилообразность» отсутствует (рис. 4.22), но проплавление по всей длине шва в азоте не обеспечивается.

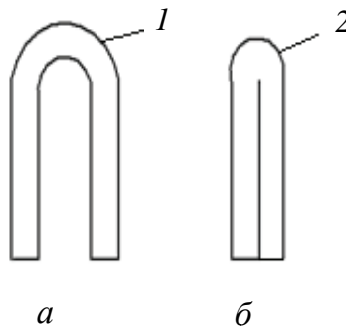


Рис. 4.20. Подготовка образца для сварки: 1, 2 – зона выполнения шва

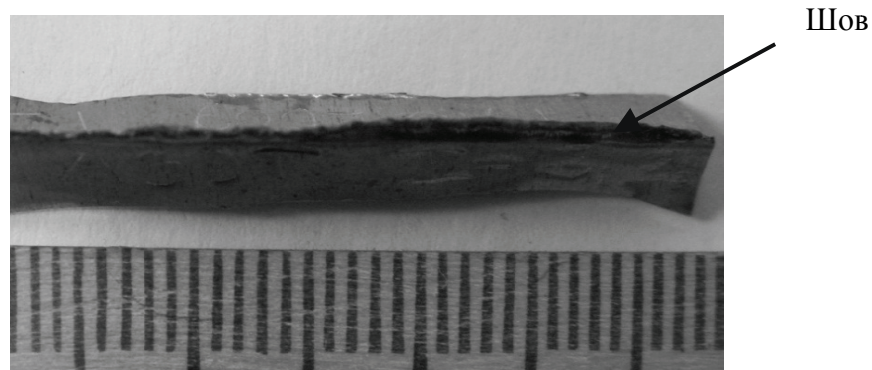


Рис. 4.21. Шов, сваренный в чистом азоте.  $I_d = 3,2$  А,  $U_d = 29-30$  В,  $V_{св} = 3,78$  м/ч

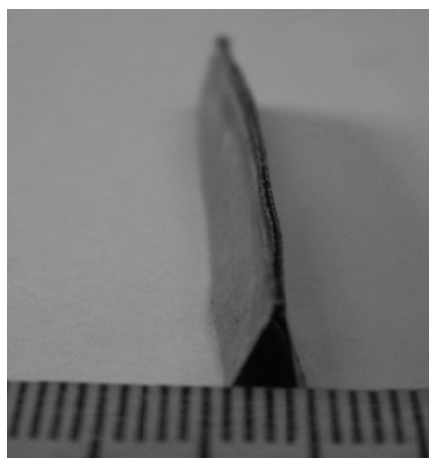


Рис. 4.22. Шов:  $I_d = 3,7$  А,  $U_d = 28-30$  В, толщина образца из латуни Л62 – 0,2 мм

При сварке алюминия толщиной 0,16 мм в аргоне на обратной полярности вручную также наблюдается «пилообразность» шва (рис. 4.23).

При сварке по отбортовке образцов толщиной 0,06 мм и более цилиндрическим электродом диаметром не менее 1 мм, заточенным на «иглу» на существующем оборудовании (опыты проводились на автомате АБС), трудно обеспечить точное позиционирование электрода относительно стыка.

Проблему позиционирования можно решить благодаря использованию плоского электрода. Он расположен перпендикулярно свариваемому стыку (рис. 4.24).



Рис. 4.23. Образец, сваренный по отбортовке: *а* – вид сверху, *б* – вид сбоку.  $I_d = 4,5\text{A}$ ;  $U_d = 15\text{ В}$ , толщина образца 0,2 мм

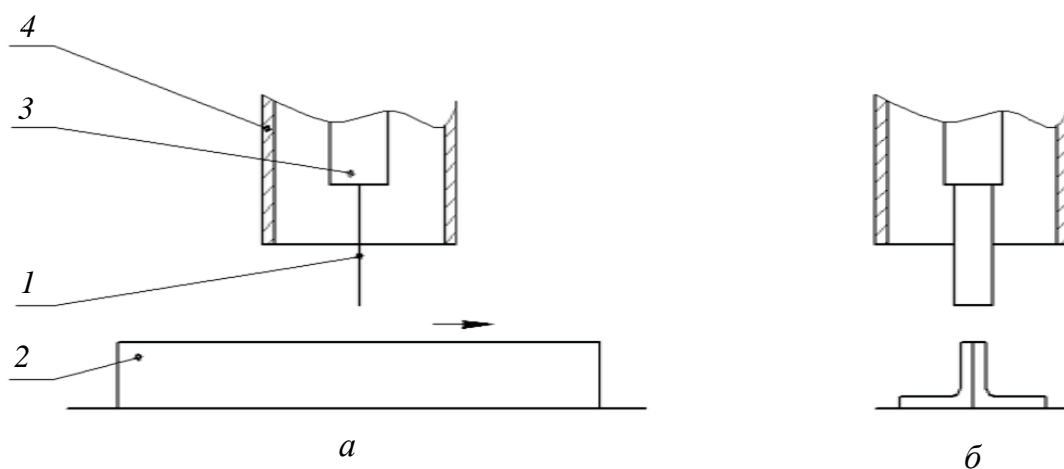


Рис. 4.24. Схема сварки образца по отбортовке: *а* – вид спереди, *б* – вид сбоку. 1 – плоский электрод; 2 – образец; 3 – цанга; 4 – сопло



Рис. 4.25. Образец, сваренный по отбортовке: *а* – вид сверху; *б* – вид сбоку

Имеются сведения о повышении стойкости прямоугольных вольфрамовых электродов в сравнении с цилиндрическими [132], но отсутствуют сведения о сварке плоскими вольфрамовыми электродами изделий толщиной 0,1 мм и более.

Плоским электродом (4×0,7 мм) из вольфрамомолибденового сплава сваривалась латунь толщиной 0,06 мм по отбортовке в аргоне.

Режимы наплавки следующие: полярность прямая; расстояние от электрода до стыка 0,5 мм;  $I_d = 3$  А;  $U_d = 18$  В; скорость сварки 7,7 м/ч.

Внешний вид образца показан на рис. 4.25. Наблюдается небольшая пилообразность.

#### 4.4. Особенности сварки угольным электродом на малых токах

Сварка малоуглеродистой стали толщиной 0,6 мм на весу без прожогов с полным проплавлением возможна покрытыми электродами диаметром 2 мм при силе тока 11–13 А и в углекислом газе проволокой 0,8 мм при силе тока 10 А [76, 77]. По сравнению со сваркой покрытыми электродами в углекислом газе обеспечиваются более равномерные швы по ширине и высоте, но высота усиления при полуавтоматической сварке составляет 1,5–2,5 мм, а ширина – 3–4 мм.

Сварка угольным электродом может применяться вместо сварки плавящимся электродом и неплавящимся вольфрамовым электродом в защитных газах.

Имеются сведения о применении воздушно-дуговой строжки графитовым электродом. Для уменьшения науглероживания и газонасыщения сварочной ванны применяется прямая полярность [63].

При сварке металлическим плавящимся электродом углекислый газ окисляет расплавленный металл.

При сварке неплавящимся угольным электродом это явление наблюдается в значительно меньшей степени. При обдувании струей углекислого газа раскаленного угольного электрода образуется окись углерода, которая не является окислителем и предохраняет расплавленный металл в зоне сварки от окисления. При выходе из зоны сварки окись углерода сгорает, образуя безвредный углекислый газ.

По-видимому, при горении угольной дуги в условиях атмосферы наблюдается аналогичное явление. Но существенным недостатком сварки угольным электродом в углекислом газе и в условиях атмосферы является окисление (сгорание) угольного электрода.

В литературе отсутствуют сведения о применении сварки угольным электродом при силе тока 1–15 А.

Закономерности блуждания активного пятна не выявлены. При плоской поверхности торца электрода активное пятно чаще стабилизируется ближе к его оси.

При конической заточке торца электрода активное пятно в основном стабилизируется на его конце.

С уменьшением индуктивного сопротивления дросселя до 0,5 мГн зажигание дуги при силе тока 2–3 А ухудшается, дуга больше блуждает и угасает.

Для определения статической вольт-амперной характеристики дуги графитовый электрод диаметром 6 мм с плоским торцом и конической заточкой торца устанавливался неподвижно на расстоянии 0,6 мм от угольной пластины. Напряжение холостого хода источника питания в конденсаторном умножителе напряжения составляло 100 В, на прямой полярности дуга зажигалась замыканием и размыканием дугового промежутка вольфрамовым электродом диаметром 1,5 мм.

В связи с быстрым окислением электрода и изменением длины дугового промежутка дуга горела 4–5 с. Перед каждым зажиганием дуги длина дугового промежутка устанавливалась равной 0,6 мм. В процессе горения дуги визуально фиксировалось поведение активных пятен и столба дуги.

На рис. 4.26 показаны статические вольт-амперные характеристики угольной дуги в условиях атмосферы.

При питании дуги от однофазного выпрямителя с конденсаторным умножителем напряжения и диаметре угольного электрода 8 мм, заточенного на конус с углом заточки 60–70° на прямой полярности, обеспечивается устойчивое горение дуги на токе 1 А и более (рис. 4.27).

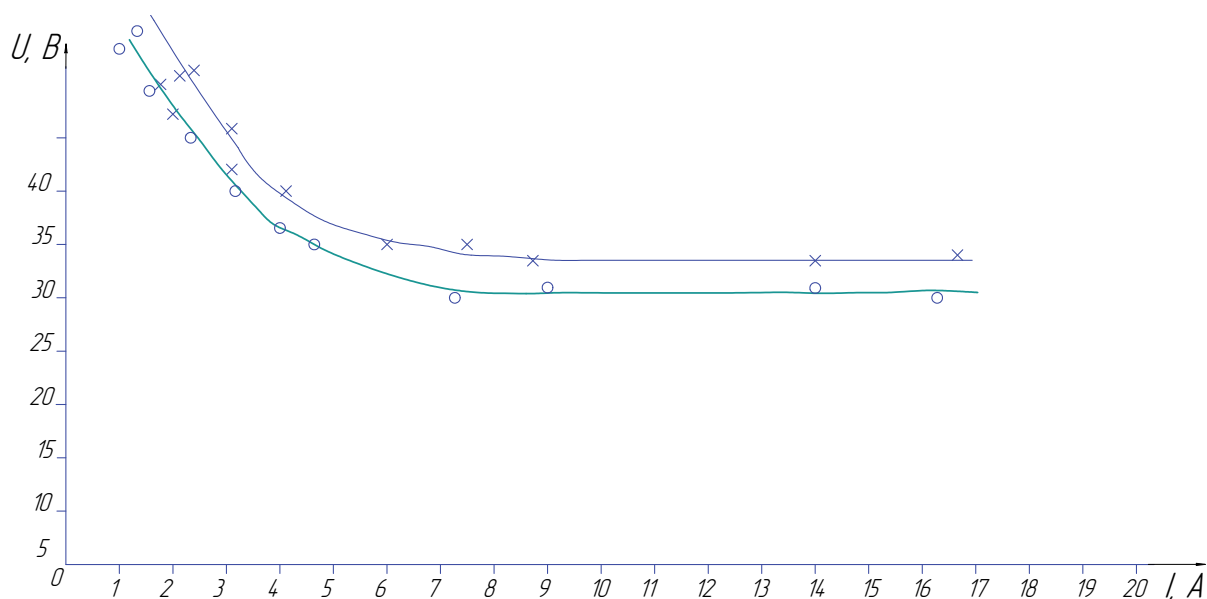


Рис. 4.26. Статические вольт-амперные характеристики дуги:  $\circ$  – плоский торец электрода;  $\times$  – угол заточки электрода 60–70°

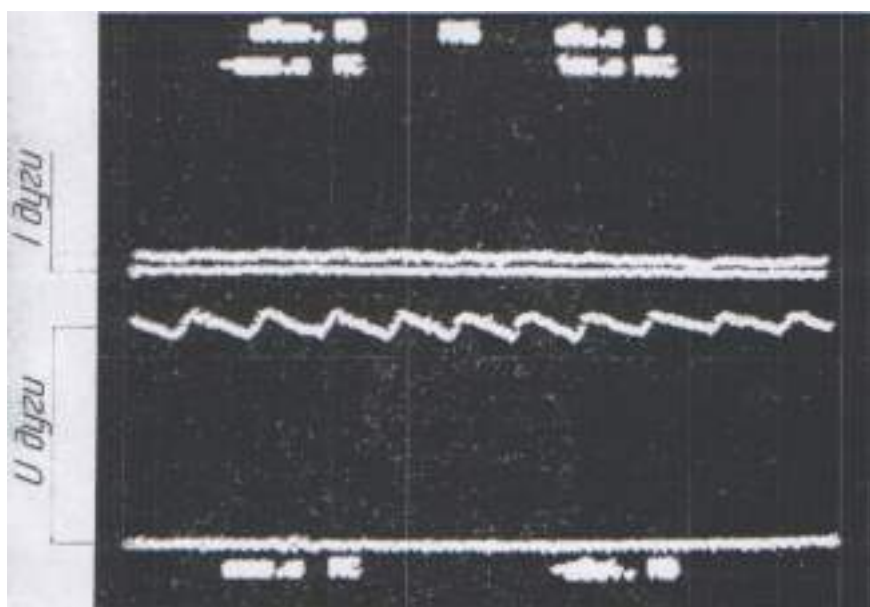


Рис. 4.27. Осциллограммы тока и напряжения дуги при ее горении в воздухе:  $I_d = 1,1$  А;  $U_d = 28$  В

Также применялись графитовые электроды, которые при сварке в воздухе фиксировались пружинным зажимом. Для сварки в газах использовалась стандартная сварочная горелка и угольный электрод фиксировался в держателе вместо медного токоподводящего наконечника.

Выявлено, что при горении дуги между угольным электродом и малоуглеродистой сталью толщиной 0,6–0,7 мм при силе тока 6–8 А дуга горит устойчиво. Заостренный конец электрода быстро окисляется и приобретает овальную форму. На данном токе в зоне шва наблюдается плавление основного металла и при уменьшении скорости сварки могут быть прожоги диаметром до 1,5 мм. При выполнении стыкового шва металл разрезался ножницами и для устранения превышения кромок и зазора подвергался незначительной деформации молотком на твердом основании.

В случае превышения кромок и наличия зазора получить равномерное проплавление без прожогов сложно. При подаче в зону горения дуги присадочной проволоки Св-08Г2С диаметром 1–1,2 мм возможно выполнение швов с незначительным превышением кромок и зазором. Плавление присадочной проволоки обеспечивает меньшую ширину и высоту усиления в сравнении с полуавтоматической сваркой в углекислом газе, но равномерность шва очень зависит от квалификации сварщика.

Для наблюдения за формированием шва предпочтительнее пользоваться маской «Хамелеон». При защите ванны углекислым газом при сварочном токе 5 А обеспечивается формирование шва без усиления с незначительными чешуйками, которые перекрывают друг друга при застывании сварочной ванны.

Для сварки меди возможно применение азота. Считается, что углерод и азот не вступают в химическое взаимодействие с медью. В случае защиты ванны азотом и током 8 А обеспечивается плавление меди толщиной 0,5 мм.

Но из-за большой теплопроводности меди необходимо длительное воздействие дуги до появления сварочной ванны. Из-за большой жидкотекучести меди при выполнении стыкового шва сварку следует осуществлять на графитовой или стальной подложке. С удлинением дуги на прямой полярности наблюдаются блуждание активного пятна на поверхности электрода и отклонение дуги от его оси, но на короткой дуге дуга горит устойчиво (рис. 4.28).

Применение угольного электрода для сварки алюминия без флюсов не рекомендуется. В связи с отсутствием в литературе сведений о катодном распылении при использовании угольного электрода в арго-не током 15 А осуществлялись зажигание и горение дуги. На короткой дуге на обратной и прямой полярности наблюдается плавление алюминия, но типичной картины катодного распыления нет. При охлаждении ванны металл в зоне шва чернеет.

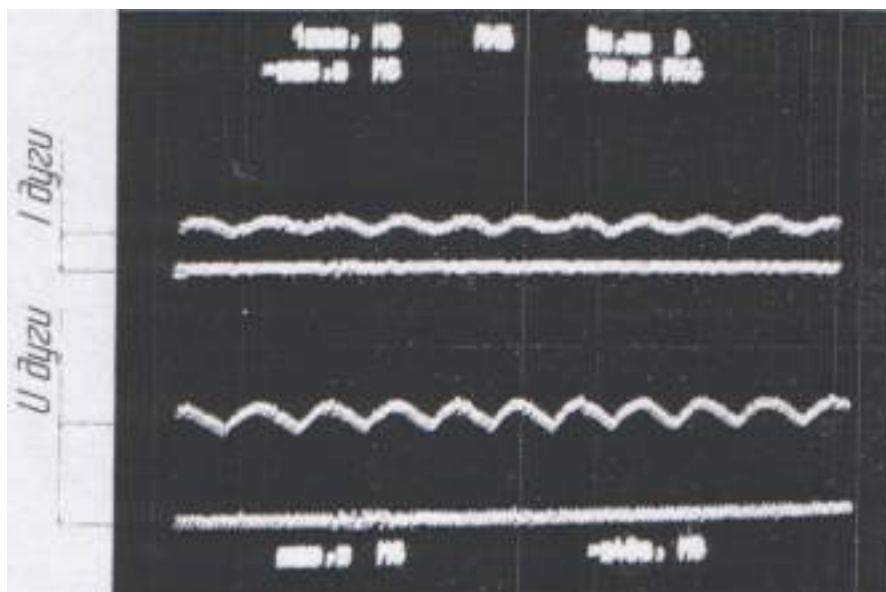


Рис. 4.28. Осциллограммы тока и напряжения при горении угольного электрода в азоте на меди:  $I_d = 8$  А;  $U_d = 25$  В

Сварка тонкого металла толщиной 0,05–0,3 мм по отбортовке осуществляется вольфрамовым электродом в аргоне и азоте без примесей кислорода [74]. Но в связи с дефицитностью данных газов сделана попытка сваривать малоуглеродистую сталь и медь тонким угольным электродом в воздухе. В качестве электрода применялся обычный карандаш с диаметром графитового стержня 2,2 мм. Графитовый стержень оголялся на длине 20–30 мм, и к нему зажимом типа «крокодил» подводился сварочный ток. Перед сваркой детали фиксировались в зажимном приспособлении с высотой отбортовки 3,5–4 мм. Дополнительно перед сваркой для устранения зазора деталь в зоне отбортовки сжималась плоскогубцами.

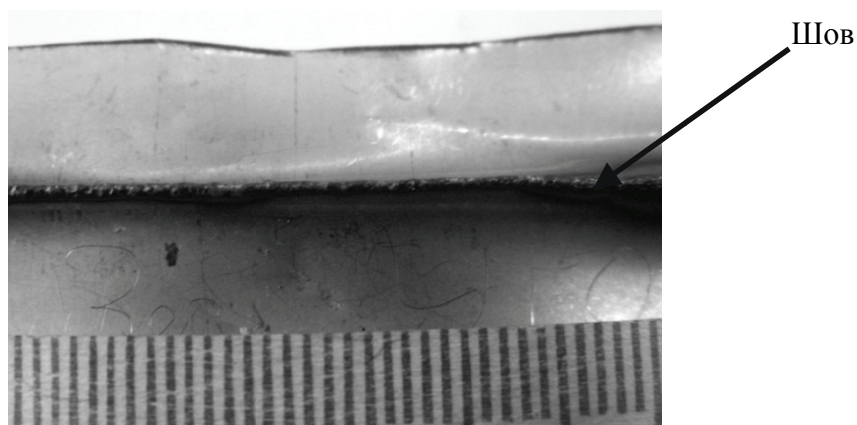
Для зажигания дуги касанием желательно применять маску «Хамелеон». При зажигании дуги касанием наблюдается образование шва. Минимальная «пилообразность» шва осуществляется на минимальном токе, обеспечивающем проплавление кромок, и при равномерном перемещении дуги вдоль линии сварного шва. Шов формируется и при сварке стали аустенитного класса. Проплавление кромок получено на режимах, представленных в табл. 4.2.

На рис. 4.29 показан образец из малоуглеродистой стали толщиной 0,2 мм, сваренный вручную по отбортовке графитовым стержнем диаметром 2,2 мм.

Таблица 4.2

**Режимы сварки**

Материал	Толщина, мм	Сварочный ток, А
Малоуглеродистая сталь	0,1	2,52
	0,2	5,2
Сталь Х18Н9Т	0,2	5
Медь	0, 1	4, 5

Рис. 4.29. Шов:  $I_d = 5$  А;  $U_d = 30$  В

Как и при сварке вольфрамовым электродом, наблюдается «пилообразность» шва.

При сварке карандашом конец графитового стержня диаметром 2 мм, заточенный под углом 60–80°, быстро обгорает и нагревается до интенсивного свечения даже при силе тока 2–4 А.

#### **4.5. Оценка пульсации выпрямленного тока и напряжения на малых токах**

Вопросу устойчивости горения дуги неплавящимся вольфрамовым электродом посвящено много работ. Ухудшение устойчивости горения дуги неплавящимся электродом в защитных газах чаще объясняют отставанием и блужданием активных пятен на катоде и аноде [39, 48, 59, 117].

Блуждание активных пятен в катодной области дуги объясняется на уровне гипотез [36, 59].

Во многих работах приводятся сведения о поведении катодного пятна, которое на плоском электроде обладает своеобразной инерцией и после движения верхнего электрода некоторое время удерживается на месте: отставание пятна зависит от скорости движения электродов, расстояния между ними и силы тока дуги. Также пятно может передвигаться отдельными «шагами», «переступая» от одной остановки к другой. Причем на вольфраме и стали пятно неподвижно, а на алюминии и меди движение столь интенсивно, что создаётся впечатление кратковременного присутствия на поверхности одновременно нескольких малых по размеру катодных пятен, обеспечивающих катодное распыление плёнки [117].

По результатам наших исследований, хаотичное перемещение катодного пятна также наблюдается при плазменно-порошковой наплавке, на обратной полярности, порошками на железной основе (ПГ-С27, Р6М5, Ф6М3) на сталь. Прокалка порошка до температуры 0,16–0,2 от температуры плавления устраняет блуждание и стабилизирует катодное пятно в процессе наплавки. По-видимому, при окислении порошка после прокалки улучшается его эмиссионная способность [79].

Также устойчивость горения дуги на малых токах определяется конструкцией электродов и тепловой мощностью, поступающей в электрод от дуги, которая стремится к некоторой определённой величине – критической, – ниже которой устойчивый дуговой разряд существовать не может. При уменьшении силы тока наступает момент, когда тепловой мощности, поступающей в электрод от дуги, оказывается недостаточно для поддержания температуры катодного пятна на уровне, обеспечивающем высокую степень термоэмиссии электродов. Из-за недостатка тепловой мощности активное пятно начинает перемещаться по микровыступам боковой поверхности электрода, эмиссия электронов с которых под воздействием электрического поля максимальна [48].

Работоспособность электродов при сварке и устойчивость горения на малых токах (1–10 А) можно улучшить, снизив теплоотвод от рабочего участка и обеспечив его близкий к равномерному нагрев. Наиболее просто эта задача решается увеличением сопротивления вылета путём уменьшения диаметра неплавящегося вольфрамового электрода. При силе тока 1–10 А близкий к равномерному нагрев рабочего участка достигается применением электродов диаметром 0,3 мм и менее [48].

Повышенную устойчивость зажигания и горения дуги вольфрамовым электродом диаметром более 1 мм на малых токах можно объяснить уменьшением пульсации тока и напряжения при питании дуги от выпрямителя с конденсаторным множителем напряжения.

Без конденсаторного умножителя напряжения и при отсутствии индуктивного сопротивления в сварочной цепи зажигание и горение дуги резко ухудшаются и становятся невозможными: факт ухудшения зажигания дуги с уменьшением напряжения холостого хода применим к любым способам сварки. Но повышение напряжения холостого хода у выпрямителей более 100 В не допускается по технике безопасности.

При напряжении холостого хода выпрямителя 30–32 В и включении конденсаторов по схеме (рис. 1.24) напряжение холостого хода увеличивается в 2,82 раза, что улучшает зажигание дуги.

По-видимому, накопление энергии в индуктивном сопротивлении и конденсаторах передаёт её на дуговой промежуток.

В работе [94] отмечается, что индуктивные накопители энергии выделяют в сварочной дуге электрическую энергию, аккумулированную в электромагнитной системе накопителя. Это обеспечивается путем зарядки индуктивного накопителя энергией до заданной величины тока с последующим разрядом его на дуговой промежуток. Устройства, созданные на базе индуктивных накопителей энергии, нечувствительны к коротким замыканиям дугового промежутка и отличаются повышенной устойчивостью против случайных обрывов дуги.

С. Н. Запольских считает, что совместное действие энергии, накопленной в индуктивном сопротивлении и конденсаторах, обеспечивает эффект колебательного контура, который реализует передачу энергии на дуговой промежуток.

По-видимому, элементы теории, приводимой в работе [94], не позволяют с необходимой точностью выполнить инженерные расчеты, объясняющие передачу энергии от дросселя и конденсаторов на дугу.

Индуктивность совместно с конденсаторами может выполнять функцию накопления энергии и сглаживания пульсаций тока и напряжения [107].

Пульсация в выпрямленном напряжении оценивается значением коэффициента пульсации  $K_{\text{п}}$ .

Наиболее просто коэффициент пульсации определяется по формулам

$$K_{\text{Пн}} = \frac{U_1 - U_2}{2}; \quad (4.1)$$

$$K_{\text{Пт}} = \frac{I_1 - I_2}{2}, \quad (4.2)$$

где  $U_1$  и  $U_2$  – это максимальное и минимальное значения выпрямленного напряжения;  $I_1$  и  $I_2$  – это максимальное и минимальное значения тока.

Устойчивое горение дуги на малых токах неплавящимся электродом без конденсаторного умножителя напряжения и индуктивного сопротивления невозможно.

Чтобы выявить влияние конденсаторов и индуктивного сопротивления, к выпрямителю подключался балластный реостат и на малых токах фиксировалась пульсация тока и напряжения без конденсаторов и дросселя, с конденсаторами, дросселем и совместно с конденсаторами и дросселем.

На рис. 4.30 показана пульсация тока и напряжения при подключении к выпрямителю балластного сопротивления и отсутствии дросселя и конденсаторов.

В данном случае коэффициент пульсации напряжения и тока (если считать максимальное значение амплитуды за 1) – 0,5.

При включении в электрическую цепь дросселя индуктивностью 8,1 мГн (рис. 4.31)  $K_{\text{ПТ}} = 0,8$ , а пульсация напряжения не улучшается.

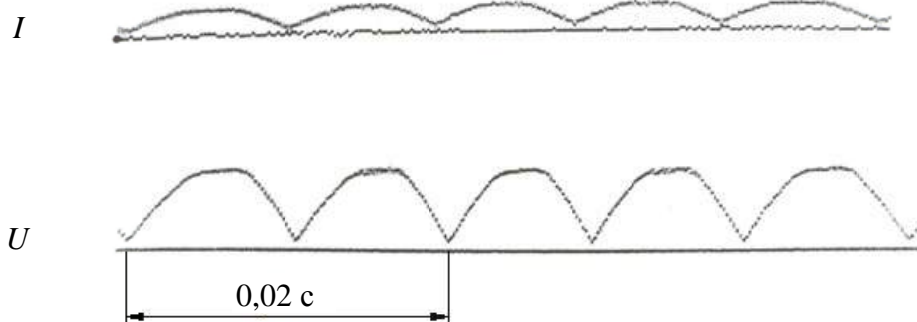


Рис. 4.30. Пульсация тока и напряжения:  $I = 8,5$  А;  $U_{\text{д}} = 28,7$  В;  $I_1 = 1,6$  А;  $I_1$  – ток, потребляемый из первичной сети

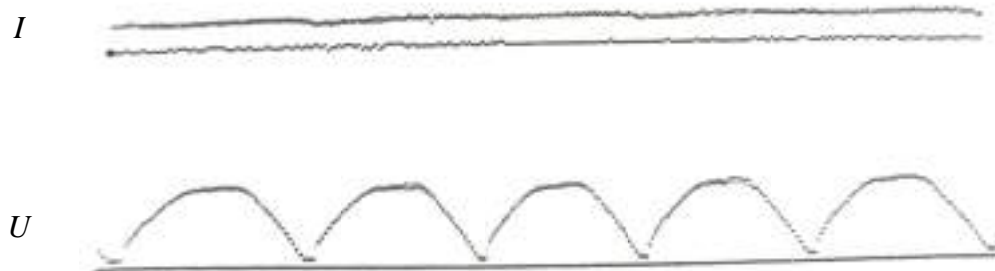


Рис. 4.31. Пульсация тока и напряжения:  $I = 8$  А;  $U = 28,5$  В;  $I_1 = 1,5$  А

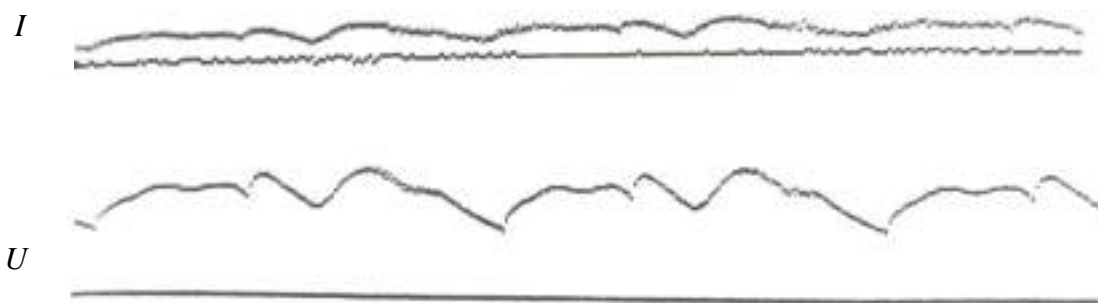


Рис. 4.32. Пульсация тока и напряжения:  $I = 13,0$  А;  $U = 38,8$  В;  $I_1 = 3,2$  А

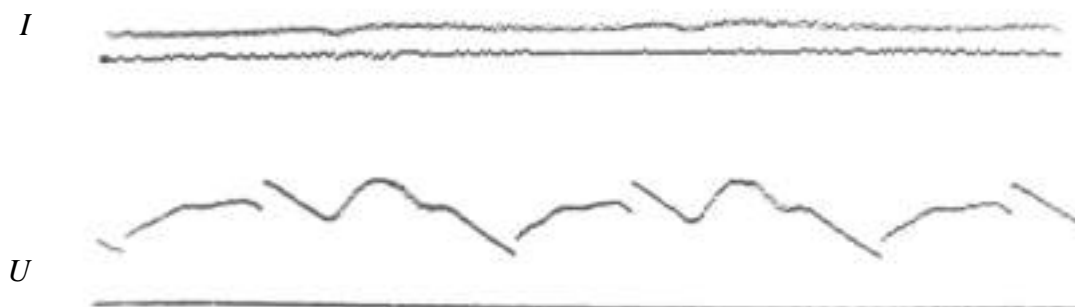


Рис. 4.33. Пульсация тока и напряжения:  $I = 12,7$  А;  $U = 38,5$  В

Осциллограммы (рис. 4.32) соответствуют включению конденсаторов ёмкостью 2000 мкф по схеме (рис. 1.24)  $K_{Пн} = 0,8$ ,  $K_{Пт} = 0,85$ .

Включение конденсаторов в 2,82 раза увеличивает напряжение холостого хода и соответственно ток, что повышает мощность, передаваемую электрической цепи при активной нагрузке.

Включение дросселя и конденсаторов (рис. 4.33) улучшает сглаживание пульсаций тока и напряжения:  $K_{Пт} = 0,85$ ,  $K_{Пн} = 0,83$ ,  $I_1 = 3,1$  А.

Таким образом, включение индуктивности и конденсаторов увеличивает мощность, передаваемую в цепь при активной нагрузке, и уменьшает пульсацию токов и напряжений.

Аналогичное явление происходит при горении дуги, что улучшает горение на малых токах.

---

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выпрямители с конденсаторным умножителем напряжения просты по устройству, легче традиционных и имеют КПД и коэффициент мощности не ниже, чем у инверторных источников питания.

Также данные выпрямители могут использоваться для зарядки аккумуляторов легковых, грузовых автомобилей и пуска двигателей автомобилей в холодное время года.

При сварке покрытыми электродами обеспечивается устойчивое горение дуги при силе тока более 1 А.

В процессе горения дуги при силе тока 5–7 А визуально наблюдается перенос металла в дуге, который осуществляется за счет сил тяжести и поверхностного натяжения без взрывных явлений, и электродами диаметром 1,2–1,6 мм возможна сварка стали толщиной 0,5–0,6 мм.

При наплавке электродами диаметром 1,6–3 мм, скомпонованными треугольником, обеспечивается устойчивое горение дуги, доля участия основного металла в наплавленном составляет 3–7 % с производительностью до 0,6 кг/ч.

Выявлены легкое зажигание и длительное устойчивое горение дуги между неподвижным вылетом электродных проволок различного химического состава в защитных газах (аргоне, азоте, углекислом газе) при силе тока 1–1,5 А и более. Использование данного факта позволило разработать способ зажигания плавящимся электродом контактным способом без длительных коротких замыканий. Наличие на конце вылета застывшей холодной капли и увеличение диаметра электрода не ухудшают зажигание дуги.

В углекислом газе проволоками диаметром 0,8–1,2 мм обеспечивается формирование швов при силе тока 10–18 А и более.

В аргоне и азоте аустенитной проволокой диаметром 0,8–1,2 мм формируются швы при силе тока более 18,5 А.

Формирование швов при наплавке и сварке получено плавящимися проволоками диаметром 0,8–1,2 мм на алюминиевой основе в аргоне при толщине изделия 0,35–0,5 мм и силе тока 12 А и более.

В защитных газах определены показатели переноса металла в дуге.

В аргоне, азоте, гелии между неплавящимся вольфрамовым электродом и изделием горит дуга при силе тока 1–3 А и более, что позволяет сваривать металлы толщиной 0,05–0,5 мм.

При питании дуги от однофазного выпрямителя с конденсаторным умножителем напряжения и диаметре угольного электрода 8 мм на прямой полярности обеспечивается устойчивое горение дуги током более 1 А.

Обычным графитовым стержнем диаметром 2,2 мм (от карандаша) в условиях атмосферы и при толщине металла 0,1–0,2 мм по отбортовке формируются швы при силе тока 2,5–5 А.

Совместное действие конденсаторного умножителя напряжения и дросселя уменьшает пульсацию напряжения и тока, что улучшает устойчивость горения дуги.

---

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аньшаков, А. С. Разработка вольфрамового анода для микроплазменной сварки изделий обратной полярности / А. С. Аньшаков, А. Э. Урбах, Е. Н. Кобелева [и др.] // Сварочное производство. – 2003. – № 3. – С. 11–16.
2. Белоусов, В. Н. К вопросу о разбрызгивании металла в  $\text{CO}_2$  с систематическими короткими замыканиями / В. Н. Белоусов, Д. Д. Остров // Теория и практика сварочного производства: межвуз. сб. – Вып. 2. – Свердловск: Изд-во УПИ им. С. М. Кирова, 1978. – 104 с.
3. Березовский, Б. М. Смачивание и растекание сварочной ванны на поверхности металла / Б. М. Березовский // Автоматическая сварка. – 1983. – № 10. – С. 31–34.
4. Богомольный, Е. В. Разработка и исследование сварочных преобразователей с улучшенными малогабаритами и энергетическими показателями: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Е. В. Богомольный. – Комсомольск-на-Амуре, 2004. – 20 с.
5. Бондаренко, В. Л. Дуговая сварка с импульсной подачей проволоки – процесс СМТ, предложенный фирмой «Фрониус» / В. Л. Бондаренко // Автоматическая сварка. – 2004. – № 12. – С. 55–57.
6. Бондаренко, В. Л. Новое оборудование фирмы «Фрониус» для сварки алюминия / В. Л. Бондаренко // Автоматическая сварка. – 2007. – № 11. – С. 58–60.
7. Пат. 2134559. Российская Федерация, МПК В23К 9/067. Способ стабилизации электродугового процесса и устройство для его осуществления / Бувайло В. В.; опубл. 20.06.2000.
8. А. с. 1790475 СССР В23К 9/067 Способ регулирования напряжения при электродуговой сварке и устройство для его осуществления / Бувайло В. В., Чуйко Н. М.; опубл. 23.01.03, Бюл. № 3.
9. Пат. 2154559. Российская Федерация В23К 9/073. Способ стабилизации электродугового процесса и устройство для его осуществления / Бувайло В. В.; опубл. 20.08.2000.
10. Будник, В. П. Особенности сварки алюминиевых сплавов на постоянном токе прямой полярности / В. П. Будник // Автоматическая сварка. – 2003. – № 1. – С. 38–40.
11. А. с. 1704975 СССР В23К 9/067. Источник питания сварочной дуги / Ю. К. Бурмистров, В. Ф. Гудихин; опубл. 15.01.1992, Бюл № 2.

12. Вайнерман, А. Е. Плазменная наплавка металлов / А. Е. Вайнерман, М. Х. Шоршоров, В. Д. Веселков [и др.] // Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1969. – 191 с.

13. Варуха, Е. Н. Классификация способов контактного зажигания дуги при сварке проволоками малого диаметра / Е. Н. Варуха // Сварочное производство. – 2007. – № 3. – С. 15–19.

14. Володин В. Я. Современные сварочные аппараты своими руками / В. Я. Володин. – СПб. : Наука и техника, 2008. – 304 с.

15. Регулирование разбрызгивания электродного металла при ручной дуговой сварке / И. Н. Ворновицкий, Б. В. Семендяев, М. Н. Кучерова [и др.] // Сварочное производство. – 2006. – № 9. – С. 22–24.

16. Воропай, Н. М. Новое в технологии сварки в защитных газах / Н. М. Воропай. – М. : Машиностроение, 1981. – 46 с.

17. Гапченко, М. Н. Очистка наплавленных поверхностей катодным распылением / М. Н. Гапченко, В. А. Фурсов, Н. А. Баранов, В. А. Бойченко // Сварочное производство. – 1973. – № 11. – С. 1–2.

18. Головченко, В. С. Сварка судовых конструкций в защитных газах / В. С. Головченко, А. В. Никонов. – Л. : Судостроение, 1972. – 264 с.

19. ГОСТ 25616–83. Источники питания для дуговой сварки. Методы испытания сварочных свойств. – Введ. 01.01.1984. – М. : Изд-во стандартов, 1983.

20. Глушко, В. Я. Стойкость вольфрамового электрода при сварке меди в азоте / В. Я. Глушко, В. М. Лейзбон, Н. Т. Лосицкий, Г. Г. Тарасов // Сварочное производство. – 1974. – № 4. – С. 23–24.

21. Дедюх, Р. Н. Повышение стабильности параметров дуговой сварки покрытыми электродами на малых токах / Р. Н. Дедюх, А. С. Киселев // Сварочное производство. – 2004. – № 7. – С. 3–6.

22. Довбищенко И. В. Развитие способов дуговой сварки алюминия и его сплавов / И. В. Довбищенко, Б. А. Стебловский // Автоматическая сварка. – 2002. – № 12. – С. 32–36.

23. Сварка особотонкостенных труб / Под ред. Д. А. Дудко. – М. : Машиностроение, 1977. – 128 с.

24. Дудко, Д. А. Допустимые зазоры при импульсно-дуговой сварке торцевых соединений металлов малых толщин / Д. А. Дудко, Б. И. Шнайдер, Д. М. Погребиский // Сварочное производство. – 1977. – № 5. – С. 27–30.

25. Дюргеров, Н. Г. Определение свойств дуги при импульсных процессах сварки / Н. Г. Дюргеров, Д. Х. Сагиров // Сварочное производство. – 2004. – № 4. – С. 14–18.

26. Дятлов, В. И. Элементы теории переноса электродного металла при электродуговой сварке / В. И. Дятлов // Новые проблемы сварочной техники. – Киев : Техника, 1964. – 480 с.

27. Зубаль, Н. Д. Сварочный аппарат своими руками / Н. Д. Зубаль. – М. : СОЛОН-ПРЕСС, 2003. – 176 с.

28. Ищенко А. Я. Сварка алюминиевых сплавов (направление исследований, проводимых в ИЭС им. Е.О. Патона) / А. Я. Ищенко // Автоматическая сварка. – 2007. – № 1. – С. 10–13.

29. Ищенко, А. Я. Особенности сварки алюминиевых сплавов плавящимся электродом в неоне и его смесях с гелием и аргоном / А. Я. Ищенко, И. В. Довбищенко, В. С. Машин, М. П. Пашуля // Автоматическая сварка. – 2002. – № 12. – С. 41–44.

30. Ищенко, А. Я. Предотвращение включений окисной пленки в швах при аргонодуговой сварке алюминиевых сплавов / А. Я. Ищенко, А. Г. Поляцкий, М. Р. Яворская // Автоматическая сварка. – 1989. – № 6. – С. 38–41.

31. Каковкин, О. С. Некоторые особенности поглощения азота металлом при дуговой сварке / О. С. Каковкин, В. Б. Пеньков // Сварочное производство. – 1987. – № 4. – С. 39–41.

32. Карасев, М. В. Новые разработки НПО «СЭЛМА-ИТС» для дуговой сварки в защитных газах / М. В. Карасев, Д. Н. Работинский, Г. В. Павленко [и др.] // Автоматическая сварка. – 2004. – № 5. – С. 40–45.

33. Карасев, М. В. Особенности современных установок для механизированной сварки плавящимся электродом в защитных газах / М. В. Карасев, Е. М. Вышемирский, В. И. Беспалов [и др.] // Автоматическая сварка. – 2004. – № 12. – С. 38–41.

34. Карасев, М. В. Влияние режима механизированной сварки в смесях газов на служебные свойства наплавленного металла / М. В. Карасев, Д. Н. Работинский, С. В. Головин [и др.] // Сварщик в России. – 2007. – № 6. – С. 35–40.

35. Сварочное оборудование, сварочные материалы, аксессуары «WeldingWorldTogether» LINCOLN ELECTRIC, THE WELDING EXPERTS, 2006.

36. Кесаев, И. Г. Катодные процессы ртутной дуги и вопросы её устойчивости / И. Г. Кесаев. – М.-Л. : Гозэнергоиздат, 1961. – 320 с.

37. Киселев, С. Н. Газоэлектрическая сварка алюминиевых сплавов / С. Н. Киселев. – М. : Машиностроение, 1972. – 176 с.

38. Однопроходная гелиеводуговая сварка нагруженным вольфрамовым электродом толстолистного алюминиевого сплава / А. А. Ковалев, В. П. Никулин, А. Г. Сильник, С. И. Верещагин // Сварочное производство. – 1978. – № 8 – С. 19–17.

39. Ковалев, И. М. Некоторые способы стабилизации неустойчивых дуг неплавящимся катодом / И. М. Ковалев // Сварочное производство. – 1973. – № 6. – С. 3–5.

40. Комаров, В. А. Опыт использования плазменно-порошковой наплавки на металлургическом заводе / В. А. Комаров [и др.] // Сварочное производство. – 1990. – № 9. – С. 20–21.

41. Коротков, В. А. Расширение практики применения бронзовых наплавки кремнистой бронзы / В. А. Коротков, И. Д. Михайлов, Д. С. Байкалов // Сварочное производство. – 2005. – № 4. – С. 35–37.

42. Корякин, С. Л. Справочник сварщика для любителей и не только / С. Л. Корякин – СПб. : Наука и техника, 2008. – 400 с.

43. Косович, В. А. Технологические особенности сварки малоамперной дугой ультратонким вольфрамовым электродом / В. А. Косович, И. Е. Лапин, О. А. Русол // Сварочное производство. – 1999. – № 1. – С. 15–17.

44. Косович, В. А. Особенности подготовки и применения ультратонких вольфрамовых электродов / В. А. Косович, И. Е. Лапин, О. А. Русол // Сварочное производство. – 2000. – № 4. – С. 6–8.

45. Косович, В. А. Электрические и тепловые характеристики малоамперной дуги постоянного тока с вольфрамовым электродом / В. А. Косович [и др.] // Сварочное производство. – 1998. – № 7. – С. 15–18.

46. Косович, В. А. Рациональные конструкции вольфрамовых электродов для аргонодуговой сварки постоянным током / В. А. Косович, Б. А. Коростелев, В. А. Полупан и др. // Сварочное производство. – 1988. – № 10. – С. 28–29.

47. Ланкин, Ю. Н. Автоматическое управление процессом сварки плавящимся электродом в  $\text{CO}_2$  с периодическими короткими замыканиями дугового промежутка (обзор) / Ю. Н. Ланкин // Автоматическая сварка. – 2007. – № 1. – С. 3–10.

48. Лапин, И. Е. Повышение технологических свойств дуги при сварке неплавящимся электродом в инертных газах: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / И. Е. Лапин. – Волгоград, 2004. – 39 с.

49. Лебедев, В. А. Малогабаритные полуавтоматы для дуговой сварки плавящимся электродом с питанием от однофазной сети переменного тока / В. А. Лебедев // Автоматическая сварка. – 1995. – № 4. – С. 48–53.

50. Лебедев, В. А. Однофазные источники сварочного тока для механизированной сварки в углекислом газе / В. А. Лебедев, В. С. Романюк // Сварочное производство. – 2004. – № 1. – С. 10–43.

51. Лебедев, В. А. Экспериментальное исследование источников сварочного тока для полуавтомата с питанием от однофазной сети 220 В / В. А. Лебедев, А. Д. Глушенко, Н. И. Постолатий // Сварочное производство. – 2006. – № 12. – С. 9–12.

52. Лебедев, В. А. Тенденция развития механизированной сварки с управляемым переносом электродного металла (обзор) / В. А. Лебедев // Автоматическая сварка. – 2010. – № 10. – С. 45–53.

53. Лебедев, В. А. Регулирование тока при механизированной сварке алюминия / В. А. Лебедев // Технология металлов. – 2008. – № 5. – С. 18–23.

54. Лебедев, В. К. Современные тенденции развития сварочных источников питания / В. К. Лебедев // Новые сварочные источники питания : сб. науч. тр. / Академия наук Украины; Ин-т электросварки им. Е. О. Патона. – Киев, 1992. – 144 с.

55. Лебедев, В. К. О динамических свойствах источников питания постоянного тока для ручной дуговой сварки / В. К. Лебедев, М. Н. Сидоренко // Новые проблемы сварочной техники. – Киев: Техника, 1964. – 184 с.

56. Лебедев, В. К. Силовое воздействие сварочной дуги / В. К. Лебедев, И. В. Пентегов // Автоматическая сварка. – 1981. – № 1. – С. 7–15.

57. Ленивкин, В. А. Технологические свойства сварочной дуги в защитных газах / В. А. Ленивкин, Н. Г. Дюргеров, Х. Н. Сагиров. – М. : Машиностроение, 1989. – 264 с.

58. Ленивкин В. А. Влияние потока плазмы с поверхности ванны на характер переноса металла при сварке в углекислом газе / В. А. Ленивкин, О. М. Черный // Сварочное производство. – 1987. – № 4. – С. 43–47.

59. Лесков, Г. И. Электрическая сварочная дуга / Г. И. Лесков. – М. : Машиностроение, 1970. – 335 с.

60. Лоос, А. В. Источники питания импульсных электротехнических процессов / А. В. Лоос, А. В. Лукутин, Ю. Н. Сараев. – Томск: Изд-тип. фирма ТПУ, 1998. – 158 с.

61. А. с. 1699737 СССР, МКИ В 23 К 9/067. Источник питания для ручной сварки. И. И. Ляткер; опубл. 23.12.1991, Бюл № 47.

62. Мазель, А. Г. Технологические свойства сварочной дуги / А. Г. Мазель. – М. : Машиностроение, 1969. – 178 с.

63. Маслов, Ю. А. Влияние полярности на процесс воздушно-электродуговой резки металлов / Ю. А. Маслов, В. С. Милютин,

В. Л. Топачевский // Сварочное производство : сб. науч. тр. УПИ. – Свердловск, 1973. – № 208. – С. 64–69.

64. Медовар, Б. И. Сварка жаропрочных аустенитных сталей и сплавов / Б. И. Медовар. – М. : Машиностроение, 1966. – 429 с.

65. Медовар, Б. И. Аустенитно-боридные стали и сплавы для сварных конструкций / Б. И. Медовар, Н. И. Пинчук, Л. Д. Чекотило. – Киев: Наука думка, 1970. – 145 с.

66. Мейстер, Р. А. Нестандартные источники питания для сварки / Р. А. Мейстер. – Красноярск : ИПЦ КГТУ, 2004. – 96 с.

67. Мейстер, Р. А. Сварочный выпрямитель, изготовленный на основе утилизированного трансформатора / Р. А. Мейстер, А. Р. Мейстер, Д. П. Яшенкин // Вестн. Краснояр. гос. техн. ун-та. – Вып. 41. Машиностроение. – Красноярск : ИПЦ КГТУ, 2006. – 227 с.

68. Пат. 2355532 Российской Федерации, МПК В 23 К 9/09 Способ дуговой сварки покрытым электродом / Мейстер Р. А., Мейстер А. Р.; опубл. 20.05.2009, Бюл. № 4.

69. Мейстер, Р. А. Многодуговая наплавка покрытыми электродами / Р. А. Мейстер, А. Р. Мейстер, А. А. Безруких // Сварочное производство. – 2008. – № 8. – С. 21–23.

70. Мейстер, Р. А. Восставление раструба пресс-инструмента наплавкой / Р. А. Мейстер // Зональная научно-техническая конференция «Пути повышения эффективности, качества и надежности в сварочном производстве»: тез. докл. – Красноярск, 1979. – 160 с.

71. Пат. 2313429 Российская Федерация МПК В 23 К 9/16. Способ зажигания дуги / Мейстер Р. А., Мейстер А. Р., № 2000113102, заяв. 18.04.2006; опубл. 27.12.2007, Бюл. № 36.

72. Пат. 2251473 Российская Федерация, МПК В23К 9/06. Способ зажигания и горения дуги постоянного тока / Мейстер Р. А., Мейстер А. Р.; № 2003 121810/02; Заяв. 12.03.2003; опубл. 10.05.2005, Бюл. № 13.

73. Мейстер Р. А. Особенности горения малоамперной дуги в защитных газах / Р. А. Мейстер, А. Р. Мейстер // Сварочное производство. – 2006. – № 7. – С. 28–30.

74. Мейстер, Р.А. Возможности сварки тонкого металла / Р. А. Мейстер, А. Р. Мейстер // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2006. – № 4. – С. 41–12.

75. Мейстер, Р. А. Методология научных исследований. Способы сварки плавлением: лаб. практикум / Р. А. Мейстер, А. Р. Мейстер. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2007. – 107 с.

76. Устойчивые режимы горения дуги на малых токах плавящимся электродом. / Р. А. Мейстер, А. Р. Мейстер, С. В. Савельев и др. // Ресурсосберегающие технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано-до макроуровня: в 2 ч.: материалы 11-й междунар. науч.-практ. конф. Ч. 1. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 438 с.

77. Мейстер, Р. А. Сварка тонкого металла / Р. А. Мейстер, А. Р. Мейстер // Вестн. КГТУ. Вып. 41. Машиностроение. – Красноярск : ИПЦ КГТУ, 2006. – 227 с.

78. Мейстер, Р. А. Некоторые особенности горения трехфазной дуги в азоте / Р. А. Мейстер // Сварочное производство. – 1977. – № 5. – С. 11.

79. А. с. 1731507 СССР, МКИ В23К 9/04. Способ плазменно-порошковой наплавки / В. А. Комаров, Р. А. Мейстер. – № 4796434; заявл. 02.03.90, опубл. 07.05.92, Бюл. № 17.

80. Милютин, В. С. Источники питания для сварки : учеб. пособие: в 2 ч. Ч. 1 / В. С. Милютин, Н. М. Иванова. Екатеринбург: Изд-во Урал. гос. проф. пед. ун-та, 1995. – 223 с.

81. Милютин, В. С. Отработка конструкции универсального тиристорного выпрямителя с микропроцессорным управлением / В. С. Милютин, А. А. Морозов, А. Г. Сивоплясов // Сварочное производство. – 2006. – № 10. – С. 16–22.

82. Милютин, В. С. Источники питания для сварки / В. С. Милютин, М. П. Шалимов, С. М. Шанчуров. – М. : Айрис-пресс, 2007. – 384 с.

83. Митрофанов, В. Л. Сварочное оборудование инверторного типа торговой марки «СТРАТ» / В. Л. Митрофанов // Славяновские чтения : сб. науч. тр. – Липецк : Изд-во ЛГТУ, 2009. – 333 с.

84. Морозкин, И. С. Управление электрическими и механическими параметрами процесса зажигания дуги при механизированной сварке : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / И. С. Морозкин. – Ростов-н/Д, 2005. – 39 с.

85. Применение плазменно-дуговой сварки при производстве криогенного оборудования из алюминиевых сплавов / С. А. Некрасов, Г. П. Салкин, А. С. Бычков, В. М. Астахин // Сварочное производство. – 1976. – № 4. – С. 16–17.

86. Никифоров, Г. Д. Металлургия сварки плавлением алюминиевых сплавов / Г. Д. Никифоров. – М. : Машиностроение, 1972. – 264 с.

87. Норин, П. А. Наплавка бронзы марки Бр КМц 3-1 на сталь открытой дугой / П. А. Норин, А. М. Осипов // Сиб. науч.-техн. конф.

«Пути повышения эффективности сварочного производства» : тез. докл. – Красноярск, 1982. – 173 с.

88. Овчинников, В. В. Технология сварки алюминиевых сплавов: учеб. пособие / В. В. Овчинников. – М. : МГИУ, 2008. – 68 с.

89. Расширение технологических возможностей выпрямителя ВД-506 ДК для дуговой сварки в защитных газах / Г. В. Павленко, В. А. Сорока, Н. М. Воропай, В. М. Илюшенко // Сварщик в Белоруссии. – 2007. – № 5. – С. 26–29.

90. Патон, Б. Е. Электрооборудование для дуговой и шлаковой сварки / Б. Е. Патон, В. К. Лебедев. – М. : Машиностроение, 1966. – 339 с.

91. Пацкевич, И. Р. Поверхностные явления в сварочных процессах / И. Р. Пацкевич, Н. Р. Деев // Металлургия, 1974. – 120 с.

92. Пентегов, И. В. Малогабаритные источники питания с улучшенными энергетическими показателями / И. В. Пентегов, В. П. Латанский, В. В. Скифос // Новые сварочные источники питания : сб. науч. тр. – Киев, 1992. – 144 с.

93. Пентегов, И. В. Оптимизация параметров сварочных источников питания с конденсаторным умножителем напряжения / И. В. Пентегов, В. П. Латанский // Современное оборудование для сварки и термической резки. – Гливице, 1997.

94. Пентегов, И. В. Модулирование сварочного тока при помощи индуктивных накопителей энергии / И. В. Пентегов, Е. П. Стенковский, В. А. Легостаев // Автоматическая сварка. – 1987. – № 11. – С. 35–40.

95. Печенкина, В. А. Исследования и разработка процесса сварки алюминиевых сплавов малых толщин сжатой малоамперной трехфазной дугой / В. А. Печенкина // Новое в технологии и оборудовании для сварки и пайки: сб. тр. к 40-летию кафедры и 75-летию В. И. Столбова / под ред. В. В. Масакова, В. П. Сидорова. – Тольятти : ТГУ, 2007. – 252 с.

96. Пономарев, В. Влияние капли электродного металла на напряжение дуги при сварке в защитных газах / В. Пономарев, А. В. да Коста, А. Скотти // Автоматическая сварка. – 2002. – № 4. – С. 7–11.

97. Постолатий, Н. И. Приближенный расчет индуктивности дросселя сварочной цепи постоянного тока / Н. И. Постолатий // Автоматическая сварка. – 2004. – № 12. – С. 42–45.

98. Потапов, А. Н. Разработка оборудования и технология сварки алюминиевых сплавов разнополярными импульсами тока прямоугольной формы : автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. Н. Потапов. – Волгоград, 2003 – 19 с.

99. Потапьевский, А. Г. Сварка в защитных газах плавящимся электродом / А. Г. Потапьевский. – М. : Машиностроение, 1974. – 240 с.

100. Потапьевский, А. Г. Импульсно-дуговая сварка в  $\text{CO}_2$  стали толщиной 0,5–0,8 мм / А. Г. Потапьевский, М. Г. Лившиц, Л. М. Куплевацкий и др. // Сварочное производство. – 1980. – № 6. – С. 15–17.

101. Методика комплексной оценки сварочно-технологических свойств источников питания / И. К. Походня, В. Е. Понаморов, И. И. Заруба, А. М. Жерносеков // Новые сварочные источники питания : сб. науч. тр. / Академия наук Украины; ИЭС им. Б. О. Патона. – Киев, 1992. – 144 с.

102. Походня, И. К. Газы в сварочных швах / И. К. Походня. М. : Машиностроение, 1972. – 256 с.

103. Походня, И. К. Критерии оценки стабильности процесса дуговой сварки на постоянном токе / И. К. Походня, И. И. Заруба, В. Е. Пономарев и др. // Автоматическая сварка. – 1989. – № 8. – С. 1–4.

104. Рабинович, И. Я. Оборудование для дуговой электрической сварки. Источники питания дуги / И. Я. Рабинович. – М., 1958. – 380 с.

105. Рабинович, Э. А. Сборник задач и упражнений по общей электротехнике : учеб. пособие / Э. А. Рабинович. – М. : Энергия, 1971. – 311 с.

106. Рабкин, Д. М. Металлургия сварки плавлением алюминия и его сплавов. / Д. М. Рабкин. – Киев : Наук. думка, 1986. – 256 с.

107. Резанов, Ю. К. Основы силовой преобразовательной техники / Ю. К. Резанов. – М. : Энергия, 1979. – 392 с.

108. Руссо, В. Л. Дуговая сварка в инертных газах / В. Л. Руссо. – Л. : Судостроение, 1984. – 120 с.

109. Сагиров, Х. Н. Зажигание сварочной дуги / Х. Н. Сагиров, Н. Г. Дюргеров, И. С. Морозкин. Ростов-н/Д : Гефест, 1999. – 200 с.

110. Сагиров, Д. Х. Разработка самоорганизующегося процесса и оборудования для сварки короткой дугой в углекислом газе : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Д. Х. Сагиров. – Ростов-н/Д, 2006. – 21 с.

111. Сараев, Ю. Н. Адаптивные импульсно-дуговые методы механизированной сварки при строительстве магистральных трубопроводов / Ю. Н. Сараев. – Сварщик-профессионал. – 2004. – № 4. – С. 4–12.

112. Сараев, Ю. Н. Пути повышения эффективности строительства, эксплуатации и ремонта нефтегазового оборудования и магистральных трубопроводов на основе адаптивных импульсных технологий сварки и наплавки / Ю. Н. Сараев, Л. Н. Макаров, Н. В. Кириллова и др. – Сварочное производство. – 2001. – № 5. – С. 31–37.

113. Семенов, Б. Ю. Силовая электроника: от простого к сложному / Б. Ю. Семенов. – М. : СОЛОН-ПРЕСС, 2006. – 416 с.
114. Сидоров, А. И. Восстановление деталей машин напылением и наплавкой / А. И. Сидоров. – М. : Машиностроение, 1987. – 189 с.
115. Оборудование для дуговой сварки : справ. пособие / под. ред. В. В. Смирнова. – Л. : Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1986. – 656 с.
116. Металлические электроды для сварки и наплавки: мат-лы конф. – М., 1997.
117. Столбов, В. Н. Сварочная ванна / В. Н. Столбов. – Тольятти: ТГУ, 2007. – 14 с.
118. Столбов, В. И. Образование прожога при сварке плавлением тонких листов / В. И. Столбов, В. В. Масаков // Сварочное производство. – 1977. – № 10. – С. 20–22.
119. Столбов, В. И. Технология и оборудование для сварки трехфазной дугой неплавящимися электродами / В. И. Столбов, Г. М. Короткова. – Куйбышев, 1984.
120. Столбов, В. И. Катодная очистка алюминиевых листов при сварке сжатой малоамперной дугой / В. И. Столбов, В. А. Печенкина, В. В. Кирюшин // Автоматическая сварка. – 1991. – № 6. – С. 53–54.
121. Столбов, В. И. Образование прожога при сварке плавлением тонких листов / В. И. Столбов, В. В. Масаков // Сварочное производство. – 1977. – № 10. – С. 20–22.
122. Тиходеев, Т. М. Электрические свойства электрической сварочной дуги / Г. М. Тиходеев. – М.; Л., 1961. – 254 с.
123. Федько, В. Т. Потери электродного металла на разбрызгивание и угар при ручной дуговой сварке покрытыми электродами / В. Т. Федько, А. П. Ястребов, Д. П. Ильященко // Современные проблемы машиностроения: тр. II междунар. науч.-техн. конф. – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – 594 с.
124. Харчевникова, Е. А. Магнитные поля при сварке и защита от их воздействия / Е. А. Харчевникова, С. В. Болотов // Вестн. Белорус. – Рос. универ. – 2008. – № 2.
125. Цепенев, Р. А. Электрические расчеты в сварочной технике : учеб. пособие / Р. А. Цепенев. – Тольятти, 1989. – 420 с.
126. Чернышов, Г. Г. Влияние теплового потока и давления дуги на предельную скорость сварки / Г. Г. Чернышов, В. Л. Ковтун // Сварочное производство. – 1985. – № 2. – С. 14–15.
127. Черный О. М. Влияние сил поверхностного натяжения на струйный перенос металла при сварке на обратной полярности / О. М. Черный // Сварочное производство. – 2004. – № 4. – С. 19–21.

128. Шнеерсон, В. Я. Особенности формирования оплавленного слоя торца стальной пластины при плазменной сварке / В. Я. Шнеерсон, Д. Г. Быховский // Сварочное производство. – № 12. – С. 18–19.

129. Шнеерсон, В. Я. Механизм волнообразного формирования швов тонколистовых соединений при сварке по отбортовке / В. Я. Шнеерсон // Сварочное производство. – 1988. – № 8. – С. 36–39.

130. Шнеерсон, В. Я. О механизме формирования волнового режима формирования швов типа «пила» при сварке тонколистовых соединений / В. Я. Шнеерсон // Сварочное производство. – 1989. – № 12. – С. 37–39.

131. Шнеерсон, В. Я. О механизме формирования периодической структуры (слоистой неоднородности) сварного шва / В. Я. Шнеерсон // Сварочное производство. – 1990. – № 2. – С. 41–43.

132. Шубин, В. И. Стойкость прямоугольных и круглых вольфрамовых электродов при длительной работе / В. И. Шубин, М. В. Буянов, Ю. М. Бородин и др. // Сварочное производство. – 1979. – № 12. – С. 12–13.

133. Юсуфова, З. А. О механизме разрушения окисных плен в стыке при аргонодуговой сварке алюминиевых сплавов / З. А. Юсуфова // Сварочное производство. – 1979. – № 10. – С. 25–26.

134. Ющенко, К. А. Сварка полос из медных сплавов, легированных бериллием / К. А. Ющенко, А. А. Наконечный, Ю. Г. Высоцкий и др. // Сварочное производство. – 1991. – № 9. – С. 2–4.

135. Ющенко, К. А. Изучение свариваемости аустенитных азото-содержащих сталей / К. А. Ющенко, А. М. Солоха, Н. П. Казенков // Сварочное производство. – 1988. – № 4. – С. 6–10.

136. Baxendine, A. R. Welding thin materials. «Welding Rev.». – 1982. – 1. – № 1. – 48–50.

137. Brilliant, M. Particularities de soudage TIG automatique des toles tres faibles epaisseurs d'aluminium et d'alliages d'aluminium. «Collog.Alum. Alloys Weld. Constr. Annu. Assem., Porto, 8 sept., 1981, IIW», S. L., s.a., 1. 3/1–1.3/9.

138. Radio frequency-free arc starting in gas Tungsten arc welding. Welding J. – 1986. – 38. – № 2. – 33–41.

139. Trindade E. M., Allum C. J. Characteristics in steady and pulsed current GMAW // Welding and Metal Fabrication. – 1984. – Vol. 52. – № 7. – P. 264–266, 268–270, 272.

140. Walster, H. Practical and Technological Aspects of Inert gas Welding of Aluminium and Its Alloys / H. Walster, M. Jehnder // «Collog. Alum. Alloys Weld. Constr. Annu. Assem., Porto, 8 Sept., 1981, IIW» 1.8/1–1.8/14.

Научное издание

**Мейстер Роберт Александрович**  
**Мейстер Андрей Робертович**

## **СВАРОЧНЫЕ СВОЙСТВА ОДНОФАЗНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ**

Монография

Редактор *М. В. Саблина*  
Корректор *В. Р. Наумова*  
Компьютерная верстка *О. А. Кравченко*

Подписано в печать 19.01.2012. Печать плоская  
Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 10  
Тираж 100 экз. Заказ № 2950

Редакционно-издательский отдел  
Библиотечно-издательского комплекса  
Сибирского федерального университета  
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79  
Тел/факс (391) 206-21-49, e-mail: rio@lan.krasu.ru

Отпечатано полиграфическим центром  
Библиотечно-издательского комплекса  
Сибирского федерального университета  
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82а  
Тел/факс (391) 206-26-58, 206-26-49  
E-mail: print\_sfu@mail.ru; <http://lib.sfu-kras.ru>