СОДЕРЖАНИЕ

Сведения об авторах **5**
Предисловие **6**

1 Особенности электродуговой сварки металла на постоянном токе и на переменном токе промышленной частоты **7**
1.1. Дуга постоянного тока 8
1.2. Дуга переменного тока 11
1.3. Механизмы переноса электродного металла в дуге 14
1.4. Предпосылки для создания электросварочных аппаратов переменного тока высокой частоты 16

2 Структура и схемотехника сварочных инверторов **19**
2.1. Схемотехника и особенности работы инверторных сварочных источников с выходом на постоянном токе 20
2.2. Высокочастотный инвертор для сварки на переменном токе 29

3 Исследование переходных процессов в сварочном инверторе **32**
3.1. Особенности построения компьютерных моделей сварочных инверторов 33
3.2. «Быстрые» переходные процессы в сварочном инверторе 35
3.3. «Медленные» переходные процессы в сварочном инверторе 42
3.3.1. Исследование «медленных» переходных процессов на этапе пуска сварочного инвертора 48
3.3.2. Переходные процессы на этапе горения сварочной дуги 54
3.4. Нагрузочная характеристика высокочастотного инвертора для сварки на переменном токе 57

4 Электромагнитная совместимость сварочного инвертора **63**
4.1. Причины и характер помех в сварочном инверторе 64
4.2. Спектральный состав тока сварочного инвертора 73

4.3. Излучающая способность сварочного кабеля 84
4.4. Излучающая способность сварочного трансформатора 90

5 Коэффициент полезного действия сварочного инвертора 99

6 Групповая работа сварочных инверторов 110
6.1. Проблемы обеспечения групповой работы..... 111
6.2. Условия осуществления групповой работы инверторов переменного тока 116

Литература 142

Сведения об авторах

Бардин Вадим Михайлович

Окончил радиотехнический факультет Московского энергетического института (1962). Кандидат технических наук, профессор кафедры радиотехники Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарёва.

Область научных интересов: измерение параметров и исследование надежности силовых полупроводниковых приборов, электронное приборостроение, производственный менеджмент.

Автор более 170 научных и учебно-методических работ, 30 авторских свидетельств и патентов. Подготовил 5 кандидатов наук. Занимал должности заместителя директора НИИ силовой электроники, проректора Мордовского госуниверситета по научной работе, заведующего кафедрой.

Земсков Антон Владимирович

Окончил институт физики и химии Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарёва (2011). Кандидат технических наук, директор Центра трансфера технологий Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарёва.

Область научных интересов: силовая электроника, электронное приборостроение, производственный менеджмент, инновационный бизнес.

Автор более 30 научных и учебно-методических работ, 3 патентов.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Как и в других областях техники, в соответствии с законами развития совершенствуются и сварочные устройства, и сварочные технологии. В настоящее время наряду с обычным трансформаторно-дроссельным оборудованием широкое применение нашли сварочные инверторы на полупроводниковых приборах. Они не только существенно меньше и легче традиционных аппаратов, но и обладают рядом дополнительных опций, облегчающих режим ручной сварки и способствующих получению более качественных соединений. Такие аппараты выпускают десятки зарубежных и отечественных фирм. Однако все они предназначены для осуществления дуговой электросварки только постоянным током. Сварка на переменном токе пока осуществляется лишь на промышленной частоте с помощью сварочных трансформаторов. У группы ученых Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарёва (г. Саранск) возник вполне естественный вопрос: если сварку можно осуществлять на частоте 50 Гц, то почему не попытаться сделать то же самое на более высокой частоте, например на частоте 50 000 Гц? Был выполнен комплекс научных и экспериментальных работ, результаты которых изложены в данной книге.

Выявлено, что сварка на частотах ультразвукового диапазона способствует снижению дисперсности металла в зоне шва, что увеличивает прочность соединения. Кроме того, широкий спектральный состав сварочного тока позволяет использовать аппарат в качестве генератора для индукционного нагрева металлов.

В ходе работ были изучены динамические процессы, происходящие в сварочном инверторе на различных этапах сварочного цикла, определена зона оптимальных рабочих частот, изучена проблема электромагнитной совместимости сварочного аппарата, показана возможность осуществления групповой работы нескольких аппаратов для увеличения величины сварочного тока.

По мнению авторов, результаты выполненной работы могут быть полезными не только специалистам по сварочной технике, но и другим специалистам, связанным с созданием полупроводниковых преобразовательных устройств, а также студентам соответствующих специальностей.

ГЛАВА СТРАНИЦА

1 Особенности электродуговой сварки металла на постоянном токе и на переменном токе промышленной частоты

2	Структура и схемотехника сварочных инверторов	19
3	Исследование переходных процессов в сварочном инверторе	32
4	Электромагнитная совместимость сварочного инвертора	63
5	Коэффициент полезного действия сварочного инвертора	99
6	Групповая работа сварочных инверторов	110

Физика сварочной дуги, металлургические свойства сварочных соединений, режимы сварки и другие аспекты сварочного процесса достаточно подробно рассмотрены в большом числе работ разных авторов. Авторы данной книги не ставили перед собой задачу изложения всех физических, химических, технологических особенностей электродуговой сварки. Задача состояла в попытке на основе известных сведений выявить предпосылки и обосновать возможность и целесообразность создания электросварочных устройств для осуществления сварки на переменном токе частоты ультразвукового диапазона (25–100 кГц). Для этого потребовалось рассмотреть некоторые особенности сварочных дуг как постоянного, так и переменного тока, поскольку физические процессы их возбуждения и горения значительно отличаются.

1.1. Дуга постоянного тока

Электрическую дугу принято рассматривать как цилиндрический столб высокотемпературной плазмы, которая обеспечивает перенос расплавленного металла с одного электрода на другой [1]. Плазма представляет собой сильно ионизированный газ, то есть газ, содержащий положительно и отрицательно заряженные частицы (ионы и электроны). Ионы и электроны обеспечивают электрический ток через область дуги, занятую плазмой. Наличие в плазме заряженных частиц определяет целый ряд ее специфических свойств. Например, ее взаимодействие с электрическим и магнитным полями.

Протекание по дуге электрического тока приводит к появлению в ней собственного магнитного поля. При цилиндрической симметрии дугового столба имеется только азимутальная составляющая магнитного поля H_φ (или индукции $B_\varphi = \mu_0 H_\varphi$), которая зависит от плотности тока. Взаимодействие этого магнитного поля с аксиальной составляющей плотности тока приводит к повышению давления в дуге, то есть к ее сжатию. Это явление называют *пинч-эффектом*. Кроме того, параметры дуги могут изменяться во времени не только в моменты ее возникновения и исчезновения, но и на этапе установившегося горения, что вызывает флуктуации сварочного тока источника питания.

Поскольку сварочная дуга является гибким электропроводом между электродом и изделием, то, как всякий проводник с током, она взаимодействует с внешним магнитным полем. Отклонение столба дуги под действием магнитного поля, наблюдаемое в основном при

сварке постоянным током, называется *магнитным дутьем*. Возникновение его объясняется тем, что в местах перегиба тока создается различная напряженность магнитного поля. Это приводит к отклонению дуги в сторону, противоположную большей напряженности магнитного поля. При сварке переменным током, в связи с тем, что полярность меняется с частотой тока, это явление наблюдается значительно слабее. Возникновение магнитного дутья вызывает непровары и ухудшает внешний вид шва. Устранить его можно путем изменения места подключения токопровода, угла наклона электрода, заменой постоянного тока переменным.

Возбуждение дуги происходит через стадии лавинного и тлеющего зарядов, переходящих по мере роста тока в дуговой. Считается, что по истечении 10^{-5}–10^{-4} сек от начала разряда между металлическими электродами его параметры приобретают значения, свойственные сколь угодно длительно горящей дуге [1].

Плазменный столб дуги, имеющий температуру несколько тысяч градусов, не может граничить непосредственно с металлом электродов, так как в большинстве случаев точка кипения последних значительно ниже температуры столба. Поэтому существуют промежуточные слои газа, соединяющие столб с электродами. Температура в них постепенно снижается, а с ней и степень термической ионизации газа. Эти зоны названы приэлектродными областями дуги – катодной и анодной.

Основная доля мощности, нагревающая и плавящая электроды, передается им из приэлектродных областей, в то время как роль столба в энергетике сварочного процесса сравнительно невелика.

Столб дуги передает энергию в окружающее пространство в основном лучеиспусканием. Эти потери при сварочных токах до 300 А не превышают 100 Вт, что составляет 3–4% от общей потребляемой мощности.

Процессы в анодной и катодной областях существенно различаются, поэтому требуют отдельного рассмотрения.

Анодная область. В процессе нагрева и плавления металлов анодная область является особенно активной. Изменения длины столба в процессе сварки практически не сказываются на величине энергии, передаваемой аноду. В сварочных дугах плавящиеся и кипящие аноды имеют, как правило, неустойчивую по форме поверхность, что вызывает непрерывное перемещение в пространстве анодной области. Анодное падение напряжения в сварочной дуге составляет $U_а \approx (2{,}5 \pm 1)$ В и слабо зависит от величины тока.

Установлено, что ток в анодном пятне распределен неравномерно. Максимальное значение его плотности в дуге со стальными электродами в воздухе достигает $3 \cdot 10^3$ А/см^2, а средняя плотность составляет около $1{,}5 \cdot 10^3$ А/см^2 и остается практически неизменной при токах от 160 до 1000 А и длине дуги от 5 до 20 мм [2].

Катодная область. На легкоплавких катодах, примыкающая к дуге поверхность которых находится в жидком состоянии и испаряется, пятна имеют четкие границы и, как правило, быстро и беспорядочно двигаются. Падение напряжения у стального катода оценивается в диапазоне от 8 до 18 В, а средняя плотность тока – в пределах $1 \cdot 10^3$–$2{,}6 \cdot 10^3$ А/см^2.

Основным механизмом появления тока считается термоэлектронная эмиссия с нагретого катода. Причем при обрыве дуги эта эмиссия сохраняется еще некоторое время, постепенно снижаясь в течение 1–1,5 мс [2]. Термический характер ионизации газа в прикатодной области определяет частые колебания дугового напряжения. Колебания $U_д$ достигают 10 В, а их частота составляет 1000–2000 Гц [1].

Известно, что дуговой разряд даже при кратковременном горении оставляет на электродах следы (или отпечатки). Размеры отпечатков увеличиваются со временем воздействия дуги на электроды. Это обусловлено блужданием дуги, усиливающимся по мере накопления на электродах жидкого металла [2].

Кроме того, в дуге имеются мощные потоки ионизированного газа с преимущественным направлением вдоль ее оси. Их скорость в сварочной дуге со стальными электродами достигает 75–100 м/сек. Потоки оказывают силовое воздействие на электроды и расплавленный металл, вытесняя его за пределы активной зоны дуги. В результате по периметру отпечатков могут образовываться валики металла. Считается, что такой поток сообщает «жесткость» дуге вблизи катода, поддерживая направление столба перпендикулярно поверхности его активного пятна. Интенсивность потоков увеличивается с ростом тока.

Электрическая дуга как элемент электрической цепи имеет свою вольт-амперную характеристику (ВАХ), обладающую ярко выраженной нелинейностью. На рис. 1.1 приведен характерный вид динамической характеристики для дуг с различными электродами.

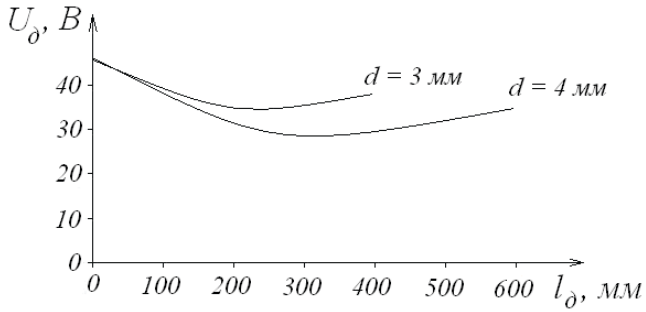

Рис. 1.1. Динамическая ВАХ открытой дуги со стальными электродами различного диаметра

1.2. Дуга переменного тока

При заданной частоте f питающего напряжения каждый из электродов дуги столько же раз поочередно бывает катодом и анодом. В случае существенного различия их физических свойств и геометрических размеров в двух соседних полупериодах тока существуют разные дуги. Изменение полярности электродов вызывает также изменение интенсивности и направления газовых потоков в дуге, обусловленных пинч-эффектом и испарением электродов. Ток дуги, непрерывно изменяясь, обусловливает изменение радиальных размеров столба и температуры отдельных слоев, с током связаны и размеры активных пятен на электродах. Все эти процессы в зависимости от скорости протекания переходных процессов в столбе и на электродах, по сравнению со скоростью изменения тока, обусловливают в ряде случаев существенное различие дуг переменного и постоянного токов.

На относительно низких частотах, в частности на промышленной частоте 50 Гц, переменный ток, проходящий через нуль с удвоенной частотой, приводит к тому, что устойчивая дуга погасает и возбуждается повторно с периодичностью 50 раз в секунду. Поэтому результаты исследования дуг постоянного тока нельзя механически переносить на дуги переменного тока.

Существует достаточно много работ по изучению особенностей дуговой сварки на промышленной частоте 50 Гц [3, 4]. Гораздо мень-

ше материалов по дугам на частоте 400 Гц, и практически отсутствуют материалы по сварочным дугам на более высоких частотах, в частности килогерцового диапазона. Тем не менее результаты и методики исследования дуг переменного тока частотой 50 Гц могут оказаться полезными для проведения исследований процессов на более высоких частотах.

При питании дуги от источника переменного напряжения кривая тока дуги оказывается близкой к синусоиде, а кривая напряжения характеризуется ярко выраженными пиками зажигания в начале каждого полупериода и почти постоянным значением $U_д$ в остальной ее части (рис. 1.2).

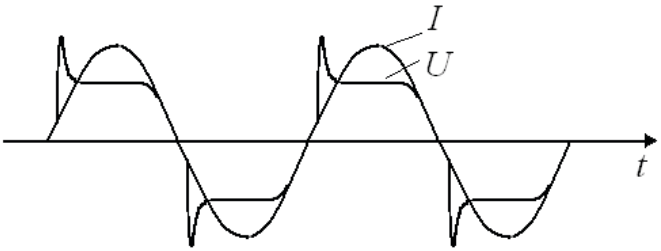

Рис. 1.2. Кривые тока и напряжения при сварке на переменном токе

Изучение характеристик дуг, питающихся от источника с частотой 50 Гц, показало, что ток дуги в момент перехода напряжения через нуль хотя и существенно уменьшается, но не достигает нулевых значений [2]. Объясняется это, вероятно, достаточно большим временем деионизации газового промежутка и большой длительностью остывания электродов. Но тем не менее в переходные периоды изменения температуры дуги значительны и могут достичь 1500–2000 °К [2].

Важным фактором, определяющим качество сварного соединения, является устойчивость сварочной дуги. Параметры системы «электроды – газ столба» могут в процессе их взаимодействия изменяться по целому ряду причин. Такими причинами могут быть: изменение длины дуги, перемещение капель металла, изменение состава газа из-за неравномерного испарения покрытий электродов, колебания напряжения питающей сети.

Длительность существования устойчивой дуги переменного тока принято характеризовать таким параметром, как постоянная време-

ни дуги θ, которая зависит прежде всего от потенциала ионизации дугового газа.

Существенное различие во времени существования плазмы и термоэлектронной эмиссии с электродов позволяет разделять создаваемую ими проводимость межэлектродного промежутка после выключения тока дуги. На рис. 1.3 приведён характерный вид изменения во времени проводимости воздушного промежутка между электродами в процессе погасания дуги [2].

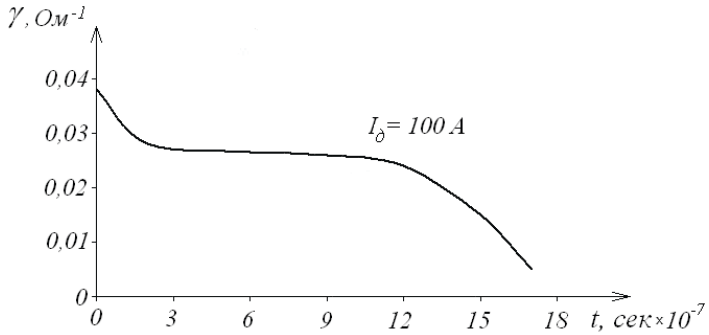

Рис. 1.3. Зависимость проводимости воздушного промежутка

На кривой видны три характерных участка. Начальная быстро убывающая проводимость обусловлена зарядами остаточной плазмы. После ее деионизации проводимость осуществляется только электронами термоэмиссии с характерным их быстрым уменьшением по мере охлаждения электродов. В первом приближении проводимость γ или сопротивление R межэлектродного промежутка можно описать выражениями:

$$\gamma = \gamma_0 \exp\left(-\frac{t}{\theta}\right) \quad \text{или} \quad R = R_0 \exp\left(\frac{t}{\theta}\right). \tag{1.1}$$

Можно считать, что при быстром выключении тока $\left(\frac{dI}{dt} \approx 5 \cdot 10^6 \, a/c\right)$ промежуток со стальными электродами в открытой атмосфере имеет начальное сопротивление порядка 30 Ом. Его постоянная времени $\theta \approx 2 \cdot 10^{-7}$ сек [1].

1.3. Механизмы переноса электродного металла в дуге

Важными параметрами сварного соединения являются глубина проплавления и ширина шва. Они зависят от процессов в сварочной дуге, определяющих давление дуги на металл и блуждание её активного пятна по изделию.

В процессе горения дуги жидкий металл с конца плавящегося электрода переходит в сварочную ванну в виде отдельных капель различного размера и массы. Независимо от положения шва в пространстве капли металла всегда перемещаются вдоль оси электрода по направлению к сварочной ванне. Формирование, отрыв и перенос капель происходят под влиянием целого ряда факторов. К ним относятся:

- сила тяжести;
- электромагнитные силы, возникающие в процессе прохождения тока через электрод и дугу;
- силы поверхностного натяжения;
- сила сварочного тока;
- напряжение на дуге;
- полярность приложенного к электроду напряжения;
- состав электродного покрытия;
- газовые потоки столба;
- скорость перемещения капли.

Не вдаваясь в тонкости всех этих процессов, которые изучались многими специалистами, остановимся лишь на некоторых результатах, представляющих интерес в рамках нашей работы. В [3] отмечено, что масса капель зависит от силы тока и полярности приложенного напряжения. Так, при прямой полярности масса капли в среднем составляла 0,5 г, а при обратной – 0,2 г. В среднем в зависимости от силы тока, условий сварки, диаметра электрода и прочих факторов масса капель может составлять от десятых долей грамма до 1,5–2,5 г. Там же приведены сведения, что при сварке низкоуглеродистой стали металл с катода переходит в ванну крупными каплями с частотой менее десяти капель в секунду, а с анода – сотнями мелких капель. Обнаружено уменьшение массы и размера капель, отрывающихся с анода по мере роста тока. Это указывает на заметную роль элетродинамических и других сил, обусловливаемых током в образовании и переносе капель, а также на различие меха-

низмов их действия на катоде и аноде дуги. Размер капель может находиться в пределах тысячных долей миллиметра до нескольких миллиметров, при крупных каплях возможны кратковременные электрические короткие замыкания в дуге с ее последующим восстановлением. Вероятно, это является одной из причин «изрезанности» тока и напряжения источника питания дуги. Частые короткие замыкания в дуге предъявляют жесткие требования к динамическим характеристикам источника питания для обеспечения возбуждения дуги после каждого такого замыкания.

Считается, что на скорость и траекторию движения капель оказывают влияние газовые потоки столба, определяемые как пинч-эффектом, так и испарением электродов. Газовые потоки со стержневых электродов не оказывают существенного влияния на механизм дуги и жидкий металл ванны. Потоки из ванны ввиду её значительной протяжённости и блуждания пятен по поверхности нестабильны в пространстве. Достигая капель, расположенных на противоположном электроде или движущихся через столб, потоки искривляют их траектории. Хаотическое изменение траектории капель металла заметно меняет длину и напряжение дуги, вызывая колебание режима её горения и всех связанных с ней факторов. Отдельные капли после отрыва от электрода могут отклоняться от зоны налагаемого шва и попасть за его пределы. Понятно, что все эти процессы приводят к ухудшению качества соединения.

Во время движения за счет теплопроводности из столба капля дополнительно нагревается. Причем чем меньше размер капли, тем до более высоких температур она может нагреться за время движения через столб. Поэтому при мелкокапеллярном переносе металла в сварочную ванну при прочих равных условиях поступает больше тепла, чем при крупнокапельном.

В целом специалисты различают до семи различных видов переноса металла в дуге, отличающихся размером и весом капель, особенностями их формы перед отрывом от электрода, траекторией движения капель в дуге, «блужданием» дуги и др. [3].

Естественно, что различные виды переноса по-разному сказываются на условиях существования дуги. Наиболее стабильны они при мелкокапельном переносе, когда длина дугового промежутка и положение столба в пространстве не меняются.

Но при любом механизме переноса капель однозначно доказано, что размер капель зависит от силы и плотности тока и напряжения на дуге. Установлено, что с увеличением силы тока размер капель

уменьшается, а число их в единицу времени возрастает. С увеличением напряжения на дуге (длины дуги), наоборот, размер капель увеличивается, а число их уменьшается. На вес и размер капель влияют также полярность электродов, диаметр электрода и состав его покрытия.

1.4. Предпосылки для создания электросварочных аппаратов переменного тока высокой частоты

По результатам проведённого по литературным источникам анализа физических процессов, происходящих в сварочной дуге, можно высказать ряд соображений, в том числе и по возможным преимуществам сварки на повышенных частотах:

1. Качество сварного соединения во многом зависит от стабильности процессов в дуговом промежутке, которые определяют размер, температуру и массу капель переносимого металла, размеры получаемого шва (ширину и глубину проплавления), а также производительность процесса сварки.
2. Одной из характерных особенностей сварочной дуги является её блуждание по поверхности электродов. Это приводит к хаотическому изменению траектории движения капель расплавленного металла, изменению длины дуги и напряжения на ней, уширению шва, разбрызгиванию металла. Дополнительным возмущающим фактором, способствующим изменениям траектории движения капель, являются мощные газовые потоки из расплавленной ванны. При сварке постоянным током наблюдается эффект «магнитного дутья», приводящий к изменению направления дуги. Это может приводить к непровару и ухудшению качества шва. На переменном токе этот эффект существенно ослабевает.
3. В зависимости от полярности приложенного к электродам напряжения меняются масса и размер капель переносимого металла. Так, при сварке на постоянном токе металл с катода переходит в ванну в виде крупных капель с частотой менее десяти капель в секунду, а с анода – сотнями мелких капель. При крупнокапельном переносе возможны кратковременные электрические короткие замыкания в дуге с её последующим восстановлением. При пролёте капли металла через столб ду-

ги, где температура существенно выше, чем в приэлектродных зонах, капля дополнительно нагревается. Очевидно, что при мелкокапельном переносе металла капля будет нагреваться быстрее и больше, и в сварочную ванну при прочих равных условиях поступает больше тепла, чем при крупнокапельном.

4. Для возбуждения электрической дуги необходимо каким-либо образом повысить уровень ионизации межэлектродного промежутка. Так, для возбуждения дуги как на постоянном, так и на переменном токе в обычных условиях напряжение холостого хода на электродах должно быть не менее 60–70 В. На частоте 50 Гц дуга гаснет каждый раз, когда ток падает до нуля и затем вновь возбуждается. Однако существует определённое время деионизации, когда столб газа остаётся ионизированным и через него протекает небольшой ток. Если существенно увеличить частоту питающего тока, то, вероятно, можно добиться режима, когда ток через газовый столб, изменяясь по величине, не будет прерываться. Известно, что колебания температуры дуги в переходные периоды при работе на частоте 50 Гц могут достигать 1500–2000 °К. Очевидно, что на повышенных частотах эти колебания должны быть существенно меньше, что должно способствовать повышению качества сварного соединения.
5. При сварке на повышенной частоте частая смена полярности электродов (анода и катода) должна привести к снижению и усреднению размера капель переносимого металла и повышению частоты их внедрения в зону соединения металлов. Мелкокапельный перенос, по мнению специалистов по сварке, способствует образованию более однородной структуры зерен металла в сварном соединении и повышению его прочности [3].
6. Питание дуги током высокой частоты должно привести за счёт индукционного нагрева металла к некоторому подогреву плавящегося электрода и дополнительному нагреву отрывающейся от него капли металла. С учётом этого можно предполагать, что при прочих равных условиях в сварочную ванну будет поступать больше тепла, что повышает КПД и производительность процесса.
7. Повышенная частота рабочего напряжения позволяет увеличить уровень предразрядной ионизации межэлектродной газовой среды, что должно снизить необходимую величину напряжения холостого хода, увеличить коэффициент трансфор-

мации по току и, соответственно, снизить токовую нагрузку на питающую сеть.

8. Сварка на переменном токе повышенной частоты позволяет исключить из сварочных аппаратов достаточно мощные и дорогие выходные выпрямители с соответствующими охладителями, а это уменьшает габариты, массу и стоимость аппаратов.

Таким образом, осуществление дуговой электросварки на повышенных частотах позволяет не только улучшить технико-экономические показатели сварочных аппаратов, но и должно повысить качество сварных соединений.

С целью проверки вышесказанных предположений были изготовлены две партии пластинчатых сварочных образцов. Одна партия была сварена постоянным током величины 150 А, другая – переменным током такой же величины на частоте 25 кГц. Образцы были испытаны на разрушение сварных соединений на разрывной машине. Полученные результаты показали, что при сварке переменным током повышенной частоты прочность соединений увеличилась на 7–12%.

Кроме того, был проведен металлографический анализ. Фотографии микрошлифов соединений приведены на рис. 1.4, 1.5. Отчетливо видно, что гранулы в соединении, полученном путем сварки переменным током повышенной частоты, существенно меньше и расположены более плотно, что и привело к увеличению прочности соединения.

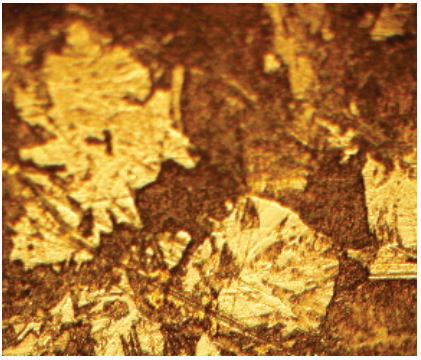

Рис. 1.4. Фотография микрошлифа при сварке постоянным током, увеличение x500

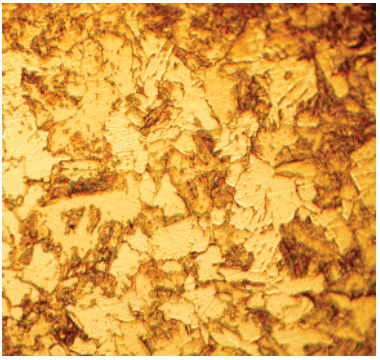

Рис. 1.5. Фотография микрошлифа при сварке переменным током высокой частоты, увеличение x500

ГЛАВА		СТРАНИЦА
1	Особенности электродуговой сварки металла на постоянном токе и на переменном токе промышленной частоты	7

2 Структура и схемотехника сварочных инверторов

3	Исследование переходных процессов в сварочном инверторе	32
4	Электромагнитная совместимость сварочного инвертора	63
5	Коэффициент полезного действия сварочного инвертора	99
6	Групповая работа сварочных инверторов	110

2.1. Схемотехника и особенности работы инверторных сварочных источников с выходом на постоянном токе

Инверторные преобразователи напряжения на мощности от единиц ватт до десятков киловатт давно и успешно применяются при построении источников питания для объектов различного функционального назначения. Особенностью этого класса преобразователей является их работа на статическую нагрузку или нагрузку с низкой динамикой. В последние два десятилетия инверторные преобразователи стали применяться при построении электросварочных аппаратов, где нагрузкой является сварочная дуга. Если первые модели таких инверторов выполнялись на тиристорах, то сейчас в качестве коммутирующих активных элементов применяются исключительно силовые МДП-транзисторы. Благодаря применению в таких аппаратах высокочастотных сварочных трансформаторов удалось существенно улучшить массогабаритные показатели сварочных устройств.

Абсолютное большинство сварочных инверторов предназначено для обеспечения сварки на постоянном токе. Поэтому существующим источникам сварочного тока инверторного типа присущи недостатки сварочных выпрямителей. Структурная схема таких аппаратов представлена на рис. 2.1.

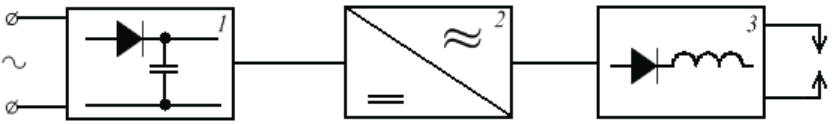

Рис. 2.1. Структура ИСА постоянного тока:
1 – входной выпрямитель с емкостным накопителем энергии;
2 – инверторный модуль; 3 – выходной выпрямитель с дросселем

При питании от однофазной сети бестрансформаторный входной выпрямитель заряжает накопительную емкость до напряжения величиной около 300 В. Инверторный модуль, выполненный на ключевых активных элементах, осуществляет преобразование энергии постоянного тока в энергию тока высокой частоты с последующим его выпрямлением для питания сварочной дуги. Причем частота преобразования составляет несколько десятков килогерц. Инвер-

торный модуль, кроме ключевых элементов и системы управления ими, обязательно содержит высокочастотный импульсный трансформатор. Схемотехническое построение инверторного модуля во многом определяет качественные и количественные параметры всего сварочного аппарата.

Анализ схемотехнического построения (топологии) сварочных инверторов зарубежных и отечественных производителей дает основание полагать, что число вариантов таких решений весьма ограничено и все их можно разделить на однотактные и двухтактные. Однотактные схемы формируют импульсы одной полярности, двухтактные – двухполярные импульсы. Во всех схемах транзисторы работают в ключевом режиме, причем время включенного состояния может регулироваться, что дает возможность изменять величину нагрузочного тока. Наиболее распространенные схемотехнические решения инверторных модулей представлены на рис. 2.2.

В двухтактной мостовой схеме формирование двухполярных импульсов происходит за счет попарного отпирания транзисторов (VT1 и VT3), (VT2 и VT4). При номинальной мощности в нагрузке через транзисторы протекает лишь половина полного тока моста, а напряжение на каждом из них составляет половину напряжения на емкости C1. Однако здесь требуется обеспечить полную симметрию плеч моста для исключения возможности протекания через первичную обмотку трансформатора тока подмагничивания. Кроме того, для исключения опасности сквозного короткого замыкания через транзисторы здесь необходимо задать некоторое «мертвое время», то есть паузу между началом процесса отключения одной пары транзисторов и включением другой. В мостовой схеме усложняется и система управления транзисторами. В полумостовой схеме за счет наличия емкостного делителя (C2, C3) напряжение на каждом из транзисторов и на первичной обмотке трансформатора составляет $0{,}5U_{вх}$, то есть при питании схемы от бестрансформаторного сетевого выпрямителя оно не превышает 150 В. Обеспечение сварочного тока величиной 120–150 А при относительно малом коэффициенте трансформации приводит к необходимости применения мощных транзисторов (либо их группового соединения) и увеличению тока, потребляемого из питающей сети. В такой схеме также необходимо задавать «мертвое время». Косой полумост является однотактным инвертором. Транзисторы VT1, VT2 открываются и закрываются одновременно, и здесь нет опасности сквозного КЗ. На транзисторах в запертом состоянии напряжение не превышает $0{,}5U_{вх}$. Энергия

Конец ознакомительного фрагмента.
Приобрести книгу можно
в интернет-магазине
«Электронный универс»
e-Univers.ru