

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.

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 $B_\phi = \mu_0 H_\phi$), 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 $U_a \approx (2,5 \pm 1)$ 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/см², а средняя плотность составляет около $1,5 \cdot 10^3$ А/см² 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/см².

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_d 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.