



## ОСОБЕННОСТИ БЕСКОНТАКТНЫХ ВОЗБУЖДЕНИЙ ДУГИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Н.М. МАХЛИН

ГП «НИЦ СКАЭ ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины». 03680, г. Киев, ул. Боженко, 11. E-mail: electro@paton.kiev.ua

Рассмотрены некоторые важные особенности процессов бесконтактных первоначального и повторных возбуждений дуги переменного тока при дуговой и плазменной сварке, а также электронных вольтодобавочных устройств, генерирующих импульсы высокого и повышенного напряжения, инжектируемые в межэлектродный промежуток для реализации этих процессов. Показано, что наиболее рациональным путем совершенствования возбuditелей и стабилизаторов дуги является создание вольтодобавочных устройств, называемых возбuditелями-стабилизаторами и отличающихся возможностью функционировать в режиме как первоначального так и повторных возбуждений дуги, т.е. в режиме стабилизации процесса горения дуги переменного тока. Приведены выработанные на основе многочисленных исследований, опыта разработки и применения вольтодобавочных устройств оптимизированные требования к параметрам генерируемых этими устройствами импульсов. Рассмотрены некоторые особенности построения комбинированных возбuditелей-стабилизаторов дуги. Библиогр. 32, табл. 2.

*Ключевые слова:* дуговая и плазменная сварка, переменный ток, устойчивость дуги, тлеющий и дуговой разряды, напряжение зажигания, электронные возбuditели – стабилизаторы дуги, энергия, амплитуда и длительность импульсов

**Введение.** Такие преимущества сварки переменным током, как отсутствие магнитного дутья, возможность получения более мелкозернистой структуры металла шва и зоны термического влияния, простота, надежность и сравнительно низкая стоимость сварочных источников питания, обусловили широкое использование переменного тока при ручной дуговой сварке покрытыми электродами (ММА), в инертных газах (TIG) и других способах дуговой и плазменной сварки. Вместе с тем сварке переменным током присущи и определенные недостатки, основным из которых является низкая устойчивость процесса горения дуги. Особенно это характерно для синусоидальных сварочных токов промышленных частот, что связано с периодическими погасаниями дуги вследствие деионизации межэлектродного промежутка, возникающей при каждом изменении полярности тока дуги. Поэтому на протяжении многих десятилетий ведется поиск способов и средств повышения устойчивости сварочных дуг переменного тока [1–9].

Способы повышения устойчивости процессов горения сварочных дуг переменного тока можно условно разделить на металлургические и электрические.

Металлургические способы базируются либо на введении в дуговой промежуток через покрытие электрода, сварочную проволоку, защитную среду или иным образом элементов с низким потенциалом ионизации, либо на увеличении термоэлектронного тока за счет легирования стерж-

ня покрытого электрода или сварочной проволоки элементами с низкой работой выхода электронов [8, 10–13]. Однако в результате исследований и практикой установлено, что возможность повышения устойчивости процессов горения металлургическими способами ограничена довольно узкими областями режимов сварки.

По сравнению с металлургическими электрические способы повышения устойчивости дуг переменного тока более доступны, разнообразны и обеспечивают более широкие технологические возможности. В результате проведенных исследований [5, 6, 8–10, 14, 15] определено, что повышение устойчивости дуг переменного тока может быть достигнуто следующим образом:

- обеспечением высокой скорости изменения напряжения и тока дуги при смене полярности этого тока;
- повышением до 90...130 В значения напряжения холостого хода  $U_{xx}$ ;
- использованием при TIG- или плазменной сварке непрерывно горящей вспомогательной («дежурной») дуги;
- применением импульсных сварочных осцилляторов или генераторов высоковольтных импульсов, амплитудное значение выходного напряжения которых составляет от 3,0 до 10,0 кВ, или генераторов импульсов повышенного напряжения амплитудой 400...1000 В, подаваемых в межэлектродный промежуток в моменты, соответствующие началу формирования катода на изделии или при каждой смене полярности сварочного тока.

Среди электрических способов повышения устойчивости дуг переменного тока наименее затратным и материалоемким и, в силу этого, наиболее распространенным является применение импульсных вольтодобавочных устройств [5, 6, 8–10, 14–19]. Существует множество разработок и технических решений. Тем не менее задача создания универсальных устройств, функционирующих в режиме как первоначального возбуждения дуги, так и повторных возбуждений для стабилизации процесса горения дуги, продолжает оставаться актуальной.

Цель настоящей работы — рассмотрение и обобщение особенностей бесконтактных первоначального и повторных возбуждений сварочной дуги на основе использования литературных данных и собственного опыта автора, определение с учетом этих особенностей требований к параметрам высоковольтных импульсов и импульсов повышенного напряжения, которые должны генерироваться комбинированными возбудителями-стабилизаторами.

**Основные особенности первоначального возбуждения дуги.** Наиболее распространенным методом бесконтактного первоначального возбуждения сварочной дуги постоянного тока в межэлектродном промежутке является его ударная ионизация путем электрического пробоя этого промежутка высоковольтными импульсами.

Различают таунсендовский и стримерный механизмы пробоя [3, 6, 8, 15, 20]. В диапазоне свойственных дуговой и плазменной сварке значений произведения  $pd$ , где  $p$  — давление газа в межэлектродном промежутке, а  $d$  — длина этого промежутка, имеет место стримерный характер пробоя, при котором от анода к катоду прорастает тонкий плазменный канал — стример. Головка стримера имеет положительный заряд и при приближении к катоду во много раз усиливает напряженность поля вблизи этого электрода, что вызывает вторичную электронную эмиссию. Вследствие этого между электродами промежутка образуется «проводящий мостик», по которому электроны проводимости движутся от катода к аноду, и создаются предпосылки для возникновения и развития искрового разряда, представляющего собой самостоятельный неустановившийся разряд в газе, для которого характерны высокая температура электронов плазмы в канале разряда и высокая степень ионизации газа [6, 15, 20]. Образование искрового канала обеспечивает скачкообразное увеличение проводимости межэлектродного промежутка и, если подсоединенный к этому промежутку сварочный источник питания обладает достаточной мощностью, электрическая искра может превратиться в стационарный дуго-

вой разряд с присущими ему катодным и анодным пятнами.

Очевидно, что при построении устройств для первоначального возбуждения дуги при дуговой и плазменной сварке нужно исходить из минимально необходимых значений напряжения пробоя межэлектродных промежутков (напряжения возбуждения искрового разряда). Следует отметить, что строгой теории искрового разряда, объясняющей всю совокупность известных фактов, пока не существует [6, 8, 15, 20, 21]. В некоторых важных случаях для описания преимущественно начальной стадии искрового разряда могут быть использованы приближенные теории [6, 15], одна из которых базируется на гипотезе Теплера о том, что проводимость канала пропорциональна прошедшему через промежуток заряду, а вторая — на гипотезе Вайцеля и Ромпе, согласно которой вся выделяемая в канале энергия затрачивается на увеличение внутренней энергии плазмы и пропорциональной ей проводимости канала.

Аналитический расчет значения напряжения пробоя сильно затруднен, так как в каждом конкретном случае требует экспериментального определения значений нескольких специфических коэффициентов. Для частных случаев при TIG- или плазменной сварке довольно удачной попыткой аналитического определения напряжения пробоя в межэлектродных промежутках являются результаты работы [15], однако приведенные в ней выражения мало пригодны для инженерных расчетов. На практике при определении необходимых значений напряжения пробоя исходят из данных экспериментальных работ, среди которых можно выделить работу [21]. В ней Г.И. Лесков и В.П. Лугин пришли к выводам о том, что при прочих равных условиях материал сварочных электродов, состав их покрытия и обычные для сварки скорости истечения газов не влияют на значения напряжения пробоя. Этими же исследователями не обнаружено и сколь-либо заметного влияния частоты следования (в диапазоне от 100 до 3000 Гц) и формы подаваемых в межэлектродный промежуток высоковольтных импульсов. Установлено, что основными факторами, определяющими значение напряжения пробоя, являются состав газа в межэлектродном промежутке, его длина и степень неоднородности электрического поля в приэлектродных областях. При этом главной молекулярно-кинетической характеристикой газа, от которой зависит напряжение пробоя, является сечение рассеяния электронов на атомах или молекулах газа.

На основе результатов работ [21, 22] и собственных экспериментов автора получены приведенные в табл. 1 эмпирические выражения для определения приближенных усредненных значе-

Таблица 1. Приближенные значения напряжения пробоя  $U_{пр}$  в зависимости от состава газа

Состав газа	Напряжение пробоя $U_{пр}$	Длина промежутка между сварочными электродами $d$ , мм
Аргон	2400+150d	0,5...8,0
Гелий	3250+390d	0,5...8,0
Азот	2940+920d	0,5...5,5
	520+1360d	> 5,5
Двуокись углерода	3200+1200d	0,5...4,0
	2400+1400d	> 4,0
Воздух	3050+1100d	0,5...4,5
	1835+1370d	> 4,5

ний минимально необходимого напряжения пробоя  $U_{пр}$  в некоторых газовых средах для технологически обоснованных промежутков между сварочными электродами и типовых длительностях высоковольтных импульсов.

При воздействии на межэлектродный промежуток импульсного напряжения пробоя имеет место запаздывание возникновения разряда [6, 15, 20], которое, главным образом, зависит от концентрации частиц газа в объеме промежутка и от превышения приложенного импульсного напряжения над напряжением пробоя в статическом поле. Это предопределяет при фиксированной вероятности пробоя наличие зависимости (вольт-секундной характеристики) напряжения пробоя от длительности импульса напряжения, приложенного к межэлектродному промежутку. При вероятности пробоя 50 % для условий, существующих при дуговой и плазменной сварке, вольт-секундная характеристика может быть представлена как [6, 15]:

$$U_{пр} = \left(1 + \sqrt[3]{\frac{a}{t_{и} pd}}\right) U_{пр.ст},$$

где  $a$  — константа, зависящая от рода газа в межэлектродном промежутке;  $t_{и}$  — длительность импульса напряжения, приложенного к межэлектродному промежутку;  $U_{пр.ст}$  — напряжение пробоя в однородном статическом поле. В реальных сварочных установках  $t_{и}$  обычно не превышает нескольких микросекунд, а значение  $U_{пр.ст}$  может быть определено по данным Купера или Ритца [20, 22].

Если энергия  $W_{и}$  импульса напряжения, приложенного к межэлектродному промежутку, достаточна, то непосредственно после пробоя промежуток в нем происходит искровой разряд, что, как установлено Б.Я. Темкиным [6, 15], сопровождается в его начальной стадии существенным возрастанием проводимости межэлектродного промежутка, а в завершающей стадии — ее падением. В зависимости от условий в межэлектродном промежутке и характеристик подсоединенного к нему сварочного источника питания по заверше-

нии искрового разряда возможно полное его затухание или же возникновение тлеющего или дугового разряда. Исследования показали, что дуга в межэлектродном промежутке возникает только в том случае, когда сопротивление  $R_{к}$  токопроводящего канала, образованного искровым разрядом, меньше некоторого порогового значения  $R_{пор}$ , зависящего от скорости ввода в канал мощности от сварочного источника питания, напряжения на промежутке  $u(t)$  и других факторов.

Рекомендуемые для различных газовых сред и технологически обоснованных межэлектродных промежутков значения энергии импульса  $W_{и}$  (Дж), обеспечивающие возбуждение дуги искровым разрядом, полученные нами экспериментально и подтвержденные опытом применения электронных вольтдобавочных устройств, составляют: аргон — (0,01...0,15) Дж, гелий — (0,10...0,25) Дж, азот — (0,15...0,40) Дж, двуокись углерода — (0,30...0,50) Дж, воздух — (0,30...0,50) Дж.

Теория возбуждения дуги переменного тока разработана слабо. Однако, поскольку для дуговой и плазменной сварки используется переменный ток преимущественно промышленной и близких к ней частот (от 50 до 200 Гц), имеются все основания полагать, что условие  $R_{к} < R_{пор}$  справедливо и в случае переменного тока. Так как возбуждение дугового разряда во многом зависит от приложенного к межэлектродному промежутку напряжения, то возбуждающий дугу импульс должен начинать инжектироваться в межэлектродный промежуток вблизи амплитуды  $U_{хх}$  источника питания дуги. Многочисленными исследованиями установлено, что при синусоидальной форме тока дуги фаза начала генерации возбуждающего дугу импульса должна составлять 75...80 электр. град. относительно момента, соответствующего нулевому значению  $U_{хх}$  источника питания дуги, при этом должно выполняться условие достаточно высокой скорости нарастания тока дугового разряда. Кроме того, для осуществления первоначального возбуждения дуги важное значение имеют условия эмиссии из электродов, которые для дуги переменного тока могут быть весьма различны в зависимости от материала электрода и от того, является ли электрод в момент возбуждения дуги анодом или катодом. Особенно это характерно для TIG-сварки алюминия и его сплавов, при которой возбуждение дуги практически всегда происходит в интервалы времени, когда катодом является свариваемое изделие.

**Некоторые особенности повторных возбуждений дуги переменного тока.** В результате многолетних обширных теоретических и экспериментальных исследований, обобщенных, например, в [5, 6, 8–10, 23, 24, 26], накоплен значительный

опыт, позволяющий объяснить ряд явлений и особенностей дуги переменного тока, а также сформулировать основные условия устойчивости дугового разряда.

Наличие пауз в существовании дугового разряда в межэлектродном промежутке вблизи перехода тока через нулевое значение является характерной особенностью сварочной дуги переменного тока. В конце каждого полупериода тока перед угасанием дугового разряда и после него температура газа в дуге существенно уменьшается, а степень его ионизации, и, следовательно, проводимость межэлектродного промежутка значительно снижаются, при этом снижается и температура анодного и катодного пятен [6, 8, 25]. Вследствие этого после погасания дуги в конце предыдущего полупериода ее повторное возбуждение в начале следующего полупериода может произойти при напряжении (пике) зажигания  $U_3$ , значение которого превышает значение напряжения горения дуги  $U_d$ . Аналитическое определение значения  $U_3$  до сих пор не представляется возможным. Экспериментально установлено, что значение  $U_3$  определяется, в основном, электрофизическими свойствами электродов и условиями в межэлектродном промежутке, причем характеристики процессов в этом промежутке, а, следовательно, значения  $U_3$  различны в зависимости от типа электрода. Также установлено, что в полупериоды, когда анодом является сварочный электрод, значение  $U_3$  в большинстве случаев превышает значение этого напряжения для полупериодов, в течение которых электрод является катодом. Основным фактором, определяющим значение  $U_3$  — время существования в межэлектродном промежутке остаточной плазмы (время деионизации плазмы дуги)  $t_{\text{днц}}$  после погасания дугового разряда вблизи перехода тока через ноль. Экспериментально доказано, что чем ниже потенциал ионизации межэлектродного газа и чем выше  $di_d/dt$ , тем продолжительней  $t_{\text{днц}}$  и, соответственно, ниже значение  $U_3$ . Такой же эффект достигается в случае введения в состав электродов элементов с низкой работой выхода. По данным Г.И. Лескова [10], при длительностях перерывов в горении дуги, не превышающих  $2 \cdot 10^{-2}$  с, для электродов типа УОНИ-13/45 значение  $U_3$  составляет 120...165 В, для содержащих в своем покрытии легко ионизирующиеся элементы (калий и натрий) электродов типа ОММ-5 и ЦМ-7  $U_3 = 40 \dots 80$  В, а для электродов без покрытия при длительностях перерывов в горении дуги, не превышающих  $1 \cdot 10^{-2}$  с,  $U_3 > 200 \dots 250$  В.

Особенности процессов, происходящих в межэлектродном промежутке вблизи перехода тока через нулевое значение при сварке неплавящимся электродом, наиболее проявляются при ТIG-свар-

ке изделий из алюминия и его сплавов. Для этого случая характерны высокое значение  $U_3$  при переходе с прямой полярности, при которой катодом является неплавящийся (вольфрамовый) электрод, на обратную, при которой катод — изделие из алюминия или его сплава, и низкое значение  $U_3$  при переходе с обратной полярности на прямую. Качественно этот феномен можно объяснить тем, что при переходе с обратной полярности на прямую температура разогретого в предыдущем полупериоде неплавящегося электрода в силу его низкой температуропроводности не успевает сколь-либо ощутимо измениться и поэтому ток дуги возникает даже при очень малых значениях напряжения на межэлектродном промежутке. При переходе с прямой полярности на обратную процессы в межэлектродном промежутке носят иной характер. Ввиду того, что наружная поверхность изделия из алюминия и его сплавов практически всегда покрыта окисной пленкой  $Al_2O_3$ , работа выхода из алюминия резко понижается и уже при напряжении на межэлектродном промежутке 60...80 В в нем возникает диффузионный тлеющий разряд, который с дальнейшим восстановлением напряжения на межэлектродном промежутке и возрастанием тока через него переходит в субнормальную стадию, а затем в нормальную, причем в нормальной стадии тлеющего разряда возрастание тока происходит при неизменном напряжении. Эта же стадия сопровождается процессом катодного распыления, вследствие чего осуществляются локальное разрушение окисной пленки и очистка от нее сварочной ванны. Последующее нарастание тока через межэлектродный промежуток вызывает переход тлеющего разряда в его аномальную стадию, которой свойственны быстрое нарастание напряжения на межэлектродном промежутке, достигающее при токе 1 А значения 220...240 В, а затем, при дальнейшем возрастании тока, переход в дуговой разряд с характерным для него низким напряжением горения, на 10...12 В большим по сравнению со значениями напряжения горения дуги в полупериоды прямой полярности [6, 15, 20].

Рассмотрение особенностей процессов, происходящих в межэлектродном промежутке вблизи перехода тока через ноль при ТIG-сварке, показывает, что значение  $U_3$  при смене полярности с прямой на обратную определяется пиком напряжения на межэлектродном промежутке в аномальной стадии тлеющего разряда, предшествующего дуговому. С учетом этого в случае использования в качестве защитного газа аргона при ТIG-сварке изделий из алюминия и его сплавов  $U_3 = 240 \dots 250$  В, а случае использования других газов в соответствии с данны-

Таблица 2. Значения энергии импульсов  $W_{и.ст}$ , обеспечивающие повторные возбуждения дуги

Материал свариваемого изделия	Способ сварки	Состав газа или тип покрытия	Энергия импульса $W_{и.ст}$ , Дж
Низкоуглеродистые и легированные стали	TIG	Аргон	0,05...0,35
		Гелий	0,20...0,40
	MMA	Фтористо-кальциевое покрытие	0,40...0,90
		Органическое покрытие без железного порошка	0,20...0,35
	MAG	Двуокись углерода	0,60...1,20
Медь и медесодержащие сплавы	TIG	Аргон	0,35...0,70
Цветные металлы и сплавы (кроме Cu и Al)		Азот	0,5...1,00
		Аргон	0,25...0,50
Алюминий и его сплавы		Гелий	0,35...0,65
		Аргон	0,45...0,90
		Гелий	0,50...1,00

ми, приведенными, например, в [8, 20], значение  $U_3$  может составлять 300...350 В.

Поскольку  $U_{xx}$  источника переменного тока согласно требованиям безопасности при дуговой сварке не должно превышать 80 В эффективно-го значения (113 В амплитудного значения), то на практике надежные повторные возбуждения дуги можно обеспечить лишь при наличии в покрытии или в материале электрода легко ионизирующихся элементов. Во всех остальных случаях стабильное горение дуги без принятия специальных мер невозможно.

Наиболее универсальным и эффективным методом обеспечения устойчивости дуг переменного тока является кратковременное (импульсное) повышение напряжения на межэлектродном промежутке при каждой смене полярности протекающего через этот промежуток тока с помощью специальных устройств, получивших название стабилизаторы горения дуги и представляющих собой генераторы импульсов повышенного напряжения, амплитуда которых равна или превышает значение  $U_3$  [1, 3, 5, 6, 8, 10, 15–19, 27]. Экспериментально установлено, что длительность таких импульсов в зависимости от свойств сварочного источника питания и условий в межэлектродном промежутке должна составлять  $(0,05...0,10) \times 10^{-3}$  с, а в отдельных случаях, например, при сварке плавящимся электродом в среде  $CO_2$ ,  $(0,20...1,00) \times 10^{-3}$  с. Энергия  $W_{и.ст}$  этих импульсов должна во всех случаях обеспечивать переход от аномального тлеющего разряда в дуговой. В табл. 2 приведены полученные нами и другими исследователями экспериментально [5, 6, 8, 10] значения энергии  $W_{и.ст}$  генерируемых стабилизаторами горения дуги импульсов, рекомендуемые для различных защитных сред и технологически обоснованных межэлектродных промежутков при сварке некоторых металлов и сплавов.

**Особенности построения и пути совершенствования комбинированных возбуждителей-стабилизаторов.** Структуры построения специ-

ализированных возбуждителей и стабилизаторов горения дуги сходны между собой, но эти устройства отличаются друг от друга как амплитудными параметрами выходных импульсов, так и алгоритмами и режимами работы их узлов управления.

Опыт применения возбуждителей дуги убеждает, что принципиально эти устройства способны обеспечить эффективную стабилизацию процесса горения подавляющего большинства сварочных дуг переменного тока [4, 8, 16, 17, 27], однако при этом возникает необходимость значительного усиления изоляции сварочного инструмента (например, электрододержателей для MMA) и проводов сварочной цепи. Еще более серьезные конструктивные затруднения появляются в случаях использования возбуждителей дуги для стабилизации процесса ее горения при сварке переменным током способом MIG/MAG. Помимо этого, как показано выше, для стабилизации процесса горения дуги необходимая энергия инжектируемых в межэлектродный промежуток импульсов превышает энергию, необходимую для обеспечения первоначального возбуждения дуги. В силу этого при использовании возбуждителей дуги для стабилизации процесса ее горения необходимо завышать уровень энергии, запасаемой в емкостных накопителях генератора импульсов повышенного напряжения (ГИН) возбуждителей дуги, что вызывает необходимость увеличения массогабаритных показателей этих устройств и их стоимости. Кроме того, при использовании для стабилизации процесса горения дуги переменного тока возбуждителей дуги схема управления последних требует некоторых усложнений ввиду различий в моментах начала генерации выходных импульсов возбуждителей и стабилизаторов. Например, экспериментально установлено, что при синусоидальной форме сварочного тока вырабатываемый возбуждителем дуги и инжектируемый в межэлектродный промежуток импульс должен начинать генерироваться в моменты, соответствующие фазе 75...80 электр.

град. относительно момента нулевой фазы напряжения холостого хода источника питания дуги, в то время, как стабилизирующие горение дуги импульсы целесообразно инжектировать в моменты, соответствующие фазе 68...72 электр. град. [4, 6, 8, 10, 15, 27]. Необходимо отметить и то, что использование возбудителей дуги для стабилизации процесса ее горения при TIG может вызывать ускоренную эрозию неплавящегося электрода, обуславливая этим возрастание вероятности образования в процессе сварки дефектов сварного соединения.

Для осуществления повторных возбуждений дуги специализированные стабилизаторы ее горения должны обеспечивать при каждой смене полярности напряжения на межэлектродном промежутке переход из тлеющего разряда в дуговой через аномальную стадию тлеющего разряда. Для этого инжектируемые в межэлектродный промежуток импульсы стабилизатора должны иметь соответствующие особенностям повторных возбуждений дуги достаточную энергию и длительность, а также амплитуду  $U_{с.и.м}$ , удовлетворяющую условию  $U_{с.и.м} \geq K_c U_3$ , где  $K_c = 1,10...1,25$ . Как правило,  $U_{с.и.м} = 400...600$  В, в отдельных специализированных моделях стабилизаторов горения дуги  $U_{с.и.м} = 700...950$  В. Необходимым условием для обеспечения повторных возбуждений сварочной дуги является правильность выбора момента начала инжекции стабилизирующего импульса в межэлектродный промежуток. Например, при преждевременной инжекции этого импульса его энергия будет рассеяна еще до того, как возникнет тлеющий разряд, вследствие чего переход напряжения на межэлектродном промежутке через пик зажигания станет практически невыполним. Анализ имеющихся в литературе данных свидетельствует о том, что в вопросе выбора момента начала инжекции стабилизирующего импульса единое мнение у исследователей отсутствует. По утверждению авторов работы [1] наиболее целесообразными моментами начала инжекции стабилизирующих импульсов являются моменты, когда после перехода сварочного тока через ноль напряжение на межэлектродном промежутке достигает значений 15...20 В, а по мнению автора работы [28] — значения 20...50 В. Исследования, результаты которых приведены в работе [6], показали, что стабилизирующий импульс должен быть инжектирован не ранее, чем когда тлеющий разряд в межэлектродном промежутке уже сформирован, т.е. с некоторой задержкой относительно момента смены полярности на межэлектродном промежутке. Длительность этой задержки определяется временем развития тлеющего разряда, зависит от тока и скорости его изменения вблизи нулевых значений

и от скорости восстановления напряжения на межэлектродном промежутке и составляет от нескольких микросекунд до  $200 \times 10^{-6}$  с.

Обычно в стабилизаторах дуги с помощью их схем управления достигается задержка длительностью  $(60...100) \times 10^{-6}$  с, что с учетом времени включения коммутирующего ключа ГИН стабилизатора обеспечивает необходимое запаздывание начала инжекции стабилизирующего импульса в межэлектродный промежуток [4, 6, 10, 15]. Частота следования инжектируемых в межэлектродный промежуток стабилизирующих импульсов может быть равна частоте напряжения питающей сети или удвоенному ее значению, что характерно для большинства стабилизаторов горения дуги при MMA и TIG [4, 6, 8, 10].

Одна из отличительных особенностей существующих специализированных стабилизаторов горения дуги заключается в том, что выход их силовой части, как правило, подключен непосредственно к межэлектродному промежутку, т.е. параллельно выходу сварочного источника питания. Силовая часть такого стабилизатора включает в себя зарядное устройство (ЗУ), накопитель энергии (преимущественно емкостной), токоограничивающий резистивный или индуктивный элемент и разрядный ключ (преимущественно тиристорный), при этом емкостной накопитель может быть подсоединен к ЗУ параллельно или последовательно с ним [4, 6, 8]. Подобное подключение выхода силовой части стабилизатора хотя и является наиболее простым и дешевым, однако обладает и существенными недостатками. В зависимости от того, какой преобладающий характер — резистивный или индуктивный — имеет токоограничивающий элемент, разряд емкостного накопителя стабилизатора может быть апериодическим или колебательным соответственно. Электромагнитные процессы, происходящие в контуре разряда емкостного накопителя стабилизатора, хорошо изучены и проанализированы в ряде работ с помощью линейных дифференциальных уравнений второго порядка с ненулевыми начальными условиями [5, 8, 29–31]. При этом приняты допущения о полном разряде (в каждом его цикле) предварительно заряженного емкостного накопителя ГИН стабилизатора и о неизменности проводимости межэлектродного промежутка в течение всей длительности разряда. Из анализа решений известных уравнений следует, что, во-первых, добротность разрядного контура и ток  $i(t)$  в этом контуре пропорциональны проводимости межэлектродного промежутка, а, во-вторых, для обеспечения необходимых значений длительности стабилизирующего импульса и амплитуды  $i(t)$ , составляющей 60...100 А при напряжении заряда



емкостного накопителя  $U_{c0} = 400 \dots 600$  В, требуемая емкость конденсаторов емкостного накопителя стабилизатора должна быть не меньше, чем несколько десятков микрофард. Подключение выхода стабилизатора параллельно межэлектродному промежутку требует наличия входного или выходного трансформатора для гальванической развязки с цепями питающей сети [5, 8]. Кроме того, при параллельном включении стабилизатора существенно снижается его эффективность из-за шунтирующего действия выходного импеданса сварочного источника питания или потерь в защитном фильтре верхних частот (ВЧ-фильтре), предохраняющем компоненты выходных цепей сварочного источника питания от воздействия вырабатываемых стабилизатором импульсов повышенного напряжения. Обычно ВЧ-фильтр представляет собой Г-образное индуктивно-емкостное звено, состоящее из подключенного последовательно с дугой высокочастотного дросселя с обмоткой, рассчитанной на протекание через нее полного тока дуги, и частотного конденсатора, подсоединяемого параллельно выходу сварочного источника питания [6]. Существенным недостатком стабилизаторов параллельного включения с непосредственным подключением к межэлектродному промежутку является принципиальное исключение возможности их использования для осуществления безконтактного первоначального возбуждения сварочной дуги.

Более эффективны возбудители и стабилизаторы дуги последовательного включения, обеспечивающие выделение в межэлектродном промежутке почти всей энергии, накопленной в формирующих контурах их ГИН (пренебрежительно малая часть этой энергии рассеивается в защитном конденсаторе, шунтирующем выход сварочного источника питания, и на проводах сварочной цепи). При последовательном включении импульсных вольтодобавочных устройств в цепь сварочной или вспомогательной дуги отпадает необходимость в ВЧ-фильтре, а для предотвращения от воздействия на сварочный или дополнительный источники питания импульсов высокого или повышенного напряжения достаточно использования защитного конденсатора [6, 15–17]. Важным достоинством импульсных вольтодобавочных устройств последовательного включения является их предпочтительность с точки зрения электромагнитной совместимости [16, 32].

Таким образом, из рассмотрения и анализа отмеченных особенностей первоначального и повторных возбуждений и специализированных вольтодобавочных устройств для реализации этих процессов вытекает, что создание комбинированных возбудителей-стабилизаторов возмож-

но при условии последовательного включения этих устройств в цепь дуги и совершенствования схемотехнических и конструктивных решений функциональных узлов их силовой части, особенно ГИН, а также алгоритмов работы их схем управления.

### Выводы

1. Для более полного объяснения всей совокупности процессов, связанных с первоначальным и повторными возбуждениями сварочной дуги, в том числе дуги переменного тока, требуются дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования, особенно в направлении изучения приэлектродных явлений.

2. В результате рассмотрения и обобщения особенностей бесконтактных первоначального и повторных возбуждений сварочной дуги, выполненных на основе использования известных литературных данных, теоретических и экспериментальных работ разных авторов и нашего опыта разработки и применения средств реализации этих процессов, определены требования к параметрам высоковольтных импульсов и импульсов повышенного напряжения, которые должны генерироваться комбинированными возбудителями-стабилизаторами, а также к моментам начала инъекции этих импульсов в межэлектродный промежуток.

3. В режиме первоначального возбуждения (зажигания) дуги в зависимости от условий в межэлектродном промежутке (его длины, рода и давления газа, формы и чистоты обработки рабочего торца сварочного электрода и свариваемого изделия) основные параметры генерируемых возбудителями-стабилизаторами выходных высоковольтных импульсов должны иметь следующие значения: энергия импульса — от 0,01 до 0,50 Дж, амплитуда — от 3,0 до 10,0 кВ, длительность (на уровне 0,05 амплитудного значения) — от 3 до 20 мкс.

В режиме стабилизации дуги переменного тока (при повторных ее возбуждениях) в зависимости от степени деионизации и связанного с ней снижения проводимости межэлектродного промежутка при каждой смене полярности тока дуги значения основных параметров вырабатываемых возбудителями-стабилизаторами импульсов повышенного напряжения должны составлять: энергия импульса — от 0,2 до 1,0 Дж, амплитуда — от 400 до 950 В, длительность (на уровне 0,05 амплитудного значения) — от 50 до 100 мкс, а в отдельных случаях (например, при сварке плавящимся электродом в  $CO_2$ ) — 0,2 до 1,0 мс.

4. Создание комбинированных возбудителей-стабилизаторов возможно при условии, что их построение предусматривает последовательное

включение выходных цепей этих устройств в цепь сварочной или вспомогательной дуги.

*Автор выражает свою признательность инженерам А.Г. Скирте и В.Ю. Буряку за ценную помощь при подготовке данной работы.*

1. Патон Б.Е., Завадский В.А. Импульсное зажигание дуги при газозлектрической и ручной дуговой сварке // Автомат. сварка. – 1956. – № 3. – С. 26–35.
2. Лаужадис А.И. Влияние частоты тока на стабильность дуги и процесса ручной дуговой сварки // Там же. – 1967. – № 9. – С. 29–32.
3. Лесков Г.И., Лугин В.П. Переменному току – дорогу в сварку. – Тула: Приок. книж. изд-во, 1969. – 59 с.
4. Троицкий В.А. Способ плавного регулирования источников питания, содержащих продольно-емкостную компенсацию // Автомат. сварка. – 1981. – № 5. – С. 8–12.
5. Дыменко В.В. Повышение стабильности процесса и расширение технологических возможностей сварки переменным током плавящимся электродом. – Дис. ... канд. техн. наук. – Киев, 1985. – 277 с.
6. Оборудование для дуговой сварки: Справ. пособие / Под ред. В.В. Смирнова. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 656 с.
7. Пентегов И.В., Дыменко В.В., Рымар С.В. Выбор напряжения холостого хода в источниках для ручной дуговой сварки переменным током // Автомат. сварка. – 1995. – № 5. – С. 35–40.
8. Сварочные источники питания с импульсной стабилизацией горения дуги. / Б.Е. Патон, И.И. Заруба, В.В. Дыменко, А.Ф. Шатан. – Киев: Екотехнологія, 2007. – 218 с.
9. Коротинский О.С. Високоэффективні джерела живлення для дугового зварювання на основі індуктивно-емнісних перетворювачів. Дис. ... докт. техн. наук. – Киев, 2007. – 392 с.
10. Лесков Г.И. Электрическая сварочная дуга. – М.: Машиностроение, 1970. – 335 с.
11. Морозкин И.С. Управление зажиганием сварочной дуги при механизированных видах наплавки. – Ростов-на-Дону: Рост. гос. ун-т путей сообщения, 2003. – 174 с.
12. Arc initiation in gas metal arc welding / D. Farson, C. Courardy, J. Talkington et al. // Ibid. – 1998. – № 8. – P. 315–321.
13. Weinshehk H.E., Schellhase M. Wiederschlagungscharakteristiken von Schweißlichtbogen mit abschmelzen der Elektrode. – ZIS-Mitt., 1971. – 13, № 12. – P. 1706–1720.
14. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. Б.Е. Патона. – М.: Машиностроение, 1974. – 768 с.
15. Темкин Б.Я. Теория и расчет возбудителей сварочной дуги. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Л., 1981. – 16 с.
16. Дудко Д.А., Федотенков В.Г., Махлин Н.М. Тиристорные генераторы импульсов типа УПД-1 // Автомат. сварка. – 1980. – № 6. – С. 61–63.
17. Махлин Н.М., Коротынский А.Е. Анализ и методика расчета электронных устройств последовательного включения для бесконтактного возбуждения дуги // Автомат. сварка. – 2014. – № 1. – С. 34–44.
18. Махлин Н.М., Коротынский А.Е. Асинхронные возбудители и стабилизаторы дуги: анализ и методика расчета. Часть 1 // Там же. – 2015. – № 3–4. – С. 25–36.
19. Махлин Н.М., Коротынский А.Е. Асинхронные возбудители и стабилизаторы дуги: анализ и методика расчета. Часть 2 // Там же. – 2015. – № 7. – С. 28–40.
20. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Наука, 1987. – 632 с.
21. Лесков Г.И., Лугин В.П. Исследование электрического пробоя промежутков между сварочными электродами // Свароч. пр-во. – 1971. – № 2. – С. 10–11.
22. Мик Дж., Крэгс Дж. Электрический пробой в газах. Пер. с англ. – М.: Изд-во иностр. лит., 1960. – 606 с.
23. Патон Б.Е., Лебедев В.К. Электрооборудование для дуговой и шлаковой сварки. – М.: Машиностроение, 1966. – 359 с.
24. Новиков О.Я. Устойчивость электрической дуги. – Л.: Энергия, 1978. – 160 с.
25. Кирдо И.В. О механизме повторного зажигания сварочной дуги тока // Автомат. сварка. – 1956. – № 6. – С. 39–54.
26. Походня И.К. Плавление электрода и взаимодействие металла с газами при дуговой сварке. – Дис. ... докт. техн. наук. – К., 1967. – 434 с.
27. Применение переменного тока для сварки низкоуглеродистых и легированных сталей, алюминия и его сплавов / Э.И. Шмаков, Н.М. Махлин, В.Г. Федотенков и др. // Монтажные и специальные работы в строительстве. – 1978. – № 4. – С. 20–22.
28. Пат. № 3328637 А1, США, МПК В23К 9/06. Alternating current arc power source / В.А. Aldenhoff. – Оpubл. 27.06.1967. – 6 с.
29. Теоретические основы электротехники. Справочник по теории электрических цепей. / Под ред. Ю.А. Бычкова, В.Н. Золотницкого, Э.П. Чернышова. – СПб.: Питер, 2008. – 349 с.
30. Андрианов А.А., Сидорец В.Н. Оптимизация режимов стабилизации сварочной дуги переменного тока // Электротехніка і Електромеханіка. – 2009. – № 2. – С. 5–8.
31. Щерба А.А., Супруновская И.Н. Закономерности повышения скорости нарастания разрядных токов в нагрузке при ограничении их максимальных значений // Технічна електродинаміка. – 2012. – № 5. – С. 3–9.
32. Подавление радиопомех, создаваемых возбудителем дуги типа УПД-1 / Н.М. Махлин, В.Г. Федотенков, Д.М. Лившиц и др. // Автомат. сварка. – 1979. – № 12. – С. 55–57.

Поступила в редакцию 13.05.2015

## ЗАКАЖИТЕ ИНФОРМАЦИОННЫЙ БЮЛЛЕТЕНЬ!

Уважаемые коллеги!

Приглашаем Вас подписаться на бесплатное получение информационного бюллетеня журнала «Автоматическая сварка».

Для подписки необходимо выслать по электронной почте письмо с темой «Информационный бюллетень/АС» на адрес редакции журнала: [journal@paton.kiev.ua](mailto:journal@paton.kiev.ua).