

ПРОЦЕССЫ СВАРКИ НЕПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ С МОДУЛЯЦИЕЙ СВАРОЧНОГО ТОКА (Обзор) Часть I. Особенности горения нестационарных дуг с тугоплавким катодом

У. Бои¹, И.В. Кривцун²

¹Гуандунский институт сварки (Китайско-украинский институт сварки им. Е.О. Патона).
510650, г. Гуанчжоу, Тяньхе, ул. Чансин, 363. E-mail: wuby@gwi.gd.cn

²ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Выполнен обзор работ, посвященных процессам сварки неплавящимся электродом в инертном газе с модуляцией сварочного тока. В первой части обзора основное внимание уделено работам, касающимся особенностей протекания тепловых, газодинамических и электромагнитных процессов в нестационарных дугах с тугоплавким катодом при различных режимах модуляции тока дуги. Библиогр. 35, табл. 2, рис. 18.

Ключевые слова: дуга с тугоплавким катодом, дуговая плазма, TIG сварка, модуляция сварочного тока, импульс, частота, коэффициент заполнения, амплитуда

Дуговая сварка неплавящимся электродом в инертном газе (TIG) на сегодняшний день является одним из основных технологических процессов получения высококачественных неразъемных соединений конструкций ответственного назначения из сталей, титановых и алюминиевых сплавов [1]. Вместе с тем данный способ сварки не удовлетворяет все возрастающим требованиям современного промышленного производства вследствие малой проплавляющей способности сварочной дуги с тугоплавким катодом и низкой производительности процесса (скорости сварки). Поэтому усилия ученых и специалистов в последние десятилетия направлены на повышение эффективности TIG сварки при сохранении высокого качества швов.

Модуляция сварочного тока при TIG сварке является одним из широко используемых способов управления тепловыми, газодинамическими и электромагнитными характеристиками дуги, а также характеристиками ее теплового и динамического (силового) воздействия на свариваемый металл. Варьируя параметры модуляции тока, такие как частота, скажность, амплитуда и форма импульсов, можно в достаточно широких пределах управлять глубиной и формой проплавления металла, термическим циклом сварки, а, следовательно, влиять на структуру и свойства металла шва и зоны термического влияния.

Исследованию процессов TIG сварки с модуляцией тока дуги посвящено большое количество работ [2–32]. Экспериментально исследованы режимы с низкочастотной (частота модуляции $f \leq 50$ Гц) [3, 5, 6, 8, 9, 11, 15, 25, 30], среднечастотной ($f \sim 5$ кГц) [2, 4–9, 15, 17] и высокочастот-

ной ($f > 10$ кГц) [2, 5, 6, 10, 13–15, 17, 20–24, 27–29] импульсной модуляцией тока. Теоретическому исследованию и математическому моделированию TIG сварки модулированным током посвящены работы [7, 11, 12, 16, 18, 19, 24, 26–29, 31, 32]. Рассмотрим результаты исследований, описанных в указанных работах, более подробно, при этом в первой части данного обзора основное внимание сосредоточим на работах, посвященных экспериментальным исследованиям физических процессов в нестационарных дугах с тугоплавким катодом при различных режимах модуляции тока дуги.

При TIG сварке с модуляцией сварочного тока процессы переноса энергии, импульса, массы и заряда в плазме столба дуги являются нестационарными, что обусловлено изменением энергетических, газодинамических и электромагнитных характеристик дуговой плазмы под воздействием периодически изменяющегося тока. В результате распределенные и интегральные характеристики плазмы нестационарной сварочной дуги, а также характеристики ее воздействия на свариваемый металл могут значительно отличаться от соответствующих характеристик для дуги постоянного тока (при прочих равных условиях), причем степень этого отличия зависит от частоты следования и формы импульсов, коэффициента заполнения, амплитуды модуляции и других факторов.

По экспериментальным данным работ [21–23] китайских ученых эффективное значение напряжения на дуге длиной 3 мм с тугоплавким катодом (W + 2 % Ce) диаметром 2,4 мм при сварке нержавеющей стали 0Cr18Ni9Ti толщиной 6 мм в аргоне (скорость сварки 120 мм/мин) возрастает

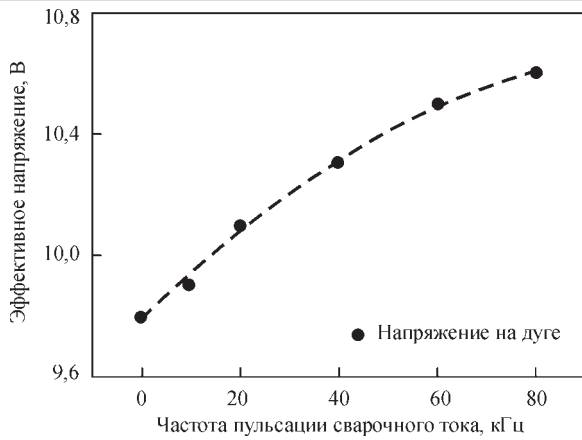


Рис. 1. Зависимость эффективного значения напряжения на дуге от частоты модуляции сварочного тока [22]

Таблица 1. Параметры исследованных режимов ВЧИ модуляции тока дуги [21, 22]

Номер режима	δ , %	f , кГц	$I_{\text{эфф}}$, А	I_b , А	I_p , А
1	20	10...80	89,4	60	160
2	50	10...80	98,5	50	130
3	80	10...80	96,0	45	105

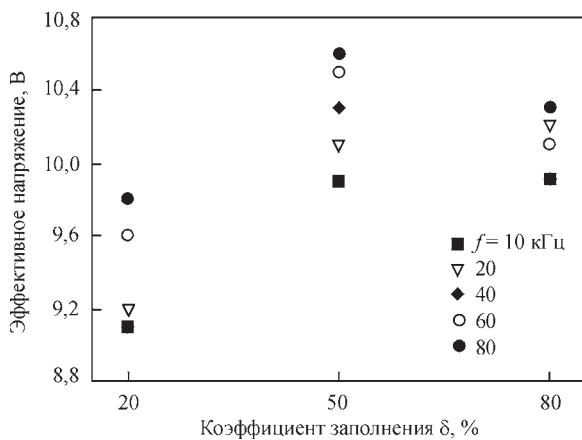


Рис. 2. Эффективные значения напряжения на дуге при различных частотах модуляции тока в зависимости от коэффициента заполнения [21, 22]

практически пропорционально частоте модуляции тока, как показано на рис. 1. В этих экспериментах были использованы следующие параметры импульсной модуляции тока: прямоугольные импульсы в форме меандра, частота следования f варьировалась в диапазоне 10...80 кГц, ток под-

ставки $I_b = 50$ А, ток в импульсе $I_p = 130$ А, эффективное значение тока

$$I_{\text{эфф}} = \sqrt{(1-\delta)I_b^2 + \delta I_p^2} = 98,5 \text{ А,}$$

где δ — коэффициент заполнения, определяемый как отношение длительности импульса к периоду модуляции (в рассматриваемом случае $\delta = 0,5$). Соответствующий эксперимент по сварке на постоянном токе был проведен при $I = 100$ А, что практически совпадает с эффективным значением модулированного тока.

В работах [21, 22] исследовано влияние коэффициента заполнения δ на эффективное значение напряжения на дуге при ТИГ сварке нержавеющей стали с высокочастотной импульсной (ВЧИ) модуляцией тока. Изучались три режима импульсной модуляции, параметры которых сведены в табл. 1.

Результаты измерения соответствующих значений напряжения на дуге показаны на рис. 2. Как следует из экспериментальных данных, приведенных на этом рисунке, с ростом δ эффективное значение напряжения на дуге вначале возрастает, а затем остается практически постоянным в диапазоне частот 10...20 кГц и несколько снижается при $f > 40$ кГц. Это приводит к ослаблению влияния частоты на эффективное значение напряжения при высоких значениях коэффициента заполнения.

Путем сравнения изображений дуговой плазмы при различных значениях частоты модуляции тока, в работах [21–23] отмечено заметное уменьшение поперечных размеров столба дуги с тугоплавким катодом при увеличении частоты модуляции, иллюстрируемое рис. 3.

Полученные данные позволили авторам произвести количественную оценку силы, действующей на поверхность свариваемого металла, значения которой приведены в табл. 2 и свидетельствуют о возрастании указанной силы с ростом частоты модуляции f и коэффициента заполнения δ .

В работе [8] экспериментально исследована нестационарная аргоновая дуга длиной 3 мм с тугоплавким катодом (W + 2 % Th) диаметром 2 мм, горящая в диапазоне частот модуляции тока от

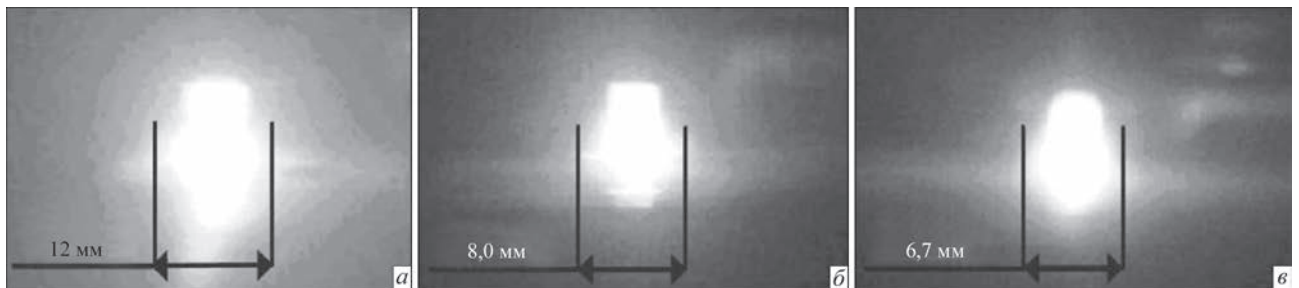


Рис. 3. Фотографии столба дуги постоянного тока (а) и при ВЧИ модуляции тока с частотой 20 (б) и 80 (в) кГц ($\delta = 20\%$) [22, 23]

Таблиця 2. Сила, действующая на поверхность свариваемого металла (мН) при различных параметрах режима импульсной модуляции тока дуги [22]

f , кГц	δ , %		
	20	50	80
0 (постоянный ток)	3,1	3,1	3,1
10	5,9	9,6	4,9
20	6,5	9,2	5,0
40	9,1	11,8	4,4
60	11,6	16,0	5,3
80	17,6	17,1	4,4

0,05 Гц (практически постоянный ток) до 5 кГц. В качестве анода была использована медная водоохлаждаемая пластина либо образец из нержавеющей стали SUS 304 толщиной 3 мм (в последнем случае дуга перемещалась относительно образца с постоянной скоростью, равной 1,6 мм/с). Импульсная модуляция тока проводилась в диапазоне от базового значения тока $I_b = 10$ А до максимального значения $I_p = 150$ А, при этом использовались две формы импульсов: прямоугольная (меандр) и треугольная (без пауз).

В ходе экспериментов установлено, что динамические характеристики рассматриваемой дуги зависят от частоты и формы импульсов тока, а также материала анода. В частности, при низких частотах ($f < 1$ Гц), изменение напряжения на дуге происходит практически вдоль статической вольт-амперной характеристики (ВАХ) дуги. Для частот 1...10 Гц, даже при условии, что соответствующие значения напряжения на дуге постоянного тока для базового и максимального значений тока различаются, напряжение горения дуги практически постоянно с типичными подъемами и спадами мгновенных значений в моменты роста и снижения тока, соответственно. Этот эффект наблюдается, если скорость изменения тока на фронтах импульсов превышает величину $1,5 \cdot 10^5$ А/с и объясняется авторами [8] запаздыванием изменения концентрации заряженных частиц и, соответственно, электропроводности дуговой плазмы при резком увеличении и снижении тока. В области частот модуляции 100 Гц...1 кГц происходит уменьшение среднего значения напряжения на дуге при базовом значении тока и некоторое его повышение при пиковом значении тока. Наконец при частотах выше 2,5 кГц дуга ведет себя как элемент цепи с постоянным омическим сопротивлением.

Зависимости напряжения V на дуге с медным (водоохлаждаемым) и стальным (плавящимся) анодом при базовом $V_b = V(I_b)$ и пиковом $V_p = V(I_p)$ значениях тока от частоты модуляции показаны на рис. 4. Как следует из представленных на этом рисунке экспериментальных данных, среднее значение напряжения на дуге при базовом

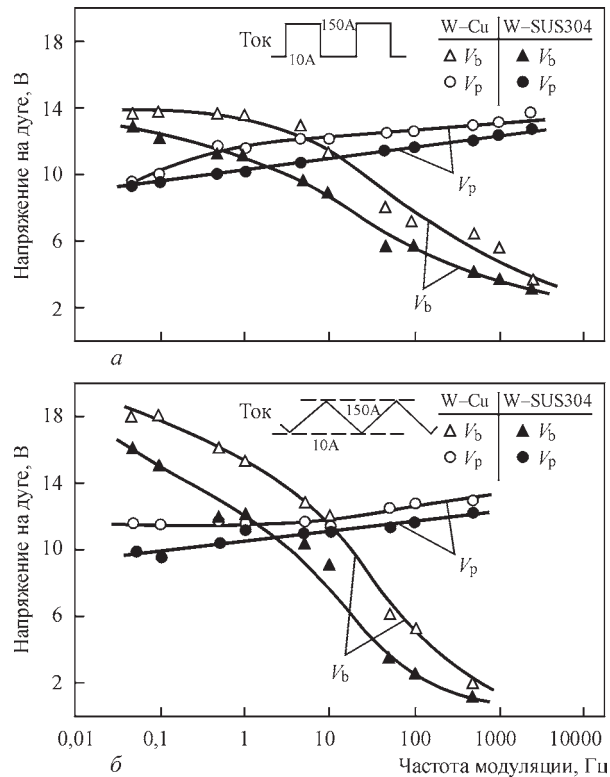


Рис. 4. Напряжение на дуге V_b (при базовом) и V_p (при пиковом значении тока) в зависимости от частоты его импульсной модуляции: *a* — прямоугольные импульсы (средние значения V_b и V_p); *б* — треугольные импульсы (максимальные значения V_b и V_p) [8]

значении тока заметно снижается, тогда как соответствующее значение напряжения в импульсе тока несколько увеличивается с ростом частоты. Это позволило авторам [8] сделать вывод о том, что средняя мощность дуги имеет максимальное значение при малых значениях f (фактически для дуги постоянного тока) и снижается с ростом частоты модуляции. Так, например, средняя мощность дуги при частоте 2,5 кГц по оценкам авторов составляет всего 70 % соответствующего значения при $f = 0,5$ Гц.

Исследованию динамических характеристик свободногорящей и сжатой (плазменной) дуги с тугоплавким катодом и медным водоохлаждаемым анодом, горящей в аргоне при постоянном токе в диапазоне 20...250 А, посвящена также работа [5]. В данной работе по экспериментальным частотным характеристикам проверялась применимость дифференциального уравнения динамики дуги, которое было получено на основе канальной модели:

$$\theta \frac{dU}{dt} + U = \theta R_s \frac{di}{dt} + R_d i, \quad (1)$$

где $R_s = U_0/I_0$ и $R_d = dU/dI$ — статическое и динамическое сопротивление дуги, соответственно; θ — постоянная времени дуги, определяющая из-

менение проводимости столба дуги G при скачкообразном изменении тока $1/\theta = -d\ln G/dt$.

Модуляция тока в экспериментах осуществлялась путем наложения на постоянный ток переменной (синусоидальной) составляющей с амплитудой 4 А и частотой в диапазоне от 20 Гц до 160 кГц. Было установлено, что для сжатой дуги (диаметр вольфрамового электрода, диаметр плазмформирующего сопла и заглубление электрода в сопло составляли 4 мм, расстояние между электродами — 11 мм, расход плазмообразующего газа варьировался в диапазоне 0,055...0,17 г/с) с ростом тока и расхода плазмообразующего газа постоянная времени дуги уменьшается от 50 до 15 мкс, что качественно и количественно совпадает с результатами расчетов для токов выше 50 А. Что касается свободноточащей аргоновой дуги (диаметр катода 4 мм, длина дуги 2...6 мм), то экспериментально определенные частотные характеристики дуги отличаются от расчетных как в области низких, так и в области высоких частот. В частности, расчет постоянной времени для дуги длиной 2 мм дает значения 2...14 мкс, причем в отличие от сжатой дуги большие значения θ соответствуют большим значениям тока. Анализ полученных данных привел авторов [5] к выводу, что каналовая модель дуги, использованная при выводе уравнения (1), является слишком упрощенной для описания свободноточащей дуги в аргоне и при анализе ее динамики необходимо учитывать перенос тепла за счет конвекции, а также потери энергии на излучение.

В работе [9] описаны результаты экспериментальных исследований оптических и электрических характеристик дуги с тугоплавким катодом, горящей как на постоянном токе, так и при его модуляции. В экспериментах использовалась электрическая дуга с вольфрамовым (W + 2 % Th) катодом диаметром 2,38 мм и углом заточки рабочего конца 30°, защитный газ (Ar) подавался через сопло диаметром 9,5 мм. Питание дуги осуществлялось от источника, который обеспечивал постоянный ток в диапазоне 0...300 А и к которому был подключен транзисторный регулятор для модуляции тока с частотой до 3000 Гц при различной форме импульсов. В качестве анода использовался медный водоохлаждаемый анод (сплошной и разрезной с шириной зазора 0,075 мм) либо анод из нержавеющей стали 304 диаметром 22,22 мм и толщиной 7,62 мм, впаянный в медную водоохлаждаемую обойму. Для измерения интенсивности излучения дуги использовалась фотодиодная матрица, содержащая 256 элементов и работающая в широком диапазоне длин волн (400...1200 нм). Излучение дуги с помощью лин-

зы и диафрагмы фокусировалось на поверхности матрицы, проходя светофильтр, предотвращающий насыщение фотодиодов излучением высокой интенсивности. Оптическая система была настроена на измерение распределения интенсивности излучения в плоскости, расположенной на расстоянии 0,01 мм от поверхности анода.

Эксперименты по измерению интенсивности излучения дуги постоянного тока (в диапазоне 50...300 А), имеющей длину от 2,0 мм до 6,3 мм, показали, что в непосредственной близости от поверхности анода данные распределения с достаточной точностью могут быть аппроксимированы соответствующей гауссовой кривой

$$\varphi(x) = \varphi_0 \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right), \quad (2)$$

где x — расстояние от плоскости, проходящей через ось симметрии дуги ($x = 0$), а параметр распределения σ определяется как расстояние, на котором значение функции составляет 60 % соответствующего значения φ_0 в указанной плоскости. Обработка экспериментальных данных для дуги длиной 4 мм дала значения σ , возрастающие с ростом тока дуги от 1,0 мм при $I = 50$ А до 2,4 мм при $I = 300$ А и в пределах погрешности измерений не зависящие от типа используемого анода (медный водоохлаждаемый или стальной).

В случае синусоидальной модуляции тока дуги в диапазоне 30...270 А (среднее значение тока $\langle I \rangle = 150$ А) измеренное распределение интенсивности излучения дуги существенно зависит от частоты модуляции, как показано на рис. 5. Так, при малых значениях f соответствующее распределение периодически изменяется с частотой, равной выбранной частоте модуляции между распределением интенсивности излучения дуги постоянного тока $I = I_{\min} = 30$ А и распределением для дуги при $I = I_{\max} = 270$ А. Такое поведение сохраняется вплоть до частоты порядка 500 Гц. С увеличением частоты модуляции амплитуда указанных изменений уменьшается и при $f > 1000$ Гц распределение

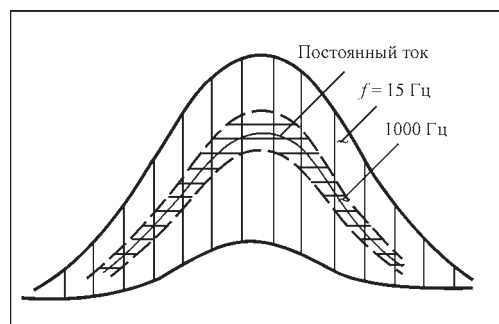


Рис. 5. Характерные формы сигнала с фотодиодной матрицы, характеризующие распределение интенсивности излучения дуги [9]

интенсивности излучения дуги модулированного тока ведет себя подобно распределению для дуги постоянного тока $I = \langle I \rangle = 150$ А.

В работе [9] проведено также экспериментальное определение плотности электрического тока на поверхности анода. Использовалась методика разрезного анода, подробно описанная в [33], и предполагалось, что плотность тока на аноде имеет гауссово распределение по радиусу, подобное (2). Установлено, что определенные таким образом значения параметра распределения σ для дуги постоянного тока увеличиваются с ростом тока и длины дуги. Сравнение полученных значений параметра радиального распределения плотности тока на аноде с соответствующими значениями σ для линейного распределения интенсивности излучения показало, что для дуг длиной от 2,0 до 6,3 мм в диапазоне токов 50...300 А указанные величины практически совпадают. Это позволило авторам сделать вывод о том, что при изменении тока (в том числе за счет модуляции) и длины дуги поперечный размер токового канала на поверхности анода с достаточно высокой степенью точности следует за соответствующим изменением поперечного размера распределения интенсивности ее излучения. Таким образом, вместо экспериментального определения (методом разрезного анода) распределения плотности электрического тока на аноде, можно использовать более простой и быстрый способ измерения интенсивности излучения дуги.

Здесь следует отметить, что предположение о гауссовом распределении плотности тока дуги на аноде, использованное авторами [9], является недостаточно обоснованным. Теоретически наиболее обоснованным является подход, базирующийся на решении интегрального уравнения Абея, при этом задача восстановления распределения плотности тока в анодной области дуги является математически некорректной и требует разработки устойчивых алгоритмов обработки экспериментальных данных, получаемых с использованием разрезного анода. В работе [34] предложена новая методика восстановления плотности электрического тока на аноде, основанная на использовании устойчивого метода численного расчета второй производной от экспериментально измеренной дискретной функции распределения тока дуги по секциям разрезного анода.

Работа [10] посвящена экспериментальному исследованию распределений средних значений плотности тока и давления дуги на поверхности анода при высокочастотной импульсной модуляции тока. При проведении всех экспериментов использовалась электрическая дуга с вольфрамо-

вым (активированным церием) катодом диаметром 3 мм, имеющим угол заточки рабочего конца 60° . В качестве защитного газа применялся аргон, подаваемый через сопло диаметром 10 мм с расходом 12 л/мин. Анодом дуги служил медный водоохлаждаемый анод с отверстием диаметром 1,0 мм для измерения давления дуги и плотности тока (в последнем случае в указанное отверстие вставлялся изолированный вольфрамовый зонд диаметром 0,9 мм). Длина дуги L варьировалась в диапазоне 2...8 мм, модуляция тока дуги осуществлялась прямоугольными импульсами (меандр) без подставки с частотой следования f до 20 кГц, средний ток $\langle I \rangle$ задавался в диапазоне 30...130 А.

Результаты экспериментального измерения радиальных распределений средних по времени значений плотности электрического тока и давления дуги на поверхности анода приведены на рис. 6, 7. Как следует из представленных на этих рисунках кривых среднее значение плотности тока в центре области анодной привязки дуги растет с увеличением частоты модуляции (см. рис. 6, а), а также величины среднего тока (см. рис. 6, б) и, наоборот, убывает при увеличении длины дуги (см. рис. 6, в).

Что касается распределений среднего значения давления дуги, то его значение в центре области анодной привязки, по данным [10], изменяется с ростом частоты модуляции тока немонотонно. В диапазоне частот от 0 до 5 кГц указанная величина растет, тогда как при дальнейшем увеличении частоты до 20 кГц, максимальное значение давления дуги на поверхность анода заметно снижается (см. рис. 7, а). Экспериментально измеренное давление в центре области анодной привязки дуги при частоте модуляции $f = 10$ кГц растет с увеличением среднего тока (см. рис. 7, б) и снижается при увеличении длины дуги (см. рис. 7, в).

В целом, полученные в работе [10] экспериментальные данные позволили авторам сделать вывод о контракции (уменьшении поперечного размера) анодной области дуги с тугоплавким катодом при импульсной модуляции тока, при этом степень такой контракции возрастает с увеличением частоты от 0 до 5 кГц и снижается в диапазоне 5...20 кГц. Последнее обстоятельство позволяет рекомендовать ТИГ процесс с ВЧИ модуляцией тока дуги для сварки тонких металлов, используя при этом частоту модуляции порядка 20 кГц.

Завершая рассмотрение работы [10], следует отметить, что данные, приведенные в сообщении [13], опровергают закономерность, обнаруженную авторами [10] и заключающуюся в увеличении давления дуги на поверхность анода с ростом частоты модуляции тока в диапазоне 0...5 кГц и его уменьшении при дальнейшем росте частоты. В

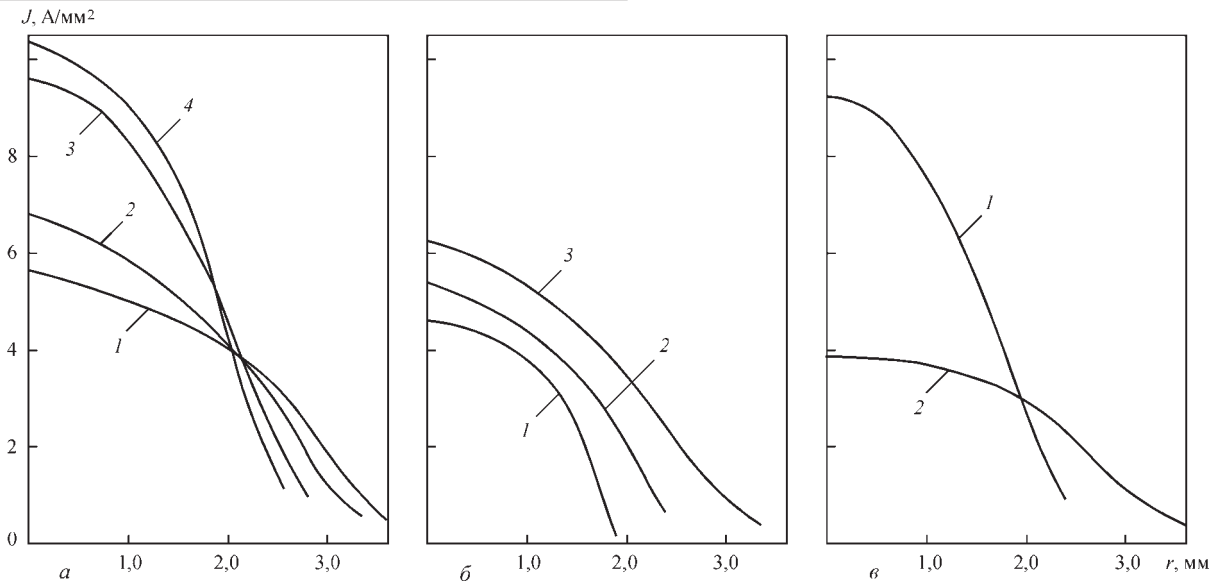


Рис. 6. Радиальные распределения средних за период модуляции значений плотности электрического тока на поверхности анода: а — $\langle I \rangle = 100\text{ A}$, $L = 4\text{ мм}$ (I — постоянный ток; 2 — $f = 5$; 3 — 10; 4 — 20 кГц); б — $f = 5\text{ кГц}$, $L = 2\text{ мм}$ (I — $\langle I \rangle = 30$; 2 — 50; 3 — 100 А); в — $\langle I \rangle = 100\text{ A}$, $f = 10\text{ кГц}$ (I — $L = 4$; 2 — 8 мм) [10]

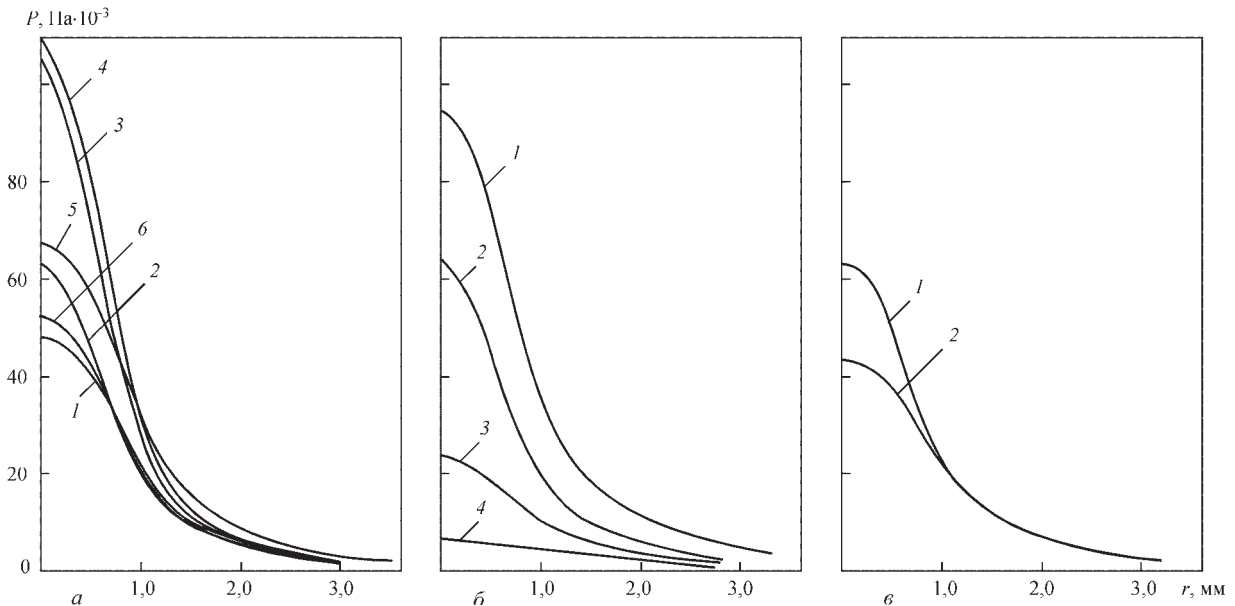


Рис. 7. Радиальные распределения средних за период модуляции значений давления дуги на поверхности анода: а — $\langle I \rangle = 100\text{ A}$, $L = 4\text{ мм}$ (I — постоянный ток; 2 — $f = 300\text{ Гц}$; 3 — 3; 4 — 5; 5 — 10; 6 — 20 кГц); б — $f = 10\text{ кГц}$, $L = 4\text{ мм}$ (I — $\langle I \rangle = 130$; 2 — 100; 3 — 70; 4 — 40 А); в — $\langle I \rangle = 100\text{ A}$, $f = 10\text{ кГц}$ (I — $L = 2$; 2 — 6 мм) [10]

частности, представленная на рис. 8 зависимость свидетельствует о непрерывном возрастании указанной величины с ростом частоты модуляции — достаточно быстром в диапазоне от 0 до 5 кГц и более медленном при $f > 5\text{ кГц}$.

В работе [14], с помощью разработанного авторами специализированного источника питания дуги, обеспечивающего ВЧИ модуляцию тока с частотой до 20 кГц при высоких пиковых значениях тока (до 500 А), экспериментально исследовано влияние параметров модуляции на степень контракции дуги с тугоплавким катодом, распределение давления дуги на поверхности анода, а также стабильность ее горения. Для определе-

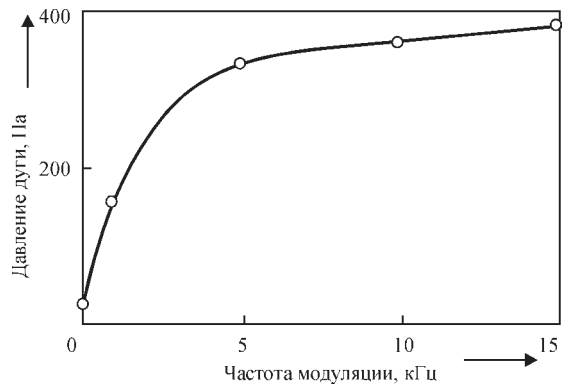


Рис. 8. Давление дуги на поверхность анода как функция частоты модуляции тока: дуга длиной 2 мм с тугоплавким (W + 2% Th) катодом диаметром 2,4 мм; угол заточки 60°; средний ток 50 А; амплитудное значение тока 150 А; ток в паузе 5 А [13]

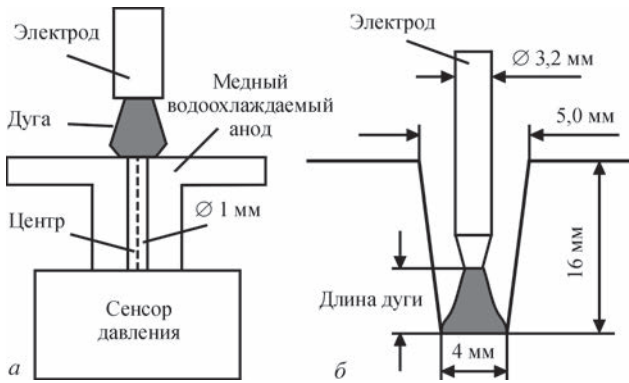


Рис. 9. Схемы экспериментальных стендов для измерения давления дуги с тугоплавким катодом (а) и определения стабильности ее горения (б) [14]

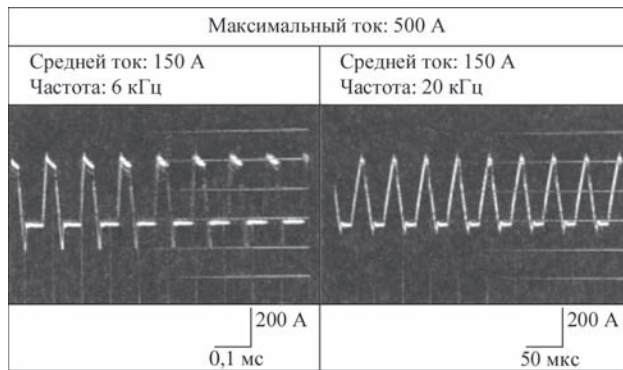


Рис. 10. Характерные формы тока дуги при различных значениях частоты модуляции [14]

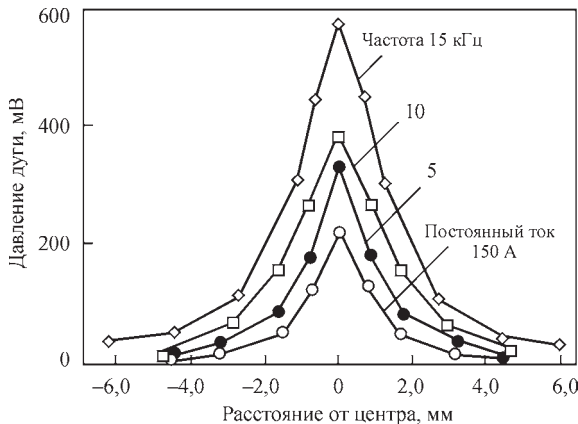


Рис. 11. Распределение давления дуги вдоль поверхности анода (относительные единицы) при различных значениях частоты модуляции тока: максимальный ток — 500 А; средний ток — 150 А; длина дуги — 2 мм [14]

ния указанных характеристик дуги использовались экспериментальные стенды, схематически изображенные на рис. 9. Реализуемая в экспериментах форма тока для двух характерных значений частоты модуляции показана на рис. 10, при этом его значение I_p в импульсе составляло 500 А, а средний ток $\langle I \rangle$ имел постоянное значение, равное 150 А.

Результаты проведенных экспериментов показали, что давление дуги в центре области анодной привязки непрерывно возрастает с увеличени-

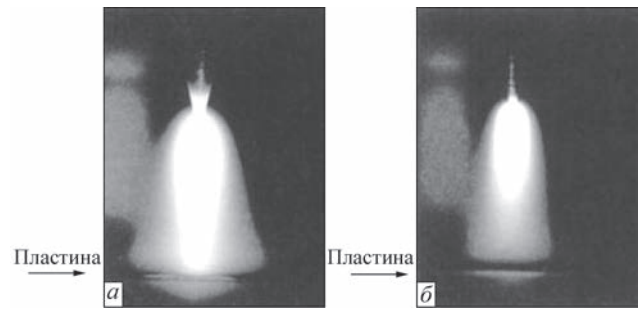


Рис. 12. Внешний вид дуги с ВЧИ модуляцией тока (а) и дуги постоянного тока (б), равного $\langle I \rangle$ для а: частота — 10 кГц; максимальный ток — 500 А; среднее значение тока — 50 А; для б: постоянный ток — 50 А [14]

ем частоты модуляции (при сохранении значений $\langle I \rangle, I_p$), как показано на рис. 11. В частности, для дуги длиной 2 мм при $f = 15$ кГц указанная величина в два раза превосходит соответствующее значение при $f = 5$ кГц и в три раза — значение для дуги постоянного тока, равного $\langle I \rangle$.

Приведенные на рис. 12 фотографии дуги при меньшем среднем токе ($\langle I \rangle = 50$ А) позволили авторам [14] сделать вывод, что степень контракции дуги и стабильность ее горения при ВЧИ модуляции тока ($f = 10$ кГц) выше, чем для соответствующей дуги постоянного тока. По их мнению, это связано с тем, что ярко светящаяся область столба дуги при высокочастотной модуляции тока существенно длиннее по сравнению с соответствующей областью в дуге постоянного тока и занимает весь разрядный промежуток. Экспериментальные исследования поведения дуги в узкой разделке, показанной на рис. 9, б, подтвердили вывод о более высокой пространственной стабильности дуги с ВЧИ модуляцией тока. Так, дуга при частоте модуляции $f = 10$ кГц была стабильной при длине L до 5 мм, тогда как дуга постоянного тока испытывала отклонения даже при $L = 2$ мм.

Экспериментальному исследованию физических характеристик дуговой плазмы при импульсной модуляции тока дуги с тугоплавким катодом посвящена работа [15]. В экспериментах использовалась дуга с тугоплавким катодом (W + 2 % Се) диаметром 3 мм, угол заточки рабочего конца — 60°, длина дуги — 4 мм, защитный газ — Ar. В качестве источника питания дуги был выбран серийный сварочный аппарат EWM Tetrix 500 с подключенным к нему специальным устройством, обеспечивающим модуляцию тока дуги прямоугольными импульсами в диапазоне частот до 80 кГц. Ток в импульсе I_p устанавливался равным 100 А, базовый ток I_b задавался на уровне 50 А.

На рис. 13 приведены фотографии дуги во время импульса тока и при базовом токе для различных значений частоты модуляции f . Как следует из этого рисунка, с ростом f изменяется форма

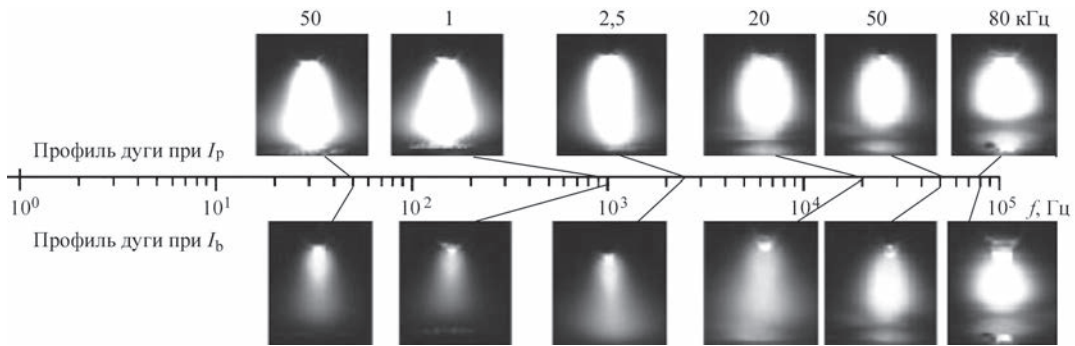


Рис. 13. Внешний вид дуги при $I = I_p$ (вверху) и при $I = I_b$ (внизу) для различных значений частоты модуляции тока [15]

столба дуги — от «грушевидной» с диффузной привязкой к аноду до «шароподобной» с темным пространством вблизи анода, причем для частот выше 50 кГц внешний вид дуги во время импульса тока практически не отличается от ее вида во время паузы.

Представленные на рис. 14 зависимости напряжения на дуге при пиковом значении тока $U_p = U(I_p)$ и при его базовом значении $U_b = U(I_b)$ от частоты импульсной модуляции свидетельствуют о существенном увеличении U_p и снижении U_b с ростом f , что качественно соответствует экспериментальным данным, приведенным в работе [8] (см. рис. 4). Это приводит к тому, что при увеличении частоты импульсной модуляции напряжение на дуге осциллирует со все возрастающей амплитудой.

На рис. 15 приведена зависимость концентрации электронов N_e в плазме столба дуги при пиковых значениях тока от частоты его модуляции. Для нахождения N_e авторами [15] использовались экспериментальные данные по уширению спектральных линий излучения дуговой плазмы за счет эффекта Штарка [35]. Согласно полученных данных концентрация электронов в столбе дуги с ростом частоты модуляции тока вначале растет (вплоть до частот порядка 20 кГц), а затем резко падает. Возможной причиной такого поведения

N_e является то, что измерения концентрации электронов проводились вблизи анода, где свечение плазмы при частотах выше 20 кГц заметно ослаблено за счет изменения формы столба дуги (см. рис. 13).

В работе [17] экспериментально исследовано влияние частоты модуляции тока на характеристики дуги при ТИГ сварке алюминиевого сплава 5А06 толщиной 3 мм в режиме разнополярных импульсов тока. В экспериментах использовалась дуга длиной 3 мм с вольфрамовым катодом диаметром 2,4 мм. Ток дуги модулировался прямоугольными импульсами (скорость изменения тока на фронтах импульсов составляла 50...100 А/мкс) с амплитудой тока прямой полярности $I_p = 80$ А и обратной — $I_N = 120$ А при соотношении длительностей импульсов прямой t_p и обратной t_N полярностей 8/2. Частота модуляции f варьировалась в диапазоне 0,1...20 кГц. Осциллограмма сварочного тока от времени при $f = 20$ кГц приведена на рис. 16.

Соответствующие осциллограммы тока и напряжения на дуге при $f = 5$ кГц показаны на рис. 17.

На рис. 18 приведены измеренные значения напряжения на дуге (во время прямой и обратной полярностей тока) в зависимости от частоты модуляции. При проведении этих экспериментов использовался следующий режим модуляции

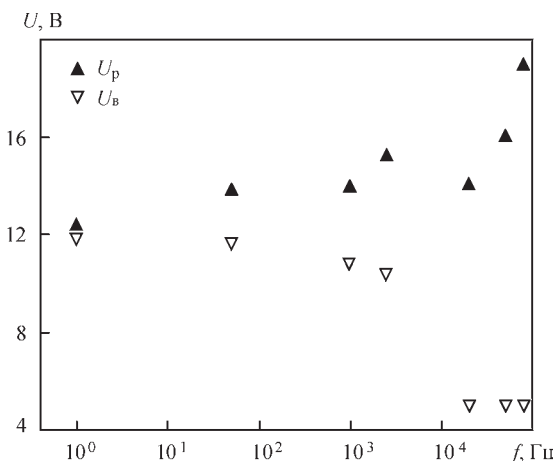


Рис. 14. Зависимости напряжения на дуге в импульсе (U_p) и в паузе (U_b) от частоты модуляции тока [15]

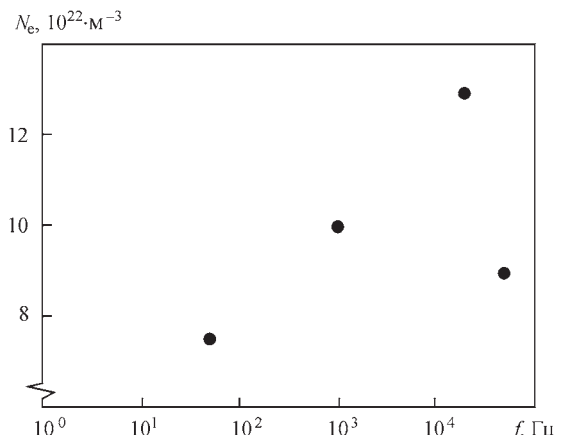


Рис. 15. Зависимость концентрации электронов в столбе дуги при пиковых значениях тока от частоты его модуляции [15]

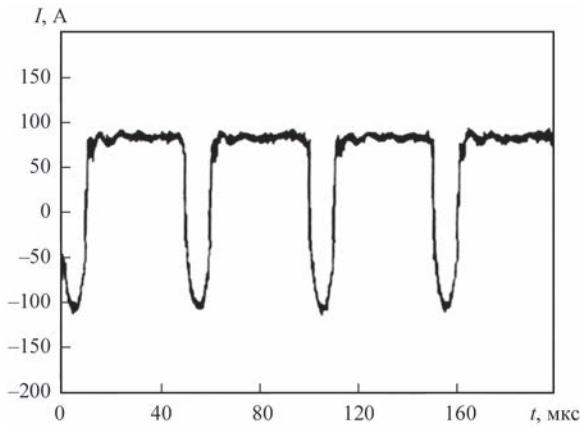


Рис. 16. Зависимость тока дуги от времени при TIG сварке алюминиевого сплава в режиме разнополярных импульсов [17]

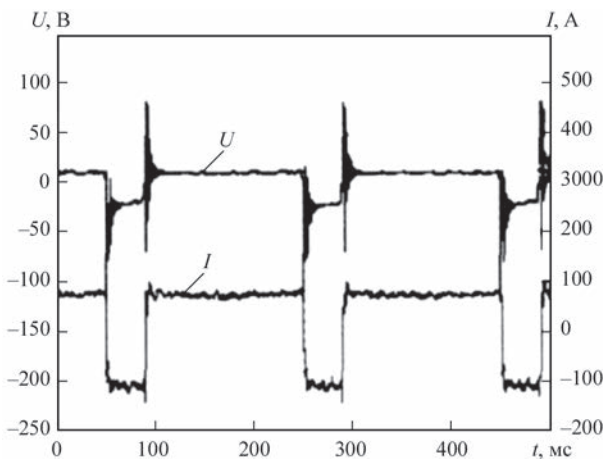


Рис. 17. Осциллограммы напряжения (верхняя кривая) и тока дуги (нижняя кривая) при TIG сварке в режиме разнополярных импульсов [17]

тока: $I_p = 100$ А; $I_N = 120$ А; $t_p/t_N = 8/2$. Как следует из рис. 18 напряжение на дуге достаточно быстро растет с частотой модуляции в диапазоне $f < 1$ кГц, а при дальнейшем увеличении частоты скорость его роста заметно снижается, причем во всем исследованном диапазоне частот напряжение на дуге прямой полярности существенно ниже аб-

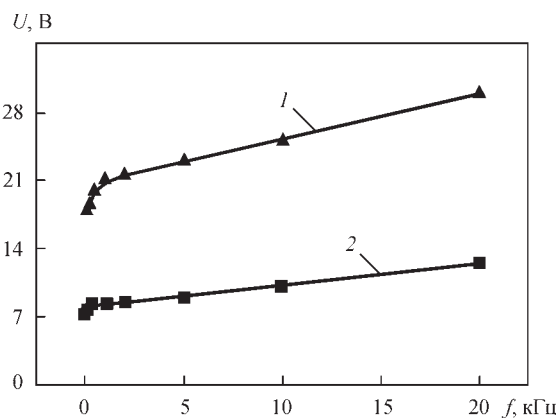


Рис. 18. Зависимость от частоты модуляции тока абсолютных значений напряжения на дуге обратной (1) и прямой (2) полярностей при TIG сварке в режиме разнополярных импульсов [17]

солютной величины соответствующего значения для дуги обратной полярности.

Анализ результатов экспериментальных работ, касающихся изучения особенностей физических явлений, протекающих в нестационарных электрических дугах при TIG сварке с импульсной модуляцией сварочного тока, позволяет сделать следующие выводы:

1. Форма светящейся области столба нестационарной дуги при TIG сварке с высокочастотной ($f > 10$ кГц) импульсной модуляцией тока заметно отличается от соответствующей формы для дуги постоянного тока, равного среднему значению модулированного тока. Это отличие заключается в уменьшении поперечных размеров (контракции) прианодной зоны столба дуги и, как следствие, в повышении плотности тока на поверхности анода при увеличении частоты модуляции. В результате форма столба дуги от «грушевидной» с диффузной привязкой к аноду при постоянном токе изменяется до «шарообразной» с темным пространством вблизи анода при ВЧИ модуляции тока, причем для частот выше 50 кГц форма столба дуги во время импульса тока практически не отличается от соответствующей формы во время паузы.

2. Высокочастотная импульсная модуляция тока дуги с тугоплавким катодом приводит к существенному повышению давления потока дуговой плазмы на поверхность анода по сравнению с давлением дуги постоянного тока. При TIG сварке с ВЧИ модуляцией тока это вызывает дополнительный прогиб поверхности сварочной ванны, результатом которого является заглубление источника тепла в свариваемый металл и, соответственно, повышение проплавливающей способности дуги. Что касается влияния частоты модуляции тока на величину давления дуги, то данная величина испытывает быстрый рост с увеличением частоты в диапазоне средних частот ($f < 5$ кГц), тогда как при дальнейшем росте частоты модуляции по данным разных авторов давление дуги ведет себя по-разному: несколько снижается [10], стабилизируется [13] или продолжает возрастать [14].

3. Что касается зависимости напряжения на дуге от частоты модуляции тока при TIG сварке, то у авторов рассмотренных работ также нет единого мнения. Так, например, по данным [21–23] эффективное значение напряжения возрастает практически пропорционально частоте модуляции. Экспериментальные данные работы [8] свидетельствуют о том, что среднее значение напряжения на дуге во время паузы тока заметно снижается, тогда как среднее значение напряжения во время импульса слабо увеличивается с

ростом частоты. В результате, как среднее, так и эффективное значения напряжения на дуге снижаются с ростом частоты модуляции тока. Наконец, в работе [15] показано, что напряжение на дуге во время паузы тока снижается при увеличении частоты модуляции практически с той же скоростью, что и растет напряжение во время импульса.

Список литературы/References

- Lienert T.J., Babu S.S., Siewert T.A., Acoff V.A. (eds.) (2011) ASM Handbook. Vol. 6A. *Welding fundamentals and processes*. Ohio, USA, ASM International.
- Roden W.A. (1972) High-frequency, pulsed-current GTA welding. *National Aerospace Engineering and Manufacturing Meeting Proc.*, 2–5 Oct. 1972. San Diego, California, USA. Paper 720874, pp. 1–8.
- Leitner R.E., McElhinney G.H., Pruitt E.L. (1973) An investigation of pulsed GTA welding variables. *Welding J., Res. Suppl.*, **9**, 405–410.
- Yamaoto T., Shimada W., Gotoh T. (1976) Characteristics of high frequency pulsed DC TIG welding process. *IIV 212-628-76*, 16–22.
- Соколов О.И., Гладков Э.А. (1977) Динамические характеристики свободной и сжатой сварочных дуг постоянного тока с неплавящимся электродом. *Сварочное производство*, **4**, 3–5.
- Sokolov, O.I., Gladkov, E.A. (1977) Dynamic characteristics of free-burning and constricted welding arc of direct current with nonconsumable electrode. *Svarochn. Proizvodstvo*, **4**, 3–5 [in Russian].
- Omar A.A., Lundin C.D. (1979) Pulsed plasma – pulsed GTA arcs: A study of the process variables. *Welding J., Res. Suppl.*, **4**, 97–105.
- Cook G.E., Eassa H.E.-D.E.H. (1985) The effect of high-frequency pulsing of a welding arc. *IEEE Transactions on Industrial Application*, *1A-21*, **5**, 1294–1299.
- Kolasa A., Matsunawa A., Arata Y. (1986) Dynamic characteristics of variable frequency pulsed TIG arc. *Transaction of JWRI*, **15**, **2**, 173–177.
- Saedi H.R., Unkel W. (1988) Arc and weld pool behavior for pulsed current GTAW. *Welding J., Res. Suppl.*, **11**, 247–255.
- Zhao J., Sun D., Hu S. (1992) Arc behavior of high frequency pulse TIG welding arc. *Trans. China Weld Inst.*, **13**(1), 59–66.
- Kim W.H., Na S.J. (1998) Heat and fluid flow in pulsed current GTA weld pool. *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, **41**, **21**, 3213–3227.
- Wu C.S., Zheng W., Wu L. (1999) Modelling the transient behaviour of pulsed current tungsten-inert-gas weldpools. *Modelling and Simul. Mater. Sci. Eng.*, **7**, **1**, 15–23.
- Dzelnitzki D. (2000) Muendersbach TIG – direct-current welding with high-frequency pulses, an interesting process variant. *EWM Hightec Welding GmbH*. WM008801. DOC; 08.00.
- Onuki J., Anazawa Y., Nihei M. et al. (2002) Development of a new high-frequency, high-peak current power source for high constricted arc formation. *Japan. J. Appl. Phys.*, **41**, 5821–5826.
- Song Y., Yan S., Xiao T. et al. (2010) A Study on the macro-micro physical properties in pulsed arc plasma. *Transactions of JWRI*, **39**, **2**, 17–18.
- Wu C.S. (2008) *Welding heat process and pool geometry*. Beijing, China Machine Press, cc. 102–104.
- Cong B., Qi B., Zhou X. (2009) TIG arc behavior of ultrafast-convert high-frequency variable polarity square wave. *Trans. China Welding Institution*, **30**, **6**, 87–90.
- Traidia A., Roger F., Guyot E. (2010) Optimal parameters for pulsed gas tungsten arc welding in partially and fully penetrated weld pools. *Int. J. of Thermal Sciences*, **49**, 1197–1208.
- Traidia A., Roger F. (2011) Numerical and experimental study of arc and weld pool behaviour for pulsed current GTA welding. *Int. J. of Heat and Mass Transfer.*, **54**, 2163–2179.
- Karunakaran N., Balasubramanian V. (2011) Effect of pulsed current on temperature distribution weld bead profiles and characteristics of gas tungsten arc welded aluminum alloy joints. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, **21**, 278–286.
- Yang M., Qi B., Cong B. et al. (2012) The influence of pulse current parameters on arc behavior by austenite stainless steel. *Trans. China Welding Institution*, **33**, **10**, 67–71.
- Qi B., Yang M., Cong B. et al. (2012) Study on fast-convert ultrasonic frequency pulse TIG welding arc characteristic. *Mater Sci. Forum.*, 704–705, 745–751.
- Qi B., Yang M., Cong B. et al. (2013) The effect of arc behavior on weld geometry by high-frequency pulse GTAW process with 0Cr18Ni9Ti stainless steel. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **66**, 1545–1553.
- Yang M., Qi B., Cong B. et al. (2013) Study on electromagnetic force in arc plasma with UHFP-GTAW of Ti–6Al–4V. *IEEE Transactions on Plasma Science*, **41**, **9**, 2561–2568.
- Yang Z., Qi B., Cong B. et al. (2013) Effect of pulse frequency on weld appearance behavior by TC4 titanium alloys. *Trans. China Welding Institute*, **34**, **12**, 37–40.
- Кривцун И.В., Крикент И.В., Демченко В.Ф. (2013) Моделирование динамических характеристик импульсной дуги с тугоплавким катодом. *Автоматическая сварка*, **7**, 14–25.
- Krivtsun, I.V., Krikent, E.V., Demchenko, V.F. (2013) Modelling of dynamic characteristics of a pulsed arc with refractory cathode. *The Paton Welding J.*, **7**, 13–23.
- Yang M., Yang Z., Cong B. et al. (2014) A study on the surface depression of the molten pool with pulsed welding. *Welding J., Res. Suppl.*, **93**, **8**, 312–319.
- Yang M., Yang Z., Qi B. (2015) The effect of pulsed frequency on the plasma jet force with ultra high frequency pulsed arc welding. *International Institute of Welding*, **8**, 875–882.
- Сидорец В.Н., Кривцун И.В., Демченко В.Ф. и др. (2016) Расчетное и экспериментальное исследование статических и динамических вольт-амперных характеристик аргоновой дуги с тугоплавким катодом. *Автоматическая сварка*, **2**, 7–13.
- Sydorets, V.N., Krivtsun, I.V., Demchenko, V.F. et al. (2016) Calculation and experimental research of static and dynamic volt-ampere characteristics of argon arc with refractory cathode. *The Paton Welding J.*, **2**, 2–8.
- Cunha T.V.d., Louise-Voigt A., Bohorquez C.E.N. (2016) Analysis of mean and RMS current welding in the pulsed TIG welding process. *Journal of Materials Processing Technology*, **231**, 449–455.
- Silva D.C.C., Scotti A. (2016) Using either Mean or RMS values to represent current in modeling of arc welding bead geometries. *Ibid*, **240**, 382–387.
- Демченко В.Ф., Бои У., Кривцун И.В. и др. (2017) Действующее значения электродинамических характеристик процесса сварки неплавящимся электродом с импульсной модуляцией тока дуги. *Автоматическая сварка*, **8**, 3–14.
- Demchenko, V.F., Boi, U., Krivtsun, I.V., Shuba, I.V. (2017) Effective values of electrodynamic characteristics of the process of nonconsumable electrode welding with pulse modulation of arc current. *The Paton Welding J.*, **8**, 2–11.
- Nestor O.H. (1962) Heat intensity and current density distributions at the anode of high current, inert gas arcs. *J. Appl. Phys*, **33**, **5**, 1638–1648.
- Демченко В.Ф., Бои У., Кривцун И.В. и др. (2016) Методика восстановления распределения плотности электрического тока в анодном пятне дуги с тугоплавким катодом по экспериментальным данным, полученным методом разрезного анода. *Сб. трудов VIII Межд. конф. «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственные процессы»*. 19–23 сентября 2016. Одесса, Украина, сс. 21–28.
- Demchenko, V.F., Boi, U., Krivtsun, I.V. et al. (2016) Procedure of density distribution restoration of electric current in arc anode spot with refractory cathode according

to experimental data obtained by the method of split anode. In: Proc. of 8th Int. Conf. on Mathematical Modeling and Information Technologies in Welding and Related Processes (19-23 September 2016, Odessa Ukraine), 21-28.

35. Грим Г. (1978) *Уширение спектральных линий в плазме*. Москва, Мир.
Grim, G. (1978) *Spectral line broadening in plasma*. Moscow, Mir [in Russian].

ПРОЦЕСИ ЗВАРЮВАННЯ НЕПЛАВКИМ ЕЛЕКТРОДОМ З МОДУЛЯЦІЄЮ ЗВАРЮВАЛЬНОГО СТРУМУ (Огляд)

Частина I. Особливості горіння нестационарних дуг з тугоплавким катодом

У. Бої¹, І.В. Кривцун²

¹Гуандунський інститут зварювання (Китайсько-український інститут зварювання ім. Є.О. Патона).
510650, м. Гуанчжоу, Тяньхе, вул. Чансин, 363. E-mail: wuby@gwi.gd.cn

²ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Виконано огляд робіт, присвячених процесам зварювання неплавким електродом в інертному газі з модуляцією зварювального струму. У першій частині огляду основна увага приділялась роботам, що стосуються особливостей протікання теплових, газодинамічних та електромагнітних процесів в нестационарних дугах з тугоплавким катодом при різних режимах модуляції струму дуги. Бібліогр. 35, табл. 2, рис. 18.

Ключові слова: дуга з тугоплавким катодом, дугова плазма, TIG зварювання, модуляція зварювального струму, імпульс, частота, коефіцієнт заповнення, амплітуда

PROCESSES OF NONCONSUMABLE ELECTRODE WELDING WITH WELDING CURRENT MODULATION (Review)

Part 1. Peculiarities of burning of non-stationary arcs with refractory cathode

U. Boi¹, I.V. Krivtsun²

¹Guangdong Institute of Welding (China-Ukraine E.O. Paton Institute of Welding).
363 Chiansin Str., Tianhe, 510650, Guangzhou. E-mail: wuby@gwi.gd.cn

²E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

Works devoted to the processes of inert-gas nonconsumable electrode welding with current modulation were reviewed. In the first part of the review attention is focused on studies, dealing with the features of running of thermal, gas-dynamic and electromagnetic processes in non-stationary arcs with refractory cathode at different modes of arc current modulation. 35 Ref., 2 Tabl., 18 Fig.

Keywords: arc with refractory cathode, arc plasma, TIG welding, welding current modulation, pulse, frequency, duty cycle, amplitude

Поступила в редакцію 28.10.2019

Cutting World 2020

Ярмарка профессиональных технологий резки

С 28 по 30 апреля 2020 г. Cutting World будет открыта в Messe Essen. Это единственная выставка, которая концентрируется на всей технологической цепочке на тему резки. Многочисленные экспоненты уже воспользовались возможностью, чтобы обеспечить зоны стендов в новом зале 8. В их число входят следующие компании: Assfalg, Boschert, Cam Concept, Eckelmann, Kjellberg, MGM, ProCom and Rosenberger, Air Liquide Deutschland, ВКЕ, ИHT Automation, NUM, STM Waterjet and Yamazaki Mazak. Заинтересованные участники могут найти регистрационные документы на www.cuttingworld.de. Крайний срок регистрации 30 ноября 2019 г.

В 2020 г. Cutting World впервые пройдет в модернизированном зале 8 в Messe Essen. Экспоненты и посетители попадут в зал через новое, залитое светом стеклянное фойе. Восточный конгресс-центр расположен в непосредственной близости и будет принимать Немецкий конгресс по резке и Немецкую конференцию по газопламенной резке.

Кроме того, участники Cutting World получают выгоду от благоприятного для инвестиций климата, потому что рынок режущих установок находится в состоянии постоянного изменения. Почти половина существующих металлорежущих станков уже более семи лет, и в этом секторе все больше требуются современные процедуры создания сетей и взаимосвязи последующих и начальных процессов обработки. Благодаря технологиям Industry 4.0 эксперты ожидают дополнительный потенциал получения прибыли в диапазоне миллиардов Евро для машиностроения в Германии в ближайшие годы.

