

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИМПУЛЬСНО-ДУГОВОЙ СВАРКИ НЕПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ (Обзор)

А.А. СЛИВИНСКИЙ, Л.А. ЖДАНОВ, В.В. КОРОТЕНКО

НТУУ «Киевский политехнический институт». 03056, г. Киев, пр-т Победы, 37. E-mail: o.slyvinsky@gmail.com

В работе рассмотрены основные проблемы развития и возможные перспективы дальнейшего совершенствования импульсно-дуговой сварки неплавящимся электродом в инертных газах. Приведены основные технологические возможности и теплофизические характеристики процесса в зависимости от вариаций параметров режимов сварки. Рассмотрены направления в развитии методов математического моделирования процесса сварки и возможные пути их совершенствования. Обоснована необходимость дальнейших исследований процесса для установления параметрических зависимостей и получения в инженерных и научных целях оптимальных режимов сварки импульсной дугой неплавящимся вольфрамовым катодом. Библиогр. 41, рис. 7.

Ключевые слова: импульсная TIG-сварка, термические циклы, жесткость режима, газодинамические характеристики, переходные процессы, дискретизация, разрядность, термопара, метод конечных элементов

TIG-сварка (Tungsten Inert Gas) начала свое активное развитие в эру авиационной и космической техники, а именно в 60-х годах прошлого века. Сегодня дуговая сварка в инертных газах является одним из самых распространенных способов соединения металлов и сплавов, который широко используется в отраслях промышленности с высокими требованиями к сварным швам и конструкциям, особенно в авиации и ракетостроении [1–6].

К концу 1960-х годов было разработано оборудование для сварки на переменном токе с наложением импульсов для соединения алюминия, которое базировалось на механических контакторах и осуществляло импульсно-дуговую сварку неплавящимся электродом. При этом между импульсами поддерживалась постоянная малоамперная дуга, что позволило существенно стабилизировать процесс и повысить качество сварных соединений [7–9]. Развитие TIG-сварки наряду с использованием различных сварочных и вспомогательных материалов (флюсов и паст, присадочных проволок, смесей газов) опирается на способы и методы изменения энергетических характеристик процесса, что позволяет эффективно влиять на тепловложение при сварке [10]. Так, в свое время нашли применение такие способы сварки неплавящимся электродом как шагодуговая сварка [11] и сварка модулированным током [12]. Дальнейшее развитие элементной базы, силовой электроники, а также микропроцессорной и цифровой техники привело к расширению количества управляемых величин и регулируемых параметров режима. В современных источниках питания для импульсно-дуговой сварки их количество состав-

ляет 7...10 параметров. При этом непосредственно на особенности существования дугового разряда влияют следующие параметры: ток в импульсе (I_p), ток паузы (I_b), продолжительность импульса (t_p) и паузы (t_b), время нарастания импульса (t_{up}), время спада импульса (t_{down}), форма импульса. Напряжение на дуге устанавливается длиной дугового промежутка, т. е. задается оператором.

Очевидно, что правильный подбор режимов сварки — сложный и длительный процесс. Поэтому, в настоящее время все более широко применяются так называемые синергетические источники питания, в которых оптимальное соотношение параметров режима в виде программы «прошивается» в сам сварочный источник. Для получения соответствующего программного обеспечения, поддерживающего необходимый режим работы источника, оператор должен задать материал, его толщину, диаметр электрода, положение сварки и характер тока сварки (стационарный или импульсный режим). При этом для облегчения выбора параметров режима сварки предусматривается использование современных компьютерных технологий, с использованием персональных компьютеров (ПК), и технологий связи, а именно Ethernet и WiFi. Создание систем «ПК – сварочный источник питания» уже сегодня позволяет отслеживать все параметры режима сварки, а также проводить их анализ и корректировку в автоматическом режиме непосредственно через программное обеспечение, установленное на ПК (технология «ewm Xnet» [13] от EWM и «Digital Revolution» от Fronius [14]).

С начала появления импульсной сварки неплавящимся электродом по настоящее время было проведено много исследований, создано боль-



Рис. 1. Влияние жесткости режима на полный тепловой КПД [15]

шое число сварочного оборудования с различными возможностями, и все же большое количество параметров регулирования режима сварки затрудняет его выбор и назначение для конкретно взятой задачи. В особенности это актуально для сварки тонколистового металла, где важно повышать производительность, но не допустить образования прожогов и значительной деформации конструкции. Существующие на сегодня передовые технологии управления процессом импульсной аргодуговой сварки неплавящимся электродом, дальше PCGTAW (Pulsed Current Gas Tungsten Arc Welding), не всегда позволяют добиться оптимального результата, прежде всего, из-за большого набора регулируемых параметров процесса и их взаимосвязей. Поэтому актуальной остается задача исследования их влияния на геометрию сварного соединения, которая зависит от формы сварочной ванны и определяется физическими характеристиками плазмы дугового разряда.

При сварке тонколистового металла важно соблюсти баланс между производительностью и качеством сварного соединения. Импульсное введение тепла позволяет значительно расширить возможности регулирования тепловложения в основной металл и его проплавления. В целом расплавление основного металла и формирование шва можно представить по следующей схеме. В течение импульса тока продолжительностью t_p вводится тепло Q , за счет которого происходит расплавление основного металла с образованием сварочной ванны в виде точки $Q = q_a t_p$, где q_a — эффективная мощность дуги; t_p — продолжительность импульса основного тока. В течение паузы t_b сварочная ванна охлаждается до полной или ча-

стичной кристаллизации. Следующий импульс тепла расплавит такую же точечную сварочную ванну на расстоянии от предыдущей точки $S = v(t_p + t_b)$, где v — скорость сварки. Шов, таким образом, формируется путем периодического расплавления отдельных точек с определенным шагом S . Степень перекрытия точек определяется их размером и шагом. Количество тепла, приходящееся на единицу длины шва, составляет $Q/S = q_a t_p / v(t_p + t_b)$, где выражение $q_a t_p / t_p + t_b$ представляет собой среднюю мощность периодически существующей дуги. Как показано в [15] процесс сварки импульсной дугой в первом приближении можно рассматривать как процесс сварки дугой постоянного тока с мощностью $q_r = q_a / (1 + t_b / t_p)$. Расчетный ток при этом составляет $I_r = I_p / (1 + t_b / t_p)$. Соотношение t_b / t_p характеризует периодичность тока и обуславливает способность к проплавлению периодически существующей дуги — чем оно больше при одном и том же расчетном токе I_r (средней мощности), тем больше импульсный ток (мощность импульса). Безразмерная величина t_b / t_p является технологическим параметром, характеризующим способность к проплавлению периодически существующей (импульсной) дуги при заданной энергии импульса и длительности цикла. Ее называют жесткостью режима сварки импульсной дугой (G).

Таким образом, изменяя жесткость режима и не изменяя величину тока можно влиять на проплавляющую способность импульсной дуги. Сравнительные исследования по сварке стали 12X18H9T толщиной 3 мм постоянной и импульсной дугой, приведенные в [15], показали, что при условии равенства средней погонной энергии и скорости сварки при увеличении жесткости также возрастает и значение полного теплового КПД (рис. 1).

Также акцентируется внимание на то, что с увеличением жесткости режима при условии одинакового проплавления, зона пластических деформаций (нагреваемая выше 600 °C) уменьшается (рис. 2) [15].

В работе [16] по результатам измерения термических циклов показано, что с возрастанием жесткости режима на одинаковых токах существенно уменьшается зона термического влияния ЗТВ (температура в точках контроля, находящихся на расстоянии 2 мм от оси сварки, уменьшилась на 200 °C с увеличением жесткости режима от 0,3 до 3). Это же подтверждают и результаты, опубликованные в [17] (рис. 3). Таким образом, можно утверждать, что жесткость режима оказывает решающее влияние на форму термических циклов сварки и время существования ванны и может служить обобщенным интегральным параметром PCGTAW-процесса.

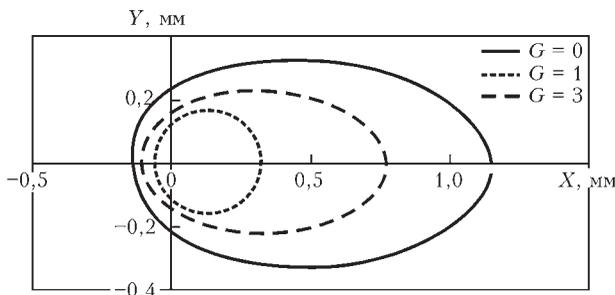


Рис. 2. Расчетные изотермы $T = 600$ °C при различных режимах сварки с использованием импульсной и постоянной дуги; G — жесткость режима [15]

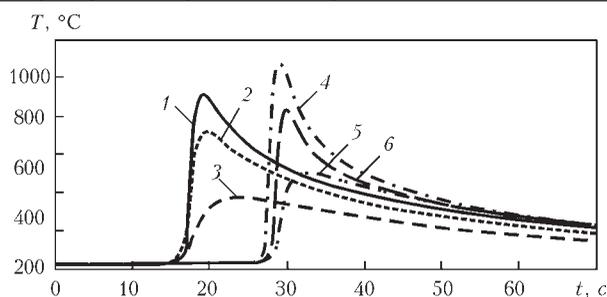


Рис. 3. Термические циклы, измеренные при сварке импульсной дугой (TIGp) (кривые 1–3) и стационарной дугой (TIG) (кривые 4–6) для точек, отстоящих на 4, 6 и 8 мм от оси шва [17]

Рассматривая процесс PCGTAW, кроме временных характеристик импульсов важно выделять такие параметры режимов, как ток в импульсе (I_p), базовое значение тока (I_b) и скорость сварки (v), которая определяет погонную энергию сварки. Если I_p — параметр, прежде всего, влияющий на проплавление основного металла, то I_b , согласно [18], служит для стабилизации дугового разряда, так как при нулевом значении базового значения тока увеличивается вероятность т. н. «блуждания дуги», что влечет за собой неопределенность местоположения участков возбуждения дуги на электроде и снижает стабильность дугового процесса.

Еще одной особенностью PCGTAW является искажение формы дугового разряда с возможным отставанием анодного пятна. Это явление автор [19] объясняет тем, что испарение основного металла, происходящее за время импульса тока, снабжает дуговой разряд атомами с более низким потенциалом ионизации, нежели атомы защитного газа, но одновременно способствует и снижению степени теплового сжатия столба дуги, что, в свою очередь, приводит к высоким значениям падения напряжения за время паузы. В результате этого возникает противоречие между наличием благоприятных условий существования дуги на расплавленном током импульса металле шва и необходимостью ее перемещения в менее благоприятные условия холодного металла. Исходя из принципа термодинамического минимума Штенбека [20], в процессе сварки должны периодически возникать задержки анодного пятна на расплавленном металле, т. к. последний обеспечивает минимальное напряжение дуги. Анодное пятно синхронно перемещается с ванной расплавленного металла, отставая от перемещения электрода до тех пор, пока напряжение растянутой дуги не окажется равным напряжению возбуждения анодных процессов. Вследствие этого перемещение дуги может иметь скачкообразный характер. Такое отставание анодного пятна приводит к существенному колебанию напряжения дуги на 10...15 В [21], что, в свою очередь, приводит к колебаниям тепловой мощности и как результат к нестабиль-

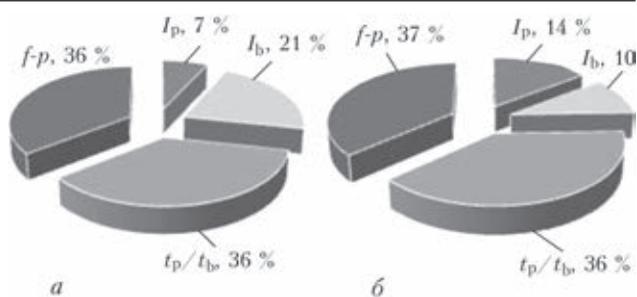


Рис. 4. Диаграммы распределения влияния основных параметров PCGTAW (а) и HF-PCGTAW (б) сварки на проплавление основного металла [26]

ному проплавлению основного металла. Таким образом, можно сказать, что пространственная нестабильность подвижной дуги существенно ограничивает область допустимых параметров режима сварки. Поэтому для поддержания ионизации столба дуги необходимо в периоды времени между импульсами поддерживать некоторый ток дуги до следующего импульса. Таким образом, именно правильным подбором базового значения тока (I_b), поддерживающего ионизацию столба дуги, и частоты импульсов можно добиться стабильности процесса PCGTAW.

Оптимальному подбору параметров посвящено значительное количество современных исследований [22–25]. Количественное подтверждение исследований в подавляющем большинстве представлено математическими зависимостями, полученными с использованием методики Тагучи (Taguchi method). По данной методике в [26] было оценено влияние параметров режима импульсно-дуговой сварки на проплавление основного металла для диапазонов частот пульсации тока до 10 Гц (PCGTAW-процесс) и 100...250 Гц (HF-PCGTAW-процесс). Из диаграмм (рис. 4) видно, что основное влияние на процесс проплавления и формирования сварного соединения как при PCGTAW, так и при HF-PCGTAW оказывает отношение длительности импульса к длительности паузы t_p/t_b (величина обратная жесткости режима) и частота пульсации тока $f-p$. В то же время, наименьшее влияние на проплавление оказывают такие параметры режима, как базовое значение тока и ток в импульсе, хотя физически именно эти параметры влияют на стабильность процесса сварки и, соответственно, качество формирования сварного соединения.

Существует достаточно большое количество работ, посвященных моделированию процесса PCGTAW. При этом основой физико-математического моделирования характеристик дугового импульсного разряда обычно служат экспериментальные данные, полученные с помощью метода зондирования дуги [27–28].

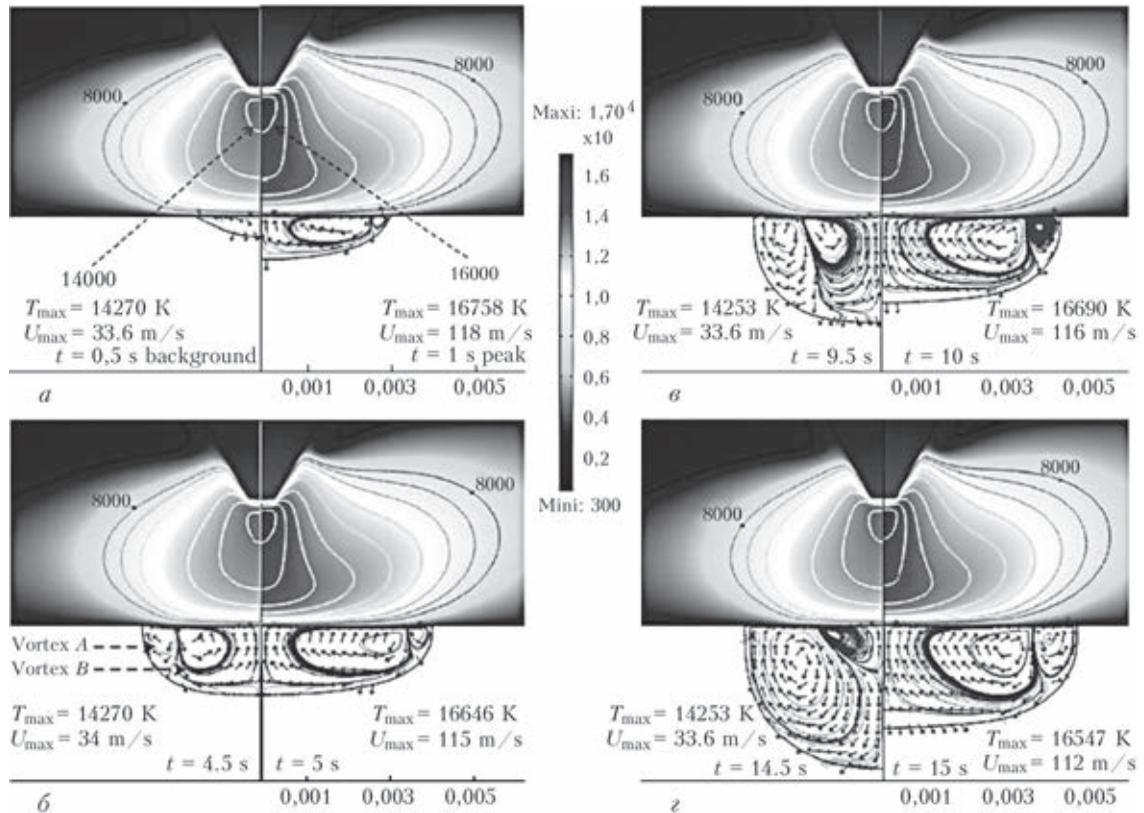


Рис. 5. Результаты моделирования магнитогидродинамических процессов в сварочной ванне для периодов действия базового тока (слева) и тока импульса (справа) в моменты времени: a — 1; b — 5; c — 10; d — 15 с с начала процесса PCGTAW со следующими режимами: $I_p = 160$ А; $I_b = 80$; $f_p = 1$ Гц; $P_{ac} = 50$ % [36]

Результаты математического моделирования дугового разряда между неплавящимся вольфрамовым катодом и медным водоохлаждаемым анодом, приведенные в [29], показали, что при сварке в импульсно-периодическом режиме существование дугового разряда сопровождается существенным изменением электромагнитных, тепловых и газодинамических характеристик дуговой плазмы.

Приведенные результаты моделирования показывают, что важнейшую роль при распределении тепловложения в основной металл играют переходные процессы, экспериментальное исследование которых может быть проведено на основе анализа электронных осциллограмм энергетических параметров дугового разряда — тока и напряжения. При таком осциллографировании чрезвычайно важным является выбор характеристик первичных датчиков и устройства фиксации — аналогово-цифрового преобразователя (АЦП). Методики выбора первичных датчиков для получения адекватного образа цифрового сигнала подробно описаны в работе [30], принципы выбора АЦП для осциллографирования — в работе [31].

Современные подходы в моделировании физических процессов, протекающих в плазме дугового разряда при PCGTAW, представленные в работах [32–36], предусматривают использование метода конечных элементов (МКЭ). Так, результаты полученные авторами работы [36] бази-

руются на использовании инфракрасной камеры и численного МКЭ-моделирования с использованием комплекса ComsolScript. При этом для вычисления распределения температур в катодной, анодной области и плазмы дуги используется система основных классических уравнений Максвелла. Моделирование магнитогидродинамических процессов показало, что в разные моменты времени сварки в ванной протекают различные процессы, существенно зависящие от электродинамических характеристик столба плазмы, а также от его температуры (рис. 5). Установлено, что максимальная температура вольфрамового катода составляла 3500 К в момент импульса и 3200 К в момент паузы. Максимальная температура в области плазмы составляла 14250 К в момент паузы и 16540 К при действии тока импульса (I_p). Известно, что эти значения существенно зависят от материала анода, величины сварочного тока и расстояния между электродами. В результате расчета также был приведен характер изменения глубины и ширины проплавления в зависимости от количества импульсов, приходящихся на одну и ту же точку металла, что дает возможность говорить о тепловом насыщении в зависимости от количества импульсов (рис. 6).

Основным тезисом, представленных в [36] результатов, является утверждение авторов, что при сварке импульсной дугой, даже при значительной

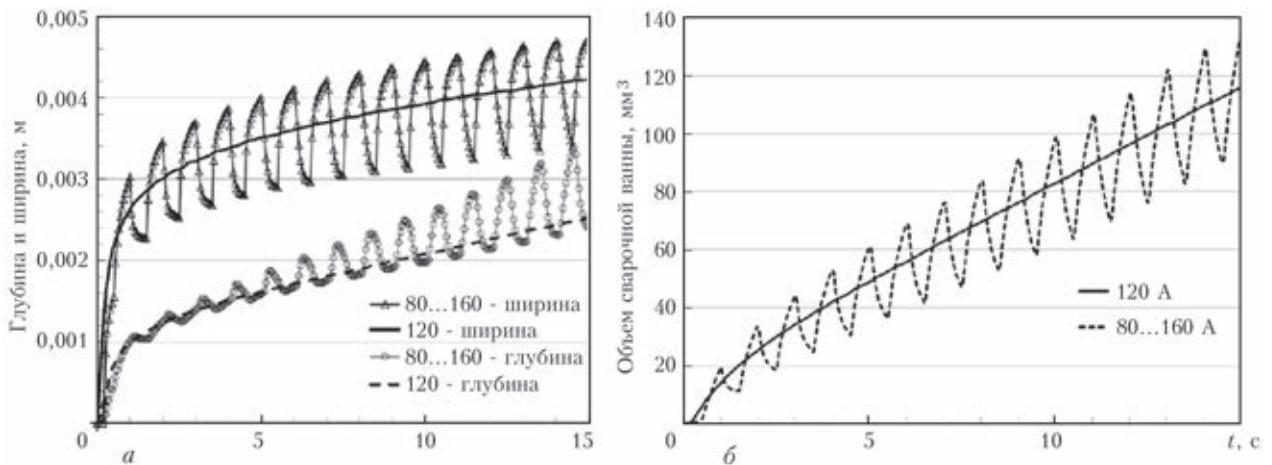


Рис. 6. Сравнение геометрических характеристик сварочной ванны для сварки на постоянном токе и PCGTAW [36]

разнице в базовом и импульсном значении тока, формоизменение сварочной ванны в поперечном сечении не происходит, что допускает регулирование этих параметров в широких пределах при сварке тонколистового металла. Вместе с тем при моделировании в данной работе приняты следующие упрощения: в плазме дуги имеет место термодинамическое равновесие, влияние паров металлов не учитывается. Последнее допущение значительно снижает эффективность использования данной модели для практических целей. В общем случае необходимо отметить, что модель рассчитана для случая точечной сварки, то есть источник тепла неподвижный, что также вносит существенные погрешности при прогнозировании проплавления основного металла.

Как известно, решающее влияние на механические свойства сварного соединения имеют структурные превращения в металле и напряженно-деформированное состояние сварного соединения и конструкции в целом. Эти факторы определяются характером тепловых процессов сварки. И, если моделирование стационарного процесса сварки достаточно широко освещено в научных источниках, то о расчетах тепловых процессов при импульсно-дуговой сварке неплавящимся электродом информации недостаточно. Известно, что теплофизическая обстановка при сварке импульсной дугой существенно отличается от сварки стационарной дугой: процесс распространения тепла становится нестационарным, происходит циклическая смена процессов нагрева и охлаждения в каждой точке шва и околошовной зоны.

Для расчета тепловых процессов TIG-сварки используются схемы точечных, линейных и объемных источников тепла. Основы расчета тепловых процессов при сварке, как известно, были заложены Розенталем и Рыкалиным. Используя расчетные схемы Рыкалина для импульсно-дуговой сварки неплавящимся электродом, в основном, прибегают к ряду упрощений. Примером

могут быть работы [37–38], результаты которых скорее качественные нежели количественные и, кроме того, такой подход не дает возможности предсказать форму сварочной ванны, что делает их неудобными для определения оптимальных режимов импульсной сварки. Для более точного прогнозирования глубины проплавления, а также теплового состояния основного металла необходимо использование объемных источников тепла [39]. Наиболее широко используемая сегодня методика конечно-элементного моделирования тепловых процессов рассматривает объемные источники тепла эллипсоидной формы, в первом приближении напоминающие форму сварочной ванны [40]. В работе [41] приведены результаты моделирования процесса PCGTAW для источника тепла, представленного в виде параболы вращения с нормальным (Гауссовым) распределением мощности. При этом размеры источника определялись экспериментально, по снимкам, полученным с помощью скоростной инфракрасной ССD-камеры. Моделирование проводилось в двух разных постановках: когда источник тепла в пери-

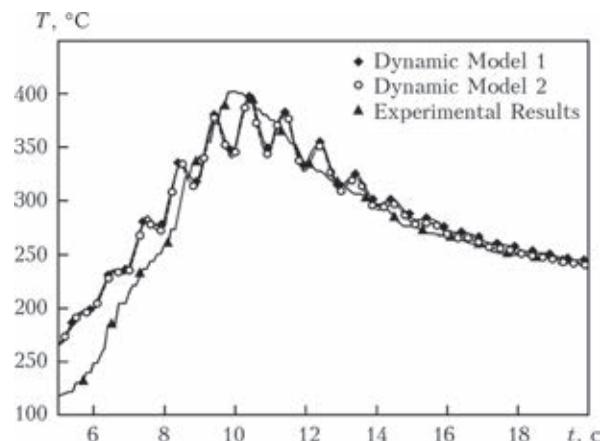


Рис. 7. Термические циклы сварки, полученные экспериментально и в результате МКЭ-моделирования для точки, находящейся на расстоянии 40 мм от начала сварки, 6 мм от оси шва, на глубине 4 мм: $I_p = 160$ А; $I_b = 80$ А; $f-p = 1$ Hz; $t_p = 0,5$ с; $t_b = 0,5$ с [41]

од действия базового тока задается в виде парабола вращения, а в момент действия основного тока — в виде модели Гаусса (рис. 7, Dynamic Model 1), а также в случае, когда и для момента паузы и для момента импульса источник тепла представляется в виде модели Гаусса (рис. 7, Dynamic Model 2).

Из приведенных термических циклов видно, что обе динамические модели дают удовлетворительную схожесть по максимальным температурам с экспериментальным термическим циклом, чего не скажешь о характере колебаний температур, полученных математически и экспериментально. Очевидно, что при сварке с периодической сменой мощности, характерной для PCGTAW-процесса, также периодически будет изменяться и температура металла, чего не наблюдается на полученной авторами работы [41] экспериментальной кривой. Возможно, подобное несоответствие связано с особенностями измерительного оборудования. Однако кроме схожести температурного расчета с экспериментом важным также является предсказание формы провара, что при использовании предложенной методики реализуется сложно.

Заключение

В результате анализа литературных данных по изучению особенностей импульсно-дуговой сварки неплавящимся электродом в защитных газах (PCGTAW) установлено, что основной проблемой при практическом использовании данного способа является отсутствие возможности прогнозирования влияния параметров режима сварки на физические и технологические свойства дугового разряда и, как следствие, на геометрические характеристики шва.

Показано, что основной технологической характеристикой режима импульсно-дуговой сварки неплавящимся электродом в защитных газах является «жесткость режима».

Установлено, что при анализе процесса PCGTAW, кроме временных характеристик импульсов важно выделять такие параметры режимов как ток (I_p) и напряжение (U_p) в импульсе, а также базовые значения тока (I_b) и напряжения (U_b) и особенно, кратковременные изменения энергетических параметров импульсного дугового разряда.

На основе анализа литературных данных и теоремы Найквиста сформулированы требования к аналогово-цифровому преобразователю (АЦП) для фиксации энергетических параметров PCGTAW-сварки и переходных процессов. Кроме этого, для дальнейшей расшифровки осциллограмм целесообразно использовать синхронизи-

рованную видеофиксацию дугового импульсного разряда.

Результаты моделирования физических процессов в плазме и магнитогидродинамических процессов в сварочной ванне показывают, что в разные моменты времени в ванне протекают различные процессы, существенно зависящие от электродинамических характеристик столба плазмы, а также от его температуры.

Конечно-элементное моделирование тепловых процессов импульсно-дуговой сварки вольфрамовым электродом требует использования расчетной схемы объемного источника нагрева эллипсоидной формы и наличия расчетно-экспериментальных временных зависимостей основных макропараметров для корректного математического описания переменной во времени мощности дуги.

Таким образом, имеющиеся в настоящее время экспериментальные данные и результаты моделирования процесса PCGTAW достаточно полно отражают существование плазмы дугового разряда в моменты появления импульса тока и его влияние на поведение металла сварочной ванны. Процессы, сопровождающие условия возникновения основного дугового разряда в импульсе и его угасания, т.е. переходные кратковременные процессы, не учитываются из-за отсутствия надежных экспериментальных данных. Это подтверждает актуальность создания оптимальной методики для дальнейшего исследования этих процессов в условиях PCGTAW-сварки, в результате чего станет возможным создание более точной методики прогнозирования влияния режима сварки на геометрические и технологические характеристики сварного соединения.

1. Бродский А.Я. Аргонодуговая сварка вольфрамовым электродом. — М.: Машгиз, 1956. — 398 с.
2. Петров А.В. Технология дуговой сварки в среде инертных газов: Справочник по сварке / Под ред. Е.В. Соколова. — М.: Машгиз, 1961. — Т 2. — С. 327–375.
3. Актуальные проблемы сварки цветных металлов: Сб. докл. 11 Всесоюз. конф. — Киев: Наук. думка, 1985. — 464 с.
4. Металловедение алюминиевых сплавов / Под ред. С.Т. Кишкина. — М.: Наука, 1985. — 239 с.
5. Руссо В.Л. Сварка алюминиевых сплавов в среде инертных газов. — Л.: Судпромгиз, 1962. — 163 с.
6. Шаханов С.Б. Теория и технология сварочного производства в ракетостроении: Учебное пособие; Балт. гос. техн. ун-т. — СПб., 2007. — 275 с.
7. Гуревич С.М., Замков В.Н., Кушницренко Н.А. Повышение эффективности проплавления титановых сплавов при аргонодуговой сварке // Автомат. сварка. — 1965. — № 9. — С. 1–7.
8. Алов А.А., Шмаков В.М. Аргонодуговая сварка с дополнительным потоком аргона // Свароч. пр-во. — 1962. — № 3. — С. 13–16.
9. Terry C.A., Tyler W.T. Inert-gas tungsten-arc welding // Weld. End Metal Fabr. — 1958. — № 2. — P. 58–61.
10. Патон Б.Е. Дальнейшее развитие систем автоматического управления и регулирования сварочных процессов // Автомат. сварка. — 1963. — № 5. — С. 1–6.

11. Размышляев А.Д., Патрикеев А.И., Маевский В.Р. Расчетное определение контура ванны при шагодуговой сварке толстолистового металла // Свароч. пр-во. – 1988. – № 5. – С. 35–37.
12. Вагнер Ф.А. Оборудование и способы сварки пульсирующей дугой. – М.: Энергия, 1980. – 118 с.
13. *Network-based welding processes analysing, controlling and managing .pdf* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ewm-group.com/ru/service/downloads/brochures-handouts-and-manuals/2698-ewm-xnet-brochure/download.html>.
14. *Weld+vision FRONIUS MAGAZINE Fronius 2002 P.11.pdf* [Электронный ресурс] Режим доступа: http://www.fronius.com/cps/rde/xbcr/SID-76553F1D-04EC16FD/fronius_brasil/4000062136_weld_vision_Nr_9_en.pdf.
15. Петров А.В. Славин Г.А. Исследование технологических возможностей импульсной дуги // Свароч. пр-во. – 1966. – № 2. – С. 1–4.
16. Сливинський О.А., Бойко В.П., Препіяло А.О. Математичне моделювання теплових процесів аргонодугового зварювання тонколистової нержавіючої сталі феритного класу // Зварювання та споріднені процеси і технології: VI Всеукр. міжгалуз. наук.-техн. конф. студентів, аспірантів та наук. співробітників, 29–31 трав. 2013 р.: матеріали конф. – Київ: НТУУ «КПІ», 2013. – С. 14.
17. Сливинський О.А., Коротенко В.В. Математичне моделювання теплових процесів імпульсного аргонодугового зварювання вольфрамовим електродом тонколистової нержавіючої сталі // Зварювання та споріднені процеси і технології: VII Всеукр. міжгалуз. наук.-техн. конф. студентів, аспірантів та наук. співробітників, 14–16 трав. 2014 р.: матеріали конф. – Київ: НТУУ «КПІ», 2014. – С. 19.
18. Ковалев И.М. Некоторые способы стабилизации неустойчивых дуг с неплавящимся электродом // Свароч. пр-во. – 1973. – № 6. – С. 3–5.
19. Ковалев И.М. Пространственная устойчивость движущейся дуги с неплавящимся катодом // Там же. – 1972. – № 8. – С. 1–3.
20. Финкельбург В., Меккер Г. Электрические дуги и термическая плазма. – М.: ИЛ, 1961. – 370 с.
21. Козаков Ю.М., Столбов В.И., Корягин К.Б. Отставание анодного пятна движущейся сварочной дуги // Свароч. пр-во. – 1986. – № 10. – С. 19–21.
22. Kim, D. and Rhee, S. Optimization of arc welding process parameters using a genetic algorithm // *Welding J.* – 2001. – July. – P. 184–189.
23. Giridharan P.K., Murugan N. Optimization of pulsed GTA welding process parameters for the welding of AISI 304L stainless steel sheets // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* – January 2009. – **40**, Is.5. – P. 478–489.
24. Babu S., Senthil Kumar T. Optimizing pulsed current gas tungsten arc welding parameters of AA6061 aluminium alloy using Hooke and Jeeves algorithm // *Transaction of Nonferrous Metals Society of China.* – 2008. – Vol. 18. – P. 1028–1036.
25. Chakravarthy M.P., Ramanaiah N., Sundara B.S. K. Siva Rao. Process parameters optimization for pulsed TIG welding of 70/30 Cu–Ni alloy welds using taguchi technique // *Intern. Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering.* – 2013. – 7, № 4. – P. 342–348.
26. Arivarasu M., Devendranath Ramkumar K, Arivazhagan N. Comparative studies of high and low frequency pulsing on the aspect ratio of weld bead in gas tungsten arc welded AISI 304L plates // *Proc. Engineering.* – 2014. – № 97. – P. 871–880.
27. Дятлов В.И. Вольт-амперная характеристика сжатой электрической дуги // *Автомат. сварка.* – № 1. – 1961.
28. Рабкин Д.М., Иванова О.Н. Исследование дуги при сварке вольфрамовым электродом // Там же. – № 5. – 1968. – С. 16–20.
29. Кривичун И.В. Моделирование динамических характеристик импульсной дуги с тугоплавким катодом // Там же. – 2013. – № 7. – С. 24.
30. *Можливість використання аналогово-цифрового перетворювача для дослідження зварювальної дуги змінного струму* / Л.А. Жданов, А.М. Сливинський, В.Т. Котик та ін. // *Машинознавство.* – 2003. – № 2. – С. 38–41.
31. *Дослідження зварювальної дуги змінного струму за допомогою персонального комп'ютера* / Л.А. Жданов, А.М. Сливинський, В.М. Коперсак та ін. // *Наук. вісті НТУУ «КПІ».* – 2004. – № 3. – С. 49–55.
32. Wu C.S., Gao J.Q. Analysis of the heat flux distribution at the anode of a TIG welding arc // *Comput. Mater. Sci.* – 2001. – **24**. – P. 323–327.
33. *Numerical simulation on interaction between TIG welding arc and weld pool* / F. Lu, X. Tang, H. Yu, S. Yao. // *Ibidi.* – 2006. – **35**. – P. 458–465.
34. Tanaka M., Lowke J.J. Predictions of weld pool profiles using plasma physics // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2007. – **40**. – P. 1–23.
35. Traidia A, Roger F, Guyot E. Optimal parameters for pulsed gas tungsten arc welding in partially and fully penetrated weld pools // *Int. J. Therm. Sci.* – 2010. – **49**. – P. 1197–1208.
36. Traidia A., Roger F. Numerical and experimental study of arc and weld pool behaviour for pulsed current GTA welding // *International Journal of Heat and Mass Transfer.* – 2011. – № 54. – P. 2163–2179.
37. Петров А.В. Применение метода источников для расчета тепловых процессов при импульсно-дуговой сварке // *Физика и химия обработки материалов.* – 1967. – № 5. – С. 15–25.
38. Вагнер Ф.А. Расчет температур в изделии при импульсной сварке с экспоненциальной формой импульса // *Автомат. сварка.* – 1975. – № 7. – С. 13–15.
39. *Современные аспекты компьютерного моделирования тепловых, деформационных процессов и структурообразования при сварке и сопутствующих технологиях* / С.Н. Киселев, А.С. Киселев, А.С. Куркин и др. // *Свароч. пр-во.* – 1998. – № 10. – С. 16–24.
40. Goldak J., A. Chakravarti, M. Bibby. A new finite element model for welding heat sources // *Metallurgical Transactions.* – 1984. – V. 15B. – P. 299–305.
41. Zhang Tong, Zheng Zhentai, Zhao Ru. A dynamic welding heat source model in pulsed current gas tungsten arc welding // *J. of Materials Processing Technology.* – Elsevier B.V. – 2013. – № 213. – P. 2329–2338.

Поступила в редакцию 28.07.2015