



МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИМПУЛЬСНОЙ ДУГИ С ТУГОПЛАВКИМ КАТОДОМ

И. В. КРИВЦУН, И. В. КРИКЕНТ, В. Ф. ДЕМЧЕНКО

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

На основе самосогласованной математической модели нестационарных процессов переноса энергии, импульса, массы и заряда в столбе и анодной области электрической дуги с тугоплавким катодом проведен детальный численный анализ динамических характеристик аргоновой дуги атмосферного давления с вольфрамовым катодом и медным водоохлаждаемым анодом при импульсном изменении электрического тока. Показано существенное различие динамического поведения локальных и интегральных характеристик дуговой плазмы, а также отличие динамики тепловых и электромагнитных процессов, протекающих в столбе и в анодной области импульсной дуги. Установлено, что скорости переходных процессов в дуговой плазме на переднем и заднем фронтах импульса также могут существенно различаться. Библиогр. 28, рис. 14.

Ключевые слова: импульсная электрическая дуга, тугоплавкий катод, водоохлаждаемый анод, столб дуги, анодная область, импульс тока, динамические характеристики, математическое моделирование

В современном сварочном производстве сварка неплавящимся электродом с импульсной модуляцией тока дуги находит все более широкое применение благодаря дополнительным возможностям управления глубиной и формой проплавления металла, термическим циклом сварки и, как следствие, свойствами получаемого сварного соединения. Эти возможности могут быть реализованы за счет надлежащего выбора формы импульсов сварочного тока, длительности и частоты их следования, величины базового тока и максимального значения тока в импульсе. Важная задача, которую необходимо решить для теоретического обоснования оптимальных режимов сварки неплавящимся электродом с импульсной модуляцией сварочного тока, заключается в численном исследовании нестационарных процессов в плазме столба и приэлектродных областей дуги с тугоплавким катодом (в первую очередь анодных процессов, определяющих взаимодействие дуговой плазмы со свариваемым металлом) при импульсном изменении электрического тока.

Существует большое количество публикаций, посвященных теоретическому исследованию и математическому моделированию процессов энерго-, массо- и электропереноса в столбе, приэлектродных областях и в электродах дуги с тугоплавким катодом, в том числе в свариваемом металле при сварке неплавящимся электродом в инертных газах [1–14]. Однако представленные в большинстве из этих работ результаты относятся к стационарным дугам, горящим на постоянном токе, за исключением работ [12–14], специально посвященных моделированию процессов про-

лавления металла при импульсной сварке неплавящимся электродом. Что касается динамических характеристик самой импульсной дуги с тугоплавким катодом, то здесь следует отметить, например, работы [15, 16], первая из которых посвящена экспериментальному исследованию указанных характеристик, тогда как в работе [16] приведены результаты численного исследования динамического поведения как электрической дуги, так и сварочной ванны при точечной сварке импульсной дугой с неплавящимся электродом. Однако представленные в данной работе расчетные данные не позволяют проанализировать динамические характеристики импульсной дуги при различных скоростях изменения сварочного тока на переднем и заднем фронтах импульса.

При горении дуги в импульсном режиме *a priori* можно выделить два характерных случая. Если скорость изменения тока сравнительно невелика, то нестационарные процессы переноса энергии, импульса, массы и заряда в дуговой плазме протекают в режиме последовательной смены стационарных состояний, каждое из которых соответствует состоянию стационарной дуги для текущего значения тока. Такой квазистационарный режим горения дуги реализуется, если скорость переходных процессов в дуге существенно превосходит скорость изменения тока. Во втором случае, т.е. при высоких скоростях изменения тока дуги, доминирующим фактором являются динамические характеристики дуговой плазмы. Численное исследование этих характеристик, а также получение количественных оценок скоростей изменения тока, разграничивающих квазистационарный и нестационарный режимы горения импульсной аргоновой дуги с тугоплавким (воль-

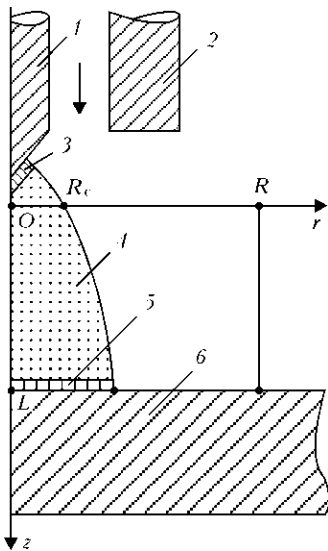


Рис. 1. Схема расчетной области для численного моделирования импульсной дуги с тугоплавким катодом: 1 — вольфрамовый катод; 2 — сопло для подачи защитного газа; 3 — катодная область; 4 — столб дуги; 5 — анодная область; 6 — медный водоохлаждаемый анод

фравовым) катодом и медным водоохлаждаемым анодом (рис. 1), и является целью настоящей работы.

Влияние импульсного изменения тока дуги на тепловые, газодинамические и электромагнитные характеристики ее столба, а также на характеристики ее теплового и электрического взаимодействия с поверхностью анода будем исследовать отдельно для переднего и заднего фронтов импульса (рис. 2). При этом будем предполагать, что как на переднем, так и на заднем фронте ток дуги изменяется линейно при следующих значениях длительности фронтов: $b = 5; 20; 100$ и 200 мкс. Будем также считать, что, достигнув своего максимального (минимального) значения, ток остается постоянным в течение времени, достаточного для установления соответствующего стационарного состояния дуги.

Для численного моделирования электрической дуги при рассматриваемом изменении тока необходимо привлекать нестационарную математическую модель процессов энерго-, массо- и электропереноса в дуговой плазме, которая должна включать следующие взаимосвязанные модели: модель тепловых, электромагнитных и газодинамических процессов в плазме столба дуги и мо-

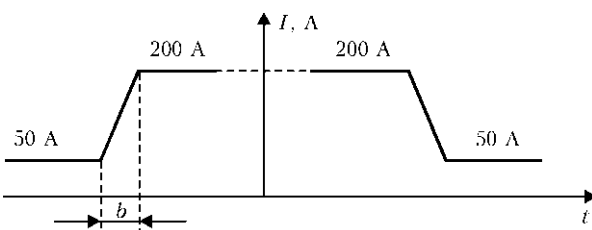


Рис. 2. Диаграмма изменения тока дуги на переднем и заднем фронтах импульса

дели приэлектродных процессов (см., например, [9, 16]). Модель анодных процессов необходима для замыкания модели столба нестационарной дуги самосогласованными граничными условиями на аноде, а также для определения характеристик теплового и электрического взаимодействия такой дуги с поверхностью анода [17]. Что касается модели катодных процессов, то, поскольку теория катодных явлений, а также процессов в прикатодной плазме электрической дуги с тугоплавким катодом разработана достаточно подробно [10, 18–21], в качестве граничных условий вблизи катода можно воспользоваться, например, результатами работы [21].

При описании процессов в плазме столба импульсной аргоновой дуги с вольфрамовым катодом и медным водоохлаждаемым анодом будем использовать модель изотермической ионизационно-равновесной плазмы [9, 22], а для описания процессов в прианодной плазме и на поверхности анода — модель анодной области, предложенную в работе [17], с учетом того, что в рассматриваемом здесь случае неиспаряющихся электродов дуговую плазму можно считать однокомпонентной, т. е. содержащей только частицы защитного газа (аргона). Для определения термодинамических характеристик, коэффициентов переноса и радиационных потерь такой плазмы в зависимости от ее температуры и давления воспользуемся данными работы [23]. Будем также предполагать, что рассматриваемая система (см. рис. 1) имеет осевую симметрию.

Соответствующая принятым допущениям система дифференциальных уравнений, описывающих нестационарные тепловые, газодинамические и электромагнитные процессы в плазме столба дуги, а также зависимости теплового потока в анод q_a и анодного падения потенциала $U_a = -\Delta\phi$, где $\Delta\phi$ — разность потенциалов между внешней границей анодной области и поверхностью анода, от температуры прианодной плазмы и плотности электрического тока на аноде приведены в работе [22]. Здесь необходимо отметить, что при рассматриваемых в настоящей работе частотах изменения электромагнитных характеристик дуги $\omega \leq 1,26 \cdot 10^6 \text{ c}^{-1}$, определяемых по длительности переднего и заднего фронтов импульса тока, толщина скин-слоя [24] для дуговой плазмы (аргоновая плазма атмосферного давления при температуре 15000 К) оказывается более 3,3 см, т. е. существенно превышает характерные размеры дуги. Поэтому использование при описании нестационарных процессов электропереноса в дуговой плазме закона Ома и уравнения для скалярного потенциала электрического поля [22], т. е. пренебрежение токами смещения, является вполне оправданным.



Расчетную область, в которой будем вычислять распределенные характеристики нестационарной дуговой плазмы, определим как $\Omega = \{0 < r < R; 0 < z < L\}$, где L — длина расчетной области, фактически равная длине дуги; R — радиус расчетной области, заведомо превышающий поперечные размеры дуги (см. рис. 1). В качестве граничных условий для указанных выше уравнений используем условия на границах расчетной области, подробно описанные в работе [22], с учетом того, что граничные условия для электромагнитных характеристик будем понимать как соответствующие текущему значению изменяющегося во времени тока дуги $I(t)$. Что касается начальных условий, то будем полагать, что распределенные характеристики дуговой плазмы в момент времени $t = 0$ соответствуют характеристикам стационарной дуги при токе, равном начальному значению тока.

Данная краевая задача решалась численно, методом конечных разностей. Для решения уравнений газодинамики и конвективного теплопереноса использовался совместный лагранжево-эйлеровый метод [25, 26], адаптированный для условий сжимаемой среды. При проведении расчетов параметры модели были выбраны следующим образом. Размеры расчетной области: $L = 3$ мм, $R = 8$ мм; сеточные параметры: шаг по времени $\tau = 0,5$ мкс; шаги сетки по пространственным координатам: $h_r = 0,125$ мм, $h_z = 0,06$ мм. Температура окружающей среды была задана равной 500 К, температура поверхности медного водоохлаждаемого анода $T_s = 720$ К [22]. Значение радиуса области катодной привязки дуги R_c (см. рис. 1) определялось на основе рекомендаций работы [21] так, чтобы максимальное значение плотности электрического тока в этой области было постоянно $j_{c0} = 10^8$ А/м² во всем исследуемом диапазоне изменения тока дуги (50...200 А). Максимальную температуру плазмы вблизи катода также выбирали постоянной $T_{c0} = 20500$ К [21].

Динамика изменения температурного поля и картины течения дуговой плазмы при быстром изменении тока дуги ($b = 5$ мкс) показана на рис. 3, 4 (время на этих рисунках отсчитывается от момента начала изменения тока). На рис. 3, 4 изотермы соответствуют температурам 1; 2; 4; 6; 8; 10; 12; 14; 16; 18 кК от периферии дуги к ее оси. Результаты расчета являются вполне ожидаемыми, а именно: на переднем фронте импульса (при увеличении тока с 50 до 200 А) колоколообразные изотермические линии в столбе дуги расширяются; напротив, на заднем фронте (при уменьшении тока с 200 до 50 А) высокотемпературная токопроводящая область дуговой плазмы сжимается. В обоих случаях требуется некоторое время (около 100 мкс при увеличении тока дуги и около 120 мкс при его уменьшении) для

того, чтобы температурное поле и картина течения дуговой плазмы вышли на соответствующие стационарные состояния.

В отличие от приведенной выше общей картины динамики горения дуги изменение во времени отдельных локальных и интегральных характеристик столба и анодной области дуги с тугоплавким катодом при импульсном изменении электрического тока имеет ряд специфических особенностей. В качестве таких характеристик столба дуги, динамику изменения которых будем в дальнейшем анализировать, выберем следующие: T_{col} и j_{col} — температура плазмы и плотность электрического тока на оси столба, вычисляемые в его среднем сечении (при $z = 1,5$ мм); R_{col} — характерный радиус токопроводящей области плазмы в этом же сечении, определяемый как радиус окружности, в пределах которого сосредоточено 95 % текущего значения тока дуги.

На рис. 5–7 представлено изменение во времени (время исчисляется с момента начала изменения тока) указанных характеристик для переднего и заднего фронтов импульса при $b = 20, 100$ и 200 мкс (сплошные, штриховые и пунктирные линии соответственно).

Как следует из представленных на этих рисунках расчетных зависимостей, температура плазмы в центре столба дуги является наименее инерционной его характеристикой. Это объясняется практически мгновенным, пропорциональным изменению тока (по крайней мере, при $b \geq 20$ мкс), изменением производительности джоулевых источников тепла, приводящим к соответствующему росту или снижению T_{col} (см. рис. 5). Наблюдающийся на переднем фронте импульса тока при $b = 20$ мкс небольшой максимум температуры дуговой плазмы связан с ее нагревом возрастающим током (см. сплошную кривую на рис. 6, а) до температур, превышающих значение T_{col} для стационарной 200-амперной дуги и последующим остыванием за счет более медленного конвективного охлаждения (характерное время релаксации температуры плазмы столба дуги в рассматриваемых условиях составляет около 30 мкс). С увеличением длительности переднего фронта до 100 мкс и выше этот максимум практически исчезает, поскольку скорость конвективного охлаждения, определяемая инерционностью газодинамических процессов в дуговой плазме, становится соизмеримой со скоростью возрастания тока дуги, а следовательно и джоулева нагрева плазмы, при увеличении b (см. штриховую и пунктирную кривые на рис. 5, а). Следует отметить, что подобный эффект практически не проявляется при уменьшении тока на заднем фронте импульса (см. рис. 5, б).

Что касается плотности тока в центре столба дуги, то, поскольку j_{col} является произведением

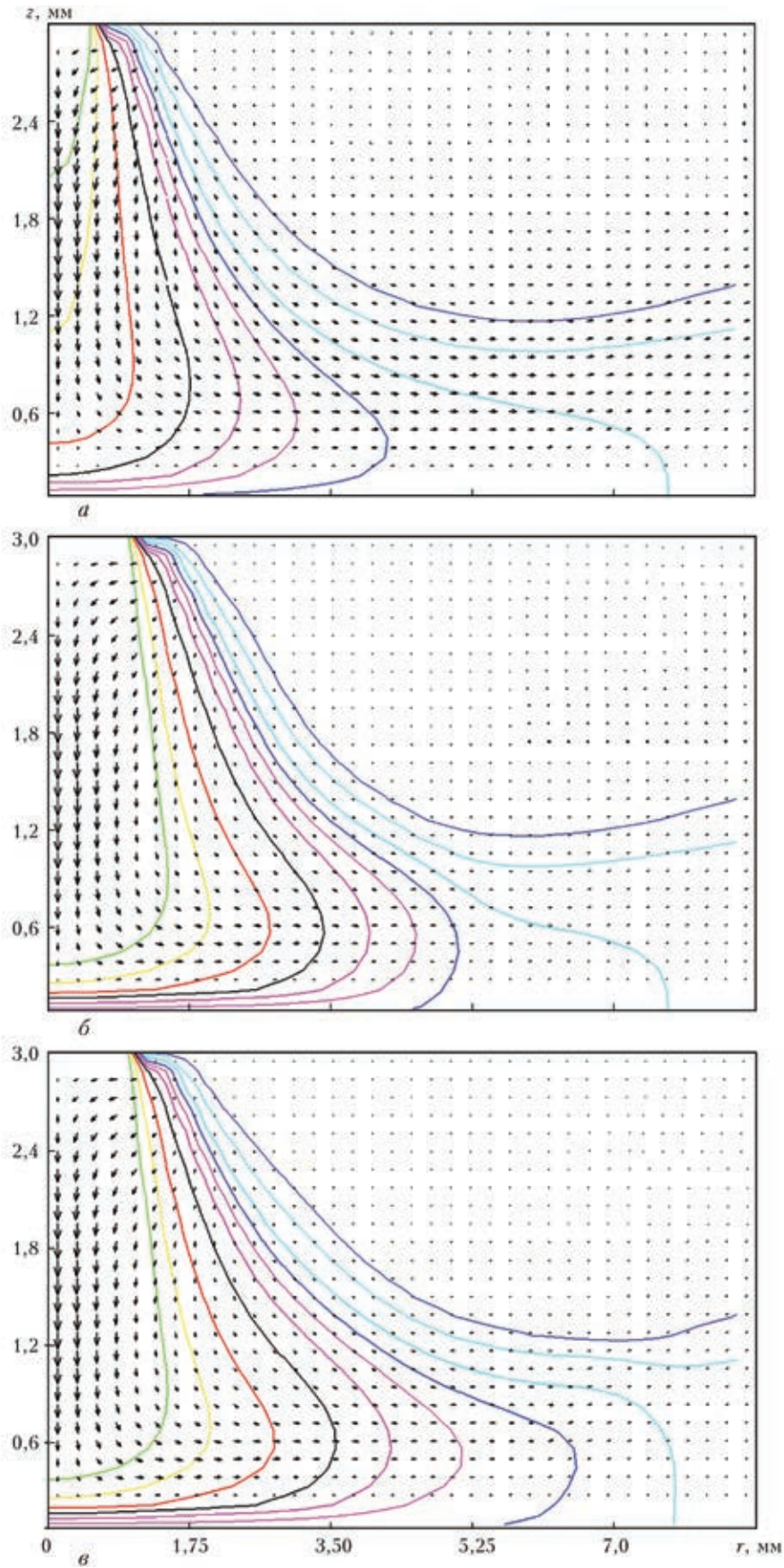


Рис. 3. Динамика полей температуры и скорости плазмы в столбе импульсной дуги при увеличении тока с 50 до 200 А ($b = 5$ мкс): $a - t = 0$ ($V_{\max} = 120,1$ м/с); $б - t = 50$ мкс ($V_{\max} = 328,7$ м/с); $в - t = 100$ мкс ($V_{\max} = 329,2$ м/с)

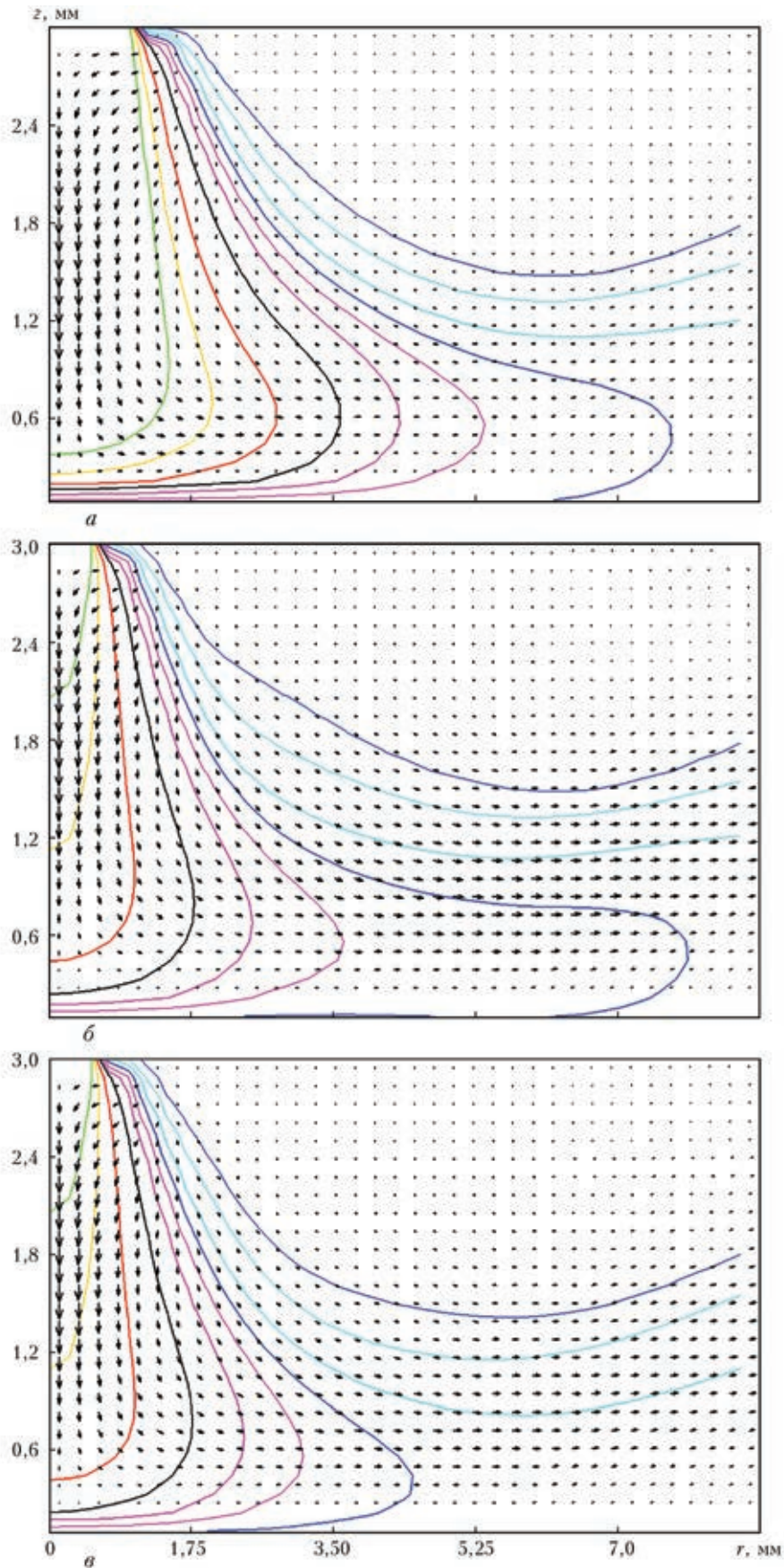


Рис. 4. Динамика полей температуры и скорости плазмы в столбе импульсной дуги при уменьшении тока с 200 до 50 А ($b = 5$ мкс): a — $t = 0$ ($V_{\max} = 329,4$ м/с); $б$ — $t = 60$ мкс ($V_{\max} = 120,0$ м/с); $в$ — $t = 120$ мкс ($V_{\max} = 120,7$ м/с)

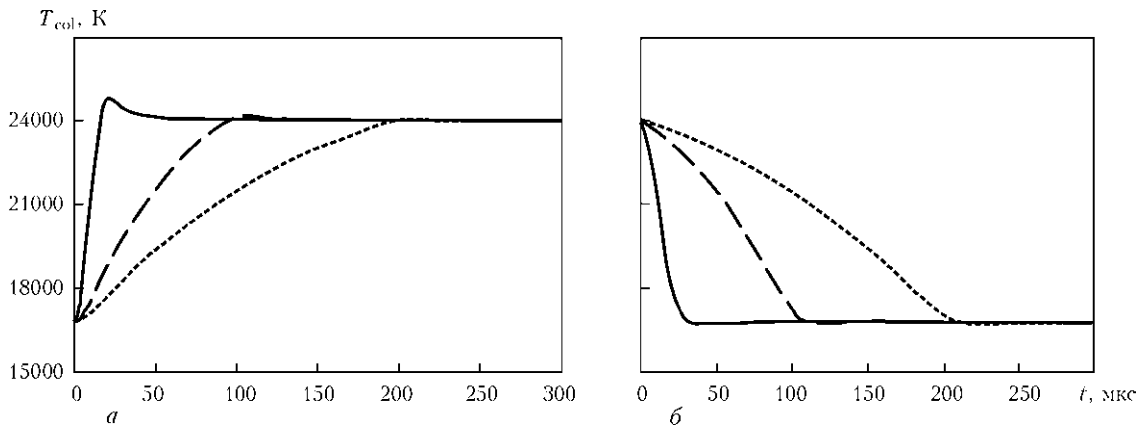


Рис. 5. Изменение температуры плазмы в центре столба дуги на переднем (а) и заднем (б) фронтах импульса тока

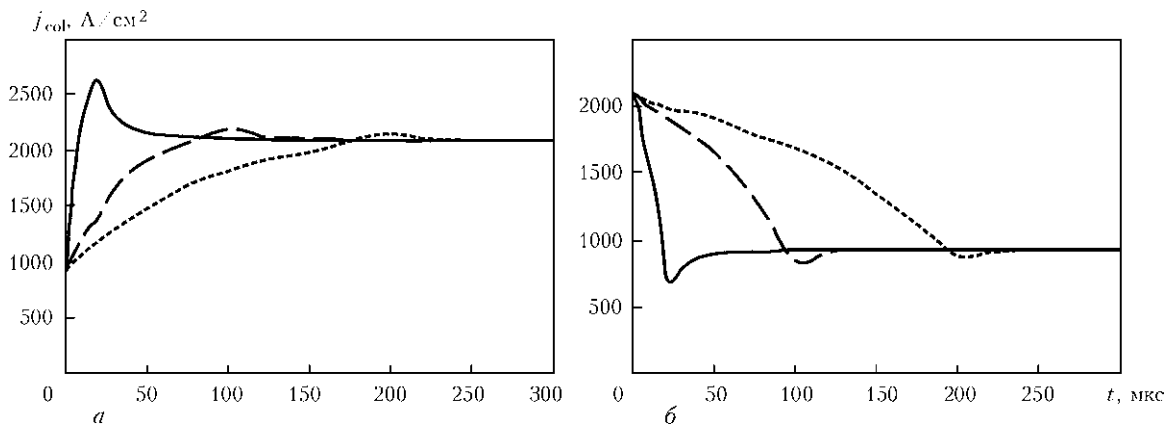


Рис. 6. Изменение плотности электрического тока в центре столба дуги на переднем (а) и заднем (б) фронтах импульса

электропроводности плазмы, определяемой значением ее температуры в этой же точке, на напряженность электрического поля, определяемого распределением температуры (электропроводности) по всему сечению столба, указанная характеристика является несколько более инерционной чем T_{col} . Наблюдающийся на переднем фронте импульса тока при $b = 20$ мкс локальный максимум j_{col} оказывается более заметным (плотность тока в центре столба импульсной дуги в момент, когда ее ток достигает 200 А, почти на 25 % превышает соответствующее значение для стационарной 200-амперной дуги), а последующее снижение величины j_{col} и установление ее стационарного значения происходит за время порядка 50 мкс (см. сплошную кривую на рис. 6, а). При уменьшении скорости нарастания тока в импульсе ($b = 100$; 200 мкс) этот максимум, также как и максимум температуры, становится все менее заметным (см. штриховую и пунктирную кривые на рис. 6, а). В отличие от поведения T_{col} на заднем фронте импульса, плотность электрического тока в столбе дуги при снижении полного тока имеет локальный минимум, абсолютная величина которого снижается при увеличении b (см. рис. 6, б). Отмеченные здесь особенности изменения плотности электрического тока в дуговой плазме во многом харак-

терны и для изменения во времени напряжения на столбе импульсной дуги. В частности, различие во времени переходных процессов в дуге на переднем и на заднем фронтах импульса при малых значениях их длительности является одной из причин возникновения гистерезисной петли на вольт-амперной характеристике импульсной дуги [15, 27].

Наиболее инерционной характеристикой столба дуги является радиус его токопроводящей области, что объясняется необходимой для изменения R_{col} перестройкой температурного поля по всему сечению столба. Характерное время установления стационарного значения данного радиуса после достижения током дуги своего стационарного (максимального) значения в случае $b = 20$ мкс составляет приблизительно 100 мкс (см. сплошную кривую на рис. 7, а). Здесь следует отметить, что характерное время изменения R_{col} при уменьшении тока дуги существенно меньше и составляет при $b = 20$ мкс около 60 мкс (см. сплошную кривую на рис. 7, б). Наконец, время установления стационарного значения радиуса токопроводящей области столба дуги при увеличении b существенно снижается за счет того, что изменение R_{col} частично происходит еще во время

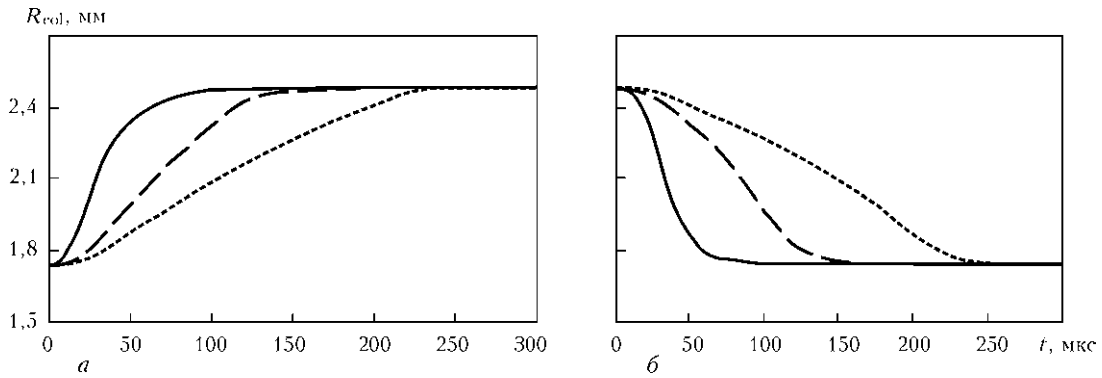


Рис. 7. Изменение радиуса токопроводящей области столба дуги на переднем (а) и заднем (б) фронтах импульса

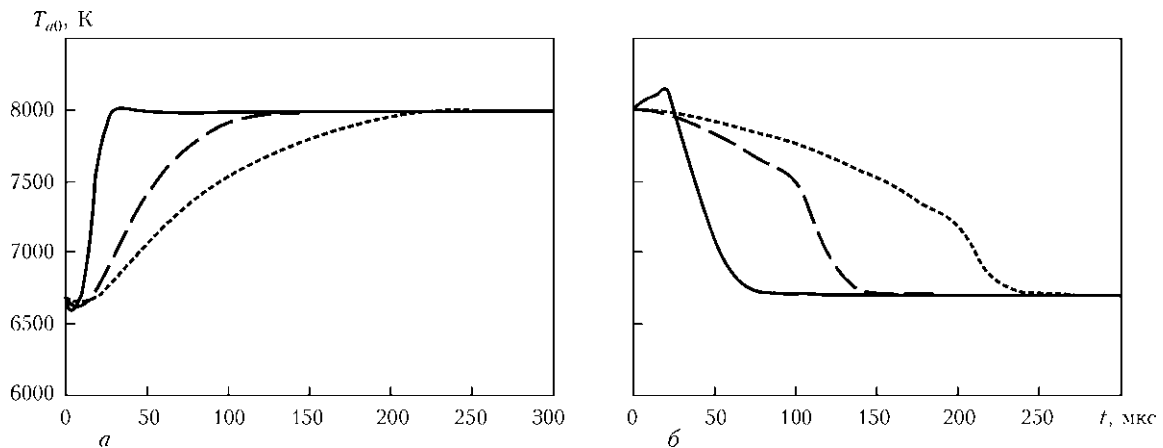


Рис. 8. Изменение осевого значения температуры прианодной плазмы на переднем (а) и заднем (б) фронтах импульса тока

нарастания или спада тока (см. штриховые и пунктирные линии на рис. 7).

Нестационарные процессы, происходящие в анодной области дуги, проиллюстрированы графиками (рис. 8–13) изменения во времени как локальных характеристик анодных процессов: T_{a0} — осевое значение температуры плазмы вблизи поверхности анода (при $z = 3$ мм), j_{a0} и q_{a0} — плотность электрического тока на аноде и плотность теплового потока в анод, определяемые в центре области анодной привязки дуги, так и интегральных характеристик указанных процессов:

P_a — полный тепловой поток в анод; R_a и R_h — радиусы токового канала и области теплового воздействия дуги на поверхности анода (под R_a и R_h понимаются радиусы окружностей на поверхности анода, в пределах которых сосредоточено 95 % текущих значений полного тока дуги $I(t)$ и полного теплового потока в анод $P_a(t)$ соответственно). Сплошные, штриховые и пунктирные кривые на указанных рисунках соответствуют $b = 20, 100$ и 200 мкс.

Закономерности динамического изменения локальных и интегральных характеристик анодной

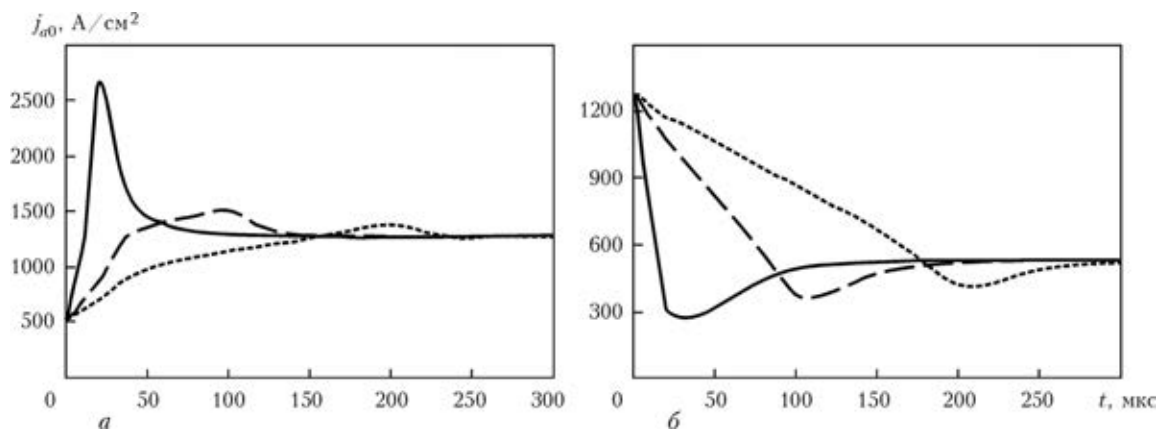


Рис. 9. Изменение осевого значения плотности электрического тока в анодной области на переднем (а) и заднем (б) фронтах импульса

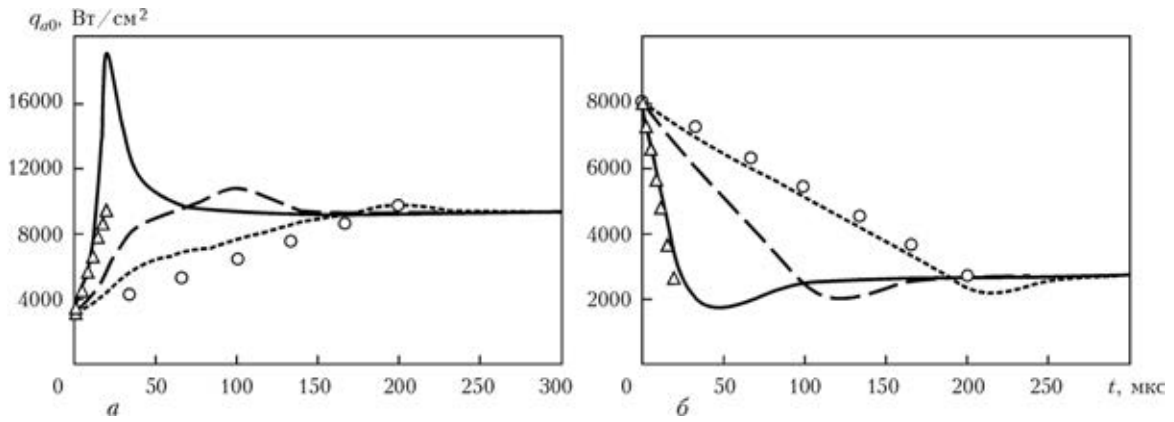


Рис. 10. Изменение осевого значения плотности теплового потока в анод на переднем (а) и заднем (б) фронтах импульса (маркерами показаны значения q_{a0} для стационарной дуги при соответствующих значениях тока: Δ — $b = 20$; \circ = 200 мкс)

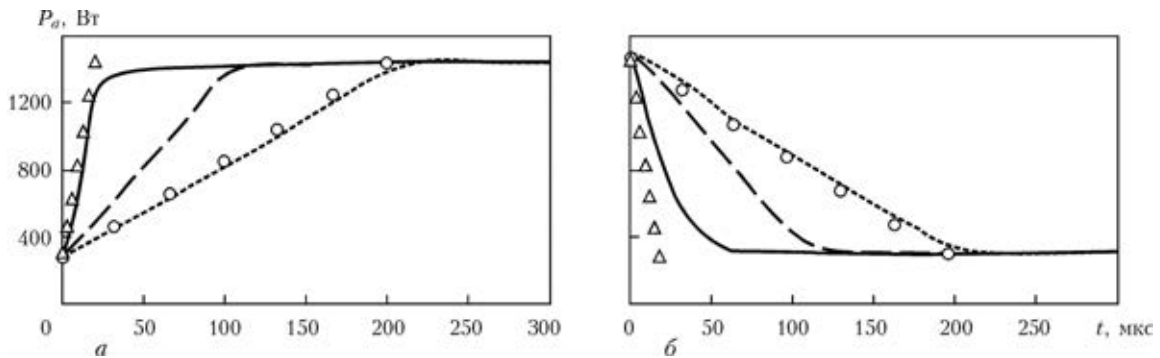


Рис. 11. Изменение полного теплового потока в анод на переднем (а) и заднем (б) фронтах импульса (маркерами показаны значения P_a для стационарной дуги при соответствующих значениях тока: Δ — $b = 20$; \circ = 200 мкс)

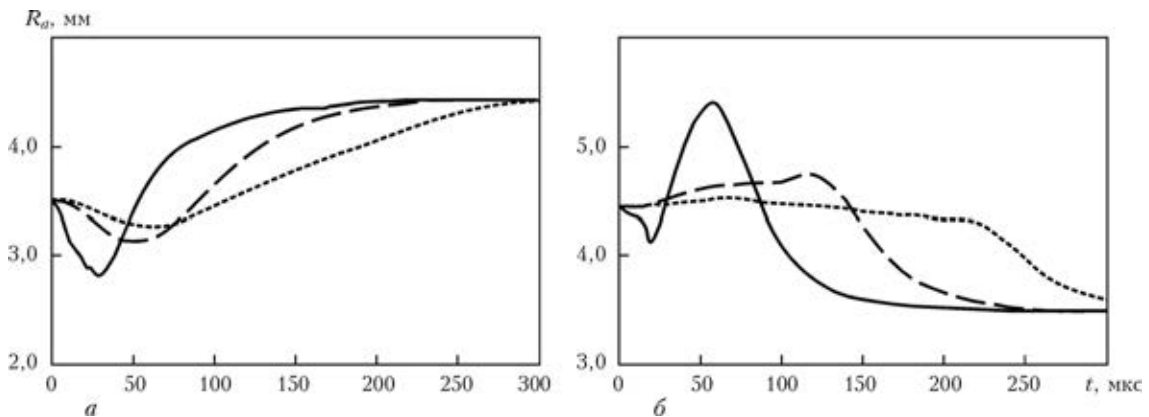


Рис. 12. Изменение радиуса токового канала дуги на аноде на переднем (а) и заднем (б) фронтах импульса

области дуги с тугоплавким катодом и медным водоохлаждаемым анодом при подаче импульса электрического тока не являются тривиальными и требуют детальной физической интерпретации. Так, например, при высокой скорости изменения тока дуги ($b = 20$ мкс), вместо ожидаемого увеличения осевого значения температуры прианодной плазмы на переднем фронте импульса и, соответственно, ее уменьшения на заднем фронте, вначале наблюдается некоторое уменьшение T_{a0} на переднем фронте и более заметное ее увеличение на заднем фронте импульса (см. сплошные кривые на рис. 8). Этот эффект во многом связан с особенностями динамики теплового состояния

и картины течения плазмы в столбе дуги при импульсном изменении тока. Для анализа данного эффекта рассмотрим условие локального теплового баланса анодной области [22]:

$$q_{\chi} + q_j = \Delta \phi j_a + q_a \quad (1)$$

Здесь $q_{\chi} = -\chi \frac{\partial T}{\partial z} |_{z=L}$ — тепловой поток из плазмы столба дуги, где χ — коэффициент теплопроводности дуговой плазмы; $q_j = j_a \frac{k}{e} \left(\frac{5}{2} - \delta \right) T |_{z=L}$ — поток энергии, приносимой в анодную область электронами плазмы стол-

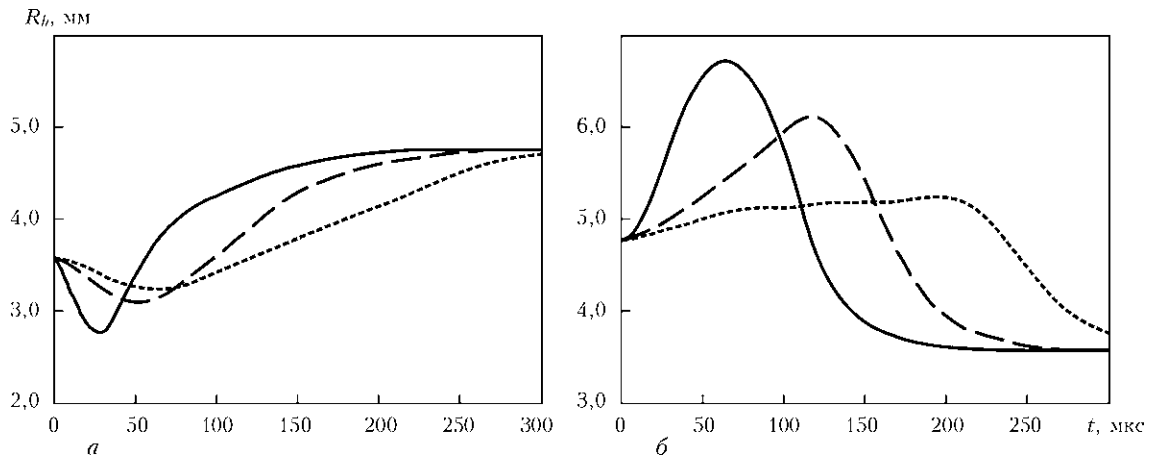


Рис. 13. Изменение радиуса области теплового воздействия дуги на анод на переднем (а) и заднем (б) фронтах импульса

ба, где $j_a = -j_z|_{z=L}$ — плотность электрического тока в прианодной плазме; k — постоянная Больцмана; e — заряд электрона; δ — постоянная термодиффузии электронов; $\Delta\varphi j_a$ — затраты энергии на поддержание анодного слоя, а величины $\Delta\varphi$ и q_a определяются на основе модели анодных процессов [17] в зависимости от температуры прианодной плазмы $T_a = T|_{z=L}$, температуры поверхности анода T_s и плотности тока в анодной области j_a .

Как уже было отмечено, наиболее инерционными процессами в столбе дуги являются газодинамические процессы. В начале заднего фронта импульса тока максимальная скорость движения плазмы на оси столба дуги составляет почти 330 м/с (см. рис. 4). Несмотря на быстрое уменьшение тока при $b = 20$ мкс и соответствующее снижение объемной плотности электромагнитной силы, плазма, двигаясь по инерции, продолжает в течение определенного времени транспортировать конвективными потоками тепловую энергию из столба дуги в сторону анода, обеспечивая тем самым высокие значения q_χ . В то же время при снижении плотности тока в анодной области (см. сплошную кривую на рис. 9, б) уменьшается плотность теплового потока за счет переноса энергии заряженными частицами, т. е. величина q_j . Слагаемые в правой части баланса энергии (1) также уменьшаются при снижении полного тока дуги ввиду уменьшения плотности тока и плотности теплового потока на аноде (см. сплошные кривые на рис. 9, б, 10, б). При такой тенденции изменения составляющих теплового баланса доминирующую роль в начальный период изменения тока играет тепловой поток за счет теплопроводности, что и приводит к локальному повышению T_{a0} . Впоследствии, когда интенсивность газодинамических потоков падает, температура прианодной плазмы в центре области анодной привязки дуги начинает монотонно убывать до значений, соот-

ветствующих стационарной дуге при токе 50 А (характерное значение времени релаксации на заднем фронте импульса составляет величину порядка 50 мкс). На переднем фронте импульса наблюдается обратная картина, при этом характерное время релаксации температуры оказывается существенно меньше и составляет величину порядка 20 мкс. Описанный эффект не наблюдается при $b \geq 100$ мкс (см. штриховые и пунктирные кривые на рис. 8), поскольку при таких длительностях фронтов импульса картина движения плазмы столба дуги успевает перестраиваться в ходе изменения тока.

В наибольшей степени эффекты нестационарности проявляются в динамике изменения во времени плотности электрического тока и плотности теплового потока на аноде в центре области анодной привязки дуги (см. рис. 9, 10). Основной особенностью этих зависимостей является их немонотонный характер с образованием локальных максимумов (на переднем фронте импульса) и минимумов (на заднем фронте), которые достигаются к моменту времени, соответствующему завершению возрастания или снижения тока дуги. В частности, при высокой скорости увеличения полного тока с 50 до 200 А ($b = 20$ мкс) максимальная плотность тока в осевой зоне анодной области более чем вдвое превосходит соответствующее значение для стационарной дуги при $I = 200$ А, а характерное время релаксации j_{a0} составляет около 80 мкс (см. сплошную кривую на рис. 9, а). На заднем фронте в точке минимума осевое значение плотности тока на аноде оказывается почти в полтора раза ниже, чем для стационарной 50-амперной дуги при несколько большем времени релаксации, составляющем величину порядка 100 мкс (см. сплошную кривую на рис. 9, б).

Рассмотрим причину такого экстремального изменения плотности тока на переднем фронте импульса при $b = 20$ мкс, когда этот эффект про-



является в наибольшей степени. Примем во внимание, что в данном случае скорость изменения тока дуги существенно превышает скорости релаксации газодинамических и тепловых процессов в дуговой плазме. Более того, как показывают расчеты, радиус токопроводящей области на аноде при увеличении полного тока вначале заметно снижается и только потом начинает возрастать, выходя на свое стационарное, соответствующее 200-амперной дуге, значение за время порядка 100 мкс (см. сплошную кривую на рис. 12, а). Все это приводит к тому, что при нарастающем токе дуги его плотность в центре области анодной привязки вначале резко возрастает, а затем плавно снижается, как показано на рис. 9, а.

На заднем фронте импульса тока при $b = 20$ мкс радиус токопроводящей области на аноде ведет себя еще более нетривиально, а именно: величина R_a в процессе уменьшения тока дуги несколько снижается, затем возрастает и только потом опять снижается до значений, характерных для стационарной дуги при токе 50 А (см. сплошную кривую на рис. 12, б). Результатом такого поведения радиуса токопроводящей области на аноде является тот факт, что минимум j_{a0} оказывается менее выраженным (см. сплошную кривую на рис. 9, б). Экстремальный характер изменения $j_{a0}(t)$ проявляется, хотя и в меньшей степени, и при более низких скоростях изменения тока, т. е. при $b = 100; 200$ мкс (см. штриховые и пунктирные кривые на рис. 9).

Поскольку плотность теплового потока в анод при прочих равных условиях практически пропорциональна плотности тока на аноде, динамика изменения q_{a0} в целом аналогична динамике изменения осевого значения плотности электрического тока в анодной области (ср. рис. 9, 10). Приведенные на рис. 10 осевые значения плотности теплового потока в анод для стационарной дуги при соответствующих значениях полного тока свидетельствуют о том, что в случае $b = 20$ мкс локальные характеристики анодной области дуги являются существенно нестационарными, тогда как в случае $b = 200$ мкс изменение указанных характеристик при изменении тока практически происходит в квазистационарном режиме, т. е. горение импульсной дуги при $b = 200$ мкс представляет собой последовательную смену состояний стационарной дуги, горящей при соответствующих значениях тока. Таким образом, в качестве характерного значения времени изменения тока импульсной дуги (длительности переднего и заднего фронтов импульсов), разделяющего нестационарный и квазистационарный режимы ее горения с точки зрения локальных характеристик электрического и теплового воздействия на анод можно выбрать величину порядка 100 мкс. Здесь следует отметить, что отмеченный экстремальный

характер изменения локальных электрических и тепловых характеристик анодной области импульсной дуги с тугоплавким катодом может приводить к важному технологическому результату импульсно-дуговой сварки неплавящимся электродом — существенному увеличению проплавляющей способности дуги за счет контракции ее электрического и теплового воздействия на поверхность сварочной ванны и обусловленной этим интенсификации процессов теплопереноса в ее объеме.

Характеристикой анодной области дуги, наименее чувствительной к скорости изменения электрического тока, является такая ее интегральная характеристика, как полная тепловая мощность, вкладываемая в анод (см. рис. 11). Несмотря на то, что при малых значениях b удельный тепловой поток в анод является существенно нестационарным (ср. сплошные кривые и соответствующие маркеры на рис. 10), величина P_a изменяется почти квазистационарно (ср. сплошные кривые и соответствующие маркеры на рис. 11). При больших значениях длительности фронтов импульсов ($b = 200$ мкс) значения мощности, вводимой в анод стационарной дугой при соответствующих значениях тока практически совпадают со значениями, определяемыми зависимостью $P_a(t)$ для импульсной дуги (ср. пунктирные кривые и соответствующие маркеры на рис. 11).

Результаты численного моделирования динамических характеристик импульсной дуги с тугоплавким катодом и медным водоохлаждаемым анодом свидетельствуют о том, что в исследуемом диапазоне длительностей фронтов импульсов тока дуги характерные времена изменения теплового состояния дуговой плазмы могут составлять $10^{-5} \dots 10^{-4}$ с. Поскольку эти значения соизмеримы с характерными временами процессов ионизации-рекомбинации в аргоновой плазме атмосферного давления [28], необходимо оценить правомерность использования модели ионизационно-равновесной плазмы и рассчитанных на ее основе температурных зависимостей термодинамических характеристик, коэффициентов переноса и радиационных потерь такой плазмы. С этой целью введем параметр $\gamma = |\alpha - \alpha_e| / \alpha_e$, характеризующий ионизационную неравновесность плазмы столба дуги, где α — степень ионизации плазмы, вычисляемая с учетом конечных скоростей процессов ионизации-рекомбинации, α_e — ее равновесное значение, вычисляемое с использованием уравнений Саха. На рис. 14 показаны изменения во времени параметра γ для плазмы столба импульсной дуги при изменении T_{col} согласно зависимостям, представленным на рис. 5, а. Как следует из приведенных на рис. 14 расчетных данных, степень ионизационной неравновесности плазмы столба дуги в рас-

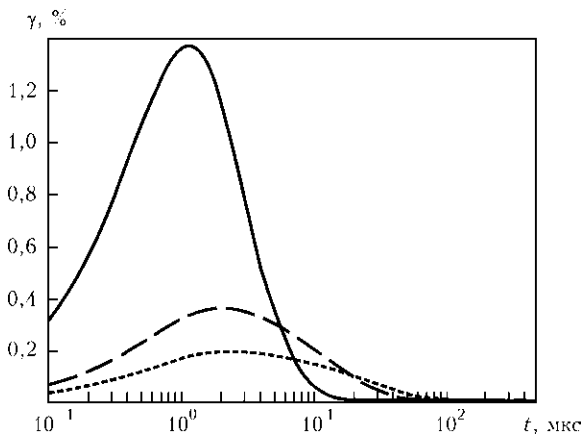


Рис. 14. Изменение степени ионизационной неравновесности дуговой плазмы в центре столба дуги на переднем фронте импульса тока при $b = 20, 100$ и 200 мкс (сплошная, штриховая и пунктирная кривые соответственно)

смаатриваемых условиях не превышает 1,5 %, что позволяет считать использование модели ионизационно-равновесной плазмы вполне оправданным.

В целом, рассмотренные в настоящей работе закономерности динамического поведения локальных и интегральных характеристик столба и анодной области импульсной дуги с вольфрамовым катодом и медным водоохлаждаемым анодом позволяют сделать следующие выводы.

1. Горение дуги с тугоплавким катодом в импульсно-периодическом режиме сопровождается существенным изменением электромагнитных, тепловых и газодинамических характеристик дуговой плазмы, а также характеристик ее электрического и теплового воздействия на поверхность анода. Динамическое поведение указанных характеристик во многом зависит от скорости изменения тока дуги на фронтах импульсов и различается для переднего и заднего фронтов. Наиболее инерционным звеном в процессе перестройки электромагнитных полей, теплового состояния и картины течения дуговой плазмы при изменении тока дуги являются газодинамические процессы.

2. При высокой крутизне фронтов импульсов (скорость изменения тока более $5 \cdot 10^6$ А/с) изменение характеристик столба и анодной области импульсной дуги происходит в две стадии: стадия изменения тока дуги и стадия переходных процессов. При возрастании (снижении) тока плотность теплового потока и плотность тока на аноде могут быть в 2 раза больше (в 1,5 раза меньше) соответствующих значений для дуги постоянного тока, равного току дуги в импульсе (в паузе). На стадии переходных процессов происходит релаксация теплового и газодинамического состояния дуговой плазмы к значениям, характерным для стационарной дуги при соответствующих зна-

чении тока. Длительности процессов релаксации зависят от значения базового тока и тока в импульсе и могут существенно различаться для локальных и интегральных характеристик плазмы столба и анодной области дуги.

3. При изменении тока на фронтах импульса со скоростью, меньшей 10^6 А/с (длительность фронтов более 100 мкс), процессы, связанные с изменением тока и процессы релаксации происходят одновременно, вследствие чего нестационарный процесс горения импульсной дуги реализуется в виде последовательной смены состояний, характерных для стационарной дуги при соответствующих значениях тока (квазистационарный режим).

- Hsu K.C., Etemadi K., Pfender E. Study of the free-burning high-intensity argon arc // J. of Appl. Phys. — 1983. — **54**, № 3. — P. 1293–1301.
- Hsu K. C., Pfender E. Two-temperature modeling of the free-burning high-intensity arc // Ibid. — 1983. — **54**, № 8. — P. 4359–4366.
- Низкотемпературная плазма / В. С. Энгельшт, В. П. Гурович, Г. А. Десятков и др. — Новосибирск: Наука, 1990. — Т. 1. Теория столба электрической дуги. — 376 с.
- Prediction of anode temperatures of free burning arcs / P. Zhu, J. J. Lowke, R. Morrow et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. — 1995. — **28**. — P. 1369–1376.
- Jenista J., Heberlein J. V. R., Pfender E. Numerical model of the anode region of high-current electric arcs // IEEE Trans. on Plasma Science. — 1997. — **25**, № 5. — P. 883–890.
- Lowke J. J., Morrow R., Haidar J. A simplified unified theory of arcs and their electrodes // J. Phys. D: Appl. Phys. — 1997. — **30**. — P. 2033–2042.
- Haidar J. Non-equilibrium modeling of transferred arcs // Ibid. — 1999. — **32**. — P. 263–272.
- Sansonnets L., Haidar J., Lowke J. J. Prediction of properties of free burning arcs including effects of ambipolar diffusion // Ibid. — 2000. — **33**. — P. 148–157.
- Computational simulation of arc melting process with complex interactions / H. Nishiyama, T. Sawada, H. Takana et al. // ISIJ International. — 2006. — **46**, № 5. — P. 705–711.
- Li He-Ping, Benilov M.S. Effect of a near-cathode sheath on heat transfer in high-pressure arc plasmas // J. Phys. D: Appl. Phys. — 2007. — **40**. — P. 2010–2017.
- Metal vapour behaviour in gas tungsten arc thermal plasma during welding / M. Tanaka, K. Yamamoto, S. Tashiro et al. // Welding in the World. — 2008. — **52**, № 11/12. — P. 82–88.
- Kim W.-H., Na S.-J. Heat and fluid flow in pulsed current GTA weld pool // Int. J. of Heat and Mass Transfer. — 1998. — **41**, Issue 21. — P. 3213–3227.
- Wu C. S., Zheng W., Wu L. Modelling the transient behaviour of pulsed current tungsten-inert-gas weld pools // Modelling Simul. Mater. Sci. Eng. — 1999. — **7**, № 1. — P. 15–23.
- Traidia A., Roger F., Guyot E. Optimal parameters for pulsed gas tungsten arc welding in partially and fully penetrated weld pools // Int. J. of Thermal Sciences. — 2012. — **49**, Issue 7. — P. 1197–1208.
- Kolasa A., Matsunawa A., Arata Y. Dynamic characteristics of variable frequency pulsed TIG arc // Transaction of JWRI. — 1986. — **15**, № 2. — P. 173–177.
- Traidia A., Roger F. Numerical and experimental study of arc and weld pool behaviour for pulsed current GTA welding // Int. J. of Heat and Mass Transfer. — 2011. — **54**, Issues 9–10. — P. 2163–2179.
- Кривцун И. В., Демченко В. Ф., Крикент И. В. Модель процессов тепло-, массо- и электропереноса в анодной



- области и столбе сварочной дуги с тугоплавким катодом // Автомат. сварка. — 2010. — № 6. — С. 3–11.
18. *Мойжес Б. Я., Немчинский В. А.* К теории дуги высокого давления на тугоплавком катоде // Ж. техн. физики. — 1972. — **42**, № 5. — С. 1001–1009.
 19. *Мойжес Б. Я., Немчинский В. А.* К теории дуги высокого давления на тугоплавком катоде. II // Там же. — 1973. — **43**, № 11. — С. 2309–2317.
 20. *Приэлектродные процессы в дуговых разрядах / М. Ф. Жуков, Н. П. Козлов, А. В. Пустогаров и др.* — Новосибирск: Наука, 1982. — 157 с.
 21. *Investigation of cathode spot behaviour of atmospheric argon arcs by mathematical modeling / J. Wendelstorf, G. Simon, I. Decker et al.* // Proc. Of the 12th Intern. conf. on Gas Discharges and their Applications, Germany, Greifswald, 1997. — Vol. 1. — P. 62–65.
 22. *Крикент И. В., Кривцун И. В., Демченко В. Ф.* Моделирование процессов тепло-, массо- и электропереноса в столбе и анодной области дуги с тугоплавким катодом // Автомат. сварка. — 2012. — № 3. — С. 7–11.
 23. *Boulos M. I., Fauchais P., Pfender E.* Thermal plasmas: Fundamentals and applications. — New York and London: Plenum Press, 1997. — Vol. 1. — 454 p.
 24. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Теоретическая физика. — М.: Наука, 1982. — Т. VIII. Электродинамика сплошных сред. — 620 с.
 25. *Ляшко И. И., Демченко В. Ф., Вакуленко С. А.* Вариант метода расщепления уравнений динамики вязкой несжимаемой жидкости на лагранжево-эйлеровых сетках // Доклады АН УССР. Сер. А. — 1981. — С. 43–47.
 26. *Демченко В. Ф., Лесной А. Б.* Лагранжево-эйлеровый метод численного решения многомерных задач конвективной диффузии // Доповіді НАНУ. — 2000. — № 11. — С. 71–75.
 27. *Трофимов Н. М., Синицкий Р. В.* Динамические характеристики импульсной дуги при сварке в аргоне // Свароч. пр-во. — 1967. — № 8. — С. 17–19.
 28. *Almeida R. M. S., Benilov M. S., Naidis G. V.* Simulation of the layer of non-equilibrium ionization in a high-pressure argon plasma with multiply-charged ions // J. of Physics D: Applied Physics. — 2000. — **33**, Issue 8. — С. 960–967.

Поступила в редакцию 18.06.2013

XII МЕЖДУНАРОДНАЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА-КОНФЕРЕНЦИЯ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ

СВАРКА

26–28 ноября 2013

Екатеринбург, РФ, ЭКСПО

Основные направления выставки:

- Оборудование и технологии для дуговой сварки металлов
- Оборудование и технологии для наплавки и напыления
- Оборудование и технологии для плазменной, газопламенной сварки и резки
- Оборудование и технологии для сварки пластмасс
- Оборудование и технологии для производства сварочных электродов и проволок
- Вспомогательное сварочное оборудование
- Сварка в стройиндустрии
- Спецодежда, средства индивидуальной защиты
- Материалы для сварки, наплавки, напыления, резки
- Средства и методы защиты от вредных производственных факторов сварочном производстве
- Инструменты для сварки и механической обработки
- Промышленная вентиляция
- Методы обучения и повышения квалификации персонала

Организатор: Уральские выставки (Выставочное общество)

Контакты: Менеджер выставки: Рушенцева Галина
т./ф. +7(343) 385-35-35
E-mail: ruchentseva@uv66.ru