



УДК 621.791.76.03:621.315

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРИ КОНТАКТНОЙ СТЫКОВОЙ СВАРКЕ НЕПРЕРЫВНЫМ ОПЛАВЛЕНИЕМ ТОЛСТОСТЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ НА ПОСТОЯННОМ И ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ

С.И. КУЧУК-ЯЦЕНКО, П.М. РУДЕНКО, В.С. ГАВРИШ, К.В. ГУЩИН

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

В последние годы широко применяются источники постоянного тока в оборудовании для контактной стыковой сварки. Вместе с тем имеется положительный опыт применения переменного тока в таком оборудовании. Цель настоящей работы заключалась в сравнительной оценке энергетических и технологических показателей процессов сварки при использовании двух источников питания. Контактную стыковую сварку непрерывным оплавлением пластин толщиной 25 мм из низколегированной стали выполнили с использованием источников питания переменного и постоянного тока. Рассмотрено влияние высокочастотных пульсаций напряжения при сварке на постоянном токе на реактивность сварочного контура, проводимость диодов выпрямителя и устойчивость процесса оплавления. Объяснено явление перенапряжений в результате переходных процессов в сварочном контуре при оплавлении. Показано, что при одинаковом нагреве образцов расход электроэнергии при сварке на постоянном токе на 15 % выше, чем на переменном. При этом макрорельеф поверхности оплавления при сварке на постоянном токе качественно лучше, чем на переменном. Библиогр. 4, табл. 1, рис. 10.

Ключевые слова: контактная стыковая сварка, непрерывное оплавление, постоянный ток, переменный ток, энергетические параметры, высокочастотные пульсации, технологические показатели

В последнее десятилетие значительно расширилось применение оборудования для контактной сварки с использованием источников постоянного тока. Этому способствовали новые разработки мощных выпрямителей, обеспечивающих токи в сварочной цепи машин до 100 кА и более. Большая часть этого оборудования предназначена для сварки сопротивлением (точечной, рельефной). Применение постоянного тока в данном случае обеспечивает равномерную загрузку трех фаз сети, а в некоторых случаях дает технологические преимущества, в частности, более равномерное распределение тока в зоне нагрева свариваемых деталей и увеличение полезной мощности, генерируемой в зоне сварки.

Эти преимущества весьма важны также при контактной стыковой сварке, особенно деталей с большими поперечными сечениями и толщинами стенок, когда потребляется значительная мощность, исчисляемая сотнями киловольт-ампер. В промышленности успешно используются машины для контактной стыковой сварки мощностью 400...500 кВ·А, обеспечивающие токи в сварочной цепи до 80 кА [1]. Однако область их применения в основном ограничивается сваркой рельсов. При этом в качестве базовой технологии используется сварка с прерывистым подогре-

вом сопротивлением и последующим кратковременным оплавлением, на которое приходится не более 10...15 % общего энергозатрата. В данном случае применение постоянного тока, кроме трехфазной загрузки сети при неизменной установленной мощности 400...500 кВ·А, позволяет значительно сократить длительность сварки за счет увеличения плотности тока при подогреве сопротивлением.

В ИЭС им. Е.О. Патона разработаны технологии сварки непрерывным оплавлением без подогрева сопротивлением деталей из разных сталей и сплавов с большими поперечными сечениями до 100 тыс. мм² и толщиной стенки до 100...150 мм, которые успешно внедрены в промышленность (сварка труб нефтегазового сортамента диаметром 50...1420 мм с толщиной стенки 5...30 мм, рельсов, металлургического проката). При сварке деталей с большими поперечными сечениями задача повышения энергетических показателей при непрерывном оплавлении также весьма актуальна, особенно в части изыскания возможностей снижения сопротивления вторичного контура $Z_{к.з}$. Все разработанные технологии сварки деталей с большими поперечными сечениями непрерывным оплавлением [2] базируются на использовании оборудования с низким сопротивлением $Z_{к.з}$, ко-

© С.И. Кучук-Яценко, П.М. Руденко, В.С. Гавриш, К.В. Гущин, 2015



Сравнение энергетических показателей при сварке непрерывным оплавлением стальных пластин сечением 25×50 мм с использованием источников питания постоянного и переменного тока

Источник питания	U_{2r} , В (хх/сварка)	I_2 , кА	Q_1 , кВт·с	Q_B , кВт·с	Q_r , кВт·с	КПД
DC	6,7/4,7	$\frac{2,0...2,6}{2,3}$	$\frac{1310...1509}{1414}$	$\frac{1060...1241}{1148}$	$\frac{929...1073}{1015}$	$\frac{0,7...0,74}{0,7}$
AC	6,8	$\frac{1,6...2,1}{1,8}$	$\frac{1052...1320}{1188}$	-	$\frac{878...1054}{971}$	$\frac{0,77...0,84}{0,8}$

Примечание. U_{2r} — вторичное напряжение на губках (зажимах) сварочной машины (свариваемых деталях); I_2 — измеренный средний ток во вторичной цепи для постоянного тока и эффективный для переменного тока; Q_1 — активная энергия в первичной цепи сварочного трансформатора; Q_r — активная энергия на губках сварочной машины (свариваемых деталях); КПД = Q_r/Q_1 — коэффициент полезного действия.

торое обеспечивает возбуждение оплавления при низких напряжениях и удельных установленных мощностях.

Цель настоящей статьи — сравнительная оценка энергетических и технологических показателей при сварке непрерывным оплавлением деталей из низколегированных сталей на постоянном (выпрямленном) (DC) и переменном (AC) токе. В качестве базовой технологии выбрана технология сварки непрерывным оплавлением кольцевых швов труб современных трубопроводов, для которых используют толстостенные трубы диаметром 1220...1420 мм, толщиной 25 мм из сталей класса прочности X70–X80. Типовая программа изменения основных параметров при контактной сварке таких труб приведена на рис. 1. Многолетний опыт разработок технологий сварки труб показывает, что удельные энергетические показатели остаются идентичными как при оплавлении по всей площади сечения трубы, так и на отдельных секторах, вырезанных по периметру трубы. Поэтому сварку образцов сечением 25×50 мм, вырезанных из трубы, с использованием источника постоянного и переменного тока выполняли на следующих режимах:

напряжение холостого хода, В	6,8
начальная скорость оплавления, мм/с	0,2
скорость в конце оплавления, мм/с	1,2
припуск на оплавление, мм	24
припуск на осадку, мм	10
скорость осадки, мм/с, не менее	50

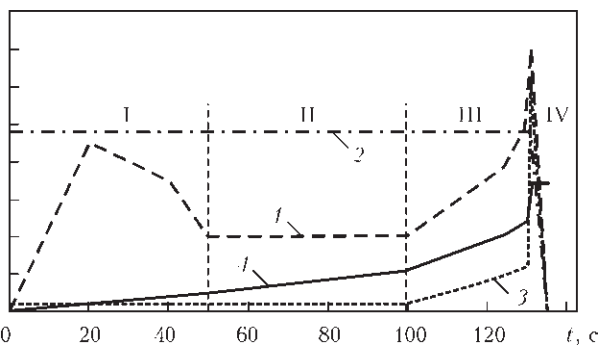


Рис. 1. Типовая программа изменения основных параметров при сварке труб с толщиной стенки 25 мм: I — сплавление скосов кромок (возбуждение оплавления); II — нагрев; III — ускоренное оплавление; IV — осадка; 1 — ток; 2 — напряжение; 3 — скорость; 4 — перемещение (для DC и AC циклограммы идентичны)

Торцы образцов, как и при сварке натуральных труб, имели скос кромок для обеспечения возбуждения оплавления. При этом в отличие от сварки труб изменение скорости оплавления $v_{опл}$ для выявления периодов возможного неустойчивого оплавления задавалось жестко по программе без ее автоматической корректировки.

В основу принятой методики проведения экспериментов положена идентичность технологии, оборудования и сопутствующих процессов при сварке партий образцов на переменном и постоянном токе. Сварку в обоих случаях выполняли на универсальной машине K724 конструкции ИЭС им. Е.О. Патона с трансформатором мощностью 150 кВ·А. После сварки на ней партии образцов при частоте 50 Гц сварочный трансформатор снимали и к сварочному контуру подключали трехфазный выпрямитель фирмы «RoMan» мощностью 180 кВ·А. Полное сопротивление машины после ее переоборудования выпрямителем сохранилось $Z_{к.з} = 240$ мкОм (измеренное на частоте 50 Гц), активное сопротивление 96 мкОм.

При оплавлении образцов осуществлялся контроль температуры в зоне термического влияния.

Все сварные образцы испытывали в соответствии с международным стандартом API. Параметры процесса сварки регистрировали и рассчитывали с помощью компьютерной системы и программного обеспечения, разработанных авторами статьи. Частота опроса каждого канала измерения тока и напряжения была 10 кГц. Результаты экспериментов приведены в таблице.

В обоих случаях средний расход энергии Q_r , используемой на нагрев, не превышает 5 %, что свидетельствует о высокой стабильности процессов нагрева металла. Интенсивность источников нагрева также отличается стабильностью, что подтверждается измерениями температурных полей при сварке образцов контрольных партий (рис. 2). При сварке на постоянном токе измеряли температуру обеих свариваемых заготовок. Температурные поля зоны нагрева деталей, являющихся катодом и анодом при оплавлении, незначительно отличались, что может быть обусловлено дополнительным влиянием дуговых разрядов, возникающих



ющих после разрушения (взрыва) локальных контактов. Однако эти различия из-за их небольшого значения не могут существенно влиять на качество сварки.

Общий расход энергии Q_1 , потребляемой при сварке из сети, на 15 % выше при оплавлении на постоянном токе, а КПД соответственно ниже, чем при оплавлении на переменном токе. Относительно низкий КПД на постоянном токе обусловлен достаточно высоким сопротивлением диодов в сварочной цепи, что приводит к дополнительным потерям энергии.

Следует отметить, что использование выпрямителей большой мощности для контактной сварки оплавлением экономически не столь рационально, как при сварке сопротивлением. На рис. 3 приведена типовая характеристика современного выпрямителя для контактной сварки. Допускаемое значение тока существенно зависит от относительной продолжительности включения (ПВ) и длительности сварочного тока t . Такие выпрямители наиболее экономично использовать при жестко ограниченной ПВ, исчисляемой не более 10...15 %. При ПВ равной 20 % допустимые токи снижаются в 1,7...2,0 раза. Приблизительно в таком режиме работает большинство машин для точечной и рельефной сварки. При их использовании для сварки сопротивлением, когда ПВ достигает 30...50 %, допустимые токи снижаются в 2,2...2,8 раза. Соответственно приходится увеличивать мощность выпрямителей и создавать для них системы охлаждения, что усложняет оборудование и увеличивает энергетические потери.

В соответствии с методикой работ предполагалось после сварки двух партий образцов на базовом режиме выполнить отдельную сварку на постоянном токе при более низком напряжении $U_{2x.x} = 6,5$ В для выявления влияния сопротивления $Z_{к.з}$ при сварке на постоянном токе. Однако при снижении напряжения менее 6,8 В не удалось получить устойчивый процесс оплавления, в результате замыкания торцов оплавление пре-

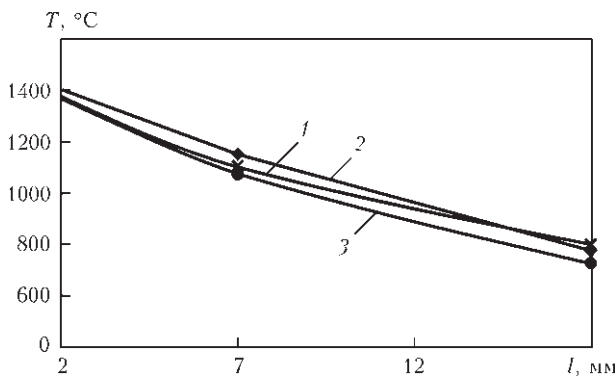


Рис. 2. Распределение температуры в зоне сварки при оплавлении перед осадкой: 1 — нагрев переменным током; 2, 3 — нагрев выпрямленным током анод и катод соответственно

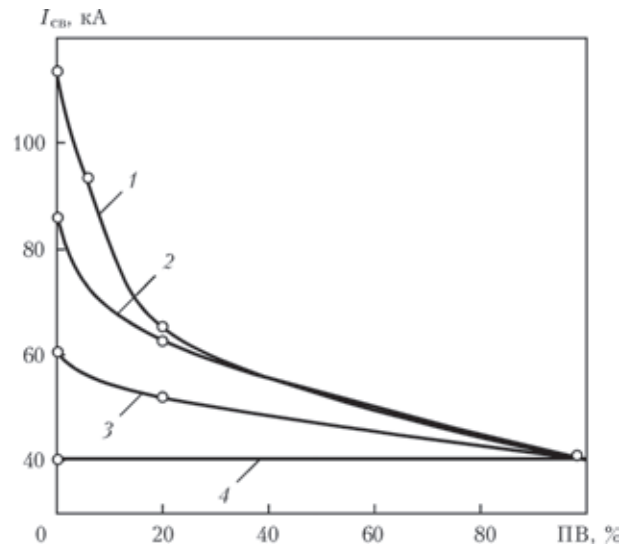


Рис. 3. Зависимость тока нагрузки от продолжительности включения при $t = 0,06$ (1); 0,1 (2); 1,0 (3) и более 2 с (4)

кращалось. Зависимости, характеризующие изменение напряжения на зажимах токоподводящих башмаков и полезной мощности, которая выделяется в контакте между деталями [3], приведены на рис. 4. Из их сравнения видно, что максимальная полезная мощность, генерируемая в контакте, в обоих случаях примерно одинакова, а падения напряжения при нагрузках близких 15 кА также имеют близкие значения. Поэтому пределы возможного допускаемого увеличения проводимости близки. Резерв повышения устойчивости процесса оплавления на постоянном токе исчерпывается падением напряжения на 2 В еще в начальный период увеличения тока нагрузки. Фактически процесс оплавления протекает при более низком падении напряжения на искровом зазоре, чем на

U , В; $P \cdot 10$, кВт

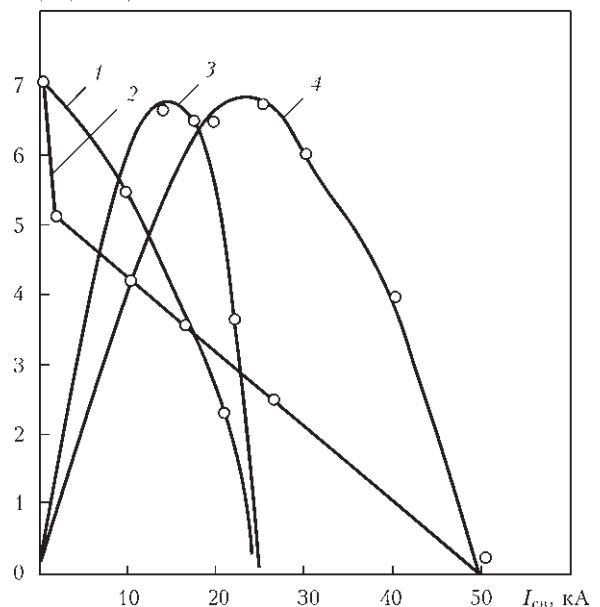


Рис. 4. Зависимости напряжения (1, 2) и мощности (3, 4) от тока в сварочной цепи соответственно на переменном (1, 3) и постоянном (2, 4) токе ($U_{x.x} = 7,0$ В)

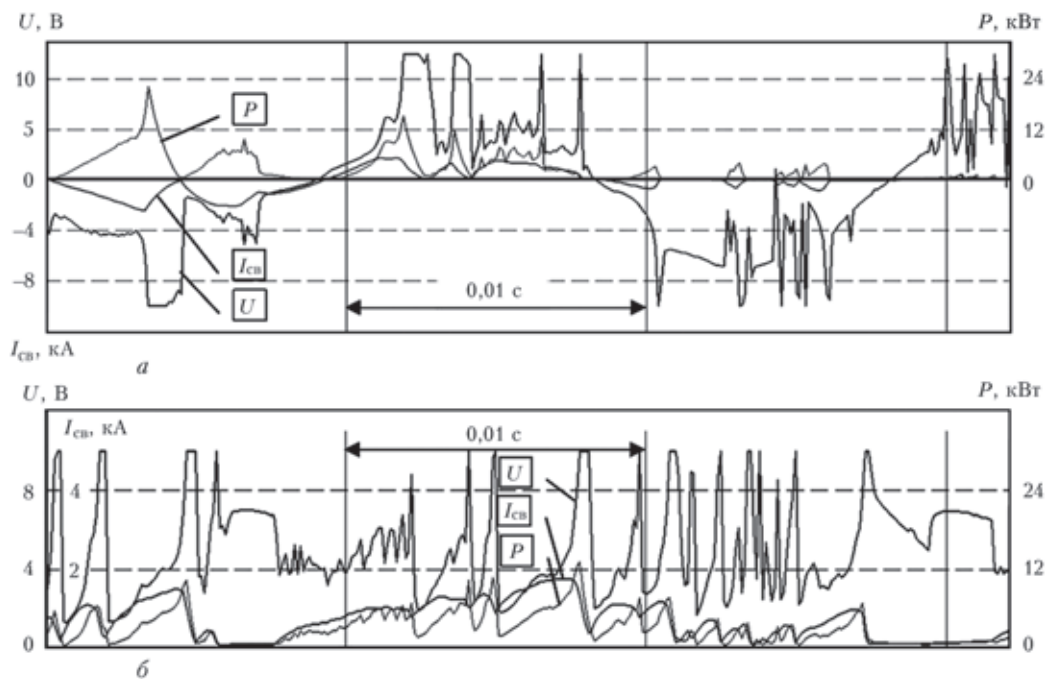


Рис. 5. Осциллограмма сварочного тока, напряжения и мощности, выделяемой на нагрев при оплавлении во II периоде на переменном (а) и постоянном (б) токе

переменном токе. На этом участке динамика прироста мощности с увеличением проводимости искрового зазора также ниже, чем при переменном токе, что не способствует повышению устойчивости процесса плавления. Указанное падение напряжения на диодах — характерная и неотъемлемая особенность изменения их проводимости под нагрузкой.

Запись процесса оплавления образцов на постоянном и переменном токе во II периоде оплавления приведена на рис. 5. Принято считать устойчивым такой процесс оплавления, при котором нет длительных перерывов в протекании тока и замыканий, при которых ток возрастает в несколько раз по отношению к среднему значению тока при оплавлении. Такая оценка весьма условна, так как процесс непрерывного оплавления прерывист по своей природе. Небольшие перерывы (0,02...0,03 с) и кратковременное увеличение тока, классифицированные как замыкания длительностью 0,01...0,02 с, не существенно влияют на стабильность нагрева и устойчивость процесса. В данном случае эти данные могут быть использованы при сравнительной качественной оценке процесса на разных этапах его реализации по программе.

Наиболее критичные с точки зрения возможных нарушений процесса являются I и III периоды программы. В I периоде наиболее высока вероятность коротких замыканий, когда процесс оплавления прекращается. Поэтому наиболее часто при сварке оплавлением, в том числе труб с помощью программы, приведенной на рис. 1, используют регуляторы, которые автоматически снижают ско-

рость оплавления и предотвращают замыкания. В процессе сварки контрольных партий образцов такие регуляторы не использовали, что позволило в большей степени выявить потенциальные возможности источников постоянного и переменного тока. Весьма критичным с точки зрения влияния устойчивости оплавления на качество соединений является III период программы. Даже незначительные, не превышающие долю секунды, перерывы и замыкания в период, предшествующий осадке, могут привести к формированию некачественных соединений.

Результаты анализа записи процесса оплавления на всех этапах программы приведены на рис. 6. В II периоде оплавления длительность пауз в протекании тока выше почти на 10 % на переменном токе по сравнению с постоянным. При увеличении скорости оплавления в III периоде на постоянном токе наблюдается увеличение длительности периодов коротких замыканий в 1,5...1,8 раза больше, чем на переменном, что свидетельствует о снижении запаса устойчивости процесса оплавления перед осадкой.

Характерной особенностью осциллограмм при контактной сварке оплавлением является наличие импульсов высокой частоты на кривых напряжения и тока (рис. 5). Принято считать, что они формируются при взрывах элементарных контактов и могут служить критерием оценки их количества. В работе [2] показано, что пульсации имеют место при расплавлении единичных контактов большой площади, когда происходит их перегрев, сопровождающийся кипением и взрывообразным выделением паров металла. Их продолжитель-

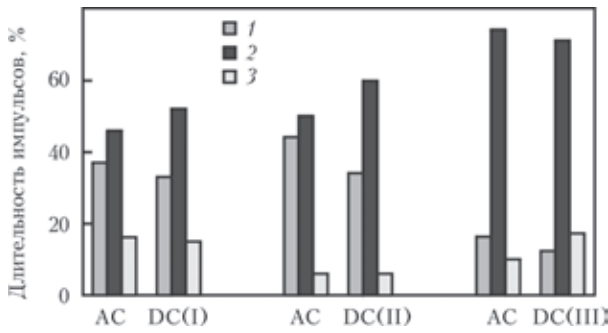


Рис. 6. Диаграмма соотношений длительности перерывов в протекании тока (1), коротких замыканий (2) и импульсов тока при оплавлении (3)

ность значительно меньше реального времени нагрева контактов достаточно большой площади, формирующих рельеф поверхности оплавления. Импульсы высокой частоты отличаются амплитудными значениями, длительностью и зависят от периода оплавления. Средняя частота пульсаций возрастает по мере нагрева деталей в процессе оплавления, а также в конечный период оплавления перед осадкой. При сопоставимой частоте пульсаций сварочного напряжения количество импульсов на постоянном токе почти в 2 раза больше, чем на переменном. Это связано с тем, что оплавление и искрообразование возбуждаются при мгновенных значениях напряжения на зажимах после достижения уровня более 3...4 В. Если для переменного тока этому условию соответствует чуть больше половины синусоиды (см. рис. 5, а), то при постоянном токе оно выполняется всегда (см. рис. 5, б).

Как видно из записей сварочных напряжений, сделанных с помощью цифрового осциллографа (рис. 7), амплитуда импульсов для постоянного тока минимум на 25 % выше, чем для пере-

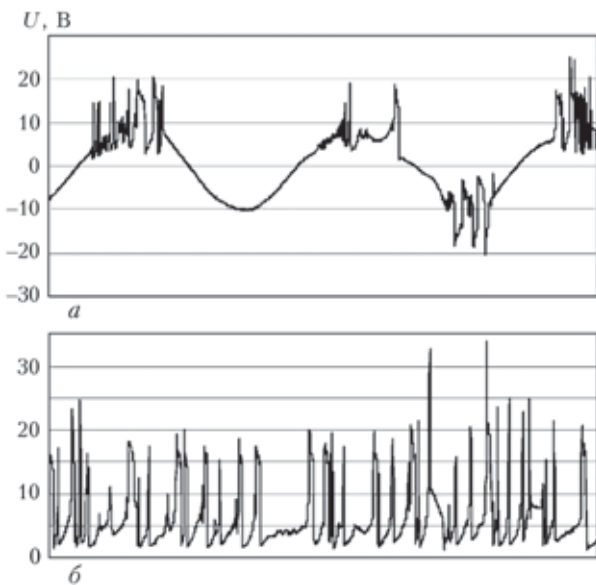


Рис. 7. Напряжение на губках контактной стыковой машины с источником переменного (а) и постоянного (б) тока при $t = 50$ мс (а) и 25 (б)

менного тока, а их длительность соответственно меньше. Для объяснения данного явления перенапряжений и оценки электрических параметров импульсов на осциллограмме напряжения на губках контактной стыковой машины рассмотрим электрическую схему модели сварочного процесса оплавления на постоянном токе, представленную на рис. 8. Активным сопротивлением вторичного контура пренебрегаем и далее считаем источник e источником постоянного тока.

При отсутствии диода D и замыкании ключа K имеем переход из режима холостого хода в режим оплавления, тогда суммарное напряжение U на резисторах и длительность переходного процесса τ :

$$U \approx e(1 - 0,99\exp(-tR/L)), \tau = L/R.$$

При размыкании ключа K имеем переход из режима оплавления в режим холостого хода:

$$U \approx e(1 + 100\exp(-t101R/L)), \tau = L/101R.$$

Таким образом, бросок напряжения на губках сварочной машины при разрыве контакта и переходе к холостому ходу значительно выше, чем при появлении контакта (в нашем примере соотношения 100/0,01); длительность импульсов или время переходного процесса значительно меньше, чем при обратном переходе (в нашем случае 1/100).

Из-за очень малой длительности переходного процесса τ можно предположить также, что спектр этих импульсов состоит из высокочастотных гармоник, на которых выпрямительные диоды теряют свои свойства по выпрямлению, и сопротивление диода значительно увеличивается. Это приводит к большим значениям амплитуды импульсов на постоянном токе по сравнению с переменным током.

В результате высокочастотных пульсаций напряжения очевидно влияние реактивности сварочного контура при сварке на постоянном токе.

Из приведенных данных следует, что часть импульсов высокой частоты, наблюдаемых на осциллограммах при сварке на постоянном токе, не связана прямо с плавлением единичных контактов и является следствием влияния реактивно-

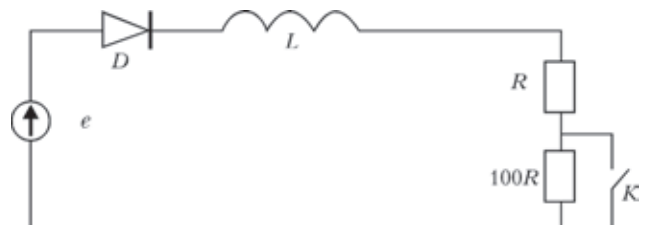


Рис. 8. Электрическая схема модели процесса оплавления на постоянном токе: e — напряжение на входе вторичного контура сварочной машины (выходе силового трансформатора); D — выпрямительный диод в источнике постоянного тока; L — индуктивность вторичного контура; R — условное сопротивление деталей при оплавлении; $100R$ — условное переходное сопротивление оплавляемых деталей при переходе от режима оплавления в режим холостого хода

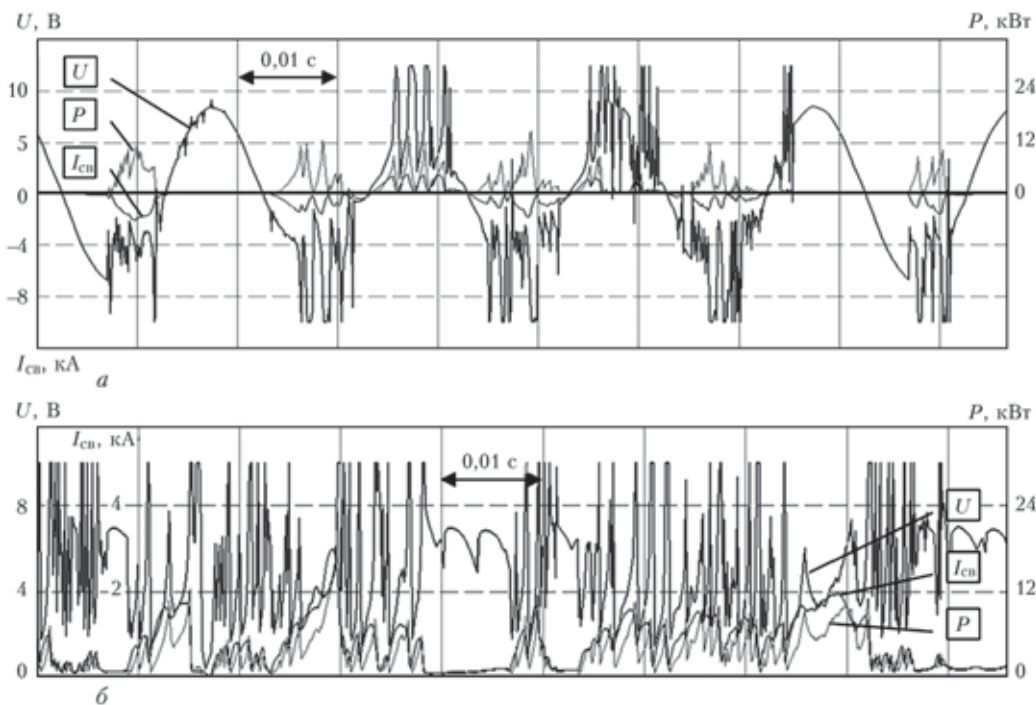


Рис. 9. Осциллограмма сварочного тока, напряжения и мощности на переменном (а) и постоянном (б) токе при оплавлении перед осадкой

сти сварочного контура при сварке на постоянном токе. Наряду с этим при сравнительном анализе формы кривой напряжения и тока на постоянном токе следует обратить внимание на пульсации напряжения и тока достаточно большой длительности, сопровождающиеся увеличением активной потребляемой мощности. Аналогичные пульсации наблюдаются при оплавлении на переменном токе. Как видно из осциллограмм, снятых в период, предшествующий осадке (рис. 9), из импульсов тока повышенной частоты можно выделить отдельные с достаточно большой длительностью (больше 2 мс), при которых наблюдается увеличение активной мощности. Таких импульсов больше при оплавлении на переменном токе. Прерывание

процесса оплавления в эти периоды позволило установить, что максимальная глубина кратеров, образующихся на поверхности оплавления на постоянном токе, составляет 1,0, а на переменном — 1,5 мм (рис. 10).

Указанные отличия в формировании поверхности оплавления не оказали влияния на качество соединений, что подтверждается также другими исследованиями [4], полученными при оплавлении тонкостенных изделий. Так, при оплавлении на постоянном токе формируется более ровная поверхность оплавления и меньше вероятность образования различных дефектов в плоскости соединения. Отмеченные отличия в формировании поверхности оплавления не оказали влияния на качество соединений образцов, выполненных на переменном токе по аналогичному режиму.

Проведенные всесторонние механические испытания партий образцов, сваренных на приведенном режиме на переменном и постоянном токе, подтвердили их полное соответствие требованиям стандарта.

Выводы

1. Применение постоянного тока при контактной стыковой сварке непрерывным оплавлением толстостенных деталей из низколегированных сталей не дает существенных преимуществ, которые можно было бы ожидать в связи со снижением сопротивления сварочной цепи, в частности получить устойчивое оплавление при более низких напряжениях холостого хода.

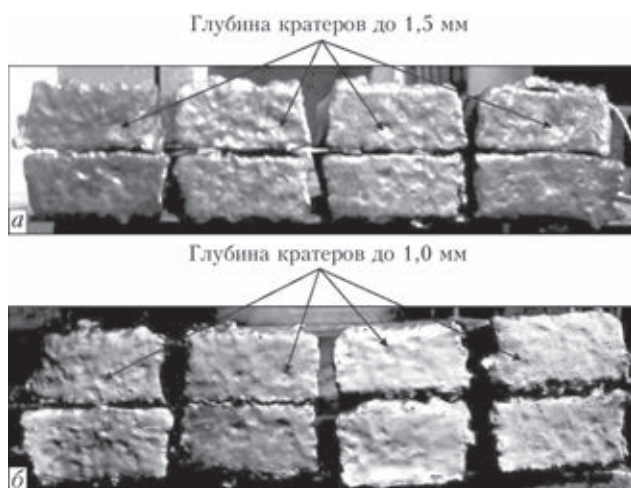


Рис. 10. Поверхность оплавления образцов после прерывания процесса перед осадкой на переменном (а) и постоянном (б) токе



2. К числу характерных особенностей процесса оплавления на постоянном токе следует отнести сокращение длительности перерывов в протекании тока при оплавлении, а также увеличение частоты и амплитуды пульсаций напряжения и тока, вызванных кипением металла. Показано, что эта особенность процесса обусловлена изменением проводимости диодов выпрямителя в определенном спектре высокочастотных гармоник сварочного тока.

3. При оплавлении на постоянном токе наблюдается некоторое уменьшение глубины кратеров на поверхности оплавления. При сварке контрольных партий образцов на одинаковых режимах на постоянном и переменном токе было получено стабильное качество соединений, отвечающее нормативным требованиям, что свидетельствует о незначительном влиянии этого параметра процесса на качество соединений указанной толщины. По-видимому, его положительное влияние на формирование соединений можно ожидать при сварке деталей большой толщины (50 мм и более).

4. При сварке на постоянном токе общий расход энергии на 15 % больше, чем на переменном токе, а КПД соответственно ниже (0,7 при DC и 0,8 при AC), что обусловлено дополнительными потерями энергии в выпрямителях.

5. Интенсивность источников нагрева на постоянном и переменном токе практически идентична. При сварке на одинаковых режимах обеспечивается одинаковый нагрев металла в зоне термического влияния, необходимый для формирования качественных соединений.

6. При переоборудовании контактных стыковых машин с переменного на постоянный ток следует учитывать необходимость многократного увеличения количества модулей выпрямителей постоянного тока по сравнению с аналогичным переоборудованием машин для точечной и рельефной сварки. Это существенно увеличивает его стоимость и эксплуатационные расходы, в частности связанные с охлаждением диодов.

1. *Перспективы* повышения энергетических показателей при контактной стыковой сварке (Обзор) / С.И.Кучук-Яценко, Ю.С.Нейло, В.С.Гавриш, К.В.Гущин // Автомат. сварка. – 2010. – № 2. – С. 30–35.
2. *Кучук-Яценко С.И.* Контактная стыковая сварка оплавлением. – Киев: Наук. думка, 1992. – 236 с.
3. *Энергетические* характеристики процессов контактной стыковой сварки на переменном и постоянном токах / С.И.Кучук-Яценко, П.М.Руденко, В.С.Гавриш и др. // Там же. – 2010. – № 12. – С. 29–33.
4. *Сидякин В.А., Орлов Б.Д.* Стыковая сварка оплавлением тонкостенных деталей на постоянном токе // Свароч. пр-во. – 1969. – № 9. – С. 22–24.

Поступила в редакцию 22.10.2014



15-я МЕЖДУНАРОДНАЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА «СВАРКА И РЕЗКА-2015»

С 7 по 10 апреля 2015 г. в Минске (просп. Победителей, 20/2 Футбольный манеж) состоится Международные специализированные выставки «Сварка и резка-2015», «Порошковая металлургия-2015», «Защита от коррозии. Покрытия», «Металлообработка-2015».

Организатор выставки: ЗАО «МинскЭкспо».

Тематическая направленность «Сварка и резка» отвечает последнему слову развития отрасли, демонстрирует технологии, оборудование, новинки в области сварки, резки, покрытий, систем контроля качества, сертификации и стандартизации сварочного оборудования.

Традиционно в рамках деловой программы выставок пройдут международные конференции, семинары, демонстрации, презентации новинок отрасли, мастер-классы.

Информацию о выставках можно получить на сайте организатора:
<http://minskexpo.com>; тел. : +375-17-226-98-58; факс: +375-17-226-98-58;
 E-mail: e_fedorova@solo.by