



ОСОБЕННОСТИ СМЕШАННЫХ ТИПОВ ПЕРЕНОСА МЕТАЛЛА ПРИ СВАРКЕ В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ ДЛИННОЙ ДУГОЙ

В. ПОНОМАРЕВ, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
А. СКОТТИ, д-р-инж. (Федеральный ун-т, г. Уберландия, Бразилия)

Проанализирована взаимосвязь вероятности появления смешанных типов переноса металла с динамическими характеристиками источника питания. Наблюдения за характером формирования и перехода капель осуществлялись с помощью установки, состоящей из лазера и высокоскоростной цифровой видеокамеры, при синхронной регистрации кривых напряжения дуги и тока сварки. Показано, что и в условиях сварки без коротких замыканий регулировка скоростей нарастания и снижения тока может существенно влиять на характер формирования и переноса капель и вызывать появление смешанных типов переноса металла.

Ключевые слова: дуговая сварка, плавящийся электрод, защитный газ, перенос металла, физика дуги, источники питания

При смешанном типе переноса металла происходит периодическая смена одного типа другим (например, переноса с короткими замыканиями на мелкокапельный). Смешанный тип переноса металла обычно является нежелательным. В настоящей работе проанализирована взаимосвязь вероятности появления смешанных типов переноса металла и скорости изменения тока di/dt . Показано, что и в условиях сварки без коротких замыканий регулировка этого параметра может повлиять на характер формирования и переноса капель, трансформируя, например, крупно-, мелкокапельный и струйный в следующие типы смешанного переноса: крупнокапельный–мелкокапельный; крупнокапельный–струйный; крупнокапельный–короткое замыкание–струйный; мелкокапельный–струйный. Полученные результаты имеют теоретическое и практическое значение и могут быть использованы при выборе динамических параметров источника питания, оптимальных для данных условий сварки.

Наблюдения за характером формирования и переходом капель осуществляли на установке, состоящей из лазера и высокоскоростной цифровой видеокамеры, при синхронной регистрации кривых напряжения дуги и тока сварки с помощью измерительной системы на базе персонального компьютера [1]. Для оценки стабильности (меры рассеяния значений) напряжения дуги U_d и тока сварки $I_{св}$ использовали коэффициенты вариации этих параметров K_U и K_I . В экспериментах применяли низкоуглеродистую электродную проволоку диаметром 1,0 мм. Вылет электрода поддерживали равным 18 мм. В качестве защитной атмосферы использовали смеси на основе аргона: $Ar + 5\% O_2$ и $Ar + 2\% O_2$. Скорость сварки $v_{св}$ составляла 30...36 см/мин.

Рассмотрим случай преобразования обычного типа переноса в смешанный, когда ток сварки поддерживается неизменным, например, при использовании источника питания со штыковой внешней вольт-амперной характеристикой (ВВАХ) (рис. 1). Сварка производилась на следующем режиме: $U_d = 26,1$ В; $K_U = 2,3\%$; $I_{св} = 166$ А; $K_I = 0,6\%$; защитная атмосфера $Ar + 5\% O_2$. В этом случае наблюдается типично крупнокапельный перенос

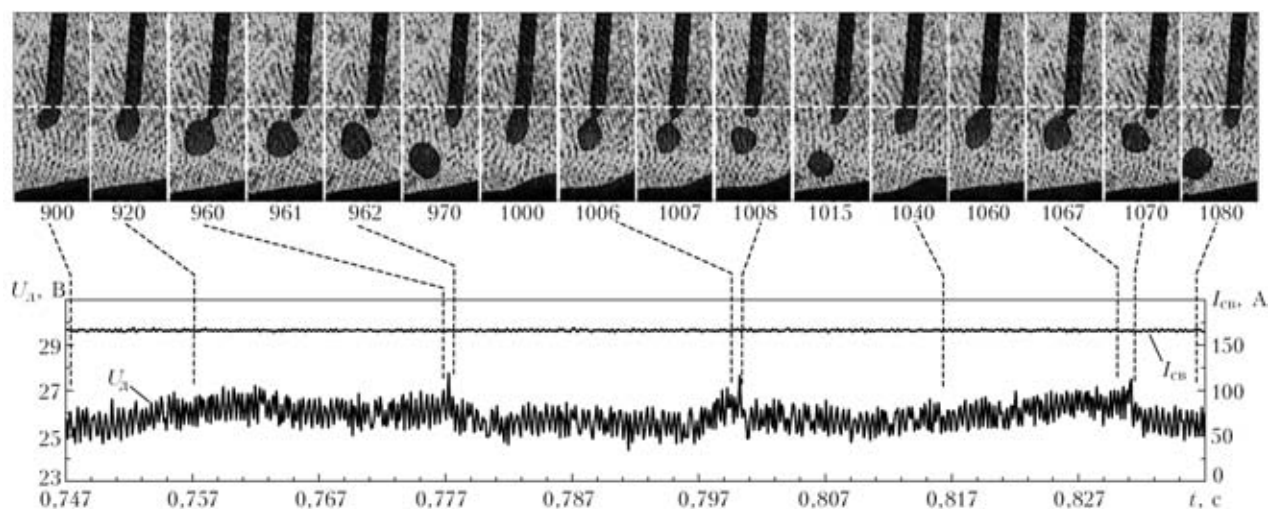


Рис. 1. Крупнокапельный перенос металла при использовании электронного источника питания со штыковой ВВАХ

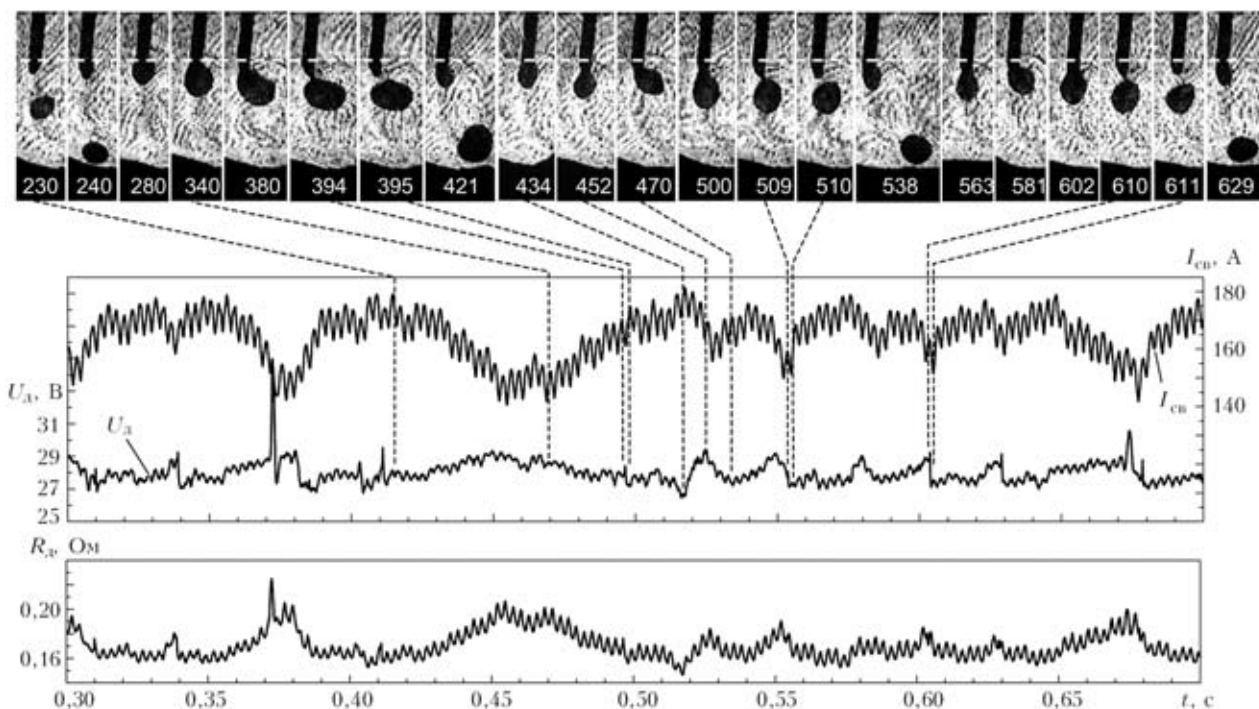


Рис. 2. Крупнокапельный перенос металла при использовании источника питания электромагнитной системы с жесткой ВВАХ и повышенной индуктивностью

металла. Капля растет, замещая собой дуговой промежуток и, следовательно, повышая общее электрическое сопротивление R_d на участке сварочной цепи «вылет электрода — капля — дуга» [2]. Из рис. 1 видно, что измеряемое напряжение дуги слегка повышается (на 1...1,5 В) по мере роста капли и падает после ее отрыва от торца электрода, который (без учета капли) при этом не перемещается, т. е. находится на одном и том же уровне. Этот результат показывает, что скорость оплавления торца проволоки не меняется в процессе роста капли, или, другими словами, размер капли не отражается на темпе оплавления торца электрода, скорость оплавления которого зависит прежде всего от тока сварки.

Крупнокапельный перенос металла сохраняет практически те же характеристики и в случае использования источника питания с жесткой ВВАХ, но при условии ограничения диапазона отклонений тока сварки, вызванных изменением электрического сопротивление R_d (рис. 2). Использовали следующий режим сварки: $U_d = 28,0$ В; $K_U = 2,1$ %; скорость подачи электродной проволоки $v_{п.пр} = 5,7$ м/мин; $I_{св} = 164,7$ А; $K_I = 4,5$ %; $di/dt = 20...30$ А/(м·с), диапазон изменения тока сварки не превышал 30 А, защитная атмосфера $Ar + 5\% O_2$.

Если ток сварки не ограничен в определенных пределах, он может периодически превышать критический ток, вызывая формирование мелких капель. Таким образом, крупнокапельный перенос металла может трансформироваться в один из типов смешанного (например, в крупнокапельный–мелкокапельный (рис. 3). В приведенном случае диапазон отклонений тока сварки достигал 70 А, что связано с динамическими характеристиками источника питания, а именно: более высокими зна-

чениями di/dt — примерно 34...40 А/(м·с). Режим сварки с использованием электронного источника питания с жесткой ВВАХ был следующим: $U_d = 27,9$ В; $K_U = 4,5$ %; $v_{п.пр} = 6,3$ м/мин; $I_{св} = 166,3$ А; $K_I = 13,7$ %; защитная атмосфера $Ar + 5\% O_2$.

В соответствии с принципом саморегулирования дуги источник питания должен реагировать на изменения электрического сопротивления в сварочной цепи, соответствующим образом повышая или понижая ток сварки. Однако такая реакция источника питания не должна быть чрезмерной. Кроме того, процесс сварки МИГ/МАГ обладает и другими механизмами саморегулирования, которые способствуют возвращению процесса сварки в заданные условия. Например, даже при использовании источника питания со штыковой ВВАХ процесс сварки МИГ/МАГ имеет возможность поддержания определенной длины дуги L_d благодаря тому, что эффективность расплавления электродной проволоки повышается по мере уменьшения длины дуги (рис. 4). Это происходит в результате повышения выделения тепла на более длинном вылете электрода, а также из-за снижения потерь тепла на излучение при более короткой дуге (источник тепла становится более концентрированным). При изменении скорости подачи электродной проволоки дуга автоматически устанавливается такой длины, чтобы между скоростью $v_{п.пр}$ и скоростью расплавления проволоки установилось равновесие. В данном случае это происходит в условиях стабильного тока, так как использован источник питания со штыковой ВВАХ, однако длительность переходного периода при таком типе саморегулирования длины дуги довольно велика (0,5...1,0 с). На рис. 4 приведены значения скорости оплавления торца электрода (которая ав-

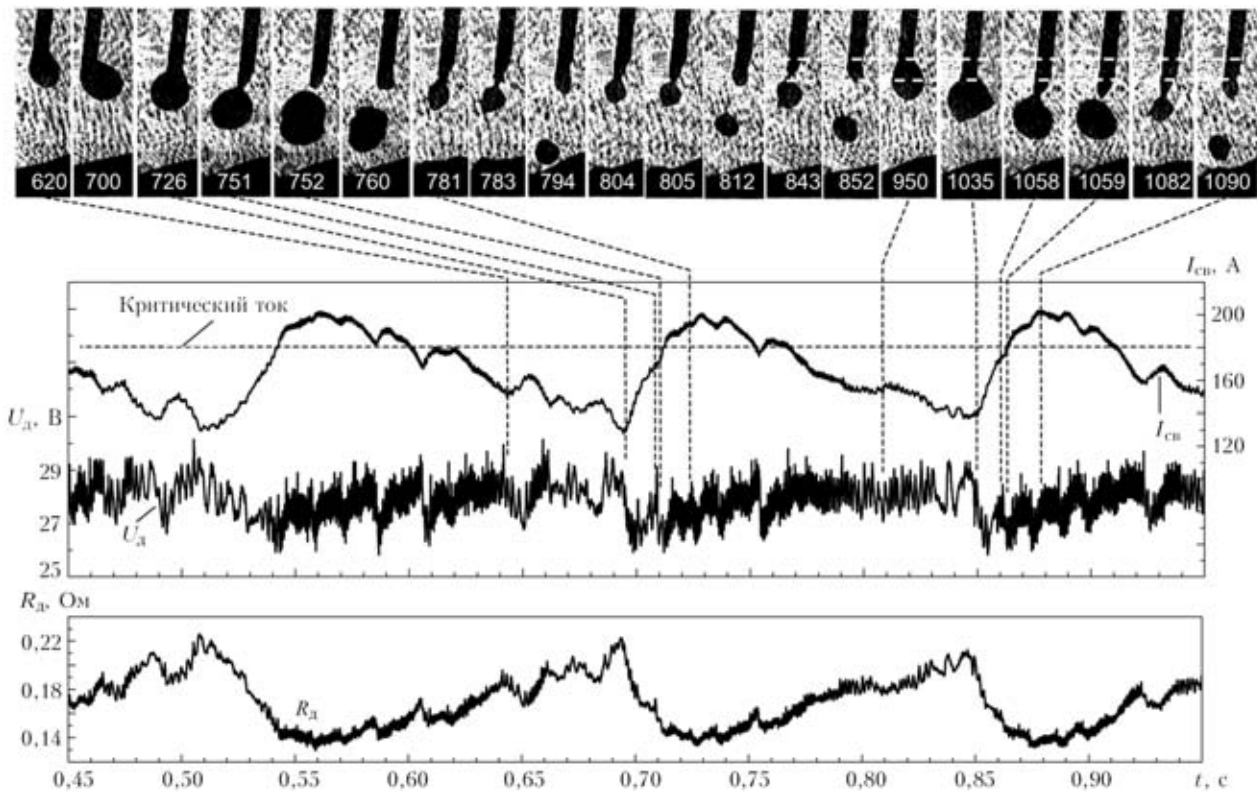


Рис. 3. Смешанный крупнокапельный-мелкокапельный перенос металла

томатически устанавливалась равной скорости подачи проволоки) и соответствующей ей длины дуги (вылет электрода 20 мм, защитная атмосфера $Ag + 2\% O_2$).

Таким образом, при крупнокапельном переносе металла лучшая стабильность длины дуги обеспечивается при ограничении колебания тока сварки (см. рис. 2) или, даже если он остается неизменным, вопреки изменениям электрического сопротивления на участке сварочной цепи «вылет электрода-капля-дуга», вызываемым ростом и отделением капли электродного металла. В противном случае ток сварки может достигать слишком высоких значений и интенсивно расплавлять торец электрода, порождая мелкокапельный перенос металла, или снижаться до очень низких значений, замедляя расплавление электродной проволоки и вызывая сокращение дугового промежутка вплоть

до касания капель поверхности ванны (рис. 5, 6). В результате стабильность процесса сварки падает. Наиболее часто это имеет место при использовании электронных источников питания, в которых скорость нарастания и снижения тока может быть отрегулирована в чрезмерно широком диапазоне (рис. 3, 5, 6). Эта проблема усиливается также при переносе металла очень крупными каплями (вызванными, например, типом применяемой защитной атмосферы), как это имело место в случаях, показанных на рис. 5 и 6, когда применялась защитная смесь со слишком малым содержанием такого поверхностно-активного элемента как кислород.

Результаты, представленные на рис. 1–6, позволяют выявить главные причины наблюдаемых изменений электрического сопротивления на участ-

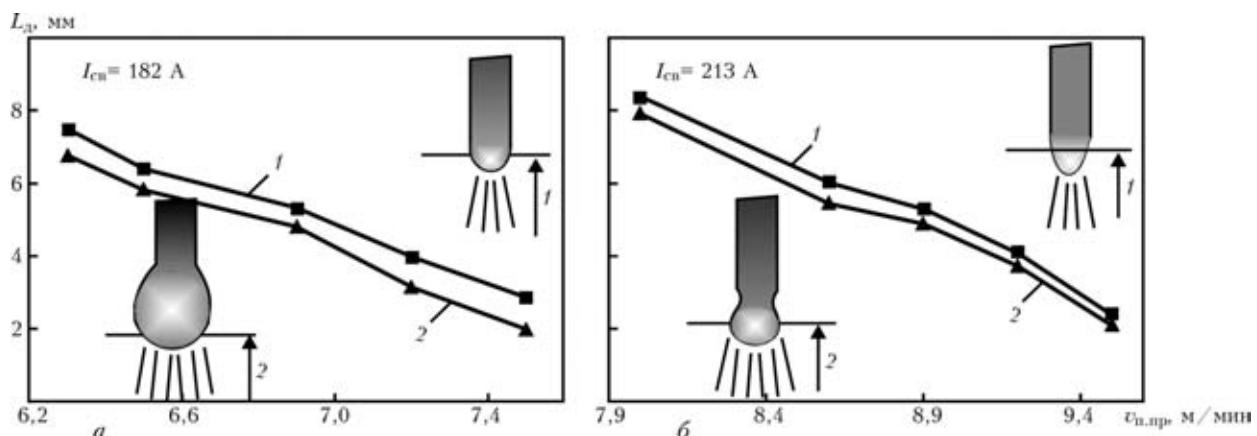


Рис. 4. Влияние длины дуги на скорость оплавления торца электрода при использовании источника питания со штыковой ВВАХ: а – крупнокапельный; б – мелкокапельный перенос металла; 1 – измерение после отделения капли; 2 – измерение в произвольный момент времени

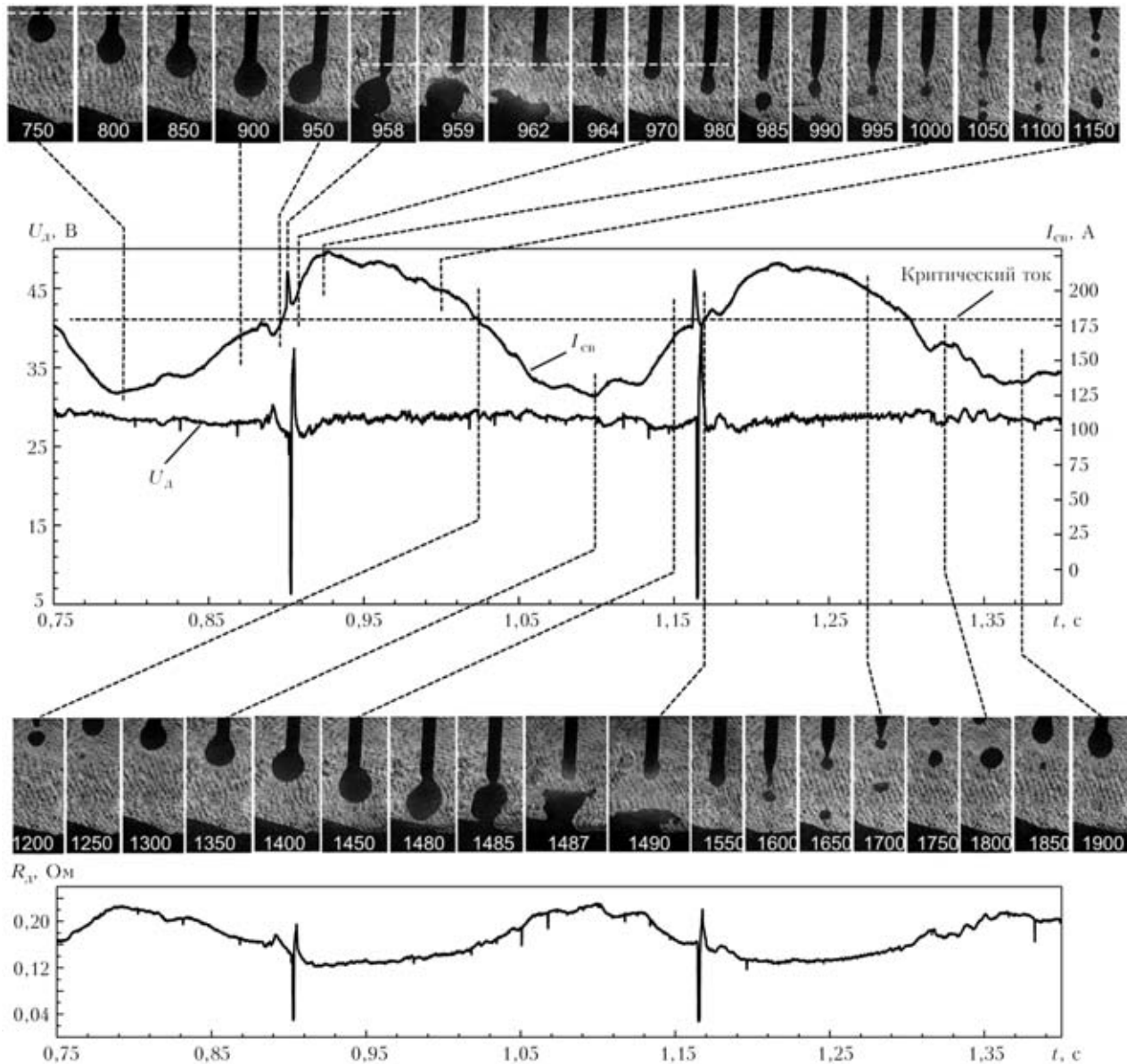


Рис. 5. Смешанный крупнокапельный–короткое замыкание–струйный перенос металла с использованием электронного источника питания с жесткой ВВАХ ($U_d = 28,4$ В; $K_U = 6,0$ %; $v_{н.пр} = 6,5$ м/мин; $I_{св} = 176,6$ А; $K_I = 19,2$ %; защитная атмосфера $Ar + 2$ % O_2 ; $di/dt = 40...45$ А/(м·с)

в сварочной цепи «вылет электрода–капля–дуга» при формировании и отделении капля электродного металла. Как видно, кривые тока $I_{св}$ и электрического сопротивления R_d являются зеркально симметричными. Это объясняется тем, что уровень тока сварки меняется в зависимости от значения сопротивления сварочной цепи (при увеличении сопротивления ток падает, и наоборот). Из рисунков видно, что кривая сопротивления не синхронизирована ни с фазой роста капли и соответствующего сокращения дугового промежутка, ни с фазой удлинения дуги после отделения капли от торца электрода. Например, она может прекратить возрастать в середине фазы роста капли и начать снижаться (рис. 5, кадр 750), а также может продолжать падать после отделения капли вопреки росту дугового промежутка (рис. 5, кадры 958... 1000).

Наблюдаемые изменения электрического сопротивления на участке сварочной цепи «вылет электрода–капля–дуга» (рис. 7) являются реальными фактами. Физические процессы, протекающие на этом участке, следующие:

рост размеров капли до ее отделения от торца электрода. Как показано в [2], удельное электрическое сопротивление капли на единицу ее длины примерно в 1,5 раза выше, чем в столбе дуги и в 10...15 раз выше, чем на вылете электрода. Таким образом, становится очевидным, что по мере того, как капля во время фазы роста замещает собой столб дуги, сопротивление R_d должно возрастать;

из-за колебаний тока сварки происходит изменение скорости оплавления торца электрода и соответственно меняется вылет электрода и его электрическое сопротивление. Изменения вылета, как правило, сопровождаются адекватными изме-

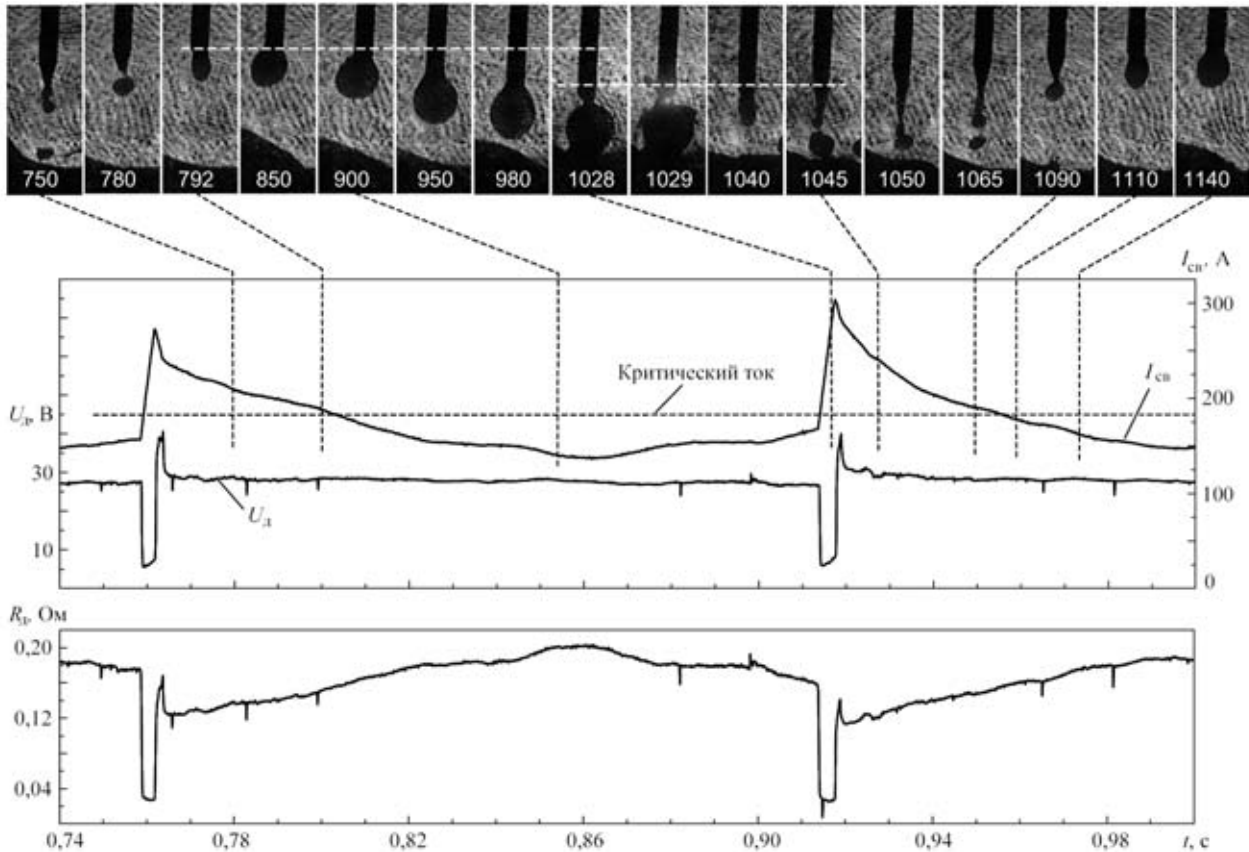


Рис. 6. Смешанный крупнокапельный–короткое замыкание–струйный перенос металла с длительными короткими замыканиями с использованием электронного источника питания с жесткой ВВАХ ($U_d = 27,5$ В; $K_U = 12,4$ %; $v_{н.п.р} = 6,5$ м/мин; $I_{св} = 168,6$ А; $K_I = 21,8$ %; защитная атмосфера — $Ar + 2$ % O_2 ; $di/dt = 38...43$ А/(м·с)

нениями длины столба дуги (чем больше вылет, тем короче дуга, и наоборот). В связи с тем, что удельное электрическое сопротивление вылета значительно ниже, чем столба дуги, колебания его длины также будут вызывать изменения электри-

ческого сопротивления на участке цепи «вылет электрода–капля–дуга»;

колебания тока вызывают изменения электрического сопротивления анодной и катодной областей, а также удельного сопротивления столба дуги. Они являются нелинейными сопротивлениями, которые при повышении тока уменьшаются.

Принимая во внимание описанные выше физические процессы, имеющие место при формировании капли на торце электрода, можно объяснить наблюдаемый при этом характер изменения полного электрического сопротивления на участке цепи «вылет электрода–капля–дуга» (рис. 8). Рассмотрим особенности протекания этих процессов в моменты, соответствующие кадрам кинограммы 750, 900, 1000 и 1150. Для удобства анализа на данном рисунке приведены соответствующие схемы замещения со значениями электрического сопротивления вылета, капли, столба дуги и анодной и катодной областей в относительных единицах (т. е. пригодными только для сравнения сопротивлений различных компонентов цепи между собой).

В момент, соответствующий кадру 750, полное сопротивление этого участка цепи максимально. Это обусловлено тем, что как капля, так и длина дуги достигли практически максимальных размеров. При этом ток сварки падает до наименьших значений, вызывая дополнительный рост полного сопротивления из-за того, что электрические сопротивления столба дуги и анодной и катодной

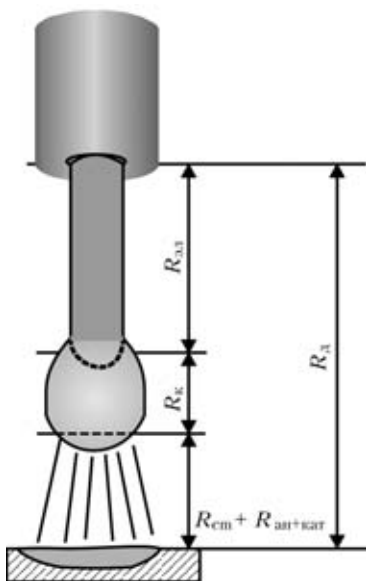


Рис. 7. Схема составляющих электрического сопротивления на участке сварочной цепи «вылет электрода–капля–анодная и катодная области–столб дуги» ($R_{эл}$ — сопротивление вылета электрода; R_k — капли; $R_{ст}$ — столба дуги; $R_{ан+кат}$ — анодной и катодной областей)

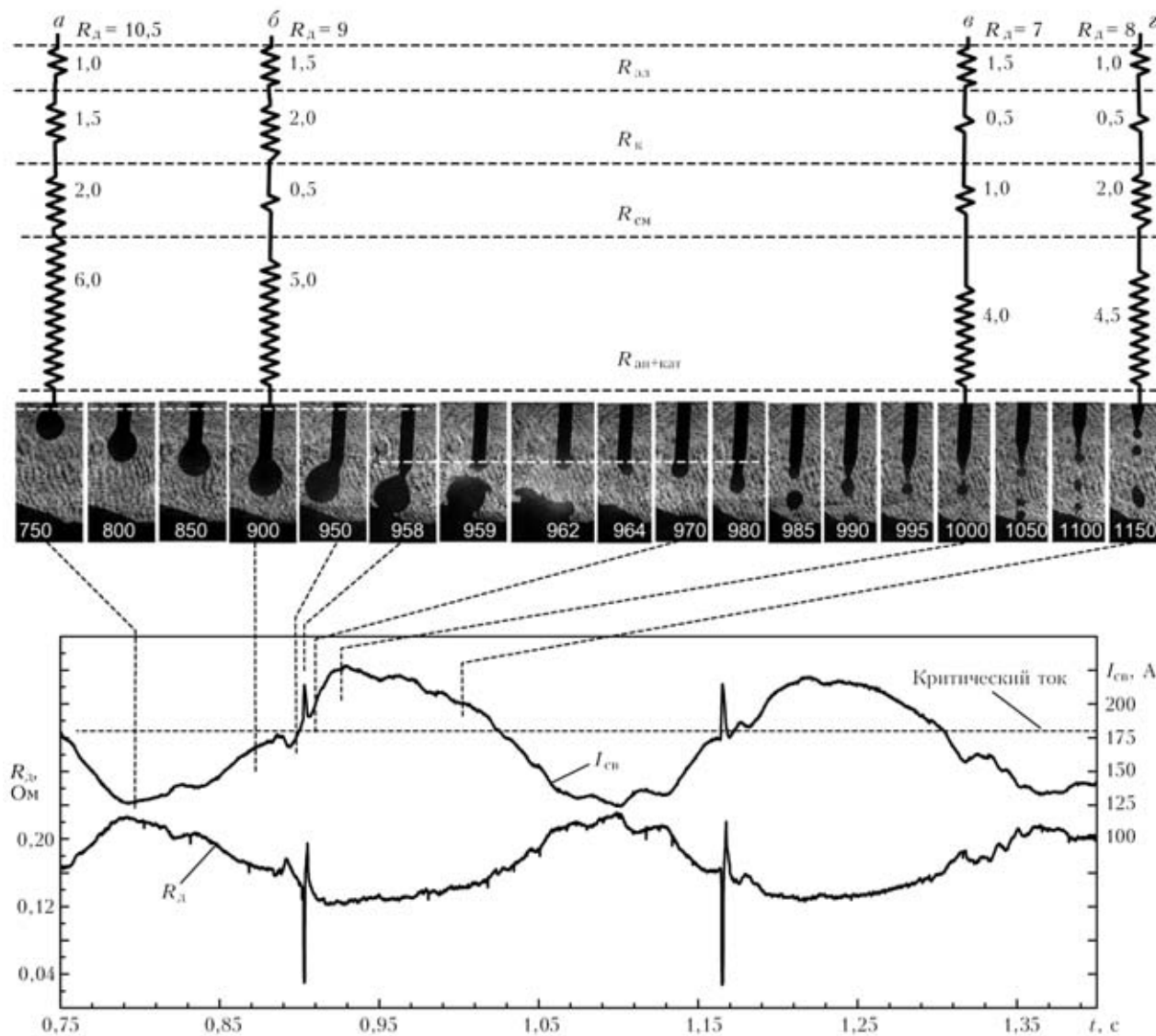


Рис. 8. Изменения электрического сопротивления на участке цепи «вылет электрода-капля-анодная и катодная области-столб дуги» при смешанном «крупнокапельный-короткое замыкание-струйный» переносе (значения сопротивления составляющих даны в относительных единицах)

областей будут наивысшими. Однако начиная с этого момента полное сопротивление начнет падать, так как из-за снижения тока сварки снизится скорость оплавления торца электрода и темп роста размеров капли. Капля будет продолжать перемещаться в направлении сварочной ванны, но уже с торцом электрода (интервал между моментами *a* и *б* на рис. 8). В этих условиях столб дуги замещается не каплей, а проволокой вылета электрода, имеющей удельное сопротивление, значительно более низкое, чем столб дуги. В результате сопротивление R_d начинает падать. При этом сопротивление капли, хоть и незначительно, но будет продолжать увеличиваться из-за продолжающегося роста капли. Благодаря начавшемуся повышению тока дуги электрическое сопротивление анодной и катодной областей начнет уменьшаться. После отделения капли сопротивление R_d упадет еще больше, так как капля будет замещена столбом дуги, который обладает меньшим удельным со-

противлением, чем капля, а также благодаря тому, что повышенный ток после превышения им критического уровня приводит к смене типа переноса металла на мелкокапельный, при котором капли практически полностью поглощаются дугой (шунтируются ею) и, таким образом, не рассматриваются при оценке сопротивления цепи. Однако высокий ток еще не привел к быстрому оплавлению торца электрода и длина столба дуги остается короткой (т. е. низким остается и его сопротивление). Дальнейшее возрастание тока дуги будет вызывать дальнейшее снижение электрического сопротивления анодной и катодной областей. Все это приводит к тому, что в момент, соответствующий кадру 1000 (момент *в*), полное сопротивление этого участка цепи достигает минимального значения, а ток дуги — максимального. С этого момента сопротивление R_d начнет вновь увеличиваться, так как интенсивное оплавление торца электрода, вызванное высоким током, приведет к росту длины дуги. Ток



сварки начинает падать (рис. 8, момент z), и когда он опустится ниже критического значения, характер переноса металла вновь изменится на крупнокапельный, на торце электрода начнет формироваться новая капля. Это приведет к еще большему повышению сопротивления R_d и к дальнейшему снижению тока сварки. Далее цикл такого типа смешанного переноса металла будет повторяться.

В заключение следует отметить, что основной причиной возникновения смешанных переносов металла являются неадекватные динамические характеристики электронного источника питания, в которых не учитывается естественное изменение полного электрического сопротивления дуги при формировании капли на торце электрода. Алгоритм поддержания заданной длины дуги, закладываемый в источник питания этого типа, является таким же, как и в случае обычных источников питания, т.е. основан на предположении, что изменения электрического сопротивления R_d на участке сварочной цепи «вылет электрода–капля–дуга» главным образом определяются изменениями сопротивления столба дуги, т.е. длины дуги. В случае удлинения дуги сопротивление R_d повышается и вызывает снижение тока сварки. Электрическое сопротивление капли электродного металла в этом алгоритме не учитывается. В связи с тем, что элек-

трическое сопротивление на участке сварочной цепи «вылет электрода–капля–дуга» представляет собой сумму сопротивлений вылета электрода, капли и дуги, оно иногда не является пропорциональным длине дуги. Например, в случае крупной капли, сформировавшейся на торце электрода, сопротивление R_d окажется повышенным, что, согласно используемому алгоритму, будет ошибочно интерпретировано как удлинение дуги. Ток сварки будет уменьшен и скорость оплавления торца электрода снизится, вопреки необходимости в ее повышении. Обычные источники питания электромагнитной системы легко справляются с этой проблемой, так как имеют низкие динамические характеристики, и, таким образом, диапазон изменения тока сварки оказывается ограниченным. Как следует из приведенного анализа, данная проблема оказывается значительно более серьезной для электронных источников питания. Некоторым из них может потребоваться дополнительная настройка под соответствующую разновидность процесса сварки МИГ/МАГ.

1. *Development of an experimental technique for studying metal transfer in welding: synchronized shadowgraphy* / S. S. Balsamo, L. O. Vilarinho, M. Vilela, A. Scotti / Int. J. for the Joining of Materials. — 2000. — 12, № 2. — P. 48–59.
2. *Пономарев В., Скотти А.* Влияние капли электродного металла на напряжение дуги при сварке в защитных газах // Автомат. сварка. — 2002. — № 4. — С. 7–11.

Interrelation of the probability of appearance of mixed types of metal transfer with dynamic characteristics of the power source has been analyzed. Mode of drop formation and transfer was observed using a unit, consisting of a laser and a high-speed digital video camera, with synchronous recording of arc voltage and welding current curves. It is shown that under the conditions of welding without short-circuiting adjustment of the rates of current rise and drop can essentially affect the nature of drop formation and transfer and can lead to appearance of mixed types of metal transfer.

Поступила в редакцию 11.05.2004

МЕЖДУНАРОДНАЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА «НЕВА-2005»

26–29 октября 2005 г.

г. С.-Петербург

Альянс сварщиков Санкт-Петербурга и Северо-Западного региона, коллективными членами которой являются ведущие фирмы Санкт-Петербурга и России, организывает раздел «Сварка и родственные технологии» на судостроительной выставке и приглашает Вас принять участие в выставке «Нева-2005».

В рамках выставки будет проводиться международная конференция.

Будем рады видеть Вас на нашем стенде.

Альянс Сварщиков СПб
г. Санкт-Петербург, тел./факс: 327-37-90 (91, 92) доб. 148
e-mail: spas@welding.spb.ru