

2. Энергетична ефективність нагріву тліючим розрядом суттєво залежить від параметрів режиму, що необхідно враховувати під час їх призначення для конкретних технологічних процесів.

Список використаних джерел

1. *Диффузионная* сварка материалов : справочник / под ред. Н. Ф. Казакова. – М. : Машиностроение, 1981. – 271 с.
2. *Котельников Д. И.* Сварка давлением в тлеющем разряде / Д. И. Котельников. – М. : Металлургия, 1981. – 116 с.
3. *Райзер Ю. П.* Физика газового разряда / Ю. П. Райзер. – М. : Наука, 1987. – 592 с.
4. *Болотов Г. П.* Баланс энергии на катоде тлеющего разряда / Г. П. Болотов, А. И. Сатюков // Автоматическая сварка. – 1998. – № 3. – С. 10–12.

УДК 621.791.754:51-74

И.В. Пентегов, д-р техн. наук

С.В. Рымар, д-р техн. наук

В.Н. Сидорец, д-р техн. наук

А.М. Жерносеков, канд. техн. наук

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, г. Киев, Украина

ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАСПЛАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ ДУГОВОЙ СВАРКИ

І.В. Пентегов, д-р техн. наук

С.В. Рymar, д-р техн. наук

В.М. Сидорець, д-р техн. наук

А.М. Жерносеков, канд. техн. наук

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, м. Київ, Україна

ЕФЕКТИВНІСТЬ РОЗПЛАВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОДА ПРИ РІЗНИХ ВИДАХ ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ

Igor Pentegov, Doctor of Technical Sciences

Sergey Rymar, Doctor of Technical Sciences

Vladimir Sydorets, Doctor of Technical Sciences

Anatolii Zhernosiekov, PhD in Technical Sciences

The E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

EFFICIENCY OF ELECTRODE MELTING IN DIFFERENT TYPES OF THE ARC WELDING

Определены технологическая и энергетическая эффективности процесса плавления электрода при различных видах дуговой сварки сталей. Соосный упорядоченный отрыв капли расплавленного металла электрода без значительных возмущений, уменьшение теплоотвода с поверхности капли и электрода, подогрев электрода сварочным током повышают технологическую и энергетическую эффективности процесса сварки.

Ключевые слова: дуговая сварка, сталь, скорость плавления, сварочный электрод, коэффициент расплавления, эффективность расплавления.

Визначені технологічна та енергетична ефективності процесу плавлення зварювального електрода при різних видах дугового зварювання сталей. Співвісний упорядкований відрив краплі розплавленого металу електрода без значних збурень, зменшення тепловідводу з поверхні краплі та електрода, підігрів електрода зварювальним струмом підвищують технологічну та енергетичну ефективності процесу зварювання.

Ключові слова: дугове зварювання, сталь, швидкість плавлення, зварювальний електрод, коефіцієнт розплавлення, ефективність розплавлення.

Technological and energy efficiency of the melting process of the electrode in different types of arc welding of steels have been defined. Coaxial orderly separation droplets of molten metal electrode without significant perturbation, reduction of heat removal from the surface of the drop and the electrode, heating of the electrode by welding current increase the technological and energy efficiency of the welding process.

Key words: arc welding, steel, melting rate, welding electrode, melting factor, melting efficiency.

Постановка проблемы. Определение технологической и энергетической эффективности процесса плавления сварочного электрода при различных видах дуговой сварки ста-

лей было и остается актуальной задачей. Статья продолжает исследования, начатые авторами в работах [1–4], которые посвящены выявлению основных факторов, влияющих на плавление сварочного электрода при дуговой сварке сталей, а также учету этих факторов при определении массовой скорости плавления электрода и коэффициента его расплавления.

Анализ последних исследований и публикаций. Вопросам плавления электрода при дуговой сварке сталей посвящено много работ, в частности работы [5–7], анализ которых проведен авторами в работах [1–4].

Выделение не решенных ранее частей общей проблемы. В опубликованных авторами работах не затрагивались вопросы эффективности процесса плавления сварочного электрода при различных видах дуговой сварки сталей.

Целью статьи является исследование технологической и энергетической эффективности процесса плавления сварочного электрода при различных видах дуговой сварки сталей.

Скорость плавления сварочного электрода и ее аппроксимации. Зависимость массовой скорости плавления сварочного электрода G_p (производительности плавления) обычно полагается прямо пропорциональной току сварки I_{sv} [5–7]:

$$G_p = \alpha_p I_{sv}, \quad (1)$$

где α_p – коэффициент расплавления электрода.

С развитием сварочных технологий и источников питания сварочной дуги, позволяющих обеспечить регулировку сварочного тока в широких пределах, зависимость (1) не во всех случаях позволяет получить результаты, хорошо согласующиеся с опытом, особенно при малых и больших значениях сварочного тока. Коэффициент α_p , сам сложным образом зависит от многих факторов: тока сварки, его вида и полярности, наличия или отсутствия коротких замыканий, кратности тока короткого замыкания источника питания, длительности непрерывного интервала сварки, наличия импульсов тока, режима сварки, окружающей среды, положения электрода в пространстве и др. [1–4].

Массовая скорость плавления электрода определяется из баланса мощностей и может быть записана в виде:

$$G_p = \frac{P_p + P_a - P_{k,izl}}{q} = \frac{U_{ekv} I_{sv} + R I_{sv}^2 - P_{k,izl}}{q}. \quad (2)$$

Здесь P_p – активная мощность, передаваемая от дуги в каплю расплавленного металла и электрод для его расплавления, $P_p = U_{eqv} I_{sv}$, где U_{eqv} – эквивалентное напряжение дуги [3]; P_a – активная мощность, расходуемая на нагрев электрода при прохождении по нему сварочного тока, $P_a = R I_{sv}^2$, где R – активное сопротивление электрода; $P_{k,izl}$ – мощность, рассеиваемая с поверхности капли и электрода в окружающую среду конвекцией и излучением; q – удельные затраты тепла на нагрев и расплавление электродного металла, Дж/кг (см. формулу (16) работы [3]).

Тогда с учетом формулы (1) коэффициент α_p равен:

$$\alpha_p = \frac{P_p + P_a - P_{k,izl}}{q I_{sv}} = \frac{U_{ekv} + R I_{sv} - P_{k,izl} / I_{sv}}{q}. \quad (3)$$

Представим коэффициент расплавления электрода в виде аппроксимации:

$$\alpha_p = a_0 + a_1 I_{sv} - a_2 / I_{sv}, \quad (4)$$

в которой коэффициенты равны: $a_0 = U_{eqv} / q$; $a_1 = R / q$; $a_2 = P_{k,izl} / q$.

При такой аппроксимации зависимость массовой скорости плавления электрода от сварочного тока примет вид:

$$G_p = a_0 I_{sv} + a_1 I_{sv}^2 - a_2. \quad (5)$$

В правой части формул (4) и (5) первое слагаемое обусловлено мощностью, передаваемой от дуги в каплю расплавленного металла и электрод, второе слагаемое – мощ-

ностью, расходуемой на нагрев электрода проходящим током, третье слагаемое – мощностью, рассеиваемой с поверхности капли и электрода в окружающую среду конвекцией и излучением.

Формулы (4) и (5) позволяют произвести анализ и оценить уровень значений величин α_p и G_p при различных видах сварки.

При подводной сварке покрытым электродом происходит интенсивный отвод тепла с его поверхности водой, поэтому коэффициент a_2 будет очень большой. Это приводит к значительному уменьшению коэффициента расплавления электрода α_p и массовой скорости его плавления G_p , делая их значения наименьшими среди всех видов сварки. В связи с этим сварочный процесс при малых токах идти не может, так как отвод тепла водой настолько велик, что вкладываемой мощности может не хватить на поддержание плавления металла. Эта одна из причин, по которой при подводной сварке [4] необходимо обеспечивать больший уровень тока, по сравнению со сваркой покрытым электродом в атмосфере [2; 3].

При сварке покрытым электродом в атмосфере, по сравнению с подводной сваркой, коэффициент a_2 уменьшается, и значения α_p и G_p возрастают.

Еще большие значения α_p и G_p наблюдаются при автоматической и механизированной сварке в среде защитных газов электродной проволокой, когда вылет электрода из мундштука, вследствие движения проволоки не успевает перегреться, при этом снижаются потери на конвекцию и излучение с поверхности электрода и уменьшается значение коэффициента a_2 .

Наибольших значений величины α_p и G_p достигают при импульсно-дуговой автоматической сварке в среде защитных газов, когда капли расплавленного металла переносятся в режиме «один импульс – одна капля» [8] (в английской версии One Pulse – One Drop). Во время паузы тока электрод практически не нагревается, время пребывания электрода и капли под сварочным током сокращается. При этом происходит резкое уменьшение потерь на конвекцию и излучение с поверхности капли расплавленного металла, сразу переносимой в сварочную ванну, и значение коэффициента a_2 оказывается пренебрежимо мало.

При автоматической и механизированной сварке в среде защитных газов электродной проволокой для приближенных расчетов можно полагать коэффициент $a_2 = 0$. При этом формула (4) хорошо согласуется с аппроксимацией, предложенной в работе [9].

Эффективность процесса плавления. Чтобы определить эффективность процесса плавления электрода запишем формулу для коэффициента полезного действия (КПД):

$$\eta_{pl} = \frac{P_p + P_a - P_{k,izl}}{P_p + P_a} = \frac{U_{ekv} I_{sv} + RI_{sv}^2 - P_{k,izl}}{U_{ekv} I_{sv} + RI_{sv}^2} = 1 - \frac{P_{k,izl}}{P_p + P_a} = 1 - \frac{P_{k,izl}}{U_{ekv} I_{sv} + RI_{sv}^2}. \quad (6)$$

Здесь для процесса плавления электрода мощности P_p и P_a являются полезными, способствующими его плавлению, а $P_{k,izl}$ – мощностью потерь.

Анализируя формулу (6), можно заключить, что наименьшее значение КПД будет наблюдаться при подводной сварке покрытым электродом, когда с электрода осуществляется интенсивный отвод тепла водой и мощность, рассеиваемая с поверхности электрода в окружающую среду конвекцией и излучением $P_{k,izl}$ будет велика.

При сварке покрытым электродом в воздухе, по сравнению с подводной сваркой, мощность $P_{k,izl}$ будет уменьшаться, увеличивая значение КПД.

Еще большее увеличение КПД будет наблюдаться при автоматической и механизированной сварке в среде защитных газов электродной проволокой, когда вылет электрода малый, и вследствие движения, практически не нагревается, резко уменьшая тем самым величину $P_{k,izl}$.

Наибольшее значение КПД принимает при импульсно-дуговой автоматической сварке в среде защитных газов, когда капли расплавленного металла переносятся в режиме «один импульс – одна капля». В этом случае величина $P_{k,izl}$ оказывается очень малой.

Формулу расчета КПД процесса плавления электрода можно записать в другом виде:

$$\eta_{pl} = \frac{G_p q}{G_p q + P_{k,izl}} = \frac{\alpha_p I_{sv} q}{\alpha_p I_{sv} q + P_{k,izl}} = \frac{1}{1 + \frac{P_{k,izl}}{G_p q}} = \frac{1}{1 + \frac{P_{k,izl}}{\alpha_p I_{sv} q}} \quad (7)$$

Чем больше величина G_p , тем больше будет значение КПД. Чем большее значение принимает величина $P_{k,izl}/(G_p q) = P_{k,izl}/(\alpha_p I_{sv} q)$, тем КПД становится меньше.

Анализ зависимостей. На рис. 1–3 приведены зависимости коэффициента расплавления α_p , массовой скорости плавления G_p и КПД процесса плавления η_{pl} покрытых электродов различных диаметров d_e от тока сварки I_{sv} и плотности тока в электроде J_{sv} в разные моменты времени сварки t_{sv} , полученные с применением формул из работы [3] при горизонтальном расположении покрытого электрода.

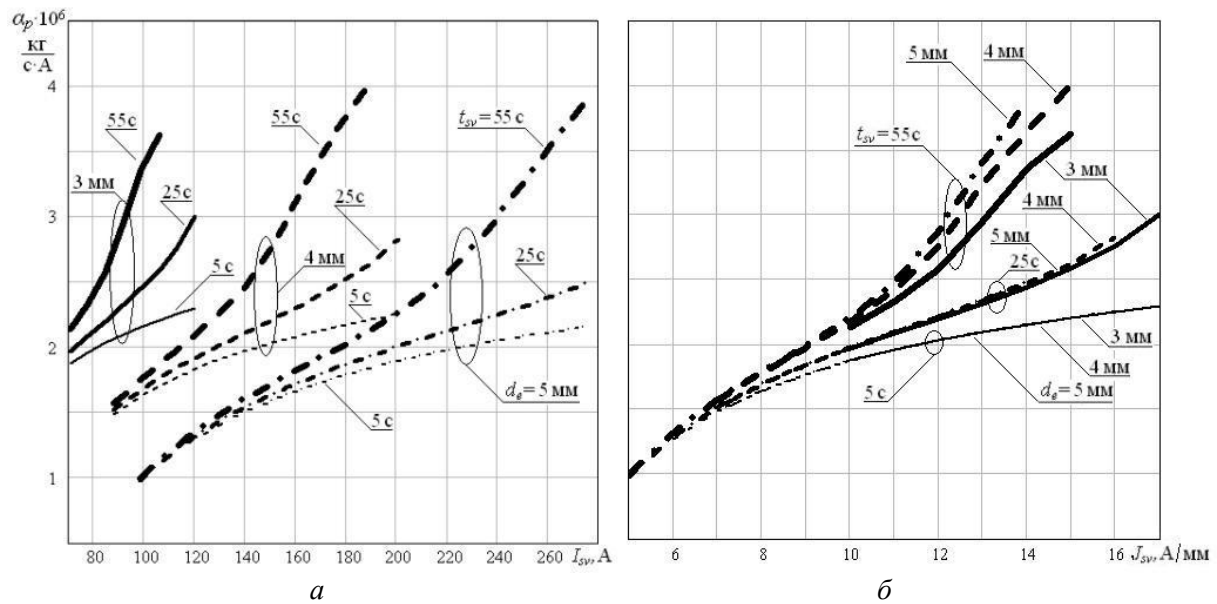


Рис. 1. Зависимость коэффициента расплавления α_p покрытого электрода от: а – тока сварки I_{sv} ; б – плотности тока в электроде J_{sv}

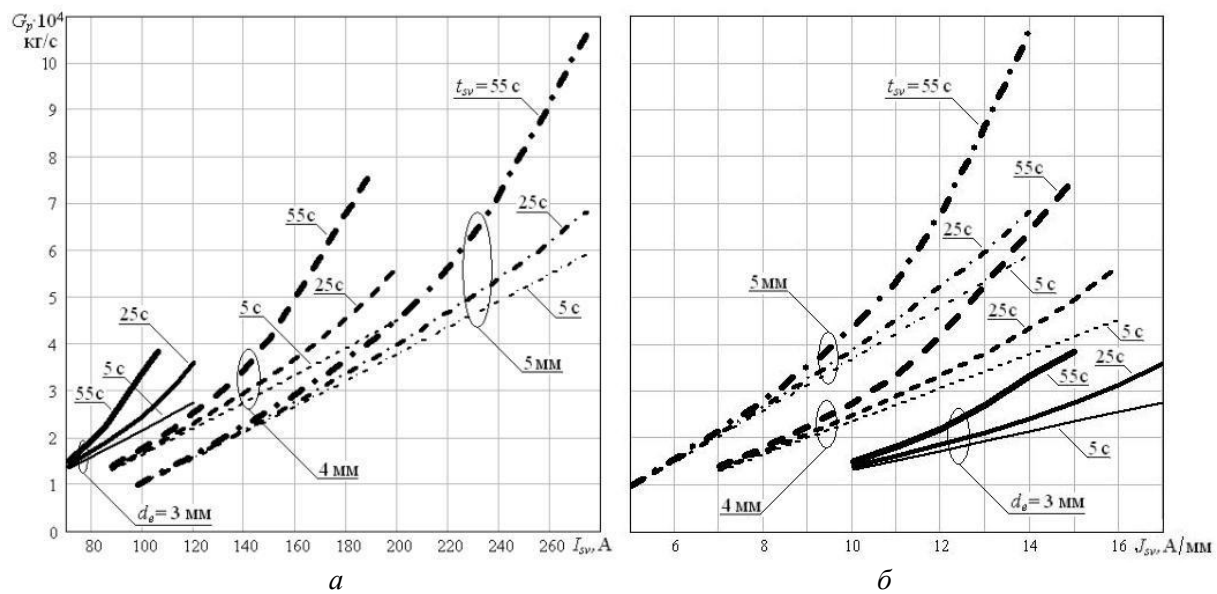


Рис. 2. Зависимость массовой скорости плавления G_p покрытого электрода от: а – тока сварки I_{sv} ; б – плотности тока в электроде J_{sv}

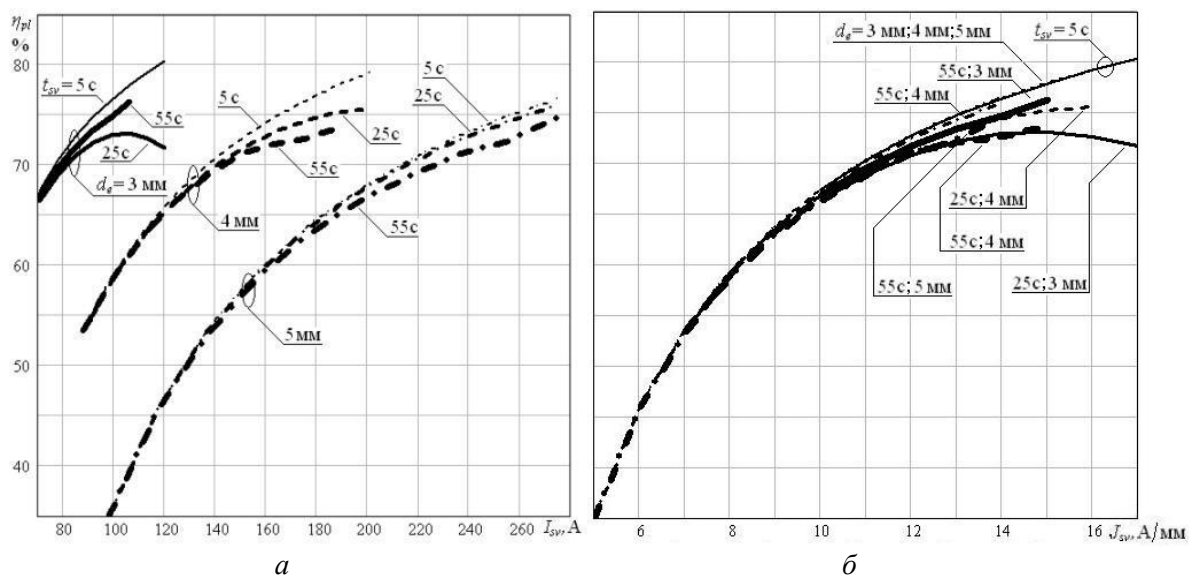


Рис. 3. Зависимость КПД процесса плавления η_{pl} покрытого электрода от:
 а – тока сварки I_{sv} ; б – плотности тока в электроде J_{sv}

Коэффициент кратности тока короткого замыкания источника питания $k_{kz} = 1,6$, коэффициент, учитывающий долю времени короткого замыкания $k_{t,kz} = 0,1$, температура капли $T_{kap} = 2800\text{ K}$. На рис. 3 для электрода $d_e = 3\text{ мм}$ начальная длина электрода составляла 30 см, для электродов $d_e = 4$ и 5 мм начальная длина – 40 см.

На рис. 1, а и 2, а видно, что при меньшем диаметре электрода величины α_p и G_p имеют большие значения, чем при большем диаметре электрода, и возрастают с увеличением сварочного тока I_{sv} и времени сварки t_{sv} .

Из рассмотрения рис. 3, а можно заключить, что при меньших диаметрах электрода значения КПД процесса плавления электрода η_{pl} при одинаковых токах выше, чем при больших диаметрах. При рассматриваемых параметрах сварочного процесса для электродов диаметром 4 и 5 мм значения КПД возрастают с увеличением тока сварки I_{sv} , причем в ранние моменты времени сварки t_{sv} КПД больше, чем в более поздние моменты времени. Это связано с увеличением мощности, отводимой с поверхности электрода при его большем нагреве с течением времени сварки. При диаметре электрода 3 мм наибольшие значения КПД также наблюдаются при меньшем времени сварки – на 5-й секунде. Немного меньшие значения оказываются на 55-й секунде. Еще меньшие – на 25-й секунде. Причем на 5-й и 55-й секундах значения КПД возрастают с увеличением тока. На 25-й секунде сварки значения КПД с увеличением тока сначала возрастает, а потом убывает. Такое поведение кривой вызвано тем, что с увеличением тока происходит нагрев электрода, увеличивающий КПД, но при дальнейшем росте тока происходит более интенсивный отвод тепла с поверхности электрода и КПД начинает уменьшаться.

Из рис. 1, б – 3, б видно, что величины α_p , G_p и η_{pl} возрастают с увеличением плотности тока в электроде J_{sv} .

Таким образом, наилучшими технологическими параметрами α_p и G_p и наибольшим КПД η_{pl} характеризуются интенсивные процессы сварки с большими плотностями тока в электроде.

На рис. 4–6 приведены зависимости коэффициента расплавления α_p , массовой скорости плавления G_p и КПД процесса плавления η_{pl} покрытых электродов различных диаметров от времени сварки t_{sv} при разных токах сварки I_{sv} .

Видно, что коэффициент расплавления электрода α_p при меньшем диаметре электрода имеет большие значения, чем при большем диаметре электрода, и возрастает с увеличением тока и времени сварки.

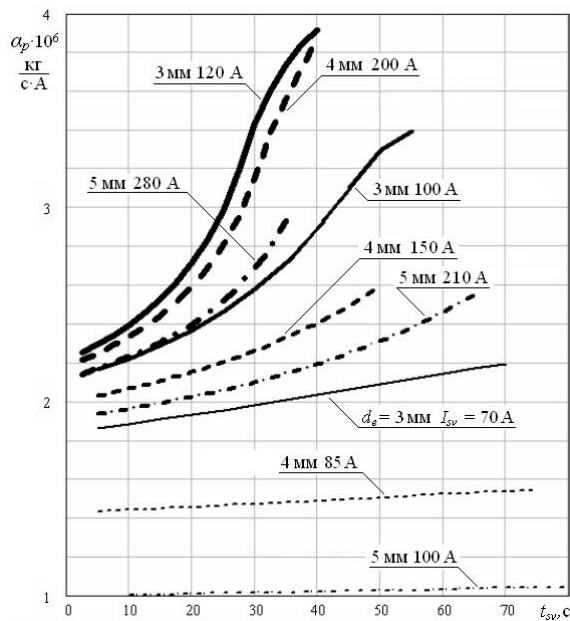


Рис. 4. Зависимость коэффициента расплавления ар покрытого электрода от времени сварки t_{sv}

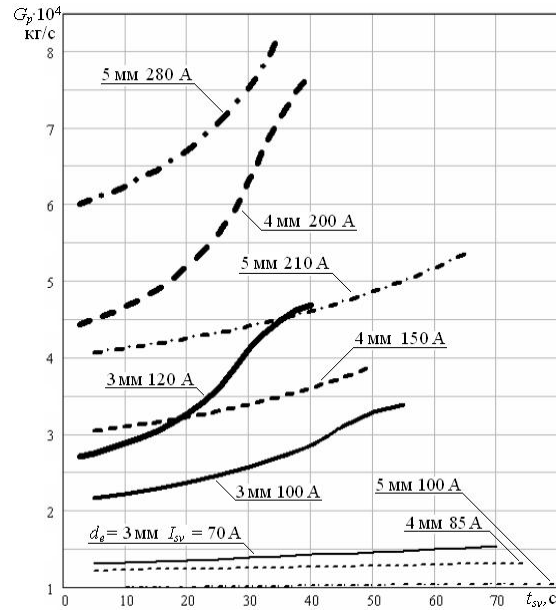


Рис. 5. Зависимость массовой скорости плавления G_p покрытого электрода от времени сварки t_{sv}

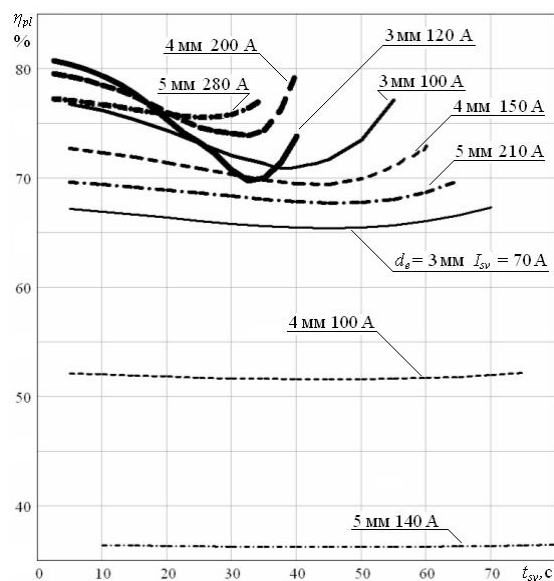


Рис. 6. Зависимость КПД процесса плавления η_{pl} покрытого электрода от времени сварки t_{sv}

Поведение зависимостей массовой скорости плавления электрода G_p сложным образом зависит от диаметра электрода, времени сварки и тока сварки. Так, при диаметре электрода 3 мм и токе 70 А значения G_p больше, чем при диаметре электрода 4 мм и токе 85 А, и еще больше, чем при диаметре электрода 5 мм и токе 100 А. Напротив, при больших токах сварки большие значения величины G_p наблюдаются при больших диаметрах электрода и больших токах. При этом во всех случаях, с течением времени, значения G_p увеличиваются.

При диаметре электрода 3 мм и токе сварки 70 А значения КПД выше, чем при диаметре электрода 4 мм и токе сварки 85 А, и еще выше, чем при диаметре электрода 5 мм и токе сварки 100 А. Еще большие значения КПД наблюдаются при диаметре электрода 3 мм и токе сварки 100 А, где они выше также значения КПД при диаметре электрода 4 мм и токе сварки 150 А, и еще выше, чем при диаметре электрода 5 мм и токе сварки 210 А.

Более сложная картина наблюдается при диаметре электрода 3 мм и токе сварки 120 А значения КПД в начальный период сварки оказываются выше, чем при диаметре электрода 4 мм и токе сварки 200 А, и еще выше, чем при диаметре электрода 5 мм и токе сварки 280 А, однако, с течением времени (с 18 секунды сварки), значения КПД для электрода диаметром 3 мм оказываются ниже значений КПД для электродов диаметром 4 и 5 мм, а для электрода диаметром 4 мм – меньше, чем для электрода диаметром 5 мм.

Для всех зависимостей КПД (рис. 6) с течением времени сварки характерно сначала уменьшение значений КПД процесса расплавления электрода, а затем их увеличение. Это связано с тем, что по мере нагрева электрода проходящим током и интенсивным отводом тепловой мощности в окружающую среду КПД уменьшается. По мере распла-

вления электрода уменьшается его длина, а соответственно и площадь его охлаждения, уменьшается доля отводимой в окружающую среду тепловой мощности, и КПД процесса расплавления увеличивается.

Таким образом, полученные формулы позволяют анализировать поведение зависимостей коэффициента расплавления α_p электрода, массовой скорости его плавления G_p и КПД процесса плавления η_{pl} покрытого электрода.

Приведем здесь так же формулу для определения КПД процесса сварки η_{sv} , которое отличается от КПД процесса плавления электрода. Для этого к мощности $P_{k,izl}$ в выражениях (6) и (7) необходимо добавить потери на испарение расплавленного металла P_ξ :

$$\eta_{sv} = 1 - \frac{P_{k,izl} + P_\xi}{P_p + P_a} = 1 - \frac{P_{k,izl} + P_\xi}{U_{ekv} I_{sv} + RI_{sv}^2} = \frac{1}{1 + \frac{P_{k,izl}}{G_p q} + \frac{P_\xi}{G_p q}} = \frac{1}{1 + \frac{P_{k,izl} + P_\xi}{\alpha_p I_{sv} q}}. \quad (8)$$

Потери P_ξ определяются путем умножения величины G_p на второе слагаемое правой части выражения (16) работы [3]:

$$P_\xi = G_p \xi \cdot \left(\int_{T_0}^{T_{dug}} C_p \theta d\theta + \sum_{i=k}^5 \lambda_{Ai} + r \right), \quad (9)$$

где ξ – коэффициент, учитывающий долю испаряемого электродного металла в процессе сварки; C_p – удельная теплоемкость стали, являющаяся функцией температуры электрода θ ; T_0 – температура нагрева электрода; T_{dug} – температура дуги; λ_{Ai} – удельные теплоты фазовых превращений железа; r – удельная теплота испарения железа. Заметим, что в выражении (8) отношение $P_\xi/(G_p q)$, согласно формуле (9), не зависит от величины G_p .

Визуальное наблюдение переноса металла. Процесс плавления электрода, образование капли расплавленного металла и ее поведение можно определить скоростной киносъемкой или осциллографированием напряжения и тока на дуге.

Для иллюстрации приведем фотографии скоростной киносъемки процесса плавления сварочного электрода при некоторых видах сварки, на которых видно образование капли расплавленного металла электрода, ее размер относительно электродной проволоки, поведение капли перед отрывом от электрода и ее перенос в сварочную ванну. Чем больше размер капли и чем дольше происходит ее отрыв, тем меньше КПД процесса плавления электрода из-за большого рассеяния тепловой энергии с капли в окружающую среду.

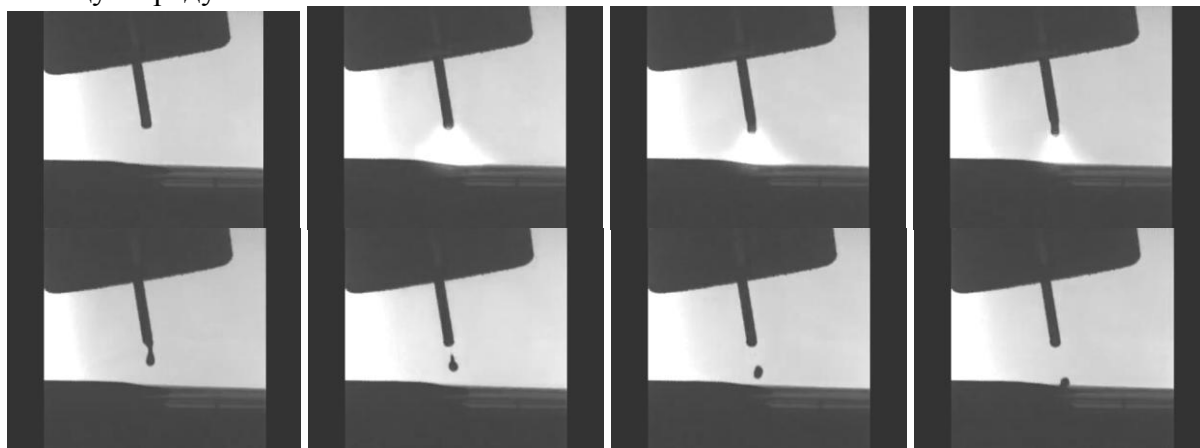


Рис. 7. Процесс переноса металла при импульсно-дуговой сварке в среде защитных газов «один импульс – одна капля» на обратной полярности [11]

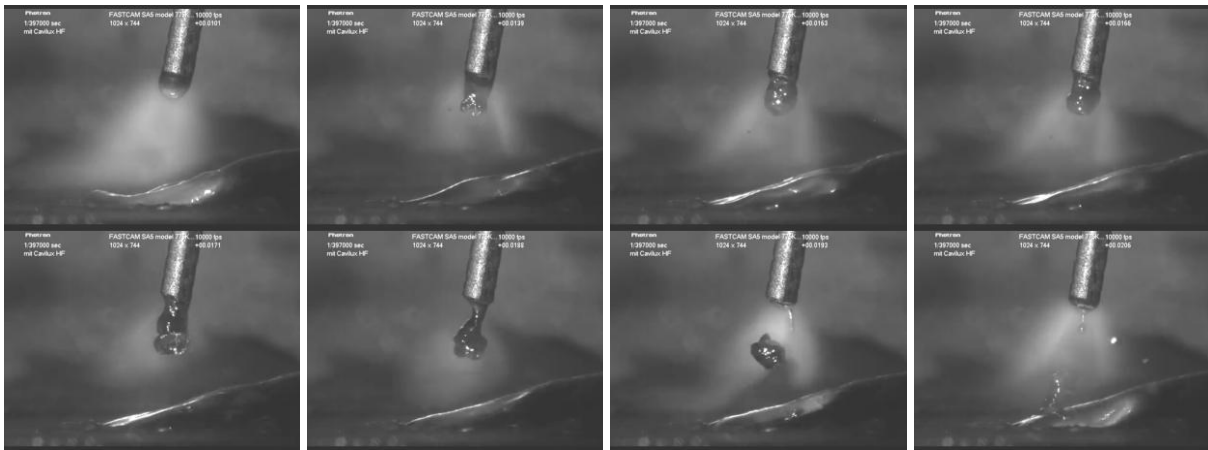


Рис. 8. Процесс переноса металла при сварке в среде защитных газов постоянным током на обратной полярности [12]

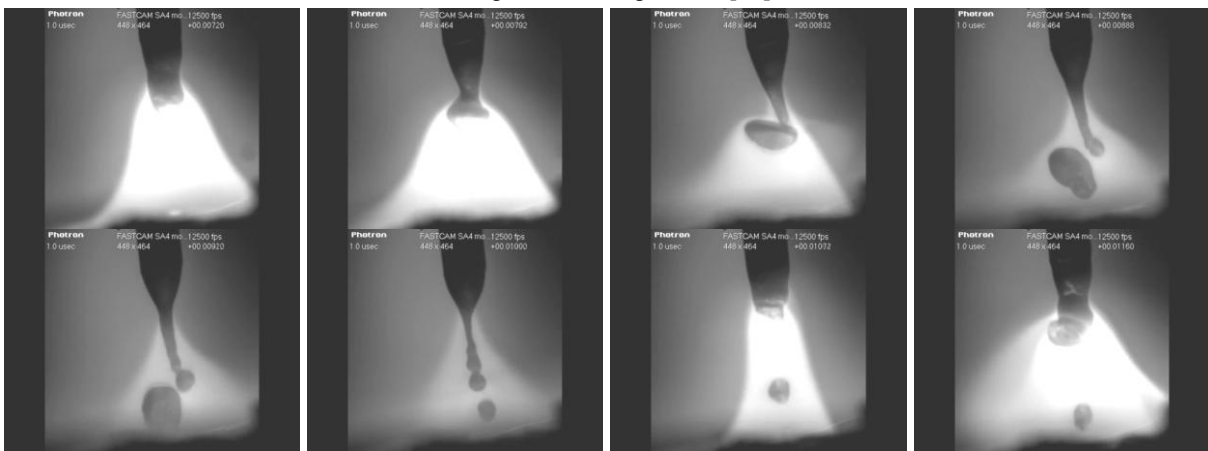


Рис. 9. Процесс переноса металла при импульсно-дуговой сварке в среде защитных газов с произвольными параметрами на обратной полярности [13]

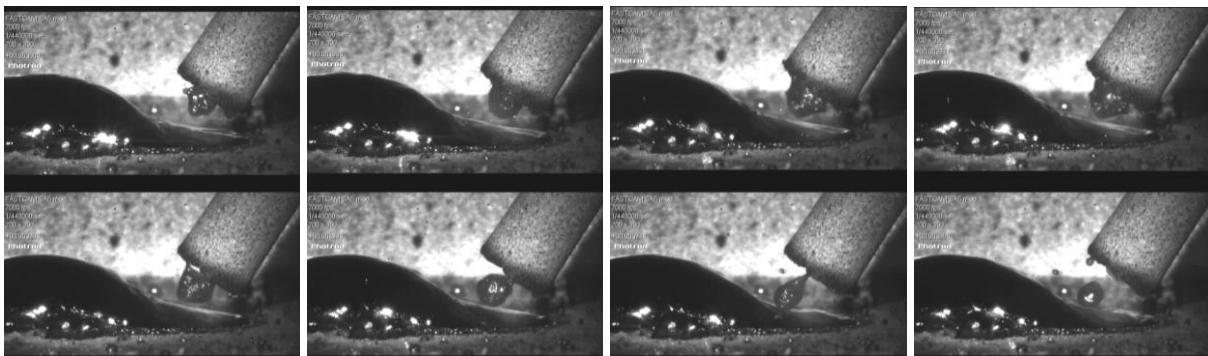


Рис. 10. Процесс переноса металла при дуговой сварке покрытым электродом [14]

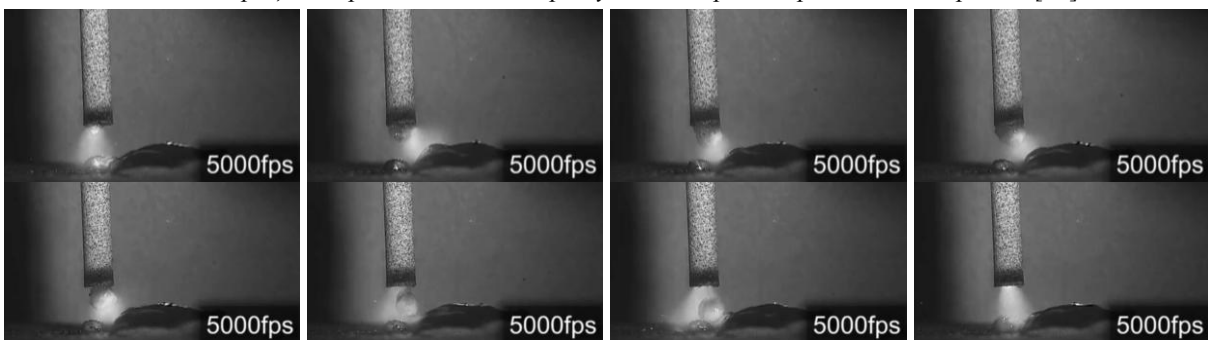


Рис. 11. Процесс переноса металла при дуговой сварке расположенным вертикально покрытым электродом [15]

С точки зрения повышения коэффициента расплавления электродного металла и КПД процесса плавления электрода очень хорошо зарекомендовала себя импульсно-дуговая сварка, особенно процесс «один импульс – одна капля». При этом процесс переноса металла электрода идет спокойно без возмущений [11], капли расплавленного металла близки по размеру, имеют малый диаметр, равный диаметру электрода, они не деформируются и рассеяние тепловой энергии с них минимально (рис. 7). Особенно это заметно при сравнении со сваркой [12] (рис. 8) и импульсно-дуговой сваркой с произвольными параметрами [13] (рис. 9). На постоянном токе наблюдается медленный отрыв капли, ее деформирование, диаметр капли больше диаметра электрода, из-за чего рассеяние тепловой энергии с них велико, что уменьшает КПД процесса плавления электрода. На указанных рисунках приведены процессы при дуговой сварке проволокой на обратной полярности в среде защитных газов.

Подобные процессы переноса металла наблюдаются и при дуговой сварке покрытым электродом (рис. 10 и 11) [14; 15].

Дальнейшие исследования плавления электрода при различных видах сварки должны быть посвящены более углубленному исследованию этих процессов.

Выводы и предложения. Полученные формулы для технологической и энергетической эффективности процесса плавления сварочного электрода при различных видах дуговой сварки сталей позволяют анализировать поведение зависимостей коэффициента расплавления электрода, массовой скорости его плавления и коэффициента полезного действия процесса плавления электрода. Процесс сварки с соосным упорядоченным отрывом капли расплавленного металла электрода, уменьшение теплоотвода с поверхности капли и электрода, подогрев электрода проходящим током повышает технологическую и энергетическую эффективность сварочного процесса. Наибольшим коэффициентом полезного действия и наилучшими технологическими параметрами (коэффициентом расплавления и массовой скоростью плавления) характеризуются интенсивные процессы сварки с большими плотностями тока в электроде.

Список литературных источников

1. *К аналитическому определению коэффициента расплавления при дуговой сварке сталей / И. В. Пентегов, В. Н. Сидорец, О. И. Петриенко, А. М. Жерносеков // Вісник ЧДТУ. Серія “Технічні науки”. – 2012. – № 2 (57). – С. 89–96.*
2. *Изменение коэффициента расплавления покрытого сварочного электрода в процессе его нагрева и плавления при дуговой сварке сталей без коротких замыканий / И. В. Пентегов, В. Н. Сидорец, С. В. Рымар, О. И. Петриенко // Вісник ЧДТУ. Серія “Технічні науки”. – 2012. – № 3 (59). – С. 110–120.*
3. *Расплавление покрытого сварочного электрода при дуговой сварке сталей с короткими замыканиями / И. В. Пентегов, В. Н. Сидорец, С. В. Рымар, О. И. Петриенко // Вісник ЧДТУ. Серія “Технічні науки”. – 2013. – № 1 (63). – С. 93–103.*
4. *Расплавление покрытого сварочного электрода при подводной дуговой сварке / И. В. Пентегов, С. В. Рымар, В. Н. Сидорец и др. // Вісник ЧДТУ. Серія “Технічні науки”. – 2013. – № 4 (69). – С. 65–75.*
5. *Теоретические основы сварки / В. В. Фролов, В. А. Винокуров, В. Н. Волченко и др. – М. : Высш. школа, 1970. – 592 с.*
6. *Лесков Г. И. Электрическая сварочная дуга / Г. И. Лесков. – М. : Машиностроение, 1970. – 335 с.*
7. *Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением ; под ред. акад. Б. Е. Патона. – М. : Машиностроение, 1974. – 768 с.*
8. *Патон Б. Е. Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом с программным регулированием процесса / Б. Е. Патон, А. Г. Потапьевский, Н. В. Подола // Автоматическая сварка. – 1964. – № 1. – С. 1–6.*
9. *Варуха Е. Н. Расчет скорости плавления предварительно нагретого электрода при сварке в углекислом газе / Е. Н. Варуха // Сварочное производство. – 2012. – № 2. – С. 3–8.*

10. *Особенности* расплавления электрода при дуговой сварке сталей / В. Н. Сидорец, А. М. Жерносеков, И. В. Пентегов, О. И. Петриенко // *Электротехника і електромеханіка*. – 2013. – № 2. – С. 34-37.

11. *DP One Drop per Pulse Transfer* [Электронный ресурс] – Режим доступа : <http://www.youtube.com/watch?v=r9ixn3p5az4>.

12. *MIG Flux Cored Welding with High Speed Camera – Photron SA5* [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.youtube.com/watch?v=MRIGks3gxG0&feature=related>.

13. *Photron Highspeed Movie Schweißen, Impulslichtbogen* [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.youtube.com/watch?v=DVLhZxvzYzc&feature=relmfu>.

14. *Welding with Cavitar CAVILUX HF – High Speed Movie* [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.youtube.com/watch?v=je8VghtYo5o&list=PL10AE97B5D796F606>.

15. *Laser Illuminated Weld* [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.youtube.com/watch?v=AU8X4MxcGJ4>.

УДК 621.791:666.1.037.42

Л.Я. Березін, канд. техн. наук

Т.Р. Ганєєв, канд. техн. наук

Чернігівський національний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

ОСОБЛИВОСТИ ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ ВУЗЛІВ МІДЬ-АЛЮМІНІЙ-СИТАЛ

Л.Я. Березин, канд. техн. наук

Т.Р. Ганеев, канд. техн. наук

Черниговский национальный технологический университет, г. Чернигов, Украина

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ УЗЛОВ МЕДЬ-АЛЮМИНИЙ-СИТАЛЛ

Leonid Berezin, PhD in Technical Sciences

Timur Hanieiev, PhD in Technical Sciences

Chernihiv National Technological University, Chernihiv, Ukraine

FEATURES OF WELDING TECHNOLOGY OF COPPER-ALUMINUM-SITALL UNITS

Запропоновано особливості технології виготовлення у твердій фазі вузлів мідь-алюміній-ситал з використанням дифузійного зварювання у вакуумі та зварювання в електричному полі.

Ключові слова: технологія, зварювання, тверда фаза, мідь, алюміній, ситал.

Предложены особенности технологии изготовления в твердой фазе узлов медь-алюминий-ситалл с использованием диффузионной сварки в вакууме и сварки в электрическом поле.

Ключевые слова: технология, сварка, твердая фаза, медь, алюминий, ситалл.

Are offered features manufacturing technology nodes to the solid phase copper-aluminum-sitall using diffusion welding in vacuo and welding in the electric field.

Key words: technology, welding, solid phase, copper, aluminum, glass ceramics.

Постановка проблеми. У деяких сучасних електронних та іонних приладах є необхідність отримання прецизійних вузлів при температурах, що не перевищують задану межу. Наприклад, приєднання мідних анодів до ситалового корпусу лазерних гіроскопів, де температура отримання нероз'ємного з'єднання не повинна перевищувати 723 К. Використання дифузійного зварювання у вакуумі (ДЗВ) не дозволяє вирішити поставлене завдання. Так, для отримання з'єднань неметалів (ситали, кварцове скло, кераміки) з міддю температура зварювання повинна бути значно більше 723 К (у більшості випадків вона більше 1000 К). При цьому товщина міді повинна бути не більше 0,5 мм, що пов'язано з виникненням великих зварювальних напружень. Поява цих напружень в основному викликана різницею в ТКЛР матеріалів, що зварюються, та товщиною металу. Чим вища температура зварювання, тим більше негативний вплив вказаних факторів [1].