



**Volodymyr
O. Lebedev**
В. О. Лебедєв



**Hennadii
V. Zhuk**
Г. В. Жук



**Stanislav
V. Drahan**
С. В. Драган



**Ivan
V. Simutenkov**
И. В. Симутенков



**Sergii
V. Novikov**
С. В. Новиков

УДК 621.791/.792:519.87

MATHEMATICAL SUBSTANTIATION OF DOSED PULSE ELECTRODE WIRE IN MECHANIZED WELDING IN PROTECTIVE GASES

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ДОЗИРОВАННОЙ ИМПУЛЬСНОЙ ПОДАЧИ ЭЛЕКТРОДНОЙ ПРОВОЛОКИ ПРИ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ СВАРКЕ В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ

DOI 10.15589/SMI. 2018.02.16

Volodymyr O. Lebediev

В. А. Лебедев, д-р техн. наук¹

valpaton@ukr.net

ORCID: 0000-0002-0006-3576

Hennadii V. Zhuk

Г. В. Жук, директор²

dktbpaton@gmail.com

ORCID: 0000-0001-6615-8239

Stanislav V. Drahan

С. В. Драган, канд. техн. наук³

stanislav.dragan@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0001-8634-782X

Ivan V. Simutenkov

И. В. Симутенков, канд. техн. наук⁴

simutenkov@inbox.ru

ORCID: 0000-0002-2896-2637

Sergej V. Novikov

С. В. Новиков, инженер¹

novykov76@ukr.net

ORCID: —

¹*Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine, Kyiv*

²*OKTB of Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine, Kyiv*

³*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolayiv*

⁴*Marine Design Engineering Mykolayiv, Mykolayiv*

¹*ІЗС імені Е. О. Патона НАН України, г. Київ*

²*ГП «ОКБ ІЗС імені Е. О. Патона НАН України», г. Київ*

³*Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, г. Ніколаєв*

⁴*ООО «Марин Дизайн Інжиніринг Ніколаєв», г. Ніколаєв*

Abstract. The development of a physic-mathematical model of the process of forming a drop and transferring it through an arc during welding with pulsed feed of an electrode wire is presented. It is shown that the process can be divided into three stages: I — arc burning in the interelectrode space at a zero value of the electrode wire feed rate. At this stage, as a result of electrode melting, the resulting drop makes chaotic movements along the end of the electrode wire. The length of the arc increases, the forming drop is removed from the bath, and thus prevents the possibility of an accidental short circuit of the arc gap; II — movement of the drop formed at stage I, in the direction of the weld pool to a short circuit between the gap and III — flow of the drop into the weld pool during the short circuit time. At this stage, the short circuit continues until the moment of explosion of the liquid metal jumper with a fixed electrode wire. The duration of each stage of the process is determined analytically taking into account the physicomechanical characteristics of the electrode materials, the geometric parameters of the near-electrode areas of the arc, and the welding conditions. The developed mathematical model is the basis for the design of the device for pulsed dosed supply of electrode wire and the drive control algorithm using reverse information links on the parameters of the arc process. A distinctive feature of the device is the use of the original sensor to measure the current value of the welding current used to generate a drive control signal for the dosed feed of the electrode wire. Experimental testing of the drive of the pulsed feed of the electrode wire according to the proposed algorithm by recording oscillograms of the current and voltage of the arc showed the possibility of obtaining a more stable transfer process of the electrode metal with regular short circuits in mechanized CO₂ welding, compared to the unmanaged.

Keywords: arc welding; pulse dosed feed; analytical definition of time; process stages, mathematical model.

Аннотация. Представлена разработка физико-математической модели процесса формирования капли и переноса ее через дугу при сварке с импульсной подачей электродной проволоки. Показано, что процесс может быть разбит на три стадии: I — горение дуги в межэлектродном пространстве при нулевом значении скорости подачи электродной проволоки. На этой стадии в результате оплавления электрода образующаяся капля совершает хаотичные перемещения по торцу электродной проволоки. Длина дуги при этом увеличивается, формирующаяся капля удаляется от ванны, и тем самым предотвращается возможность случайного короткого замыкания дугового промежутка; II — перемещение капли, сформированной на стадии I, в направлении сварочной ванны до короткого замыкания междугового промежутка и III — перетекание капли в сварочную ванну в течение времени короткого замыкания. На этой стадии короткое замыкание продолжается до момента взрыва жидкой металлической перемычки при неподвижной электродной проволоке. Продолжительность каждой стадии процесса определена аналитически с учетом физико-механических характеристик электродных материалов, геометрических параметров приэлектродных областей дуги и режимов сварки. Разработанная математическая модель положена в основу конструкции устройства импульсной дозированной подачи электродной проволоки и алгоритма управления приводом с использованием обратных информационных связей по параметрам дугового процесса. Отличительной особенностью устройства является применение оригинального датчика для измерения текущего значения сварочного тока, используемого для формирования сигнала управления приводом дозированной подачи электродной проволоки. Экспериментальная проверка работы привода импульсной подачи электродной проволоки по предложенному алгоритму путем записи осциллограмм тока и напряжения дуги показала возможность получения более стабильного, по сравнению с неуправляемым, процесса переноса электродного металла с регулярными короткими замыканиями при механизированной сварке в CO_2 .

Ключевые слова: дуговая сварка; импульсная дозированная подача; аналитическое определение времени; стадии процесса; математическая модель.

Анотація. Подана розробка фізико-математичної моделі процесу формування краплі і перенесення її через дугу при зварюванні з імпульсною подачею електродного дроту. Показано, що процес може бути розбитий на три стадії: I — горіння дуги в міжелектродному просторі при нульовому значенні швидкості подачі електродного дроту. На цій стадії в результаті оплавлення електроду крапля, що утворюється, здійснює хаотичні переміщення по торцю електродного дроту. Довжина дуги при цьому збільшується, крапля, що формується, віддаляється від ванни і тим самим запобігає можливості випадкового короткого замикання дугового проміжку; II — переміщення краплі, сформованої на стадії I, у напрямі зварювальної ванни до короткого замикання міждугового проміжку і III — перетікання краплі в зварювальну ванну впродовж часу короткого замикання. На цій стадії коротке замикання триває до моменту вибуху рідкої металевої перемички при нерухомому електродному дроті. Тривалість кожної стадії процесу визначена аналітично з урахуванням фізико-механічних характеристик електродних матеріалів, геометричних параметрів приелектродних областей дуги і режимів зварювання. Розроблена математична модель покладена в основу конструкції пристрою імпульсної дозованої подачі електродного дроту та алгоритму керування приводом з використанням зворотних інформаційних зв'язків за параметрами дугового процесу. Відмітною особливістю пристрою є застосування оригінального датчика для вимірювання поточного значення зварювального струму, використовуваного для формування сигналу керування приводом дозованої подачі електродного дроту. Експериментальна перевірка роботи приводу імпульсної подачі електродного дроту за запропонованим алгоритмом шляхом запису осцилограм струму і напруги дуги показала можливість отримання стабільнішого, в порівнянні з некерованим, процесу перенесення електродного металу з регулярними короткими замиканнями при механізованому зварюванні в CO_2 .

Ключові слова: дугове зварювання; імпульсна дозована подача; аналітичне визначення часу; стадії процесу; математична модель.

References

- [1] Lankin, Yu. N. Avtomaticheskoe upravlenie protsessom svarki plavyaschimsya elektrodom v SO_2 s periodicheskimi zamykaniyami dugovogo promezhutka (Obzor) / Yu. N. Lankin // Avtomaticheskaya svarka. 2007. No 1. Pp. 3–10.
- [2] Lebedev, V. A. Tehnologicheskie harakteristiki avtomaticheskoy naplavki pod flyusom s vyisokochastotnyimi kolebaniyami elektroda / V. A. Lebedev, S. V. Dragan, Zh. G. Goloborodko i dr. // Avtomaticheskaya svarka. 2014. No 8. Pp. 35–38.
- [3] Morozov, V. P. Analiz usloviy formirovaniya izmelchennoy struktury pri kristallizatsii metalla svarочноy van-nyi s nalozheniem vneshnih periodicheskikh vozmuscheniy / V. P. Morozov // Izvestiya Vysshih Uchebnykh Zavedeniy. Mashinostroyeniye. 2006, No 8. Pp. 41–54.
- [4] Potapevskiy, A. G. Svarka staley v zaschitnykh gazakh plavyaschimsya elektrodom. Tehnika i tehnologiya budushchego: monografiya / A. G. Potapevskiy, Yu. N. Saraev, D. A. Chinahov. Tomsk: Izd-vo Tomskogo politehnicheskogo universiteta, 2012. 208 p.

- [5] Gulakov, S. V. Issledovanie prichin razbryzgvaniya metalla pri svarke v srede SO₂ / S. V. Gulakov, V. V. Burlaka, O. V. Harlanov // *VIIsnik DonbaskoYi mashinobudIvnoYi akademIYi*. 2014. No 1 (32). Pp. 188–192.
- [6] Lebedev, V. K. Tendentsii razvitiya istochnikov pitaniya i sistem upravleniya (po materialam patentov USA) / V. K. Lebedev // *Avtomaticheskaya svarka*. 2004. No 1. Pp. 40–48.
- [7] Lebedev, V. A. Automatic submerged-arc welding with pulsed electrode wire feed using a stepping motor / V. A. Lebedev, S. V. Dragan, K. K. Trunin // *Welding International*. 2017. Vol. 31. No 2. Pp. 145–150. DOI: 10.1080/09507116.2016.1223917.
- [8] Lebedev, V. A. Sovremennoe mehanizirovannoe oborudovanie dlya svarki i naplavki i ego tehniko-tehnologicheskie vozmozhnosti / V. A. Lebedev, S. Yu. Maksimov. K.: Osnova. 2012. 392 p.
- [9] Solodskiy, S. A. Razrabotka avtomatizirovannoy sistemy dlya svarki v CO₂ s impulsnoy podachey provoloki i modulyatsiey svarochnogo toka / S. A. Solodskiy. Avtoref. kand. diss. Chelyabinsk: 2010. 20 p.
- [10] Tewari, S. P. Effects of Oscillation on Impact Property of Weldments / S. P. Tewari // *ISIJ International*. 1999. Vol. 39 (8). Pp. 809–812. DOI: 10.2355/isijinternational.39.809.
- [11] Abu-Aesh, M. Welding of fully — Austenitic stainless steel using pcgtaw process; Part I: Bead structure / M. Abu-Aesh, M. Taha, A. El-Sabbagh, L. Dorn // *Journal of Manufacturing Processes*. 2019, Volume 38. Pp. 21–29. DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.12.037.
- [12] Morozov, V. P. Rol vyideleniya skryitogo tepla v upravlenii strukturoobrazovaniiem protsessa kristallizatsii metalla rasplavlennoy vanniy pri svarke / V. P. Morozov // *Inzhenernoe obrazovanie (Elektronnyy zhurnal)*. 2011, No 11.
- [13] Getskin, O. B. Modelirovanie protsessa perenosa elektrodnoogo metalla pri svarke s korotkimi zamykaniyami / O. B. Getskin, V. A. Erofeev, S. I. Poloskov // *Avtomaticheskaya svarka*. 2009, No 2. Pp. 16–21.
- [14] Lebedev, V. A. Sposoby upravleniya podachey elektrodnoy provoloki pri dugovoy mehanizirovannoy svarke i naplavke / V. A. Lebedev, G. V. Zhuk, S. V. Dragan // *ZNP NUK*. 2017, No 4. Pp. 43–52.
- [15] Zhao, Y. Effect of pulsing parameters on drop transfer dynamics and heat transfer behavior in pulsed gas metal arc welding / Y. Zhao, P.-S. Lee, H. Chung // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019, Volume 129. Pp. 1110–1122. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.10.037.
- [16] Paton, B. E. Self-regulation of the arc in consumable electrode welding / B. E. Paton, S. Y. Maksimov, V. S. Sidoruk, Y. N. Saraev // *Welding International*. 2015. Vol. 29. No. 12. Pp. 956–962. DOI: 10.1080/09507116.2015.1012381.
- [17] Lenivkin, V. A. Tehnologicheskie svoystva svarochnoy dugi v zaschitnykh gazakh / V. A. Lenivkin, N. G. Dyurgerov, H. N. Sagirov. M.: Mashinostroenie, 1989. 264 p.
- [18] Getskin, O. B. Fiziko – matematicheskaya model sistemy «istochnik pitaniya — duga» dlya svarki plavyaschimysya elektrodom v zaschitnykh gazakh / O. B. Getskin, S. I. Poloskov, V. A. Erofeev, O. P. Vitko // *Tyazheloe mashinostroenie*. 2008, No 6. Pp. 18–20.
- [19] Ryikalin, N. N. Raschyoty teplovykh protsessov pri svarke / N. N. Ryikalin. M.: Gosudarstvennoe Nauchno — Tehnicheskoe Izdatelstvo Mashinostroitelnoy Literatury. 1951. 190 p.
- [20] Zaruba, I. I. Priroda korotkikh zamykaniy dugi pri svarke v uglekislom gaze / I. I. Zaruba // *Avtomaticheskaya svarka*. 1973, No 5. Pp. 14–17.
- [21] Leskov, G. I. Elektricheskaya svarochnaya duga / G. I. Leskov. M.: Mashinostroenie, 1970. 335 p.

Постановка задачи. Современная мировая тенденция развития технологии машиностроения поставила в ряд актуальных проблем экономию ресурсов и энергии. Одно из приоритетных направлений решения этой проблемы — создание новых или доработка старых технологий, в том числе на основе дуговых сварочных процессов. При этом важнейшим фактором, который определяет технологические характеристики и области применения дуговой сварки и наплавки механизированными способами, является управление переносом электродного металла в сварочную ванну и формирование структуры сварного шва под воздействием внешних возмущающих факторов [1, 2, 3].

Проблеме управления переносом электродного металла при сварке в защитных газах посвяще-

но достаточно много технической литературы [1, 4, 5], но по-прежнему актуальными остаются задачи, связанные со снижением потерь электродного металла, улучшением условий формирования наплавленного валика, обеспечением качественного формирования сварных соединений, особенно выполняемых в положениях, отличных от нижнего, снижением затрат на последующую обработку шва и др.

Анализ последних исследований и публикаций. Решение задач расширения технологических возможностей механизированной сварки в защитных газах путем воздействия на процесс переноса металла через дуговой промежуток достигается применением способов и средств, обеспечивающих программное управление параметрами режима

дуговой сварки, в частности скоростью подачи электродной проволоки. С этой целью на практике уже давно используются методы с модуляцией режимов в различной технической реализации, но ни один из существующих методов управления не является достаточно универсальным [6, 7, 8, 9]. Продолжается поиск новых, более эффективных, способов влияния на каплю электродного металла, в том числе с управляемым энерговыделением в металлическую ванну [10, 11, 12]. При этом, перспективным направлением можно считать использование импульсных алгоритмов управления механизмом подачи сварочной проволоки, обеспечивающих дозированную подачу на основе информации о времени формирования на торце электродной проволоки капли металла, перехода капли в сварочную ванну и времени горения дуги между короткими замыканиями межэлектродного промежутка. Разработка расчетной методики определения указанных временных интервалов обуславливает актуальность решения поставленной проблемы.

Для механизированной и автоматической сварки плавящимся электродом разработано много перспективных способов сварки с целенаправленными воздействиями на каплю электродного металла при переходе в сварочную ванну [2, 13, 14, 15]. Однако эффективная реализация предложенных способов сварки с управляемым каплепереносом электродного металла стала возможной лишь на рубеже прошлого и нынешнего столетий, благодаря развитию микропроцессорной техники и созданию мощных транзисторных ключей, позволяющих осуществлять быструю коммутацию сварочного тока по сложному алгоритму управления [1, 7, 16].

К числу наиболее перспективных способов управления переносом электродного металла при механизированных дуговых процессах — сварке и наплавке — относятся способы с импульсной подачей электродной проволоки, для которых создана научная база и соответствующие конструкторские разработки [1, 4, 8]. Так, например, в ГП ОКБТ ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины разработано несколько новых вариантов построения систем управления переносом электродного металла с использованием импульсных алгоритмов воздействия на систему подачи электродной проволоки при механизированной дуговой сварке. Сущность их, в основном, сводится к следующему:

- использование информационной обратной связи по току сварки;
- использование информационной обратной связи по току сварки с дополнительной низкочастотной модуляцией скорости подачи электродной проволоки;
- использование информационной обратной связи по напряжению сварочной дуги.

Для принятия решения по использованию того или иного способа управления переносом электродного металла следует учитывать эффективность и целесообразность метода, затраты на его реализа-

цию при серийном производстве или при модернизации уже имеющегося на предприятии оборудования [4, 7, 9].

Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы. Большинство способов и методов, обеспечивающих условия переноса электродного металла, достаточно полно исследованы и успешно реализованы на производстве. Вместе с тем, в технической литературе ограниченно представлены сведения о применении оборудования с использованием обратных информационных связей по параметрам дугового процесса для импульсного воздействия на перенос электродного металла. Это связано, по нашему мнению, с еще недостаточным математическим описанием процесса переноса металла при дозированной импульсной подаче электродной проволоки [1, 9, 12].

ЦЕЛЬ СТАТЬИ — разработка основ математической модели процесса управления переносом металла через дугу при сварке в CO_2 с дозированной импульсной подачей электродной проволоки и использованием обратных информационных связей по параметрам дугового процесса.

Методы, объект и предмет исследования. *Объектом исследований* является процесс переноса электродного металла через дуговой промежуток с периодическими короткими замыканиями (КЗ) при механизированной сварке в защитных газах электродными проволоками диаметром 0,5...1,6 мм короткой дугой с напряжением 15...28 В.

Предмет исследований — установление аналитических зависимостей между параметрами режима дозированной импульсной подачи электродной проволоки с длительностью стадий процесса каплепереноса.

При обычном процессе сварки, с неуправляемым переносом металла, скорость подачи электродной проволоки постоянна, а скорость ее плавления изменяется. Поэтому торец электрода с каплей приближается к сварочной ванне (длина дуги и ее напряжение уменьшаются) до короткого замыкания. Частота периодических замыканий при этом изменяется в пределах 90...450 раз в секунду.

Во время КЗ сварочный ток резко возрастает, увеличивается сжимающее действие электромагнитных сил, в результате чего разрывается перемычка жидкого металла между электродом и изделием и капля расплавленного электродного металла переходит в сварочную ванну.

После каждого КЗ силой поверхностного натяжения расплавленный металл на торце электрода снова стягивается в каплю. В результате длина и напряжение дуги становятся максимальными [8]. Процесс формирования капли и перенос ее через дугу можно рассматривать как стохастичный. Для описания и анализа процессов переноса электродного металла используют данные о параметрах дугового процесса, полученных при записи осциллограмм тока

и напряжения с помощью, например, электронного USB-осциллографа IRIS [2]. На рис. 1 представлены осциллограммы параметров режима механизированной сварки в CO_2 с постоянной скоростью подачи электродной проволоки, иллюстрирующие описанный процесс.

Импульсно-дуговая сварка обеспечивает программное управление каплепереносом на основе использования математических моделей процесса. Для возможности математического моделирования и разработки алгоритма управления некоторые исследователи выделяют две главные фазы микроцикла переноса капли металла через дуговой промежуток — фазу горения дуги и фазу КЗ — с разбивкой их на несколько стадий: I — плавление электрода и формирование капли; II — успокоение капли; III — КЗ и начало перетекания капли в ванну; IV — окончание перетекания; V — разрыв перемычки расплава между электродом и ванной и возбуждение дуги [1].

Аналогичный подход к исследованию процесса каплепереноса металла при импульсной подаче электродной проволоки использован авторами и в данной работе. При этом отдельные аналитические зависимости для описания динамики капли заимствованы из [17, 18, 19, 20], а численные данные, характеризующие материалы электродов и параметры приэлектродных областей дуги, приняты по [2, 16, 21].

Основной материал. В основу разработки способа управления каплепереносом при импульсной подаче электродной проволоки положена гипотеза о трехстадийном протекании процесса с возможностью аналитического определения продолжительности каждой стадии.

Стадия I — горение дуги в межэлектродном пространстве при нулевом значении скорости пода-

чи электродной проволоки. На этой стадии электрод оплавляется, образуется капля, которая совершает хаотичные перемещения по торцу электродной проволоки. Длина дуги увеличивается, формирующаяся капля удаляется от ванны, и тем самым предотвращается возможность случайного КЗ дугового промежутка. Вместе с тем, по мере увеличения объема и, следовательно, массы капли, скорость её движения вверх замедляется. Длительность стадии I определяется временем t_1 — от момента начала формирования капли до момента начала образования «шейки» расплавленного металла между каплей и торцом электродной проволоки (рис. 2).

Эта стадия процесса описывается уравнением динамики капли [13]:

$$m_k \frac{d^2 Z_k}{dt^2} = F_\sigma + F_l + F_j, \quad (1)$$

где m_k — масса капли, кг; Z_k — расстояние от центра масс капли до торца электродной проволоки, м; F_σ — сила поверхностного натяжения, Н; F_l — аксиальная составляющая электромагнитной силы, Н; F_j — сила реактивного давления паров, Н.

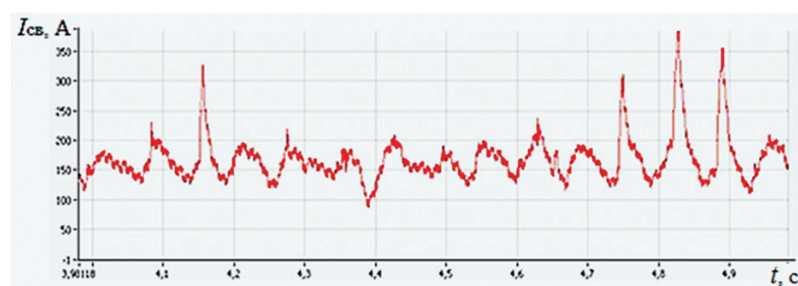
Силы, действующие на каплю, рассчитаем следующим образом:

$$F_\sigma = (\pi D_k - 12 Z_k) \sigma,$$

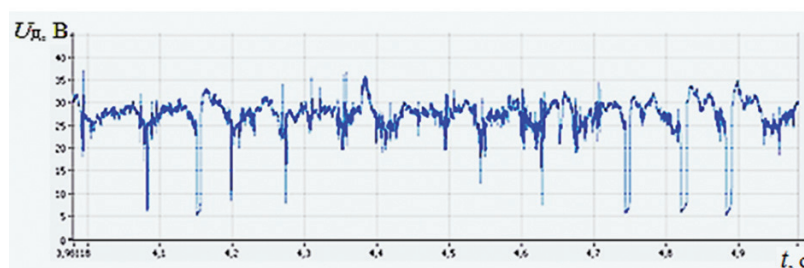
где D_k — диаметр капли, м; σ — коэффициент поверхностного натяжения на границе капли с электродом, Н/м;

$$F_l \approx k I^2 \left(\frac{r_3}{r_k} - 1 \right),$$

где $k = 1,02 \cdot 10^{-5}$; I — ток дуги, А; r_3 , r_k — радиусы поперечного сечения электродной проволоки и капли соответственно, м;



а)



б)

Рис. 1. Реальные осциллограммы сварочного тока (а) и напряжения на дуге (б) при сварке с постоянной скоростью подачи электродной проволоки диаметром $d_3 = 1,2$ мм (неуправляемый процесс переноса электродного металла)

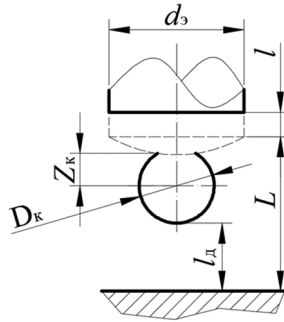


Рис. 2. Соотношение длин участков межэлектродного промежутка при формировании капли

$$F_j = \frac{4Aj^2}{\pi d_3^2},$$

где A — постоянный безразмерный коэффициент, учитывающий характеристики материалов электродов и параметры приэлектродных областей дуги [21]; j — плотность тока дуги, A/m^2 ; d_3 — диаметр электродной проволоки, м.

Если считать, что в начальный момент времени центр тяжести формирующейся капли находится на границе между торцом электродной проволоки и сварочной дугой и по мере роста объема капли перемещается вдоль оси проволоки, то момент времени начала формирования «шейки» будет определяться таким положением капли, когда её центр тяжести пройдет расстояние $Z_k = \frac{D_k}{12}$ [18].

Массу капли m_k и скорость плавления электрода $\omega_{пл}$ определим по известным зависимостям [19]:

$$m_k = \frac{q_{эф} V_k}{\omega_{пл} F_3 (S_k - S_T)}, \quad (2)$$

где $q_{эф} = \eta IU_d$ — эффективная тепловая мощность дуги, Вт (тут η — эффективный К.П.Д. процесса нагрева дугой, U_d — напряжение на дуге, В); V_k — объем капли, m^3 ; F_3 — площадь поперечного сечения электродной проволоки, m^2 ; $\omega_{пл}$ — скорость плавления электрода, м/с; S_k , S_T — теплосодержание металла капли, нагретой током I до температуры T_k , и торца электрода, нагретого до температуры T_T соответственно, Дж/кг;

$$\omega_{пл} = \frac{q_{эф}}{c_p F_3 (T_k - T_T)}, \quad (3)$$

где c_p — объемная теплоемкость металла электрода, Дж/м³·°C.

Температуру T_T определим по формуле [19]

$$T_T = (B - T_0) e^{\frac{C}{B} j^2 t_1} - B, \quad (4)$$

где B и C — постоянные нагрева электродной проволоки, для постоянного тока $B = (200...240)$ °C, $C = (2,4...3,1)$ м⁴·°C/A²·с; T_0 — начальная температура проволоки, °C; t_1 — время формирования капли, с.

Пренебрегая потерями на испарение, примем одинаковыми массы образовавшейся капли и части электродной проволоки длиной l (см. рис. 3), расплавившейся за время t_1 , т. е.

$$\rho_k \frac{\pi D_k^3}{6} = \rho_3 \frac{\pi d_3^2}{4} l, \quad (5)$$

где ρ_k , ρ_3 — плотность металла капли и электродной проволоки соответственно, кг/м³.

Тогда

$$\frac{d^2 D_k}{dt_1^2} = \frac{1}{D_k^2} \left(\left(\frac{\rho_3 d_3^2}{2\rho_k} \right) \frac{d^2 l}{dt_1^2} - \left(\frac{\rho_3^2 d_3^4}{2\rho_k^2 D_k^3} \right) \left(\frac{dl}{dt_1} \right)^2 \right). \quad (6)$$

Решение системы уравнений (1)–(4), (6) относительно t_1 дает следующий результат:

$$t_1 = \frac{B}{Cj^2} \ln \left(\frac{12F_3^2 c_p (S_k - S_T) (T_k + B) \times \left(F_\sigma + F_l + F_j \right) + \frac{\pi \rho_3^2 d_3^4 q_{эф}^2}{12\rho_k^2 D_k^2}}{(B - T_0) \times \left(\frac{12F_3^2 c_p (S_k - S_T) (F_\sigma + F_l + F_j) - \frac{\pi C j^2 \rho_3 d_3^4 q_{эф} D_k F_3 c_p}{4B\rho_k}}{4B\rho_k} \right)} \right). \quad (7)$$

Стадия II — перемещение капли объемом V_k , сформированной за время t_1 , в сварочную ванну до короткого замыкания дугового промежутка. Продолжительность данной стадии характеризуется временем t_2 , которое можно определить из уравнения

$$\frac{dl_d}{dt_2} = at_2, \quad (8)$$

где l_d — длина дугового промежутка (см. рис. 3), м; a — ускорение, характеризующее инерционные свойства системы подачи электродной проволоки, м/с².

Принимая до начала формирования капли длину дуги L известной величиной, определим расстояние l_d , на которое перемещается капля до короткого замыкания с поверхностью сварочной ванны,

$$l_d = L + l - D_k. \quad (9)$$

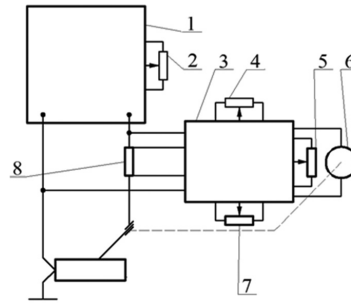


Рис. 3. Принципиальная блок-схема устройства дозированной импульсной подачи электродной проволоки с управлением по параметрам дуги

Из уравнения (5) найдем длину участка l

$$l = \frac{2\rho_k D_k^3}{3\rho_3 d_3^2}. \quad (10)$$

Тогда уравнение (8) примет вид

$$\int_0^{l_a} dl = a \int_0^{t_2} t dt, \quad (11)$$

откуда

$$t_2 = \sqrt{\frac{2}{a} \left(L + \frac{2\rho_k D_k^3}{3\rho_3 d_3^2} - D_k \right)}. \quad (12)$$

Стадия III — короткое замыкание межэлектродного промежутка. На этой стадии короткое замыкание происходит в течение времени t_3 при неподвижной электродной проволоке (скорость подачи равна нулю), т.е. до момента взрыва жидкой металлической перемычки. Время t_3 можно рассчитать по уравнению [20]

$$t_3 = \frac{\pi Q \rho_k d_3^2}{2 \Theta I_{кз} j}, \quad (13)$$

где Q — удельная теплота испарения металла, Дж/кг; Θ — удельное электрическое сопротивление жидкого металла, Ом·м; $I_{кз}$ — сила тока короткого замыкания, А; j — плотность тока в перемычке, А/м².

Таким образом, расчет времени каждой стадии процесса переноса капли, позволяет не только установить общую длительность цикла работы механизма импульсной подачи электродной проволоки, но и управлять рассмотренным процессом путем регулирования скорости подачи электрода с использованием информационной обратной связи по параметрам дуги, что является элементом научной новизны данной работы.

Обсуждение полученных результатов. Представленная математическая модель процесса управляемого переноса электродного металла положена в основу разработки способа импульсной дозированной подачи проволоки, отличительными особенностями которого являются:

– электродная проволока подается со скоростью, изменяемой от установленного начального до ко-

нечного значения с регулируемой во времени остановкой (паузой в движении до окончания перехода капли в сварочную ванну) и последующим возобновлением движения;

– начало цикла изменения скорости подачи электрода синхронизировано с моментом окончания времени перехода капли путем использования информационной обратной связи по параметрам дуги в системе управления электроприводом механизма подачи.

– продолжительность времени остановки (пауза в движении) подачи проволоки определяется суммарным временем формирования капли на торце электрода и переходом ее в сварочную ванну при КЗ межэлектродного промежутка.

Принципиальная блок-схема разработанного в ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины устройства для реализации алгоритма управляемого переноса металла при импульсной дозированной подаче электродной проволоки приведена на рис. 3, циклограмма его работы — на рис. 4.

Работа устройства заключается в следующем. Перед сваркой от источника сварочного тока I в сварочную цепь подается напряжение U_d , устанавливаемое с помощью задатчика 2. На блоке управления электроприводом 3 двигателя 6 механизма подачи электродной проволоки датчиком 5 устанавливается скорость подачи v_3 , датчиками 4 и 7 — соответственно минимальное $I_{св\ min}$ и максимальное $I_{св\ max}$ значения тока $I = I_{св}$, ограничивающие диапазон управления электроприводом (см. рис. 4, а).

В процессе сварки на торце электродной проволоки, подаваемой с установленной скоростью v_3 , формируется капля расплавленного металла. Вследствие роста размеров капли длина межэлектродного промежутка сокращается, вызывая соответствующее снижение напряжения на дуге U_d и возрастание силы сварочного тока $I_{св}$. Текущее значение тока измеряется датчиком 8. В момент времени, соответствующий точке D (см. рис. 4, а), размеры капли становятся такими, что вызывают короткое замыкание межэлектродного промежутка. При этом напряжение на дуге исчезает ($U_d \approx 0$, рис. 4, б), электрическое сопротивление жидкой металлической перемычки (капли) снижается, сварочный ток $I_{св}$ достигает установленного с помощью датчика 7 максимальной величины $I_{св\ max}$ (точка B на рис. 4, а) и электропривод 3 остано-

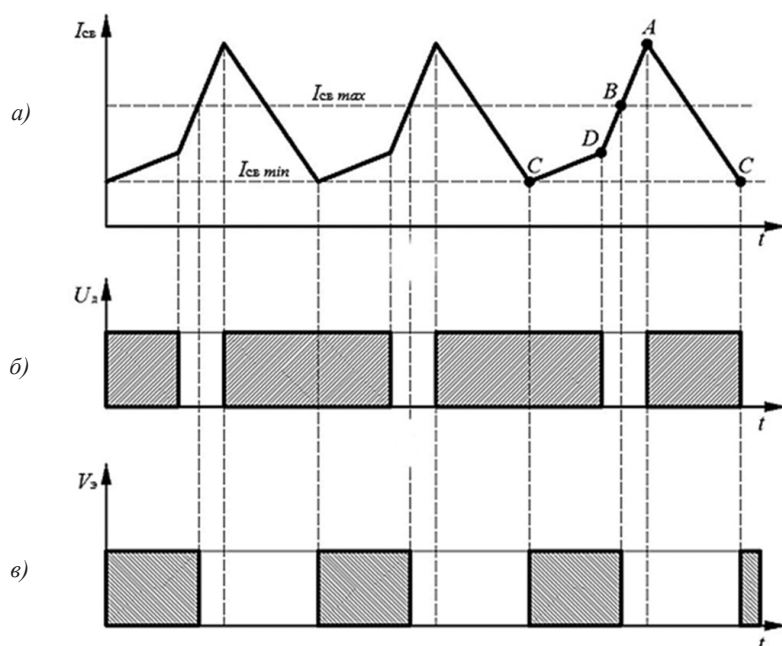


Рис. 4. Схематизированные осциллограммы сварочного тока (а), напряжения на дуге (б) и циклограмма работы электропривода (в) механизма дозированной импульсной подачи сварочной проволоки

ливает двигатель 6 механизма подачи электродной проволоки (см. рис. 4, в).

При достижении сварочным током величины, соответствующей точке А (см. рис. 4, а), жидкая металлическая перемычка разрушается, капля металла переносится в сварочную ванну и восстанавливается дуговой процесс. При этом появляется напряжение на дуге U_d (см. рис. 4, б), а сила сварочного тока $I_{св}$ начинает снижаться пропорционально росту длины дуги.

Пауза (остановка в работе электропривода) в процессе подачи электродной проволоки длится в течение времени, пока сила сварочного тока $I_{св}$ не снизится до установленной с помощью датчика 4 величины $I_{св\ min}$. Затем электропривод снова включается (точ-

ка С на рис. 4, а) цикл работы механизма импульсной подачи электродной проволоки повторяется.

Работа привода дозированной импульсной подачи проволоки по приведенному алгоритму обеспечивает более стабильный, по сравнению с постоянной скоростью подачи, процесс переноса электродного металла с регулярными короткими замыканиями (рис. 5).

Экспериментальная проверка разработанной математической модели путем определения длительности составляющих цикла переноса капли по осциллограмме напряжения (см. рис. 5, б) при сварке проволокой Св-08Г2С диаметром $d_3 = 1,2$ мм показала следующие результаты (табл. 1).

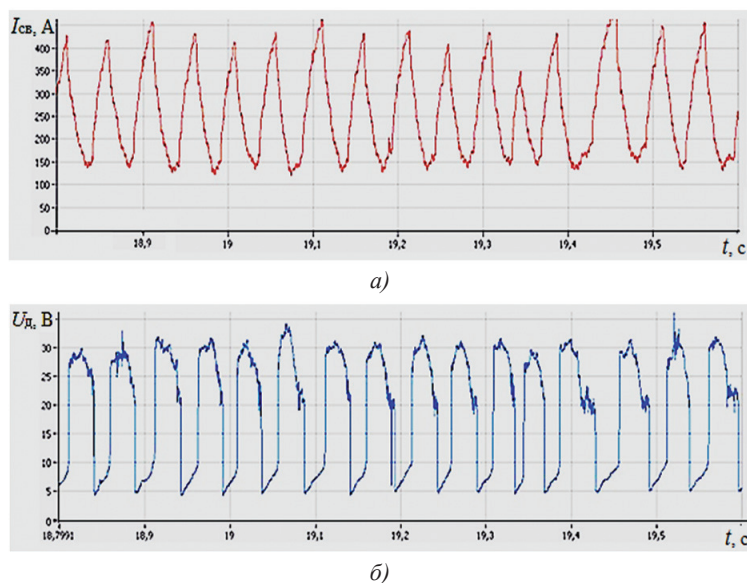


Рис. 5. Реальные осциллограммы сварочного тока (а) и напряжения на дуге (б) при импульсной подаче электродной проволоки с короткими замыканиями межэлектродного промежутка (управляемый процесс переноса электродного металла)

Таблица 1. Оценка точности математической модели

Время, с	t_1	t_2	t_3	$t_{\text{общ}}$
Расчет	0,010	0,012	0,016	0,038
Эксперимент	0,012	0,016	0,020	0,048
Погрешность, %	16,7	25,0	20,0	20,8

Сравнение полученных параметров с характерными для неуправляемого процесса переноса металла при сварке в CO_2 [4], показало, что при импульсной дозированной подаче электродной проволоки общая длительность цикла переноса капли может быть сокращена, что благоприятно скажется на формировании наплавленного валика и будет способствовать повышению производительности сварочного процесса. Также, несмотря на известные результаты исследований формирования структуры при кристаллизации металла сварочной ванны под воздействием внешних периодических возмущений [3, 11, 12], мало изученными остаются вопросы, связанные с влиянием импульсной дозированной подачи электродной проволоки при механизированной сварке в защитных газах на структуру и механические свойства сварных соединений.

Выводы. 1. Процесс переноса металла через дугу

при сварке с короткими замыканиями и импульсной подаче электродной проволоки может быть описан как состоящий из трех стадий: стадия I — горение дуги в межэлектродном пространстве при нулевом значении скорости подачи электродной проволоки; стадия II — перемещение капли, сформированной на первой стадии, в сварочную ванну до короткого замыкания междугового промежутка и стадия III — перетекание расплавленного электродного металла в сварочную ванну за время короткого замыкания межэлектродного промежутка.

2. Разработанная физико-математическая модель, позволяющая рассчитать длительность стадий процесса, подтверждена экспериментально и положена в основу системы управления приводом импульсной дозированной подачи сварочной проволоки при сварке в углекислом газе.

3. Для разработки промышленной технологии сварки программой дальнейших работ предусмотрено проведение исследований по влиянию импульсной дозированной подачи электродной проволоки на производительность сварочного процесса, структуру и механические свойства сварных соединений.

Список литературы

- [1] Ланкин, Ю. Н. Автоматическое управление процессом сварки плавящимся электродом в CO_2 с периодическими замыканиями дугового промежутка (Обзор) / Ю. Н. Ланкин // Автоматическая сварка. 2007. № 1. С. 3–10.
- [2] Лебедев, В. А. Технологические характеристики автоматической наплавки под флюсом с высокочастотными колебаниями электрода / В. А. Лебедев, С. В. Драган, Ж. Г. Голобородько и др. // Автоматическая сварка. 2014. № 8. С. 35–38.
- [3] Морозов, В. П. Анализ условий формирования измельченной структуры при кристаллизации металла сварочной ванны с наложением внешних периодических возмущений / В. П. Морозов // Известия Высших Учебных Заведений. Машиностроение. 2006, № 8. С. 41–54.
- [4] Потапьевский, А. Г. Сварка сталей в защитных газах плавящимся электродом. Техника и технология будущего: монография / А. Г. Потапьевский, Ю. Н. Сараев, Д. А. Чинахов. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. 208 с.
- [5] Гулаков, С. В. Исследование причин разбрызгивания металла при сварке в среде CO_2 / С. В. Гулаков, В. В. Бурлака, О. В. Харланов // Вісник Донбаської машинобудівної академії. 2014. № 1 (32). С. 188–192.
- [6] Лебедев, В. К. Тенденции развития источников питания и систем управления (по материалам патентов США) / В. К. Лебедев // Автоматическая сварка. 2004. № 1. С. 40–48.
- [7] Lebedev, V. A. Automatic submerged-arc welding with pulsed electrode wire feed using a stepping motor / V. A. Lebedev, S. V. Dragan, K. K. Trunin // Welding International. 2017. Vol. 31. No 2. Pp. 145–150. DOI: 10.1080/09507116.2016.1223917.
- [8] Лебедев, В. А. Современное механизированное оборудование для сварки и наплавки и его технико-технологические возможности / В. А. Лебедев, С. Ю. Максимов. К.: Основа. 2012. 392 с.
- [9] Солодский, С. А. Разработка автоматизированной системы для сварки в CO_2 с импульсной подачей проволоки и модуляцией сварочного тока / С. А. Солодский. Автореф. канд. дисс. Челябинск: 2010. 20 с.
- [10] Tewari, S. P. Effects of Oscillation on Impact Property of Weldments / S. P. Tewari // ISIJ International. 1999. Vol. 39 (8). Pp. 809–812. DOI: 10.2355/isijinternational.39.809.
- [11] Abu-Aesh, M. Welding of fully — Austenitic stainless steel using pcgtaw process; Part I: Bead structure / M. Abu-Aesh, M. Taha, A. El-Sabbagh, L. Dorn // Journal of Manufacturing Processes. 2019, Volume 38. Pp. 21–29. DOI: 10.1016/j.jmapro.2018.12.037.
- [12] Морозов, В. П. Роль выделения скрытого тепла в управлении структурообразованием процесса кристаллизации металла расплавленной ванны при сварке / В. П. Морозов // Инженерное образование (Электронный журнал). 2011, № 11.
- [13] Гецкин, О. Б. Моделирование процесса переноса электродного металла при сварке с короткими замыканиями / О. Б. Гецкин, В. А. Ерофеев, С. И. Полосков // Автоматическая сварка. 2009, № 2. С. 16–21.
- [14] Лебедев, В. А. Способы управления подачей электродной проволоки при дуговой механизированной сварке и наплавке / В. А. Лебедев, Г. В. Жук, С. В. Драган // ЗНП НУК. 2017, № 4. С. 43–52.
- [15] Zhao, Y. Effect of pulsing parameters on drop transfer dynamics and heat transfer behavior in pulsed gas metal arc welding / Y. Zhao, P.-S. Lee, H. Chung // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019, Volume 129. Pp. 1110–1122. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.10.037.

- [16] **Paton, B. E.** Self-regulation of the arc in consumable electrode welding / B. E. Paton, S. Y. Maksimov, V. S. Sidoruk, Y. N. Saraev // *Welding International*. 2015. Vol. 29. No. 12. Pp. 956–962. DOI: 10.1080/09507116.2015.1012381.
- [17] **Ленивкин, В. А.** Технологические свойства сварочной дуги в защитных газах / В. А. Ленивкин, Н. Г. Дюргеров, Х. Н. Сагиров. М.: Машиностроение, 1989. 264 с.
- [18] **Гецкин, О. Б.** Физико – математическая модель системы «источник питания — дуга» для сварки плавящимся электродом в защитных газах / О. Б. Гецкин, С. И. Полосков, В. А. Ерофеев, О. П. Витько // *Тяжелое машиностроение*. 2008, № 6. С. 18–20.
- [19] **Рыкалин, Н. Н.** Расчёты тепловых процессов при сварке / Н. Н. Рыкалин. М.: Государственное Научно — Техническое Издательство Машиностроительной Литературы. 1951. 190 с.
- [20] **Заруба, И. И.** Природа коротких замыканий дуги при сварке в углекислом газе / И. И. Заруба // *Автоматическая сварка*. 1973, № 5. С. 14–17.
- [21] **Лесков, Г. И.** Электрическая сварочная дуга / Г. И. Лесков. М.: Машиностроение, 1970. 335 с.

© Колектив авторів

Статтю рекомендує до друку
д-р техн. наук *С. Ю. Максимов*