



МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕНОСА ЭЛЕКТРОДНОГО МЕТАЛЛА ПРИ СВАРКЕ С КОРОТКИМИ ЗАМЫКАНИЯМИ

О. Б. ГЕЦКИН, инж. (НПП «ТехноТрон», г. Чебоксары, РФ),

В. А. ЕРОФЕЕВ, канд. техн. наук (Тульский гос. ун-т, РФ), **С. И. ПОЛОСКОВ**, д-р техн. наук
(НУЦ «Сварка и контроль» при МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва, РФ)

Рассмотрена физико-математическая модель явлений каплепереноса при сварке плавящимся электродом с короткими замыканиями дугового промежутка, учитывающая условия переноса электродного металла и взаимодействия дуги с электрическими параметрами источника питания. Компьютерная программа, реализующая численное решение уравнений модели, позволяет исследовать явления при сварке и обоснованно определять не только технологические параметры процесса, но и технологические требования к конструированию различных видов оборудования для сварки плавящимся электродом.

Ключевые слова: дуговая сварка, плавящийся электрод, защитный газ, явления каплепереноса, виртуальный процесс, источник питания, дуга, дуговой промежуток, короткие замыкания, физико-математическая модель, управляемый каплеперенос

При выполнении неповоротных стыков существуют объективные проблемы обеспечения устойчивого переноса каплей электродного металла в сварочную ванну. Наиболее эффективно этот перенос обеспечивается при сварке с короткими замыканиями (КЗ) дугового промежутка и дополнительными воздействиями на каплю при ее переходе в ванну. Еще в 1960–1970-х годах разработаны различные варианты таких воздействий на капли электродного металла [1–3], однако эффективная реализация предложенных способов сварки с управляемым каплепереносом (УКП) электродного металла стала возможной только в середине 1990-х годов [4, 5] благодаря развитию микропроцессорной техники и созданию мощных транзисторных ключей [6], позволяющих осуществлять быструю коммутацию сварочного тока по сложному алгоритму управления.

До сегодня многие вопросы практической реализации УКП и выработки технологических требований к сварочному оборудованию остаются недостаточно изученными. Это связано с тем, что для изучения быстропротекающих процессов при дуговой сварке плавящимся электродом экспериментальными методами необходимы значительные материальные затраты на проведение исследований, а сама обработка результатов экспериментов характеризуется высокой трудоемкостью. Поэтому наиболее эффективным методом получения необходимых количественных характеристик процесса с УКП является моделирование указанных воздействий и приемов сварки. При этом

под моделированием какого-либо объекта (системы, процесса, явления) обычно понимается воспроизведение и исследование другого объекта, подобного оригиналу, с последующим переносом полученных результатов на моделируемый объект. При этом моделирование должно учитывать как физические явления при сварке, так и математические зависимости при их описании.

Целью работы являлось изучение алгоритмов управления и определение параметров сварки с УКП электродного металла на основе моделирования явлений в фазах КЗ, плавления электрода и формирования капли.

Работами многих авторов, представленными в обзоре [7], разработан «идеальный» цикл сварки с УКЗ, в котором отдельные фазы цикла управляются по собственному алгоритму (рис. 1). Выделены следующие стадии микроцикла переноса капли электродного металла через дуговой промежуток: t_1 — плавление электрода и формирование капли; t_2 — успокоение капли; t_3 — КЗ и начало

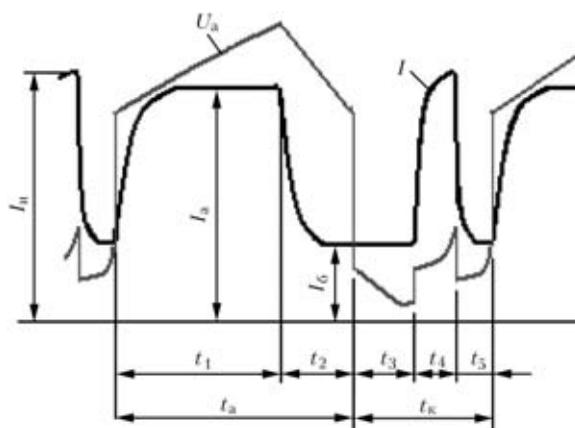


Рис. 1. Осциллограмма тока и напряжения дуги при импульсной дуговой сварке с КЗ (обозначения см. в тексте)



перетекания капли в ванну; t_4 — окончание перетекания; t_5 — разрыв перемычки расплава между электродом и ванной и возбуждение дуги. Стадии t_1, t_2 образуют фазу горения дуги t_a , а t_3-t_5 — фазу КЗ продолжительностью t_k .

Проблемой является определение моментов завершения каждой из перечисленных фаз в ходе сварочного процесса. Наиболее доступными экспериментальными параметрами процесса являются измеряемые при переносе капли в ванну значения тока и напряжения дуги.

Длительность стадии t_1 и ток I_a определяют размер капли, в простейшем случае их задают в зависимости от диаметра и скорости подачи электрода. Момент завершения фазы t_2 легко фиксируется уменьшением напряжения дуги ниже суммы анодного и катодного падений напряжения дуги. Наиболее сложным является определение момента окончания стадии t_3 , так как в этом микроцикле существуют две перемычки, одна в зоне контакта капля-ванна, вторая в зоне капля-проволока. Полагают [8], что за начало стадии t_4 можно принять момент, с которого сопротивление дугового промежутка (или напряжения) начинает возрастать, однако изменением какой из перемычек это обусловлено неочевидно. Еще более сложным является определение момента окончания стадии t_4 , т. е. момента подачи импульса тока I_u для ускорения переноса капли. Признаком начала разрыва перемычки в зоне капля-проволока является быстрое увеличение сопротивления дугового промежутка (или напряжения выше 8...10 В). Описанные стадии УКП реализуются по различным алгоритмам управления [9], в том числе со стабилизацией тока или напряжения в фазе формирования капли, с подачей и без подачи импульса тока в фазе КЗ от отдельного или основного источника.

В данной работе выполнен сравнительный анализ описанных выше вариантов управления на основе моделирования происходящих при этом физических процессов.

Физико-математическая модель. В основу модели положены уравнения, описывающие плавление электродной проволоки дугой с учетом нагрева вылета электрода [10, 11]. Главным отличием созданной модели является возможность наглядного воспроизведения и сравнительный анализ различных алгоритмов импульсного управления переносом капель при КЗ дугового промежутка.

Электрические процессы. При описании электрических процессов учитывали индуктивность L , активное сопротивление R источника и цепи питания дуги, а также сопротивление вылета электродной проволоки $R(T)$.

Ток дуги I_a определяли по ее вольт-амперной характеристике (ВАХ) с учетом зависимости напряжения дуги U_a и ее длины l_a

$$U_a(I_a, l_a) = U_e + l_a \text{ grad } U \left(1 - \frac{l_k}{l_a} \right), \quad (1)$$

где U_e — сумма анодного и катодного падения напряжений на дуге; $\text{grad } U$ — градиент потенциала в столбе дуги; I_k — значение тока, при котором напряжение дуги минимально (ток КЗ).

Сопротивление вылета электрода определяли по распределению температуры в вылете

$$R(T) = \frac{4}{\pi d_f^2} \int_0^{l_e} \rho_e(T_f(z)) dz, \quad (2)$$

где d_f — диаметр электродной проволоки; l_e — длина вылета электродной проволоки от торца токоподводящего мундштука до дуги; $\rho_e(T_f)$ — зависимость удельного сопротивления материала электрода от его температуры T_f ; z — ордината осевого перемещения электродной проволоки и капли в ванну.

Температура металла в вылете определяется с учетом изменения тока дуги во времени

$$T_f = \frac{16}{c\rho(\pi d_f^2)^2} \int_{t-\tau}^t \rho_e(T_f) I_a^2(\tau) d\tau, \quad (3)$$

где $\tau = l_e/v_f$ — время перемещения металла от токоподводящего наконечника на расстояние l_e от его торца; ρ — плотность материала электрода; c — удельная теплоемкость; t — время цикла переноса одной капли электродного металла, состоящее из микроциклов $t_a + t_k$.

Электрические процессы в цепи питания дуги описаны уравнением, которое связывает ток и напряжение в источнике с энергетическими параметрами дуги по условиям коммутации

$$I_a = \frac{1}{L} \int_0^t (U_{x.x} - U_k - R \max(I_u, I_0)) dt, \quad (4)$$

где $U_{x.x}$ — заданное напряжение холостого хода источника; U_k — напряжение ключа K ; I_0 — заданный базовый ток.

Напряжение на ключе изменяется в течение каждой стадии (микроцикла) переноса капли в ванну

$$U_k = \begin{cases} 0 & \text{при } t \in (t_2, t_3) \cup t \in t_5, \\ U_a & \text{при } t \in t_1 \cup t \in t_4. \end{cases} \quad (5)$$

Напряжение на дуговом промежутке в фазе горения дуги определяется ее ВАХ, а в фазе КЗ — падением напряжения на вылете электрода и в перемычках зон капля-ванна и капля-проволока. Общее сопротивление перемычек R_k рассчитывается в соответствии с изменением формы капли



и описывается как функция координаты Z_k центра тяжести капли

$$R_k \approx \rho_k \frac{D}{d_f \sqrt{(D - 2Z_k)(D + d_f - 6Z_k)}}, \quad (6)$$

где ρ_k — удельное сопротивление расплава; D — текущий диаметр капли.

Плавление проволоки и формирование капли. Размер капли определяется скоростью плавления электродного металла v_f зависящей от теплопередачи дуги к капле. При этом тепловая мощность дуги увеличивает среднюю температуру капель со скоростью, равной

$$\frac{dT_k}{dt} = \frac{U_e I_a - \lambda \frac{\pi d_f^2}{D} (T_k - T_L)}{c \rho \frac{\pi D^3}{6}}, \quad (7)$$

где λ — теплопроводность металла электрода; T_L — температура плавления; T_k — текущая средняя температура капли.

Одновременно в зоне капля–электродная проволока возникает тепловой поток мощностью

$$P_f = \pi d_f^2 \frac{2\lambda}{D} (T_k - T_f). \quad (8)$$

Этот тепловой поток вызывает дополнительное плавление электродной проволоки с нарастанием текущего объема капли V_k со скоростью

$$\frac{dV_k}{dt} = \frac{P_f}{c \rho (T_L - T_f) + H_L}, \quad (9)$$

где H_L — удельная теплота плавления.

Текущий диаметр капли определяется ее объемом

$$D = \sqrt[3]{\frac{6}{\pi} V_k}. \quad (10)$$

Формирование дугового промежутка. Длину дугового промежутка l_a определяли по минимальному расстоянию между поверхностями сварочной ванны и капли на электроде. Так как параметр l_a зависит от скорости подачи электрода v_f и диаметра D капли, то верно соотношение

$$\frac{dl_a}{dt} = -\frac{dD}{dt} - v_f \quad (11)$$

Перенос капли. Длительность стадии t_1 микроцикла переноса капли задается, а t_2 определяется по значению длины дуги, которое в момент КЗ равно нулю и определяется расположением центра тяжести капли. Расположение центра масс капли Z_k зависит от ее формы и определяется уравнением

$$\frac{d^2 Z_k}{dt^2} = \frac{m_k}{F_\sigma + F_I + m_k g}, \quad (12)$$

где $m_k = \frac{1}{6} \pi D^3 \rho$ — масса капли; $F_\sigma = \pi D \sigma (1 - Z_k/Z_2)$ — сила поверхностного натяжения; $F_I \approx k I_D^2 (Z_k/Z_1 - 1)$ — аксиальная составляющая электромагнитной силы, направление и значение которой зависит от формы капли и кривизны поверхности ванны при их слиянии.

Совместное решение системы уравнений (1)...(12) позволяет виртуально воспроизвести перенос капель расплава с электрода в ванну при КЗ. Для численного решения уравнения (1)...(12) преобразованы в систему обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка, разрешенных относительно производных. Решение всех уравнений этой системы выполнялось в общем цикле времени с шагом менее $dt = 10^{-5}$ с, что позволило детально воспроизвести быстротекущие процессы при переносе капли с электрода в сварочную ванну, от первоначального касания электрода изделия до достижения установившегося состояния.

Результаты моделирования. Моделирование выполнено для случая сварки в CO_2 проволокой диаметром 1,2 мм и скорости ее подачи 120 мм/с при питании от источника с наклоном ВАХ 0,08 В/А с индуктивностью сварочной цепи 4 мГн, что соответствует параметрам установки УАСТ-1 для автоматической орбитальной сварки магистральных трубопроводов [12]. Оно позволило определить изменение параметров процесса переноса капли в ванну на стадиях КЗ, плавления электрода и формирования капли при разных алгоритмах управления каплепереносом.

Параметры процесса в разных вариантах управления (напряжение холостого хода источника питания $U_{x,x}$, базовый ток I_6 , длительность импульса тока плавления τ_1 и длительность задержки включения тока τ_5 после начала КЗ) приведены в табл. 1. В табл. 2 представлены основные результаты расчета характеристик процесса при разных алгоритмах управления. Варианты управления соответствуют алгоритмам управления, приведенным в табл. 1.

На рис. 2–5 показаны результаты имитации в виде графиков изменения тока, напряжения и длины дуги в течение нескольких периодов переноса электродного металла в сварочную ванну (диаметр электродной проволоки 1,2 мм, скорость подачи 120 мм/с при питании от источника с наклоном ВАХ 0,08 В/А, длительность импульса 0,02 с).

Полученные результаты показали, что при импульсном управлении процессом ток дуги, период



Таблица 1. Заданные значения параметров процесса сварки с КЗ при разных алгоритмах управления

№ п/п	Алгоритм управления	$U_{х.х}, В$	$I_a, А$	$I_k, А$	$\tau_1, мс$	$\tau_5, мс$	$I_6, А$
1	С заданным напряжением источника и полным ограничением тока КЗ	35	—	—	20	0,5	40
2	С заданным напряжением источника и импульсом при КЗ	35	—	—	20	0,5	40
3	С заданным значением токов импульсов плавления и КЗ	—	250	350	—	—	—
4	Неуправляемый каплеперенос электродного металла	30	—	—	—	0	0

Таблица 2. Параметры процесса, полученные при моделировании переноса электродного металла с УКП

Вариант управления	$I_{max}, А$	$I_{cp}, А$	$l_a^{max}, мм$	$l_a^{cp}, мм$	$t_k, мс$	Период переноса капель, мс	$D, мм$	$T, °C$	T подогрева вылета, $°C$
1	270	172	0,9	0,48	5,6	33	1,65	1780	330
2	265	185	0,9	0,47	5,4	33	1,65	1750	370
3	350	184	0,94	0,50	5,2	32	1,64	1737	400
4	210	198	0,62	0,19	4,0	16	1,25	1680	372

переноса капель с электрода в сварочную ванну, размер капель и максимальная длина дуги существенно больше, чем в непрерывном режиме при отсутствии управления (табл. 2), однако средние значения тока дуги различаются мало. Наблюдается существенное увеличение размера капель и максимальной длины дуги. Это обусловлено увеличением тока дуги в фазе формирования капли, которое является следствием больших значений напряжения холостого хода источника питания при импульсном управлении. Увеличение периода переноса капель и длительности КЗ является прямым следствием возрастания максимальной длины дуги, диаметра и массы капель. При ограничении тока на весь период КЗ длительность за-

мыкания несколько больше, чем при подаче импульса тока в заключительной стадии КЗ.

Анализ технологических особенностей процесса сварки с УКП. Главным недостатком неуправляемого процесса дуговой сварки с КЗ является очень узкий диапазон параметров процесса, в котором реализуется устойчивый процесс переноса электродного металла в сварочную ванну [13]. При импульсном управлении длительность формирования капли задана, что позволяет управлять процессом формирования капли, регулируя ток импульса. При этом имеется возможность использования эффекта саморегулирования дуги, если задавать не ток импульса, а напряжение источника питания дуги. Это обеспечивает автоматическое изменение тока при изменении ско-

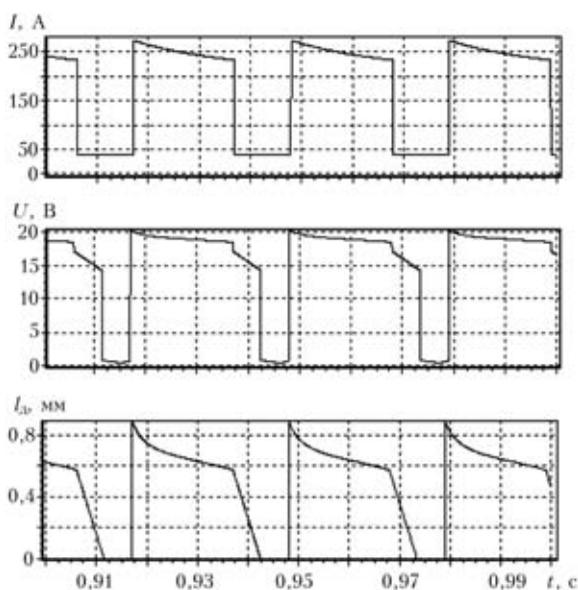


Рис. 2. Результат имитации процесса сварки с КЗ при задании напряжения холостого хода источника питания и полном ограничении тока КЗ ($U_{х.х} = 35 В$)

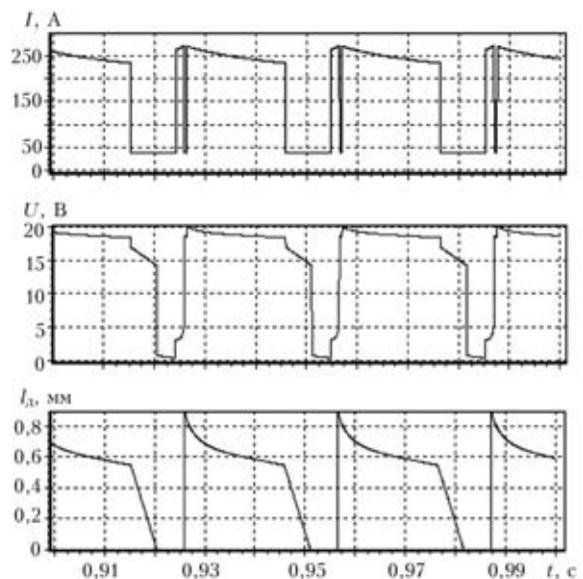


Рис. 3. Результат имитации процесса с КЗ при задании напряжения холостого хода источника питания и подаче импульса тока в завершающей фазе КЗ (задержка импульса тока после КЗ 0,0005 с)

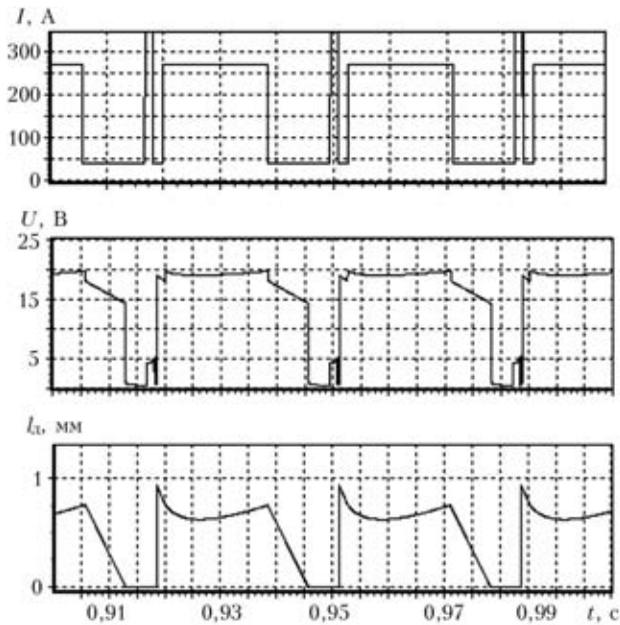


Рис. 4. Результат имитации процесса сварки с КЗ при задании тока в фазе образования капли и тока в завершающей фазе КЗ (амплитуда импульса тока на стадии формирования капли 260 А, на стадии успокоения 40 А, при КЗ 350 А)

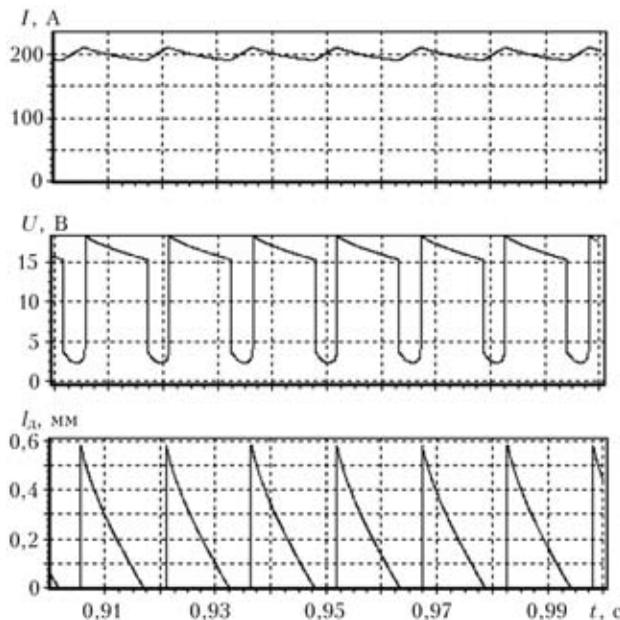


Рис. 5. Результат имитации неуправляемого процесса дуговой сварки с периодическими КЗ ($U_{xx} = 30$ В)

рости подачи электродной проволоки, а также ослабляет влияние нестабильности характеристик электродной проволоки на длину дуги на размер и период следования капель. Последнее, в свою очередь, улучшает стабильность формирования и повышает качество сварных соединений.

Указанные преимущества расширяют область параметров, в которых реализуется процесс сварки с периодическими КЗ. Ограничением длительности и амплитуды импульса тока в фазе

формирования капли является ее максимальный размер, при котором капля удерживается на электроде. Максимальное значение напряжения источника питания не ограничено, а минимальный ток дежурной дуги ограничен только условием поддержания сформировавшейся капли в расплавленном состоянии.

Выводы

1. Для изучения алгоритмов управления и определения параметров УКП электродного металла разработана физико-математическая модель процесса дуговой сварки в защитных газах в системе источник питания–дуга, которые учитывают быстропротекающие явления в фазах КЗ, плавления электрода и формирования капли при сварке плавящимся электродом.

2. Реализация модели в виде компьютерной программы для виртуального воспроизведения быстропротекающих явлений в фазах КЗ, плавления электрода и формирования капли при сварке плавящимся электродом позволяет обоснованно определять не только технологические параметры процесса, но и технологические требования к конструированию различных видов оборудования для механизированной и автоматической сварки плавящимся электродом.

1. *Тавровский В. П.* Автоматическая сварка пульсирующей дугой неповоротных стыков паропроводных труб // Энергет. стр.-во. — 1969. — № 10. — С. 28–32.
2. *Патон Б. Е., Шейко П. П., Пацуля М. П.* Автоматическое управление переносом металла при импульсно-дуговой сварке // Автомат. сварка. — 1971. — № 9. — С. 1–3.
3. *Патон Б. Е., Потальевский А. Г.* Виды процессов сварки в защитных газах стационарной и импульсной дугой (Обзор) // Там же. — 1973. — № 9. — С. 1–8.
4. *Stava E. K.* New surface transfer tension process speeds pipe welding // Pipe Line & Gas Industry. — 1999. — **82**, № 9. — P. 55–57.
5. *Modelling and analysis of metal transfer in gas metal arc welding / F. Wang, W. K. Hou, S. J. Hu et al.* // J. Phys. D: Applied Physics. — 2003. — **36**. — P. 1–19.
6. *Некоторые тенденции в развитии приборов и устройств силовой электроники / Г. В. Грабовецкий, С. А. Харитонов, Е. Б. Преображенский и др.* // Химия в интересах устойчивого развития. — 2001. — **9**, № 7. — С. 921–928.
7. *Ланкин Ю. Н.* Автоматическое управление процессом сварки плавящимся электродом в CO_2 с периодическими замыканиями дугового промежутка (Обзор) // Автомат. сварка. — 2007. — № 1. — С. 3–10.
8. *Mathematical modeling of metal active gas arc welding / T. Yamamoto, T. Ohji, F. Miyasaka, Y. Tsuji* // Sci. and Technol. of Welding & Joining. — 2002. — **7**, № 4. — P. 260–264.
9. *Лебедев В. К.* Тенденции развития источников питания и систем управления (по материалам патентов США) // Автомат. сварка. — 2004. — № 1. — С. 40–48.
10. *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* // Тяж. машиностроение. — 2008. — № 6. — С. 18–20.
11. *Имитационное моделирование особенностей управления переносом капель при сварке с короткими замыканиями / О. Б. Гецкин, С. И. Полосков, В. А. Ерофеев,*



- О. П. Витько // Технология машиностроения. — 2008. — № 10. — С. 25–29.
12. Гецкин О. Б. Создание автомата блочно-модульной конструкции для орбитальной сварки магистральных трубопроводов // Сварка и диагностика. — 2008. — № 6. — С. 19–23.
13. Устойчивость процесса сварки плавящимся электродом с короткими замыканиями дугового промежутка / О. Б. Гецкин, С. И. Полосков, В. А. Ерофеев, О. П. Витько // Тяж. машиностроение. — 2008. — № 9. — С. 20–23.

The physical-mathematical model is considered, describing the short-time phenomena occurring in metal-electrode welding with short-circuits of the arc gap, and allowing for conditions of electrode metal transfer and interaction of the arc with electric parameters of the power supply. The software realising numerical solution of the model equations makes it possible to study the phenomena occurring in welding and justifiably determine not only the technological parameters of the process, but also the technological requirements to designs of various types of metal-arc welding equipment.

Поступила в редакцию 01.12.2008

ВНИМАНИЮ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ!

Приглашаем Вас принять участие в работе V открытой Всеукраинской научно-технической конференции молодых ученых и специалистов «Сварка и родственные технологии», посвященной 75-летию ИЭС им. Е. О. Патона.

Организатором конференции выступает Институт электросварки им. Е. О. Патона при участии Совета научной молодежи.

Ожидается участие в работе конференции молодых ученых (докторов наук, докторантов, кандидатов наук), научных сотрудников, аспирантов и специалистов из многих регионов Украины и ближнего зарубежья.

Основные направления конференции:

- Прогрессивные технологии сварки и соединения материалов
- Прочность, надежность и долговечность сварных конструкций
- Технологии наплавки, нанесения покрытий и обработки поверхностей
- Новые конструкционные и функциональные материалы
- Техническая диагностика и неразрушающий контроль
- Автоматизация процессов сварки и родственных технологий
- Фундаментальные исследования физико-химических процессов (термодинамика, кинетика, микроструктура, фазовые превращения, электронная структура, свойства)
- Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных технологиях

***По вопросам участия в конференции
просьба обращаться в оргкомитет:***

03680, г. Киев, ул. Боженко, 11, ОНТИ
 тел.: (+38044) 271-25-60
 e-mail: vorzel2009@gmail.com
<http://www.paton.kiev.ua/rus/events/conf2009.html>