

УДК 621.791.754

## **УСТОЙЧИВОСТЬ ПРОЦЕССА СВАРКИ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ С КОРОТКИМИ ЗАМЫКАНИЯМИ ДУГОВОГО ПРОМЕЖУТКА**

О. Б. ГЕЦКИН, инж., С. И. ПОЛОСКОВ, д-р техн. наук (НПП «ТехноТрон»)  
В.А. ЕРОФЕЕВ, канд. техн. наук (ТулГУ)  
О.П. ВИТЬКО, инж. (ИСК «Росатомстрой»)

При автоматической орбитальной сварке плавящимся электродом перспективно использование процессов с короткими замыканиями (КЗ) дугового промежутка [1]. Достоинством сварки с КЗ является возможность использования самозащитных и порошковых проволок, а также в определенной степени раздельного влияния на массу расплавляемого электродного металла и тепловложение в сварочную ванну. Однако гарантированный перенос капель электродного металла в ванну при сварке с КЗ может быть достигнут только синхронизацией тепловой мощности дуги с размерами капель [2]. Диапазон значений параметров, обеспечивающих устойчивый процесс [3], из-за технологических возможностей системы «источник питания – дуга» по компенсации возможных возмущений, достаточно узок [4]. При этом, несмотря на большое количество работ по повышению устойчивости процессов сварки плавящимся электродом к возмущениям, например [5-9], нет ясных рекомендаций по определению границ областей устойчивых режимов, что затрудняет обоснование технологических требований к сварочному оборудованию и разработку процессов сварки с КЗ.

Цель работы - определение на основе физико-математического моделирования системы «источник питания - дуга» технологических требований к источникам для реализации процессов орбитальной сварки.

Для решения поставленной задачи использовали подход, предложенный в работе [10] и разработанную ранее физико-математическую модель в виде системы дифференциальных уравнений [11], в которых учтены

все существенные явления дуговой сварки плавящимся электродом. Модель учитывает условия поддержания дугового промежутка  $l_a(v_f, v_e, t)$  в зависимости от скорости подачи  $v_f$  и плавления  $v_e$  электродной проволоки в период  $t$  микроцикла сварки. Кроме того, модель учитывает зависимости напряжения дуги  $U_a$  от её длины  $l_a$  и тока дуги  $I_a$  от напряжения холостого хода  $U_{xx}$  источника, динамического сопротивления  $R$  источника (угла наклона его вольтамперной характеристики (ВАХ)) и индуктивности  $L$  сварочной цепи. Скорость плавления электродной проволоки  $v_e(I_a, T_e)$  электрической дугой в модели определяется с учётом температуры  $T_e(I_a)$  подогрева вылета проходящим током. Сложные связи перечисленных параметров являются естественными критериями устойчивости. Учет их в модели позволил виртуально воспроизводить характерные возмущения процесса сварки с КЗ с учетом диаметра  $d_f$  электродных проволок.

Структура модели представлена на рис.1.

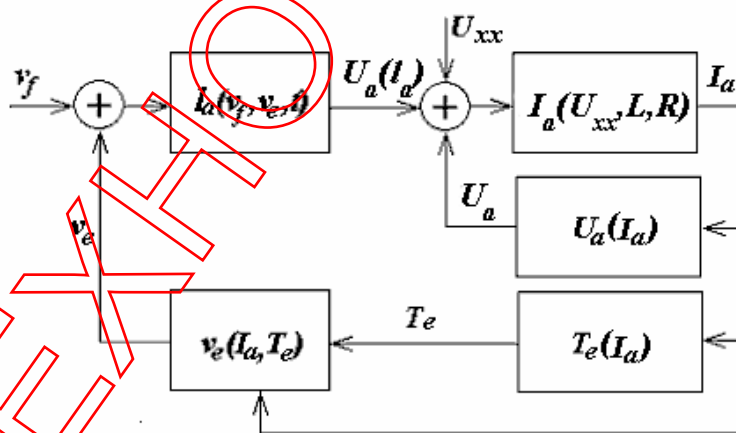
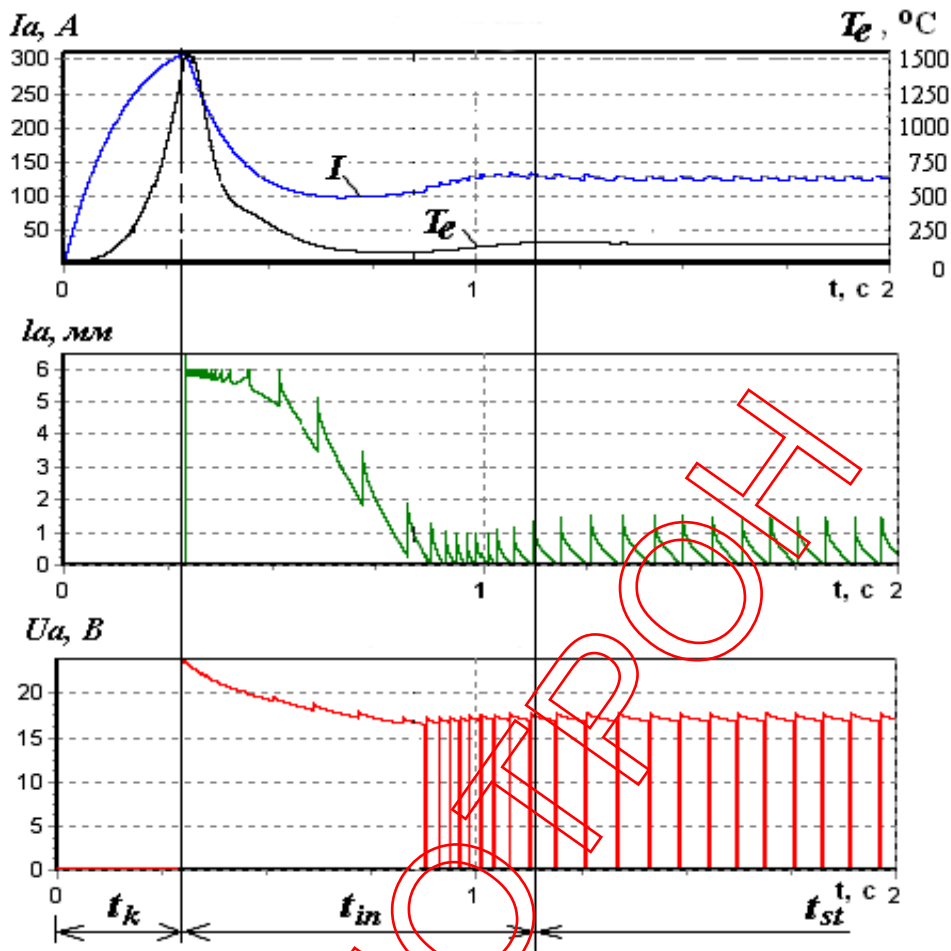


Рис. 1. Структура модели процесса сварки с КЗ в системе «источник питания – дуга»

Наиболее часто технологические возмущения процесса сварки, связанные с изменением длины дуги и величины вылета электродной проволоки возникают на начальной стадии процесса. На рис. 2 показана начальная стадия процесса сварки с КЗ от первичного возбуждения дуги  $t_k$  и становления процесса  $t_{in}$  до его устойчивого протекания  $t_{st}$ . График изменения  $T_e$  построен для температуры точки вылета электрода, которая

находится на расстоянии, равном  $d_f/2$  со стороны капли.



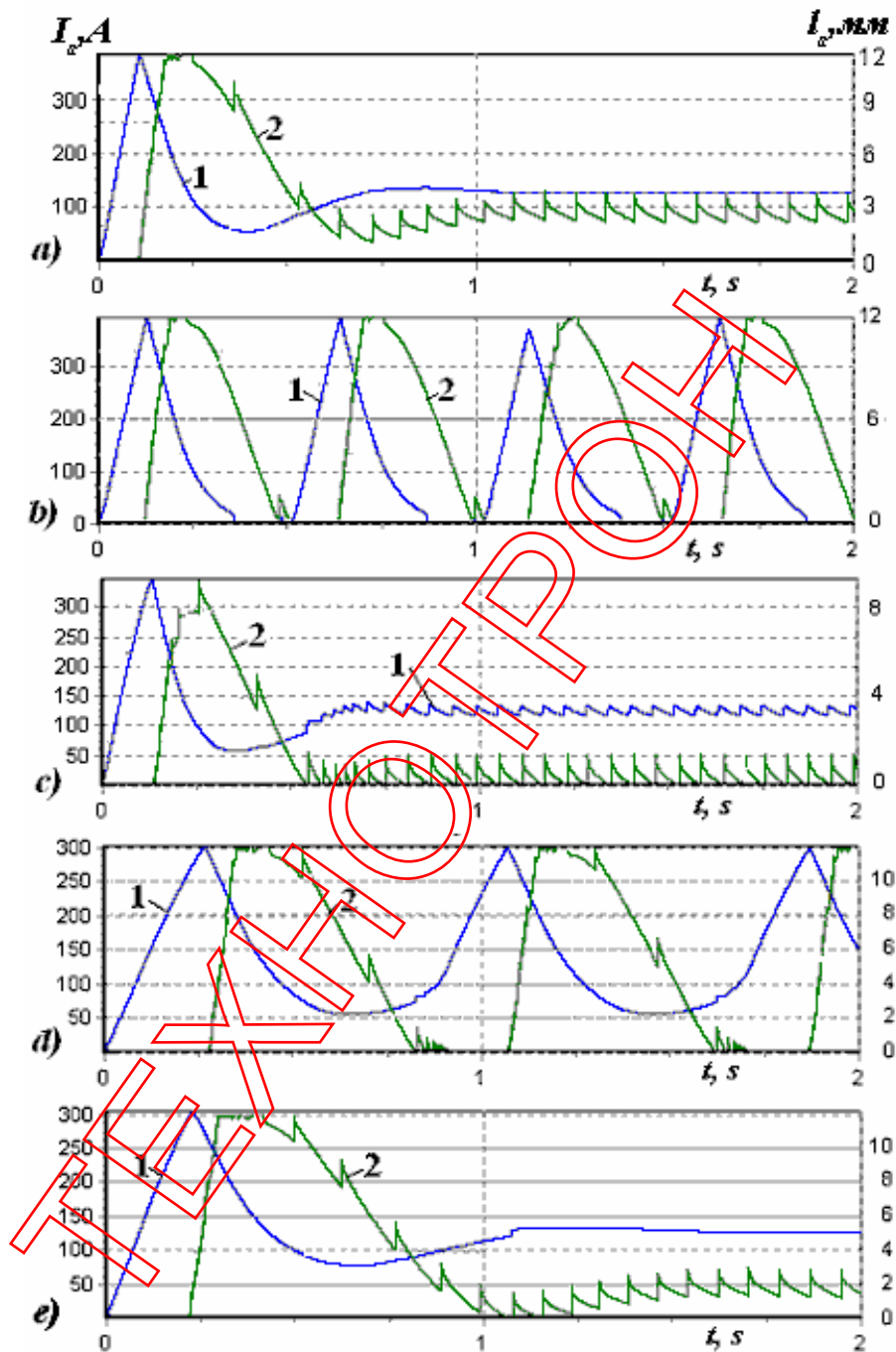
**Рис. 2. Результат компьютерной имитации начальной стадии процесса сварки :  
 $t_k$  - фаза первичного возбуждения дуги,  $t_{in}$  - фаза установления процесса,  
 $t_{st}$  - устойчивый процесс с КЗ.**

$d_f = 1,2$  мм,  $l_e = 12$  мм,  $v_f = 60$  мм/с,  $U_{xx} = 24$  В,  $R = 0,06$  Ом,  $L = 10$  мГн. Защитный газ -  $CO_2$ )

При выполнении исследований оценивали влияние параметров источника питания на устойчивость процесса и характер переноса электродного металла в сварочную ванну. При исследовании варьировали напряжение холостого хода источника питания, угол наклона ВАХ источника (его динамическое сопротивление  $R$ ) и индуктивность  $L$  сварочной цепи при различных значениях диаметра  $d_f$  и скорости  $v_f$  подачи электродной проволоки. Устойчивость определяли по длительности фазы установления процесса ( $t_k + t_{in}$ , рис. 2). Процесс считали неустойчивым, если длительность этой фазы превышала 10 секунд или возникали периодические обрывы дуги.

На рис.3. представлены результаты моделирования начальной стадии

процесса от первичного возбуждения дуги до стабильного переноса капель.



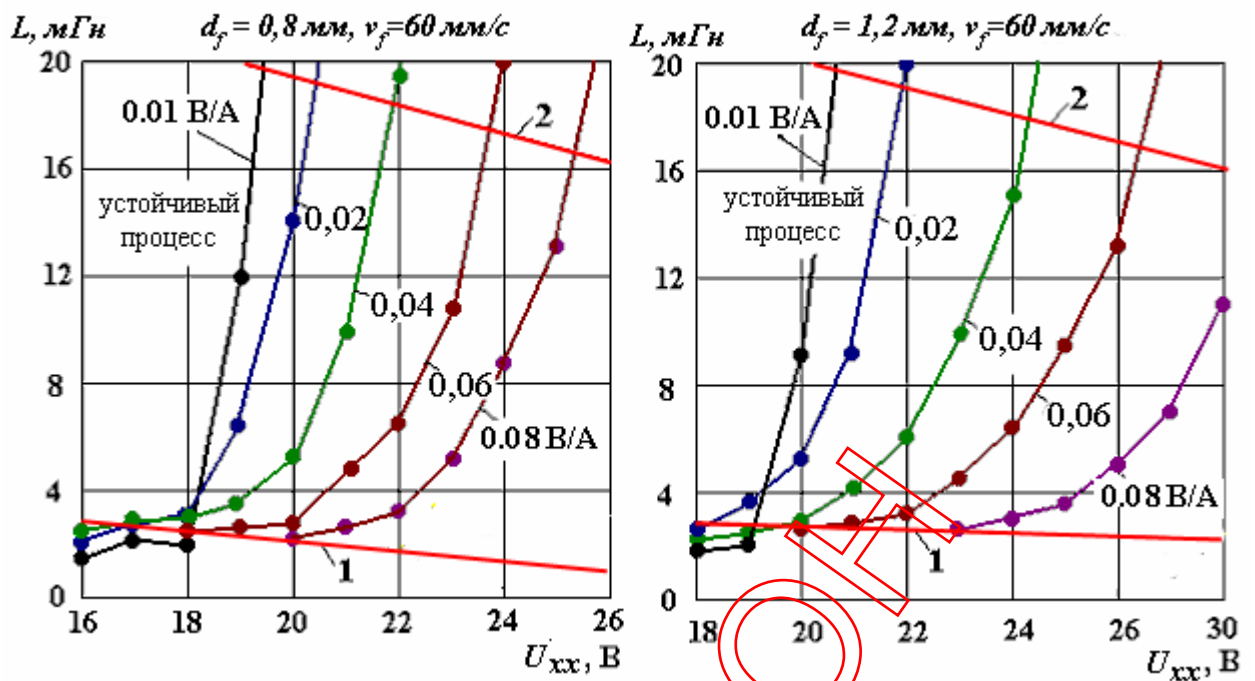
**Рис. 3.** Результат компьютерной имитации изменения  $I_a$  (1) и  $I_a$  (2) дуги на начальной стадии процесса сварки с КЗ ( $d_f = 1,2$  мм,  $v_f = 60$  мм/с, защитный газ -  $\text{CO}_2$ ):

- a)  $U_{xx} = 20$  В, угол наклона ВАХ  $0,01$  В/А,  $L = 4$  мГн;
- b)  $U_{xx} = 18$  В, угол наклона ВАХ  $0,01$  В/А,  $L = 4$  мГн;
- c)  $U_{xx} = 20$  В, угол наклона ВАХ  $0,03$  В/А,  $L = 4$  мГн;
- d)  $U_{xx} = 20$  В, угол наклона ВАХ  $0,03$  В/А,  $L = 10$  мГн;
- e)  $U_{xx} = 22$  В, угол наклона ВАХ  $0,03$  В/А,  $L = 10$  мГн.

Было установлено, рис. 3а, что при использовании источника с жесткой ВАХ (угол наклона ВАХ 0,01 В/А) и достаточно большим напряжением  $U_{xx}$  обеспечивается капельный перенос без КЗ. После первичного возбуждения дуги процесс сварки быстро приобретает устойчивость. Установившейся процесс протекает с небольшими колебаниями длины, напряжения и тока.

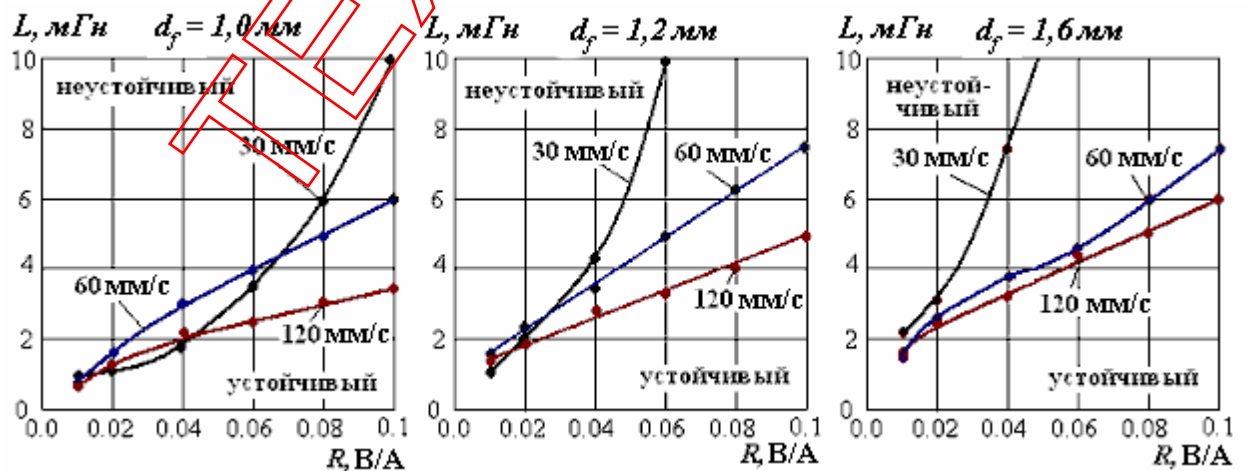
Переход в процесс сварки с КЗ возможен при уменьшении длины дуги, что достигается уменьшением  $U_{xx}$  источника. Однако при переходе в режим с КЗ при жесткой ВАХ, может возникнуть характерная неустойчивость процесса (рис. 3б) с хаотическими обрывами дуги. В этом случае для получения устойчивого процесса с КЗ целесообразно увеличить угол наклона ВАХ источника (рис. 3с), не менее, чем до 0,03 В/А. Однако такой процесс будет устойчивым только при достаточно малой индуктивности сварочной цепи. Если же цепь питания дуги имеет большую индуктивность, то процесс вновь оказывается неустойчивым, рис. 3д, с непредсказуемыми обрывами дуги. Влияние индуктивности на устойчивость процесса является специфическим только для сварки с КЗ, так как при тех же параметрах процесс сварки без КЗ, как правило, является устойчивым, рис. 3е.

Полученные результаты показывают, что при равных условиях процесс сварки с КЗ менее устойчив, чем процесс без КЗ, а важным параметром, определяющим их устойчивость, наряду с углом наклона ВАХ является индуктивность сварочной цепи. Для уточнения технологических требований к источникам сварочного тока было определены максимальные значения индуктивности  $L$  и напряжения  $U_{xx}$  источника, при котором процесс сварки с КЗ становится неустойчивым. Так как активное сопротивление источника  $R$  и цепи питания дуги определяют угол наклона ВАХ, то установили их влияние на устойчивость процесса сварки с КЗ при разных диаметрах  $d_f$  электродной проволоки. По результатам моделирования построили (рис. 4) зависимости максимального допустимого значения индуктивности  $L$  сварочной цепи от  $U_{xx}$  при различных углах наклона ВАХ, при которых обеспечивается устойчивый процесс сварки с КЗ.



**Рис. 4. Результаты компьютерной имитации зависимости индуктивности  $L$  сварочной цепи от  $U_{xx}$  источника и угла наклона ВАХ, обеспечивающих устойчивый процесс сварки с КЗ**  
 Диаметр электродной проволоки  $d_f = 0,8$  и  $1,2$  мм,  $v_f = 60$  мм/с; 1 - граница "примерзания" электрода, 2 - граница перехода в режим без КЗ

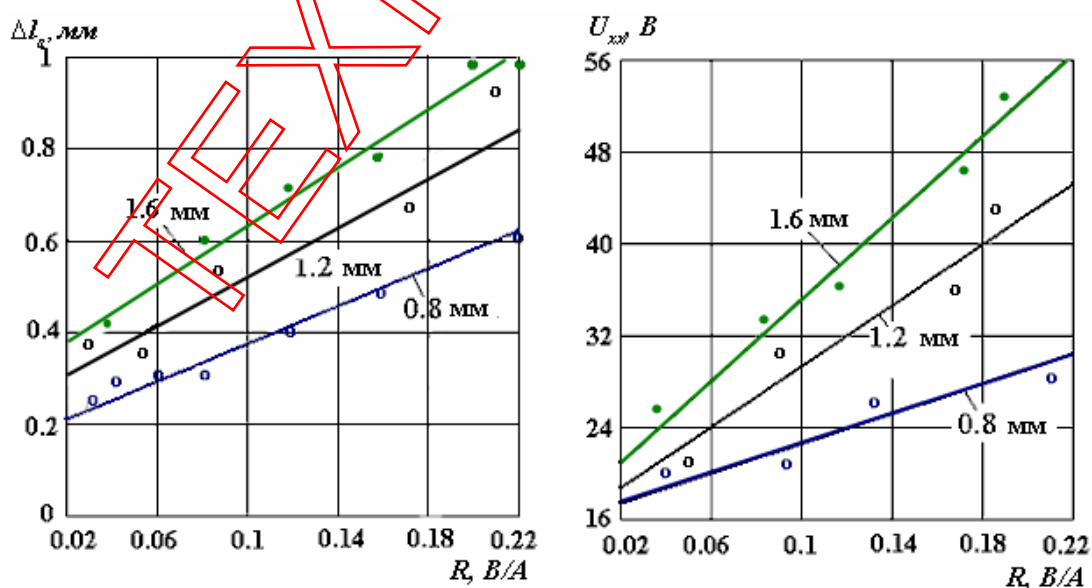
Одновременно исследовали влияние скорости подачи электродной проволоки на устойчивость процессов сварки с КЗ. На рис. 5 приведены данные об областях устойчивых режимов сварки в зависимости от угла наклона ВАХ при варьировании скорости  $v_f$  подачи электродной проволоки.



**Рис. 5. Результат компьютерной имитации зависимости индуктивности  $L$  сварочной цепи от наклона  $R$  ВАХ источника, при которых обеспечивается устойчивый процесс сварки с КЗ**  
 при  $v_f = 30; 60; 120$  мм/с и проволок диаметром  $d_f = 1,0; 1,2; 1,6$  мм

Результаты исследований показали, что увеличение  $U_{xx}$  и угла наклона ВАХ источника расширяют границы технологических ограничений на параметры процесса, при которых обеспечивается устойчивый процесс сварки с КЗ. Однако при использовании типовых источников для сварки плавящимся электродом в  $CO_2$ , имеющих индуктивность 10...20 мГн, устойчивый процесс сварки с КЗ может быть обеспечен только при значительном наклоне (0,08...0,2 В/А) ВАХ источника и напряжении  $U_{xx}$ , превышающем 30...50 В. Известно [6,7,8], что саморегулирование длины дуги при большом угле наклона ВАХ малоэффективно, и именно поэтому, даже небольшое изменение скорости подачи электрода, может вызывать переход в режим сварки без КЗ или «приморзание» электрода. Это положение подтверждают данные работы [12], что гарантированный перенос капель при сварке с КЗ невозможен без стабильной подачи проволоки.

Для оценки требований по стабильности подачи электродной проволоки исследовали влияние небольших возмущений по скорости подачи на отклонения длины дуги при разном наклоне ВАХ источника, рис. 6, а также максимальных значений  $U_{xx}$  источника, при которых возможен устойчивый режим сварки с КЗ.



**Рис. 6. Влияние угла наклона ВАХ на отклонения длины дуги  $\Delta L_a$  и максимальных значений  $U_{xx}$  источника, обеспечивающих устойчивый режим сварки с КЗ**

при  $d_f = 0,8; 1,2; 1,6$  мм и варьировании  $v_f$  от 60 до 70 мм/с

При выполнении исследований изменяли угол наклона ВАХ источника и определяли значение  $U_{xx}$ , при котором возникает устойчивый режим с КЗ. Так как длина дуги при сварке с КЗ непрерывно меняется, то влияние скорости подачи электродной проволоки оценивали по разности максимальных значений длины дуги при двух значениях скорости подачи для электродных проволок разных диаметров. Полученные результаты показывают, что устойчивость процесса к нестабильности подачи проволоки существенно увеличивается с увеличением угла наклона ВАХ. Особенно наглядно это проявляется при использовании электродных проволок больших диаметров.

Визуализация модели подтвердила данные работы [12], что возмущения процесса сварки, связанные с увеличением скорости подачи электродной проволоки приводят к уменьшению размера капли до начала КЗ, а, следовательно, площади пятна ее первичного контакта со сварочной ванной. Скачкообразное изменение скорости подачи может укоротить дугу до значения, при котором капля не сможет перетечь в сварочную ванну. Процесс сварки будет прерван, а так как дуговой промежуток не может восстановиться, то электрод окажется приваренным к основному металлу. Для исключения этого аппаратными средствами длина дуги после начала слияния капли с ванной должна быть ограничена значениями  $1,2...1,3 d_f$ , в зависимости от угла наклона ВАХ. Учитывая, что минимальная длина дуги при слиянии капли с ванной не может быть меньше диаметра проволоки, допустимое отклонения длины дуги, обусловленные нестабильностью подачи проволоки не должны превышать  $0,2...0,3 d_f$ . Эти обстоятельства позволяют ограничить, допустимую нестабильность скорости подачи, в зависимости от угла наклона ВАХ, значениями 15% (при угле наклона ВАХ 0,02 В/А) и 5% (при угле наклона ВАХ 0,2 В/А).

Другой причиной недопустимого уменьшения длины дуги может быть нестабильность входного напряжения источника и изменение сопротивления сварочной цепи. Установлено, что укорочение дуги на  $0,2...0,3 d_f$  вызывает



уменьшение напряжения на 1,0...1,5 В, или увеличение электрического сопротивления сварочной цепи на значение  $\Delta R = \Delta U_a / I_a$ . При токе 100 А максимально допустимое увеличение сопротивления составляет около 0,01...0,015 Ом. При использовании большинства сварочных выпрямителей активное сопротивление токоведущих элементов сварочной цепи составляет 0,04...0,1 Ом, с допустимым увеличением не более, чем на 10...30 % от этих значений. Такое увеличение сопротивления возможно уже при увеличении температуры медных токоподводящих кабелей всего на 25...60°C, или даже при простом перемещении дуги по стыку. Это показывает, что границы области устойчивых режимов при использовании типовых сварочных источников соизмеримы со значениями погрешности, вносимой случайными факторами.

Учитывая изложенное, расширение области устойчивых режимов сварки возможно только при использовании источников с малой индуктивностью и регулируемом углом наклона ВАХ, что обеспечивает эффективное саморегулирование дуги и меньшую чувствительность процесса к изменениям скорости подачи электродной проволоки на стадии образования капли и сопротивления сварочной цепи при слиянии капли с ванной. В этой связи для реализации высокотехнологичных процессов орбитальной сварки трубопроводов целесообразно использовать специальные сварочные источники, обеспечивающие управляемый тепломассоперенос капель электродного металла, как в фазе горения дуги, так и в фазе короткого замыкания.

## **Выводы**

Компьютерное моделирование процесса сварки плавящимся электродом с короткими замыканиями дугового промежутка показало, что устойчивость процесса в значительной степени определяется углом наклона вольтамперной характеристики сварочного источника и индуктивностью цепи питания дуги.

Установлено, что при значениях индуктивности 10...20 мГн,

характерных для типовых сварочных выпрямителей с тиристорным регулятором сварочного тока, устойчивость процесса к возмущениям обеспечивается только при наклоне вольтамперной характеристики источника не менее 0,08...0,2 В/А и напряжении холостого хода не менее 30...50 В.

При использовании типовых сварочных источников для сварки плавящимся электродом устойчивый процесс сварки обеспечивается в очень узком диапазоне значений напряжения холостого хода источника и электрического сопротивления сварочной цепи, что ужесточает требования по скорости подачи электродной проволоки, при этом допустимые отклонения этих параметров соизмеримы со значениями погрешности, вносимой случайными факторами.

Результаты физико-математического моделирования процессов в системе «источник питания - дуга» при определении технологических ограничений на процесс сварки плавящимся электродом с короткими замыканиями дугового промежутка позволяют обоснованно устанавливать требования к специализированному оборудованию для реализации высокотехнологичных процессов орбитальной сварки трубопроводов.

## Литература

1. Полосков С.И., Ищенко Ю.С., Букаров В.А. Анализ факторов, определяющих формирование сварочной ванны при орбитальной сварке неповоротных стыков труб (обзор) // Сварочное производство. - 2003. - №2. - С. 11-19.
2. Управление параметрами короткого замыкания в процессе сварки плавящимся электродом / С. И. Полосков, Ю.С. Ищенко, В. А. Лебедев, О. Б. Гецкин // Сварочное производство. - 2001. - №12. - С.3-7.
3. Сараев Ю.Н. Импульсные технологические процессы сварки и наплавки. - Новосибирск: Наука, 1994. - 108 с.
4. Signature analysis for quality monitoring in short-circuit GMAW / Y.X. Chu, S.J. Hu, W.K. Hou, et al. // Welding Journal. - 2004, Vol.84. - №12. - P. 336s - 343s.
5. Букаров В.А., Ермаков С.С., Дорина Т.А. Оценка стабильности дуговой сварки по осциллограммам процесса с использованием статистических методов // Сварочное производство. - 1990. - №12. - С. 30-32.

6. *Критерии* оценки стабильности процесса дуговой сварки на постоянном токе / И.К. Походня, И.И. Заруба, В.Е. Пономарёв и др. // Автоматическая сварка. - 1989. - №8. - С. 1-4.

7. *Wu C.S., Chen M.A., Lu Y.F.* Effect of current waveforms on metal transfer in pulsed gas metal arc welding // Measurement Science and Technology. - 2005, Vol.16. - №12. - P. 2459-2465.

8. *Кобозев В.А., Коваленко В.В., Лебедев В.А.* Оценка устойчивости процессов ручной и механизированной дуговой электросварки плавящимся электродом // Автоматическая сварка. - 1998. - №8. - С. 26-31.

9. *Choi J.H., Lee J.Y., Yoo C.D.* Simulation of dynamic behavior in a GMAW system // Welding Journal. - 2001, Vol.80. - №10. - P. 239s - 245s.

10. *Ерофеев В.А.* Решение задач оптимизации технологии на основе компьютерного моделирования процесса сварки // Сварочное производство. - 2003. - №7. - С. 19 -26.

11. *Физико-математическая модель системы «источник питания - дуга» для сварки плавящимся электродом в защитных газах* / О.Б. Гецкин, С.И. Полосков, В.А. Ерофеев // Тяжелое машиностроение. (В портфеле редакции)

12. *Влияние возмущений в системе подачи электродной проволоки на качество сварных соединений* / С.И. Полосков, Ю.С. Ищенко, В.А. Лебедев, О.Б. Гецкин // Сварочное производство. - 2001. - №8. - С. 3-7.

## АННОТАЦИЯ

### **Устойчивость процесса сварки плавящимся электродом с короткими замыканиями дугового промежутка**

Гецкин О.Б., Полосков С.И., Ерофеев В.А., Витько О.П.

Для определения факторов, определяющих устойчивость процесса сварки плавящимся электродом с короткими замыканиями, выполнено физико-математическое моделирование влияния параметров сварочного источника на характер изменения переноса капель через дуговой промежуток. Предложены методы расширения области устойчивых режимов сварки с короткими замыканиями дугового промежутка.

Результаты компьютерного моделирования позволяют устанавливать технологические требования к оборудованию для реализации высокотехнологичных процессов орбитальной сварки.