

## УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРАМИ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ПРОЦЕССЕ СВАРКИ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ

С. И. ПОЛОСКОВ, канд. техн. наук, Ю. С. ИЩЕНКО, канд. техн. наук,  
В. А. ЛЕБЕДЕВ, канд. техн. наук, О. Б. ГЕЦКИН, инж.

Одной из основных задач при выполнении ремонтных работ в стесненных условиях является качественное формирование сварочной ванны в различных пространственных положениях при сварке плавящимся электродом неповоротных стыков труб [1] и сокращение потерь электродного металла на разбрызгивание при переносе капель в ванну.

Процесс сварки плавящимся электродом с короткими замыканиями дугового промежутка позволяет получать сварочную ванну меньшего размера и, следовательно, массы, что улучшает условия формирования сварных швов в различных пространственных положениях [2].

В основу управления массопереносом при сварке с короткими замыканиями с минимальным разбрызгиванием положен выбор режимов сварки, обеспечивающих перенос каждой капли электродного металла оптимальных размеров. При этом для управления переносом капель используется импульсный ввод энергии на стадии короткого замыкания [3]. Необходимая автоматическая подстройка энергетических характеристик процесса, в том числе изменение длительности периодически накладываемых импульсов, описаны в работах [2, 4]. Однако только в работе [5] рассмотрены вопросы оптимального переноса с одновременным управлением размерами сварочной ванны применительно к сварке с короткими замыканиями тонколистового металла. Предложенные решения можно использовать для формирования швов при сварке неповоротных стыков труб со средней и большей толщиной стенки плавящимся электродом.

Массоперенос капель при сварке осуществляется в несколько стадий: касание капель сварочной ванны с образованием жидкой перемычки в зоне

контакта; слияние капли с ванной; изменение формы капли (перетекание капли) с утонением перемычки (шейки капли) в зоне «капля - электродная проволока»; разрыв шейки капли и поглощение капли ванной.

Цель данной работы - исследование влияния временных и энергетических (силовых) параметров короткого замыкания на процесс массопереноса и разбрызгивание капель электродного металла.

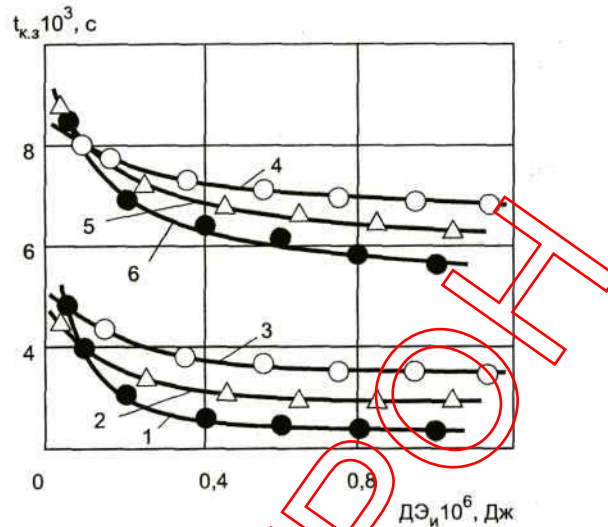
При импульсной сварке с короткими замыканиями, когда дуговой промежуток соизмерим с диаметром капли электродного металла, могут одновременно существовать две жидкие перемычки металла: одна - в месте касания капель поверхности ванны, а вторая - в зоне «капля - электродная проволока».

На стабильность процесса (каждая капля переходит в ванну при первом касании) прежде всего влияет площадь касания капли с поверхностью ванны. При малой площади касания сила от пинч-эффекта (при наличии тока в момент касания) действует быстрее, чем нарастает сила от поверхностной энергии (поверхностного натяжения) - одной из главных сил в процессе поглощения капли сварочной ванной [6]. При этом разбрызгивание практически полностью исключается, когда при переходе капли в ванну разрушается перемычка между каплей и электродной проволокой [7].

При малых объемах капли и большой площади первоначального касания каплей ванны сила поверхностного натяжения недостаточно для обеспечения перетекания ее в ванну. В то же время именно режим, обеспечивающий перенос капель малого объема, является наиболее предпочтительным для качественного формирования швов при сварке неповоротных стыков труб.

Поэтому после того, как между каплей и сварочной ванной установился прочный контакт (перемычка), возникает необходимость в дополнительной энергии  $DЭ_{и}$  за счет импульса тока, внешних электромагнитных сил, импульса газа или продольного ускорения электродной проволоки при импульсной подаче. С учетом обеспечения простоты контроля при

проведении экспериментов в данной работе рассматривали управление временем короткого замыкания с помощью дополнительного импульса тока. Дополнительная энергия  $DЭ_{И}$  существенно сокращает время перехода капли в сварочную ванну (рис. 1).



**Рис. 1. Зависимость времени короткого замыкания от дополнительной энергии импульса тока:** 1-3 - задержка подачи импульса после касания капель поверхности ванны ( $DЭ_0 = 0$ ); 4-6 - подача импульса тока непосредственно в момент касания; 1,6 - дуговой промежуток 1,9 мм, радиус поверхности касания 0,46 мм; 2-5 - дуговой промежуток 2,5 мм, радиус касания 0,39 мм

Для формирования качественных швов в различных пространственных положениях влияние  $DЭ_{И}$  на формоизменение объема капли должно быть оптимальным. Необходимое значение  $DЭ_{И}$  оценивали расчетным методом, как долю высвобождающейся свободной энергии при формировании капли в начале процесса ее слияния с металлом ванны и образования перемычки. Полученные данные показывают, что при достижении определенной величины  $DЭ_{И}$  не влияет на время короткого замыкания. Тогда как увеличение времени короткого замыкания существенно зависит от первоначальной площади контакта капли с ванной (рис. 1, кривые 7-3 и 4-6).

С целью оптимизации дополнительного импульса тока определили минимальное значение  $DЭ_{Иmin}$ , обеспечивающей переход капли в ванну. Установлено, что  $DЭ_{Иmin}$  определяется величиной отрицательного воздействия  $DЭ_0$ , пинч-эффекта на стадии касания капли (рис. 2. кривая 7 при  $DЭ_0 = 0$ ) и временем начала положительного действия  $DЭ_{И}$  (кривые 2, 3).



**Рис. 2. Зависимость минимальной энергии перехода капли в ванну от энергии противодействия  $DЭ_0$  и временного интервала  $t_H$ :**  
 1-3 -  $DЭ_0$  равна нулю,  $-1,6 \cdot 10^{16}$  и  $-2,4 \cdot 10^{16}$  Дж соответственно

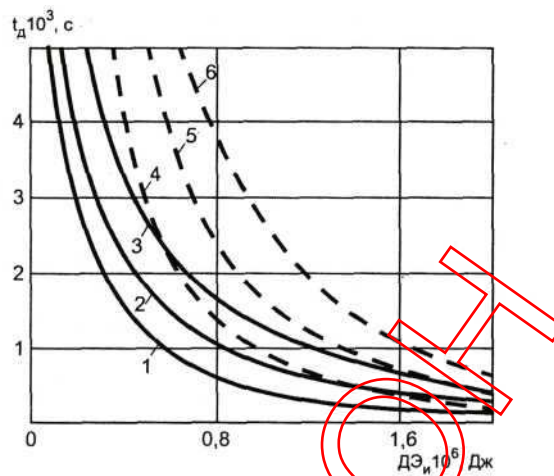
При этом чем больше  $DЭ_0$ , противодействующая переходу капли от пинч-эффекта, тем большую  $DЭ_{Imin}$  необходимо приложить в период короткого замыкания для перехода капли в ванну (рис. 1, кривые 1-3 при  $t_H = \text{const}$ ). Чем позже начало положительного действия  $DЭ_{Imin}$ , тем больше должна быть ее абсолютная величина (кривые 1-3, характеризующие  $DЭ_{Imin} = f(t_H)$ ). В противном случае капля не получает необходимой кинетической энергии для ее перехода в ванну.

Расчеты подтвердили, что минимальное время  $t_D$  действия  $DЭ_{Imin}$  для переноса капли зависит от ее размеров (объема и массы), а также силы  $|-DЭ_0|$ , противодействующей слиянию капли с ванной (рис. 3). При этом время действия дополнительной энергии импульса тока равно:

$$t_D = t_{K.3} - t_H$$

где  $f_H$  - начало действия  $DЭ_{Imin}$ ,  $t_{K.3}$  - время короткого замыкания. Минимальное время действия дополнительного импульса тока всегда меньше, когда в момент перехода капли сварочный ток минимален либо отключен и  $DЭ_0 = 0$  (рис. 3, кривые 7-3). При запаздывании с отключением

тока сварки в момент перехода капли в ванну задержка в подаче дополнительного импульса тока увеличивает  $t_D$  (рис. 3, кривые 4-6).

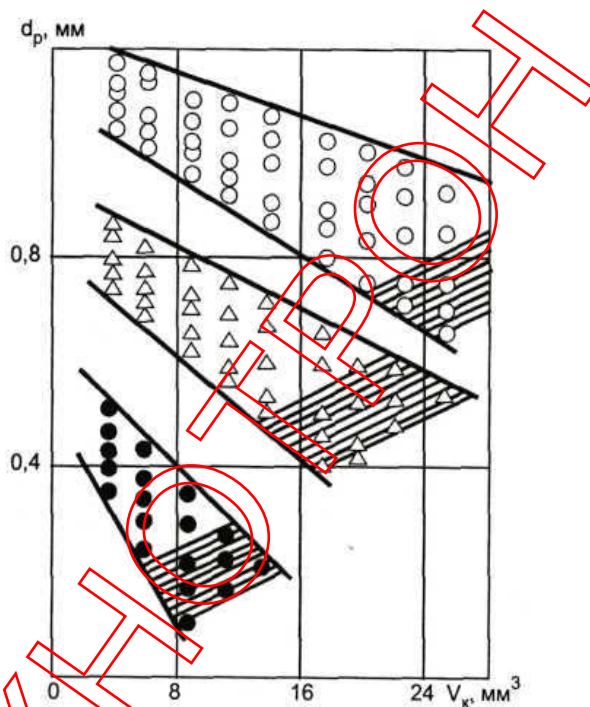


**Рис. 3. Зависимость минимального времени  $t_D$  действия импульса тока от энергии противодействия переносу капли в ванну: 1-3 - при отключении сварочного тока в момент касания каплей поверхности ванны при действии дополнительного импульса тока соответственно через 0,00189, 0,00265 и 0,00375 с после касания; 4-6 - при действии сварочного тока в момент касания каплей поверхности ванны и действии дополнительного импульса тока соответственно через 0,00226, 0,00311 и 0,00463 с после касания**

Поэтому при малых значениях импульса тока  $I_H$  время действия  $t_D$  должно быть больше. Однако при увеличении амплитуды импульса снижается (менее значительно) время его действия. Дальнейшее увеличение амплитуды практически не изменяет времени действия дополнительного импульса тока.

Поскольку основной причиной разбрызгивания считается взрыв перемычки [8-10], то необходимо управлять формой и током короткого замыкания как до, так и во время разрыва перемычки в зоне «капля - электродная проволока». Влияние напряжения холостого хода источника, индуктивности сварочной дуги и типа источника исследовано в работах [4, 8], где показано уменьшение коэффициента разбрызгивания с увеличением отношения напряжения холостого хода к напряжению дуги и индуктивности сварочной цепи к частоте коротких замыканий. Так, в работе [4] указывается, что потери расплавленного металла на испарение и разбрызгивание уменьшаются при увеличении частоты коротких замыканий. Поскольку диа-

метр разрыва шейки капли  $d_p$  определяет степень разбрызгивания электродного металла, то определены области  $d_p$  в зависимости от объема (массы) капли для электродных проволок различных диаметров. Расчеты подтверждают соответствие меньшего диаметра проволоки меньшему  $d_p$ . Для проволоки диаметром  $d_{\text{э}} = 1,05$  мм  $d_p$  колеблется от 0,2 до 0,6 мм, а для  $d_{\text{э}} = 2,0$  мм - в диапазоне 0,6-1,2 мм (рис. 4). Значение  $d_p$  тем меньше, чем больше объем капли  $V_K$ .



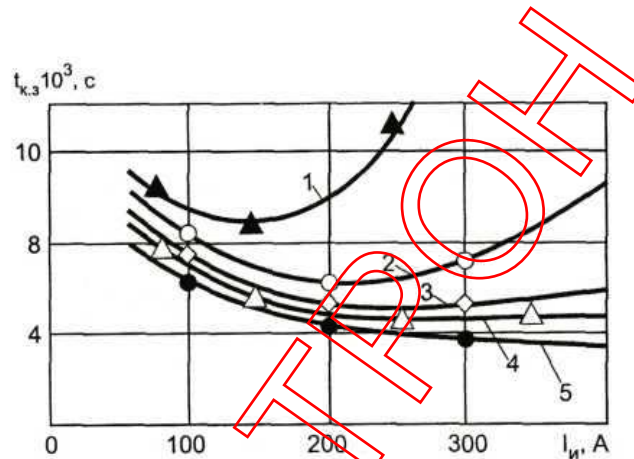
**Рис. 4. Зависимость диаметра разрыва шейки капли от ее объема  $V_K$ :**  
( $d_{\text{э}}$  равен 1,05 (●), 1,55 (Δ) и 1,85 мм (○))

Влияние площади первоначального касания капли отражает разброс значений  $d_p$  даже при  $V_K = \text{const}$  и  $\sigma = \text{const}$  (см. рис. 4). При этом минимальное значение  $d$  соответствует минимальной площади первоначального касания капель ванны.

Диаметр разрыва шейки капли  $d_p$  рассчитывали из условия, что работа, необходимая для увеличения поверхности ванны после касания ее каплей, больше работы, необходимой для преодоления сил когезии в наиболее узком сечении деформируемой капли (зоне разрыва). Именно в силу этих обстоятельств и происходит разрыв перемычки (шейки). Согласно данным работы [9], полученным при вытягивании из ванны расплавленного олова медной

проволоки  $d_{\text{э}}$  диаметром 1,0-2,5 мм  $d_p = 0,1-0,25$  мм, а при сварке проволокой диаметром  $d_{\text{э}} = 1,2$  мм в  $\text{CO}_2$ ,  $d_p = 0,4-0,6$  мм [10]. Эти данные, а также результаты работы [11] подтверждают наши расчеты.

Время  $t_{\text{к.з}}$  больше при действии тока с момента касания капель сварочной ванны (рис. 5, кривые 1-3). Оно тем больше, чем меньше первоначальный радиус касания, а, следовательно, и площадь контакта, поскольку на переход капли отрицательно воздействует пинч-эффект.



**Рис. 5. Зависимость времени перехода капли в ванну от амплитуды дополнительного импульса тока при действии импульса с момента касания капель поверхности ванны и радиусе касания соответственно 0,15, 0,44 и 0,75 мм (1-3), начале действия импульса через  $t_H = 0,02$  с (4, 5), окончании действия импульса за 0,0015 с до разрыва шейки капли (4) и действия импульса до разрыва шейки капли (5)**

При малых значениях  $I_n$  его энергия влияет на  $t_{\text{к.з}}$  незначительно, а при больших токах электромагнитное сжатие существенно увеличивает  $t_{\text{к.з}}$ . Именно поэтому необходимо выбирать оптимальную амплитуду импульса тока и время его действия с момента касания капель ванны ( $I_n = 150-200$  А). При задержке подачи импульса тока  $I_n$  с момента касания капель ванны (рис. 5, кривые 4, 5)  $t_{\text{к.з}}$  уменьшается. При этом видно, что увеличение амплитуды тока с некоторого значения (около 200 А) практически не влияет на  $t_{\text{к.з}}$ . Вместе с тем  $t_{\text{к.з}}$  практически не изменяется, если импульс тока действует до разрыва шейки капли (рис. 5, кривая 5) или за  $\Delta t = 0,0015$  с до разрыва (см. рис. 5, кривая 4), но оно больше, если импульс подается в момент касания капель поверхности ванны (рис. 5, кривые 1-3). При этом  $t_{\text{к.з}}$  тем больше, чем

больше  $I_{II}$ . При малой площади первоначального касания капли с поверхностью ванны (см. рис. 5, кривая 7)  $t_{K.3}$  возрастает тем больше, чем больше  $I_{II}$ , действующий с момента касания. Естественно, что чем больше площадь первоначального касания, тем меньше влияние  $I_{II}$  с момента касания (рис. 5, кривые 2, 3).

В работах [10,12,13] показано влияние скорости нарастания тока при коротком замыкании на стабильность процесса переноса капель, однако не оценены формы импульсов тока. В то же время исследованная форма импульса при достижении максимального значения тока увеличивает вероятность разрыва перемычки между каплей и ванной, а следовательно, увеличивается и вероятность разбрызгивания. Поэтому, очевидно, в работе [13] ограничены пределы скорости роста тока  $dI / dt$  ( $dt < 50$  А/мс). Предложенная форма импульса реализуется существующими серийными источниками питания дуги.

Быстродействие современных инверторных источников [14] позволяет реализовать массоперенос капли не только с образованием ее под действием базового тока  $I_B$  и перехода ее в ванну под действием импульса тока  $I_{II}$ , но и последовательного действия импульсов тока. Эффективность формы импульса, способствующего управляемому переходу капли в ванну, оценивали по уменьшению времени короткого замыкания  $\Delta t_{K.3}$  по сравнению с нарастающим импульсом тока амплитудой 150 А ( $t_{150}$ ):

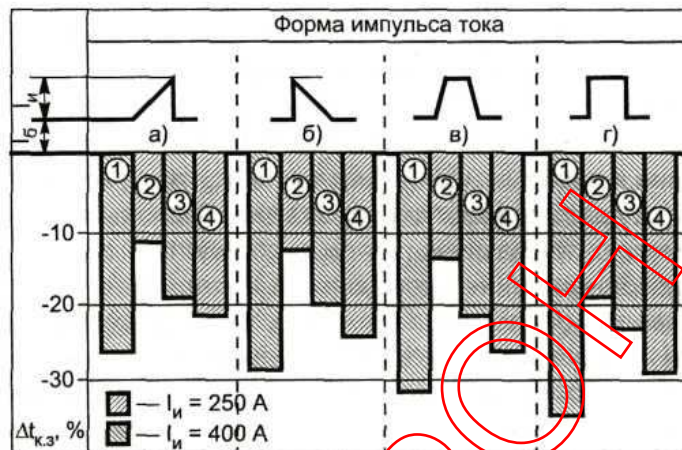
$$\Delta t_{K.3} = (t_{150} - t_{K.3}) / t_{150}$$

Кроме этого, учитывали вероятность разбрызгивания металла в момент окончания цикла короткого замыкания. Расчеты выполняли при условии подачи импульса тока различной формы как с запаздыванием относительно начала короткого замыкания, так и сразу после касания капель ванны.

Анализ расчетных данных показал следующее. Наименее эффективна форма импульса тока (рис. 6,а), которая реализуется наиболее распространенными в настоящее время инверторными источниками питания. К тому же, как отмечалось выше, для реализации такой формы импульсов

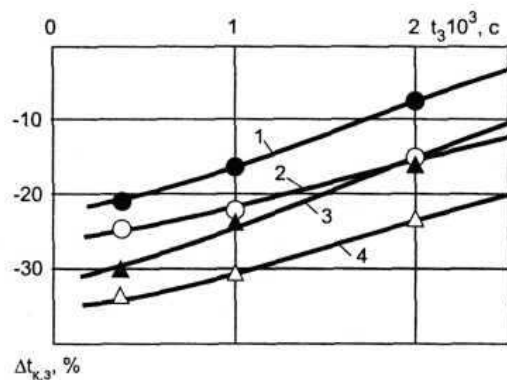


необходимо учитывать скорость нарастания тока и максимальный ток в конце импульса. Форма импульса тока, приведенная на рис. 6,б, тем эффективнее по сравнению с формой, приведенной на рис. 6,а, чем больше максимальное значение  $I_H$  (рис. 5, кривые 1 и 4).



**Рис. 6. Зависимость относительного уменьшения времени короткого замыкания от формы дополнительного импульса тока через  $t_H$  после касания (1, 3) и с момента касания капель поверхности ванны (2, 4)**

Для обеспечения устойчивости первоначального контакта капли с ванной, наименьшего разбрызгивания при окончании короткого замыкания и достижения при этом высокой эффективности по  $\Delta t_{к.з.}$  наиболее эффективна форма импульса тока, приведенная на рис. 6, в, даже при незначительном повышении тока в импульсе по сравнению с принятым базовым значением тока. Форма импульса тока (рис. 6,г), хотя и обеспечивает максимальную эффективность, но трудна в реализации, поскольку необходимо обеспечить окончание действия импульса до разрыва перемычки. Результаты проведенных исследований показали, что одинаковую эффективность по критерию  $\Delta t_{к.з.}$  с формой импульса тока, приведенной на рис. 6,в, обеспечивает окончание действия импульса тока формы (см. рис. 6,г) приблизительно за 0,0075 с до разрыва перемычки (рис. 7). Поэтому возможность реализации трапецеидальных импульсов тока наряду с быстродействием является одним из главных требований к источнику питания для сварки неповоротных стыков труб плавящимся электродом с короткими замыканиями дугового промежутка.



**Рис. 7. Зависимость относительного уменьшения времени короткого замыкания  $\Delta t_{к.з}$  от запаса времени до разрыва шейки капли после окончания действия импульса прямоугольной формы непосредственно с момента касания капель поверхности ванны (1, 3) и через  $t_H$  после касания (2,4) ( $I_H$  равен 250 (○,●) и 400 А (▲,△))**

## Выводы

1. Уменьшение времени короткого замыкания за счет дополнительной энергии импульсов тока эффективно только до определенной величины, зависящей от диаметра электродной проволоки, длины дуги, площади первоначального контакта между каплями и поверхностью сварочной ванны.

2. Дополнительную энергию необходимо подавать с запаздыванием на  $(1-2)10^{-3}$  с после момента касания капель поверхности ванны. Отключение импульса тока в момент разрыва шейки капли не влияет существенно на уменьшение времени короткого замыкания, но уменьшает вероятность разбрызгивания.

3. Оптимальные объем капли, время короткого замыкания и минимальная дополнительная энергия определяют эффективность процесса орбитальной сварки плавящимся электродом неповоротных стыков труб.

4. Одним из главных требований при разработке источников питания для сварки плавящимся электродом с короткими замыканиями является возможность реализации трапецидальных импульсов тока, повышающих эффективность массопереноса с учетом объема и формы капель.

## Список литературы

1. Рощин В. В., Кузнецов И. К., Хаванов В. А. Сварка неповоротных стыков труб плавящимся электродом // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Сварочное производство. - 1980, Вып. 1 (7). - С. 55-63.
2. Патон Б. Е., Шейко П. П., Пашуля М. П. Автоматическое управление переносом металла при импульсно-дуговой сварке // Автоматическая сварка. - 1971. - № 9. - С. 1-3.
3. Осипенко В. П., Славинский В. Д. Сварка в углекислом газе пульсирующей дугой с автоматическим изменением наклона внешней характеристики источника питания // Сварочное производство. - 1983. - № 5. - С. 10-11.
4. Amin M. Pulse current parameters for arc stability and controlled metal transfer in arc welding // Metal construction. - 1983, Vol. 15. - №5. - P. 272-278.
5. Импульсно-дуговая сварка в CO<sub>2</sub> стали толщиной 0,5-0,8 мм / А. Г. Потапьевский, М. Г. Лифшиц, Л. М. Куплевацкий, В.Г. Рубан // Сварочное производство. - 1980. - № 4. - С. 15-17.
6. Ищенко Ю. С. Некоторые закономерности перехода капли при коротком замыкании // Сварочное производство. - 1992. - № 3. - С. 23-26.
7. Сараев Ю. Н. Импульсные технологические процессы сварки и наплавки. - Новосибирск: Наука, 1994. - 108 с.
8. Шеронов Е. А. Влияние электрических параметров системы «источник питания - сварочная цепь» на потери металла при сварке в углекислом газе // Сварочное производство. - 1979. - № 12. - С. 23-24.
9. Характер действия сил поверхностного натяжения при разрушении перемычки в капле / И. С. Пинчук, В. Ф. Постаушкин, Г. Д. Куликов и др. // Автоматическая сварка. - 1974. - № 11. - С. 24-27.
10. Заруба И. И. Электрический взрыв как причина разбрызгивания металла // Автоматическая сварка. - 1970. - № 3. - С. 14-18.
11. Попков А. М., Варенников В. В. Влияние параметров источника питания на потери металла при сварке в углекислом газе // Сварочное производство. - 1973. - № 4. - С. 39.
12. Заруба И. И. Условие устойчивости процесса сварки с короткими замыканиями // Автоматическая сварка. - 1971. - № 2. - С. 1-4.
13. Лебедев А. В. Исследование управляемого переноса электродного металла при сварке в углекислом газе // Автоматическая сварка. 1991. № 3. С. 33-37.
14. Trindade E., Allum C. Characteristics in steady and pulsed current GMAW // Welding and Metal Fabrication. - 1984, Vol. 52. - №7. - P. 264-266, 268-270, 272.