

## ВЛИЯНИЕ ВОЗМУЩЕНИЙ В СИСТЕМЕ ПОДАЧИ ЭЛЕКТРОДНОЙ ПРОВОЛОКИ НА КАЧЕСТВО СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

С. И. ПОЛОСКОВ, канд. техн. наук, Ю. С. ИЩЕНКО, канд. техн. наук  
(НИКИМТ),  
В. А. ЛЕБЕДЕВ, канд. техн. наук (ИЭС им. Е. О. Патона),  
О. Б. ГЕЦКИН, инж. (НПП "Технотрон")

Ремонтные работы на объектах атомной промышленности проводят, как правило, в стесненных условиях с использованием автоматической аргодуговой сварки неплавящимся электродом. Только ряд соединений выполняют автоматической сваркой плавящимся электродом в смеси газов. Так, при монтаже установки аварийного паросброса реакторов РБМК применяют сварку плавящимся электродом в шахте диаметром 0,6 м на глубине около 8 м. Работы выполняют с использованием систем дистанционного наблюдения и управления.

Брак при сварке приводит к большим материальным затратам (извлечение автомата, замена или дополнительная обработка детали ремонтируемого изделия, повторная установка и настройка автомата, сварка) и увеличению сроков ремонта. В силу этих обстоятельств применение сварки плавящимся электродом при ремонтных работах ограничено из-за сложностей в обеспечении гарантированного качества сварных соединений, ее применение обусловлено только конструктивными особенностями свариваемых изделий. Проводятся интенсивные работы, направленные на то, чтобы технология и конструктивные особенности как механической, так и электрической частей сварочного оборудования допускали прогнозируемые возмущения в работе без ухудшения качества сварных соединений.

При автоматической ремонтной сварке плавящимся электродом наиболее очевидными признаками нарушения стабильности процесса являются возмущения в подаче электродной проволоки, приводящие к "примерзанию" проволоки к металлу сварочной ванны либо изменению ее

геометрических размеров и увеличению разбрызгивания. Одним из основных факторов улучшения работы сварочного автомата является повышение надежности работы системы подачи электродной проволоки, включающей механизм подачи с подающими роликами, направляющий тракт и токоподводящий наконечник (токоподвод).

Исследования возмущений в системе подачи проволоки проводили на специальном стенде. Сварку выполняли на следующих режимах: ток сварки  $I_{св.} = 60-400$  А; напряжение дуги  $U_d = 17-27$  В, скорость подачи электродной проволоки  $v_p = 54-720$  м/ч (0,02-0,2 м/с); вылет электродной проволоки от 3 до 18 мм; скорость сварки  $v_{св} = 8-25$  м/ч. Применяли электродную проволоку 04X19N11M3T диаметром  $d_p$ , равным 1,2, 1,6 и 2,0 мм, защитный газ - смесь 75% Ar и 25% CO<sub>2</sub>. Инверторный источник ДС-400САУ позволил кратковременно изменять угол наклона ВАХ, а также значения параметров импульсов тока (частоты, мощности, времени воздействия).

Проведенный анализ последствий отказов элементов системы подачи проволоки показал, что прекращение ее перемещений роликами не приводит к неисправимому браку швов. Как правило, при этом по достижению длины 5-6 мм гаснет дуга, а на проволоке образуется шарик застывшего металла диаметром приблизительно 3,5 мм ( $d_p = 1,2$  мм) и 4-4,5 мм ( $d_p = 1,6$  мм). На поверхности ванны шва появляется лунка диаметром 2 мм и глубиной 0,3-0,4 мм и диаметром около 5 мм и глубиной до 1 мм при сварке проволокой диаметром 1,2 и 1,6 мм соответственно. При этом дуга горит до 0,2-0,3 с. Для продолжения процесса сварки необходимо удалить шарик, так как стабильного возбуждения дуги после восстановления подачи проволоки не происходит, а замена роликов или регулировка их сцепления с проволокой увеличивает общие затраты времени.

При сварке плавящимся электродом отказы в токоподводящем наконечнике и тракте подачи проволоки определяют уровень разбрызгивания и качество формирования шва [1]. В работе [2] рассмотрена контактная пара электродная проволока - токоподводящий наконечник и даны рекомендации

по токопередаче скользящим контактом. Там же приведены экспериментальные данные об уменьшении с течением времени диаметра отверстия на отдельных участках токоподводящего наконечника, что приводит к заклиниванию проволоки. Уменьшение диаметра канала токоподводящего наконечника обусловлено тем, что вносимые вместе с проволокой частицы металла (от воздействия на проволоку насечки роликов механизма подачи) нарушают непосредственный контакт проволоки с наконечником, образуют "электрические мостики", оплавливающиеся под действием джоулевой теплоты и прихватывающиеся к внутренней поверхности отверстия наконечника. Увеличение толщины слоя приварившихся частиц может привести к заклиниванию проволоки. Заклинивание же проволоки в наконечнике, так же как и ее загормаживание в тракте при продолжающейся подаче, приводит к накоплению проволокой сил упругих деформаций, которые могут преодолеть силу сопротивления выходу проволоки и привести к ее "выстреливанию", т. е. кратковременному скачкообразному увеличению скорости подачи проволоки до 0,55 м/с [3], что на несколько порядков выше скорости подачи проволоки при сварке.

Из всех известных способов переноса металла проволоки в ванну: свободнолетающий, шлако-защитный, мостиковый - согласно классификации International Institute of Welding, последний наиболее способствует "выстреливанию". При этом длина промежутка проволока-ванна соизмерима с размером капли, т. е. происходит короткое замыкание с резким изменением тепловложения в проволоку и ванну и, как следствие, охлаждение (до затвердевания) при переходе капли в ванну. Поэтому дальнейшее изложение касается сварки короткими замыканиями.

Определим оптимальное приращение проволоки после "выстреливания", не приводящее к нарушению процесса сварки с короткими замыканиями и вероятность (величину зоны при горении дуги) возможного нарушения процесса для исключения причин подобных отказов.

Заглубление капли в ванну определяли по модели, предложенной в

работе [4]. На рис. 1 приведены расчетные данные для проволоки диаметром 1,6 мм в зависимости от объема капли (для трех наиболее распространенных режимов сварки).



**Рис. 1. Зависимость заглубления капли в ванну, обеспечивающего ее устойчивый переход при сварке с короткими замыканиями, от объема капли** ( $\circ$  - отсутствие тока сварки в начале короткого замыкания;  $\blacktriangle$ ,  $\circ\blacktriangle$  - при неблагоприятном действии тока в момент касания, соответственно 150 и 200 А;  $d_3 = 1,6$  мм)

Верхняя граница области перехода капли в ванну ограничена возможностью отталкивания капли из-за плазменных потоков и пинч-эффекта, а нижняя - недостаточной поверхностной энергией для втягивания капли в ванну. Диапазон заглубления каплей оптимальной массы, обеспечивающего их устойчивое слияние с ванной, для проволоки  $d_3$  диаметром 1,2, 1,6 и 2,0 мм составляет 0,03-0,3, 0,05-0,4 и 0,07-0,8 мм соответственно. Полученные значения удовлетворительно коррелируют с расчетными данными более полной модели [5].

Для того чтобы определить зону дуги, в которой "выстреливание" проволоки может привести к нарушению процесса сварки, и оценить вероятность нарушения, необходимо проанализировать некоторые параметры процесса. В таблице приведены некоторые характеристики оптимальных режимов сварки для проволоки разных диаметров. "Выстреливание" может произойти в любой момент цикла, но самыми неблагоприятными являются стадии касания капли с поверхностью ванны и перетекание капли в ванну,

особенно на завершающих стадиях цикла короткого замыкания.

$d_0$ , мм	$V_k$ , мм <sup>3</sup>	$t_{об}$ , с	$t_r$ , с	$v_3$ , мм/с	$l_d$ , мм	$t_y$ , с	$t_{к.з.}$ , с	$t_b$ , с	$d_{тр}$ , мм	$\Delta$ , мм	Источник
0,8	1,1	0,013	—	—	—	—	0,0013	—	1,2—1,4	—	[7]
1,2	0,7*	0,002	—	—	—	—	0,0035	—	1,1	—	[6]
1,2	1,7	0,0097	0,02	50,0	1,0	0,0006—0,006	0,0035	0,002	1,7	0,03—0,3	Данные авторов
1,6	3,0*	0,0086	—	—	—	—	0,0045	—	1,8	—	[6]
1,6	8,0	0,05	0,13	30,0	2,6	0,0017—0,015	0,006	0,00084	2,6	0,05—0,4	Данные авторов
2,0	4,0*	0,0114	—	—	—	—	0,008	—	2,8	—	[6]
2,0	16,0	0,134	0,24	15	3,6	0,0045—0,04	0,012	0,00043	3,1	0,07—0,8	Данные авторов
2,0	14,0	0,078	0,08	—	—	—	0,005	—	3,0	—	[7]
2,0	31,0	0,161	0,167	—	—	—	0,0055	—	3,9	—	[7]

\* Объем капли, переходящей в ванну, минимальный.  
 Об о з н а ч е н и я:  $t_{об}$  — время образования капли;  $t_r$  — время горения дуги (среднее) — экспериментальные данные;  $l_d$  — длина дугового промежутка;  $t_y$  — время накопления упругих деформаций, равное  $\Delta l / v_3$  ( $\Delta$  — допустимое значение "выстреливания" проволоки от общей величины приращения упругих деформаций  $\Delta l$ );  $t_{к.з.}$  — время короткого замыкания;  $t_b$  — время "выстреливания";  $d_{тр}$  — внутренний диаметр канала тракта для подачи электродной проволоки.

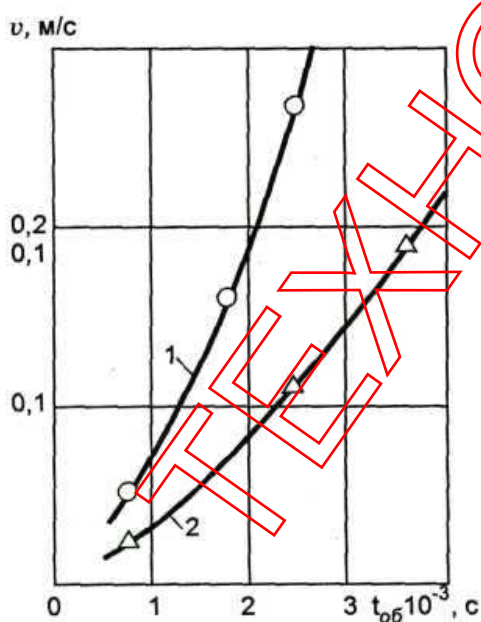
Процесс образования капли завершается, практически, за 0,05 с (см. таблицу, 5-ю строку), т. е. приблизительно за третью часть общего времени горения дуги. За это время длина дугового промежутка составит с учетом одного "выстреливания" во время горения дуги 2,5 мм, двух - 2,1 мм, трех - 1,7 мм. Больше трех "выстреливаний" не произойдет, так как для одного "выстреливания"  $f_y = 0,0133$  с при  $v_3 = 30$  мм/с и  $\Delta = 0,4$  мм. Изменение длины дугового промежутка оценено от первоначальной длины с учетом подачи проволоки и количества "выстреливаний". После приближения капли к поверхности ванны (даже с учетом последующих "выстреливаний") наступают следующие ситуации:

- капля не коснулась ванны, но произошло "выстреливание". Если капля при этом не заглубится более, чем на 0,05 мм, то пинч-эффект оттолкнет ее от поверхности ванны и затем при повторном касании она перейдет в ванну;

- капля коснулась ванны после "выстреливания", погрузившись больше, чем на 0,05 мм (допустим на 0,06 мм). Начнется переход капли в ванну. Время перехода  $f_{к.з.} = 0,006$  с, т. е. капля успеет перейти в ванну до начала возможного следующего "выстреливания", так как  $t$  в тракте порядка 0,013 с;

- "выстреливание" произошло с погружением капли на величину 0,45

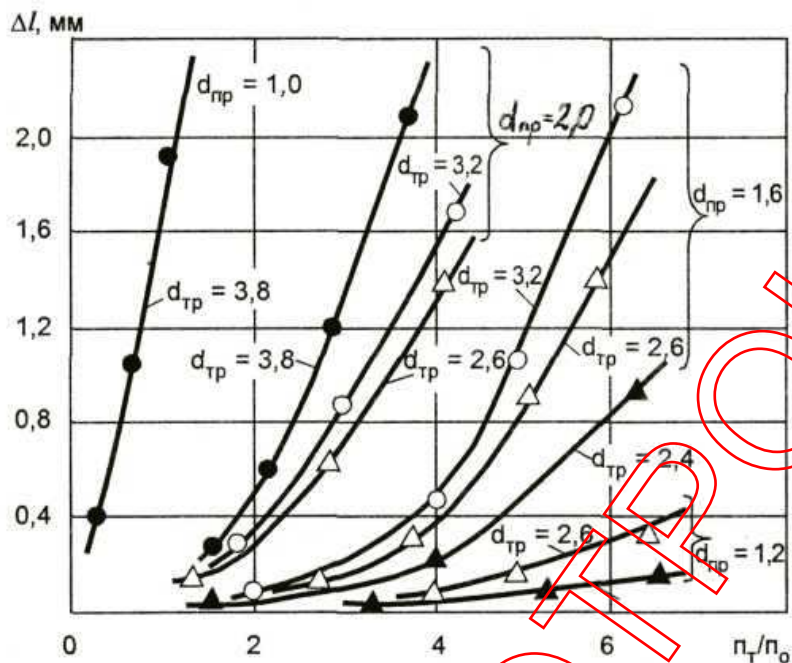
мм, что допустимо (см. рис. 1). Капля перейдет в ванну. Однако в процессе перехода капли и произошло "выстреливание". Наихудший случай - до окончания короткого замыкания осталось 0,001 с. За 0,005 с проволока пройдет при скорости подачи 30 мм/с 0,15 мм, но при этом металл капли приобретет максимальную скорость входа (рис. 2) в ванну. Скорость перемещения капли возрастает, однако при отключении тока градиент нарастания скорости более интенсивный. "Выстреливание" на 0,4 мм практически не повлияет на процесс сварки. Таким образом, "выстреливание" проволоки диаметром 1,6 мм не должно превышать 0,4 мм. При большем значении "выстреливания" расширяется критическая зона "выстреливания" и увеличивается вероятность "замораживания" проволоки. Такие малые значения "выстреливания" [3] обусловлены уменьшением внутреннего диаметра тракта и повышением его жесткости, т. е. сопротивления растягивания тракта за счет упругих деформаций.



**Рис. 2. Интегральная скорость перемещения центра масс капли в процессе ее образования при отключении (1) и наличии (2) тока в момент касания ( $d_s = 2,0$  мм, объем капли  $V_K = 11$  мм<sup>3</sup>, радиус касания капли 0,44 мм)**

Оценка максимального значения "выстреливания" проволоки за счет освобождения ее от упругих деформаций в зависимости от диаметра про-

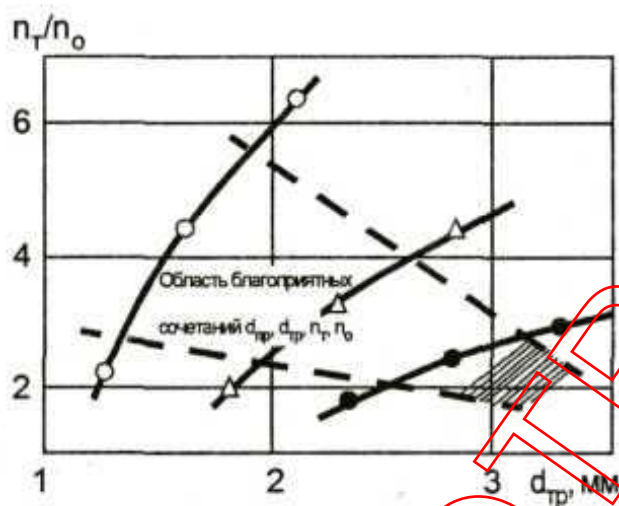
волоки и количества волнообразных изгибов по отношению к первоначальным изгибам, присущим проволоке при свободном прохождении в тракте, приведена на рис. 3.



**Рис. 3. Зависимость приращения упругих деформаций  $\Delta l$  от количества изгибов проволоки в тракте** ( $n_1$  - количество изгибов при торможении проволоки,  $n_0$  - первоначальное количество изгибов,  $d_{тр}$  и  $d_{пр}$  приведены в мм)

При проведении исследований длина тракта составляла 0,5 м, а его растяжение под действием накапливаемых проволокой упругих деформаций минимально. Как и следовало ожидать, внутренний диаметр тракта существенно влияет на "выстреливание" проволоки. Чем он меньше, тем больше продольная устойчивость проволоки к искривлению и больше должна быть осевая сила проталкивания проволоки, а следовательно, тем меньше вероятность накопления упругих деформаций. При одинаковом зазоре (разности внутреннего диаметра тракта и проволоки), чем больше  $d_3$ , тем меньше "выстреливание" при одинаковом количестве изгибов (по отношению к первоначальным). Чем меньше  $d_3$ , тем больше влияние внутреннего диаметра тракта вследствие уменьшения жесткости проволоки.

Следовательно, чтобы обеспечить стабильность процесса перехода каждой капли в соответствии с определенным для каждого диаметра проволоки диапазоном ее заглубления в ванну в результате "выстреливания", необходимо выбрать оптимальный внутренний диаметр тракта и обеспечить его жесткость. Выбор  $d_{TP}$  можно оценить с использованием зависимости на рис. 4.



**Рис. 4.** Зависимость числа допустимых изгибов проволоки в тракте от его внутреннего диаметра для максимально допустимой величины "выстреливания" проволоки, не ухудшающей стабильность процесса сварки ( $\circ$  -  $d_3 = 1,2$  мм,  $\Delta$  -  $d_3 = 1,6$ , мм,  $\bullet$  -  $d_3 = 2,0$  мм)

Приведенные данные показывают, что для каждого  $d_3$  существует область оптимального сочетания  $d_{TP} / d_3$  полностью исключающая появление дефектов сварных швов, обусловленных "выстреливанием" проволоки. Возмущающее действие при "выстреливании" проволоки больших диаметров более заметно и именно поэтому ведение процесса сварки с короткими замыканиями становится более проблематичным. Нижняя граница области оптимальных сочетаний  $d_{TP} / d_3$  определена из условия исключения случаев заклинивания проволоки в тракте и обеспечения длительной службы тракта без технического обслуживания, включающего разборку и промывку тракта от частиц металла, поступающих с подающих роликов, а также поверхностных пятен смазки на проволоке.



Естественно, чем больше изгибов допускает тракт, обеспечивая при этом оптимальное "выстреливание", тем больше вероятность стабильного процесса сварки, даже при скачкообразном изменении скорости ее подачи. Конечно, в реальных условиях вероятность "замораживания" проволоки в ванне полностью не исключается, поскольку известно, что при сварке на одном режиме мы имеем капли разных размеров. Поэтому при разработке автоматов, в основном применяемых при ремонтных работах с дистанционным управлением настройки и сварки, целесообразно принимать дополнительные меры. Например, усилие прижима подающих роликов должно обеспечивать кратковременное проскальзывание проволоки при накоплении проволокой упругих деформаций за счет дополнительных изгибов больше допустимого значения "выстреливания". Необходимо обеспечить также быстрый отвод или торможение проволоки при превышении диапазона  $t_{к.з.}$ . Оценка среднего времени пребывания ванны в жидком состоянии при сварке стальной проволокой диаметром 1,2-2,0 мм дает величину порядка 0,7-1,5 с в зависимости от толщины свариваемого металла. Конечно, передняя часть ванны кристаллизуется быстрее, чем хвостовая, но все равно это будут, допустим, сотые доли секунды для  $d_{э} = 1,2$  мм и десятые для  $d_{э} = 1,6-2,0$  мм.

Наряду с нестабильностью подачи электродной проволоки представляет интерес оценка зависимости скорости подачи от возмущений в электрической части автомата, в частности, от недостаточно стабильной работы электропривода. Четырехкратное [8] и двукратное [7, 9] изменение скорости подачи электродной проволоки может изменить характер массопереноса капель. Изменение геометрических размеров поперечного сечения шва - наиболее серьезное последствие отказа в системе подачи проволоки. При 10 % отклонений по высоте наплавки для исключения образования межваликовых несплавлений или несплавлений между слоями допустимое отклонение скорости подачи проволоки составляет для  $d_{э} - 1,2$  мм не более 80 % при  $I_{ce} = 150-200$  А и не более 20 % при  $I_{ce} = 120-150$  А.

Частота перехода капель при сварке с короткими замыканиями и разбрызгивание могут быть определяющими лишь при недопустимости наличия застывших капель на поверхности изделия, а также изменении стабильности переноса каждой капли вследствие увеличения размеров капли. Известно, что потери на испарение и разбрызгивание, а также неравномерность слоя наплавленного валика уменьшаются с увеличением частоты коротких замыканий [11]. Оценка влияния скорости подачи электродной проволоки на частоту коротких замыканий [11] дает величину изменения скорости подачи проволоки  $\pm 10\%$  для проволоки диаметром 2,0 мм при условии сохранения частоты на максимальном уровне.

Таким образом, можно констатировать, что практически пределы отклонения скорости подачи проволоки определяются отклонениями геометрических размеров наплавки и требованиями стабильности управления переносом капель и уменьшения разбрызгивания. Поддержание в узких пределах оптимальной частоты коротких замыканий, т. е. длительности цикла перехода капли определяется не только колебаниями скорости подачи электродной проволоки, но и рабочей областью на ВАХ источника питания.

Согласно данным работы [12] для управления переходом капли при сварке с короткими замыканиями и выхода на режим в пределах 0,56-0,63 с должны быть комбинированные ВАХ: жесткие на стадии образования капли и возрастающие при подаче импульса тока, а в районе рабочей точки коэффициент ВАХ должен быть равен 0 или 0,02 В/А. Однако комбинированная характеристика ВАХ должна состоять из двух участков: падающего и жесткого, а в некоторых случаях возрастающего.

## **Выводы**

1. Области заглупления капли при сварки с короткими замыканиями, обеспечивающими переход капель в ванну, для проволок диаметром 1,2, 1,6 и 2,0 мм составляют соответственно 0,03-0,3, 0,05-0,4 и 0,07-0,8 мм. Эти области могут быть взяты за основу при оценке "выстреливания" проволоки.

2. Отношение внутреннего диаметра тракта к диаметру проволоки должно быть не более 1,6. При этом жесткость тракта в продольном направлении не должна приводить к возникновению в нем упругих деформаций. Длина тракта должна быть минимально возможной.

3. Электропривод должен обеспечивать стабилизацию подачи проволоки не более  $\pm 10\%$ .

4. Необходимо уточнение вольтамперных характеристик в районе рабочей точки инверторного источника питания для сварки с короткими замыканиями.

### Список литературы

1. Чубуков А. А. Влияние износа токоподводящего наконечника на технологические параметры процесса сварки // Сварочное производство. - 1980. - № 1. - С. 26-27.

2. Дегтярев В. Г., Новиков М. П., Воропай Н. М. Улучшение условий работы контактной пары электродная проволока - токоподводящий наконечник // Автоматическая сварка. - 1991. - № 4. - С. 48-52.

3. Лебедев В. А., Свешников Б. Г. Изучение причин колебаний скорости подачи электродной проволоки (элементы анализа динамики) // Автоматическая сварка. - 1988. - № 7. - С. 38-43.

4. Ищенко Ю. С., Тушева Н. В. Модель расчета перехода капли в ванну при коротком замыкании // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерная техника и технология. - 1990, Вып. 5. - С. 8-14.

5. Судник В. А., Иванов А. В., Дилтей У. Математическая модель источника теплоты при дуговой сварке плавящимся электродом в смеси защитных газов. Ч. 2. Импульсный процесс // Сварочное производство. - 2000. - № 9. - С. 9-15.

6. Плавление электродной проволоки при кратковременном дуговом разряде / А. А. Буки, А. В. Утробин, А. Н. Юсупов и др. // Сварочное производство. - 1971. - № 1. - С. 13-15.

7. Потаповский А. Г. Сварка в защитных газах плавящимся электродом. - М.: Машиностроение, 1974. - 239 с.

8. Сварка малоуглеродистых сталей плавящимся электродом при комбинированной защите / В. С. Лаевский, Н. Г. Дюргеров, В. А. Ленивкин и др. // Сварочное производство. - 1969. - № 10. - С. 21-22.

9. Ищенко Ю. С. Некоторые закономерности перехода капли при коротком замыкании // Сварочное производство. - 1992. - № 3. - С. 23-26.

10. *Акулов А. И., Спицын В. В.* Влияние режима и пространственного положения на размеры шва при сварке в  $\text{CO}_2$  // Сварочное производство. - 1971. № 2. - С. 27-29.

11. *Попков А. М.* О длительности циклов при сварке с систематическими короткими замыканиями // Сварочное производство. - 1970. № 7. - С. 32-33.

12. *Одзима К.* Зависимость устойчивости и саморегулирования сварочной дуги от характеристики источника питания // Дэнки гаккай ромбунси. - 1981. Т. 101 А. № 1. - С. 7-14.

ТЕХНОТРОН