

## ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЯЕМОГО ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ СВАРКЕ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ С КОРОТКИМИ ЗАМЫКАНИЯМИ ДУГОВОГО ПРОМЕЖУТКА

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

До настоящего времени автоматическая сварка плавящимся электродом в защитных газах не получила широкого применения при соединении неповоротных стыков труб в атомной промышленности. Это связано с жесткими требованиями по подготовке и сборке стыков труб под сварку, качеству сварных соединений и сложностью формирования швов в различных пространственных положениях.

При сварке плавящимся электродом в защитных газах тепловые, газодинамические и электромагнитные явления в дуге [1] дополнительно осложняются явлениями массопереноса капель расплавленного электродного металла. К сожалению, неразрывность процессов в дуге исключает возможность отдельного управления плавлением основного металла и формированием наплавленных слоев. Возможность управления размерами сварочной ванны и массопереносом капель расплавленного металла обеспечивают только импульсные (нестационарные) технологии сварки. При этом наиболее распространенными способами управления тепломассопереносом являются:

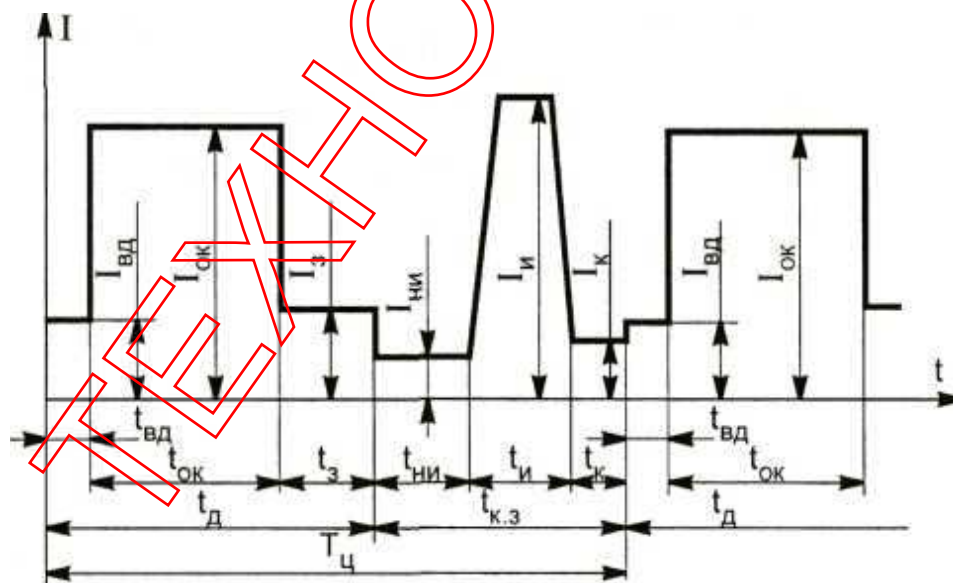
- управление импульсами тока с кратковременным увеличением импульса тока после образования капли для ее перемещения через дуговой промежуток — импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом;
- систематическое уменьшение тока сварки в момент замыкания капель дугового промежутка — сварка плавящимся электродом с короткими замыканиями (*КЗ*) дугового промежутка;
- различные сочетания обоих импульсных процессов.

Цель данной работы - определение параметров микроциклов сварки с

учетом особенностей процесса сварки плавящимся электродом с КЗ как наиболее предпочтительного способа формирования швов, расположенных в различных пространственных положениях.

В результате работ по управляемому тепломассопереносу капле электродного металла, выполненных в ЧелГТУ (Челябинск), РИСХМ и РГУПС (Ростов-на-Дону), Институте физики прочности и материаловедения СО РАН (Томск), ТулГУ (Тула), ИЭС им. Е. О. Патона (Киев), МГТУ им. Н. Э. Баумана, НИКИМТ (Москва) и других организациях, получена циклограмма изменения тока на разных стадиях процесса сварки с КЗ (рис. 1). При этом полный цикл  $T_{Ц}$  переноса капли учитывает как время ее образования  $t_{Д}$  так и время короткого замыкания  $t_{к.з.}$  каплей дугового промежутка при переходе ее в сварочную ванну.

При управляемом переносе каждой капли первичное возбуждение дуги проводят при небольшом значении тока  $I_{ВД}$ , чтобы уменьшить газодинамическое воздействие на металл ванны.



**Рис. 1. Циклограмма изменения тока основных стадий процесса сварки плавящимся электродом с короткими замыканиями дугового промежутка**

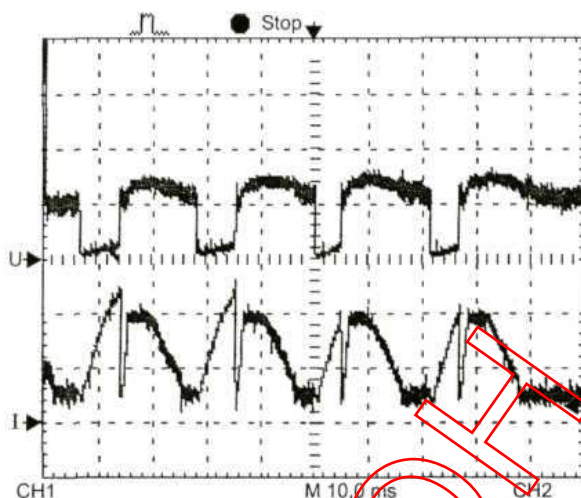
По истечении времени начала устойчивого дугового процесса  $t_{ВД}$  подается импульс тока  $I_{ОК}$ , достаточный для образования капли оптимального объема. Затем ток в момент касания капель ванны снижают до значения  $I_{З}$ , необходимого для поддержания дугового разряда и исключения активного

воздействия на каплю плазменных потоков, определяющих пространственную неустойчивость капли на электродной проволоке (зона "электрод - капля"). При  $KЗ$  ток можно уменьшать дополнительно (до нуля) на время, за которое капля при переходе в ванну под действием сил поверхностного натяжения деформируется так, что наименьшим сечением в системе "электрод - капля - ванна" будет сечение в зоне "электрод - капля". Это исключит отрицательное проявление пинч-эффекта в зоне "капля - ванна" при подаче импульса тока  $I_{II}$ . Импульс тока  $I_{II}$  действует до начала разрыва перемычки между каплей и проволокой и в этот момент ток резко снижают до значения  $I_K$  необходимого для повторного возбуждения дуги после разрыва перемычки.

Реализация такой циклограммы возможна при двух условиях. Первое - наличие датчиков обратной связи на важных для стабилизации процесса стадиях цикла сварки и прежде всего определения моментов уменьшения тока при касании каплей поверхности ванны и последующей подачи импульса тока для ускорения перехода капли в ванну. Второе - наличие исполнительных устройств в силовой части источника тока, обладающих соответствующим быстродействием обработки сигналов датчика для выдачи соответствующего импульса тока (большей или меньшей амплитуды).

Главным источником информации для блока управления источником питания дуги являются комбинированные обратные связи, в том числе по напряжению дуги. Например, начало  $KЗ$  (рис. 2) можно определять по резкому снижению напряжения после устойчивого контакта капли с ванной и образования перемычки в зоне "капля - ванна". Этот временной интервал перехода от  $t_D$  к  $t_{K.з}$  будет являться точкой отсчета времени подачи импульса тока для ускорения перехода капли в ванну. Лавинообразное увеличение напряжения дуги после изменения формы капли с уменьшением диаметра перемычки в зоне "электрод - капля" не только определяет необходимость окончания времени  $KЗ$ , но и необходимость резкого снижения тока импульса до значения, исключающего взрыв перемычки. Изменение напряжения после

повторного возбуждения дуги определяет время начала действия тока для образования новой капли.



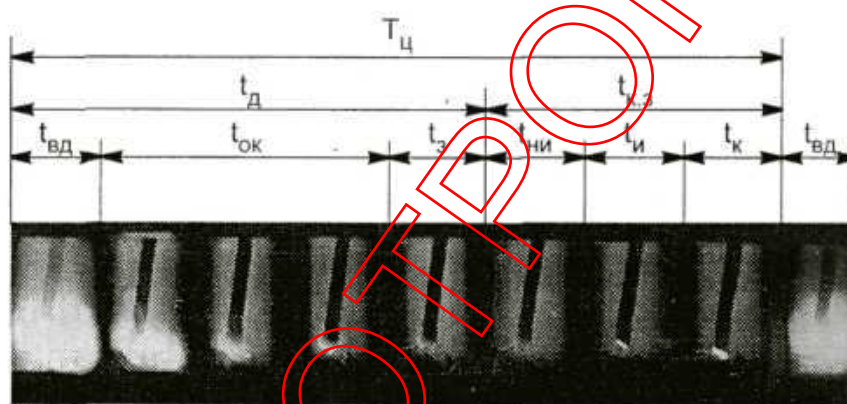
*Рис. 2. Оциллограмма процесса сварки с управляемыми короткими замыканиями*

В связи с переходом от традиционных стационарных процессов сварки плавящимся электродом к управляемым процессам образования и переноса капли оптимальных размеров, принципиально изменяется и подход к выбору параметров режима на каждой стадии микроцикла.

Математическая модель процесса плавления и переноса электродного металла с систематическими  $KЗ$  дугового промежутка, описанная в работе [2], позволяет оценить зависимости скорости роста объема капли расплавленного металла от сварочного тока, длительности  $KЗ$  от начального и конечного (пикового) значений тока, размеров переносимых капель и частоты  $KЗ$  от скорости подачи проволоки при различной длительности импульса тока в процессе горения дуги, а также вылета электрода. Однако данной информации недостаточно для выбора всех параметров циклограммы изменения тока, приведенной на рис. 1.

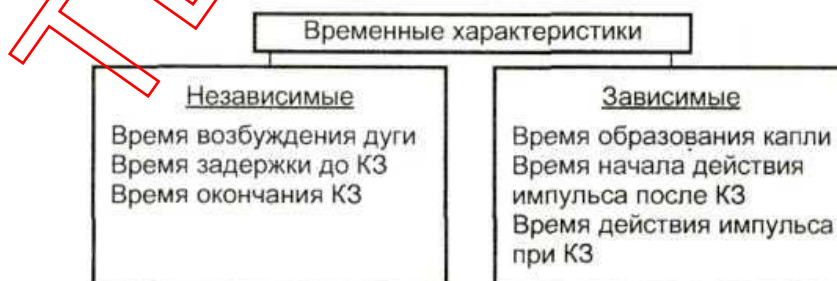
На основании расчетно-экспериментальных данных авторов и анализа данных других исследователей предлагается методика определения параметров цикла и областей режимов сварки неповоротных стыков труб в зависимости от скорости подачи электродной проволоки. В качестве примера приведем оценку параметров режимов сварки для проволоки диаметром 1,2 мм для квазистационарного режима ее плавления и перехода капель в ванну.

Прежде всего следует обратить внимание на то, что временные характеристики стадий цикла определяют скорость подачи проволоки и частоту переноса капель. Причем временные характеристики процесса зависят от теплофизических особенностей и назначения каждой стадии общего цикла образования и перехода капли. Поэтому временной интервал протекания одних стадий может быть постоянным, а других - переменным, определяемым объемом капли, значением тока, составом защитного газа и т. п. Реальный цикл управляемого тепломассопереноса капли приведен на рис. 3.



*Рис. 3. Реальный цикл управляемого тепломассопереноса капли*

Условно разделим (рис. 4) временные характеристики процесса сварки с КЗ на две группы: независимые (постоянные) и зависимые (переменные) и определим их влияние на стадии тепломассопереноса каплей.



*Рис. 4. Временные характеристики процесса сварки с короткими замыканиями*

Рассмотрим составные стадии времени дугового процесса образования капли:

$$t = t_{вд} + t_{ок} + t_3.$$

Во время возбуждения дуги  $t_{ВД}$  формируется устойчивый дуговой разряд. В работе [3] приведены данные о зависимости минимального напряжения холостого хода  $U_{ХХ}$  источника сварочного тока, необходимого для развития дугового разряда, от диаметра электрода. Сравнительные результаты этих данных, а также экспериментальные данные авторов о скорости нарастания тока разряда приведены в табл.1.

Таблица 1

Диаметр проволоки, мм	Скорость подачи проволоки, м/ч	$U_{ХХ}$ , В	Скорость нарастания тока $dI/dt$ , кА/с
1,2	125	32,0	53
	250	36,5	102
	350	37,5	142
1,6	125	34,0	93
	250	37,0	181
	350	38,0	252

Следует обратить внимание на то, что данные табл. 1 приведены для случая бесконтактного возбуждения дуги. В литературе практически нет данных о времени возбуждения дуги. В работе [3] эта величина составляет 0,0003-0,005 с, по данным работы [4], для проволоки диаметром 1,2 мм она находится в пределах 0,0007-0,0014 с.

Известно, что повторное возбуждение дуги после разрыва перемычки гарантировано при наличии прослойки жидкого металла в сварочной ванне. Поэтому для дальнейших расчетов предлагается принимать для проволоки диаметром не более 2 мм  $t_{ВД} = 0,0005-0,002$  с, причем  $t_{ВД}$  уменьшается с уменьшением диаметра проволоки.

Что касается тока, то, по данным работы [3], минимально возможный ток дуги при сварке в аргоне и углекислом газе для проволоки диаметром 1,6 и 2,0 мм не превышает 2—3 А.

Время образования капли  $t_{ОК}$  оптимального размера определяется значением тока. Теплофизика процесса образования капли рассмотрена, в частности, в работах [2, 5, 6]. Для практических целей важно иметь данные о времени и токе образования капли. Исследователи, как правило, приводя

данные о сварке с КЗ, приводят среднее значение тока, что не позволяет точно определить значение сварочного тока при образовании капли, как того требуют условия реализации циклограммы процесса сварки (см. рис. 1).

Однако расчетными методами можно точно оценить время образования капли, а с несколько меньшей степенью вероятности и амплитуду импульса тока.

Поскольку все исследователи при экспериментальном определении  $t_{ок}$  или расчете выбирали скорость подачи проволоки в интервалах, обеспечивающих оптимальную частоту переноса капель, то можно считать, что капли имели оптимальный размер, хотя, конечно, объем капли зависит от тока и времени его протекания. В табл. 2 приведены сравнительные данные о времени образования капли при сварке с КЗ.

Таблица 2

Номер по порядку	$d_э$ , мм	Ток, А	$U_d$ , В	$U_{хх}$ , В	Скорость подачи $v_э$ , м/с	Вылет проволоки, мм	Объем капли $V_k$ , мм <sup>3</sup>	Частота переноса $f_k$ , 1/с	$t_{ок}$ , с	Источник информации
1	2,0	100	—	—	—	—	1,6	—	0,009	[6]
2		200	—	—	—	—	2,6	—	0,0075	
3		300	—	—	—	—	3,1	—	0,0063	
4		300	—	—	—	—	4,7	—	0,009	
5	1,6	280	20	48	280	16	2,7	90	0,0083	Данные авторов
6			22		312		14	3,9	76	
7	1,2	—	18	60	380,0	14	—	—	0,008	[5]
8		—	23		380,0		—	—	0,008	
9		—	25		380,0		—	—	0,008	
10		—	23		80,0, 233,0		—	—	0,0075	
11	1,2	135	21	48	331	12	1,7	97	0,0093	Данные авторов
12	1,0	115	22		310		1,32	94	0,0087	
13	0,8	60	—	—	146	10	1,15	70	0,013	[7]
14		95	—		252		0,9	100	0,0085	
15		120	—		335		1,4	105	0,0079	
16	—	—	—	41	396, 600	12	—	—	0,0075	[2]

Следует обратить внимание, что данные п. 1 - 4 табл. 2 приведены для случая подачи импульса тока при расстоянии между электродом и ванной 1,6 мм. Видно, что время образования капли оптимального размера для  $d_э = 0,8-1,2$  мм в основном находится в диапазоне 0,0075-0,008 с. Для  $d_э = 1,6$  мм оптимальный объем капли, как известно, составляет 6-10 мм<sup>3</sup>, а для  $d_э = 2,0$  мм - 16-28 мм<sup>3</sup>. Естественно, что для образования капли время воздействия импульса тока должно быть большим и находиться в пределах 0,1-0,2 с. По

данным работы [3], для  $d_{\text{э}} = 2,0$  мм  $t_{0\text{К}} = 0,08-0,16$  с.

Что касается изменения амплитуды тока в импульсе, то расчеты показывают, что для образования капли из проволоки  $d_{\text{э}}$  диаметром 0,8 мм  $I_{0\text{К}} = 60-80$  А,  $d_{\text{э}} = 1,2$  мм - 100-120 А;  $d_{\text{э}} = 1,6$  мм - 140-160 А;  $d_{\text{э}} = 2,0$  мм - 200-250 А.

Время задержки  $t_3$  необходимо для стабилизации процесса образования капли оптимального размера из-за возможных возмущений по скорости подачи проволоки и приобретения каплей пространственной устойчивости в результате резкого снижения силового воздействия плазменных потоков и теплового воздействия дуги. Так как время формирования стабильного термического равновесия при изменении энергии дуги (тока) мало, то практически всю долю во времени задержки составляет время, необходимое для стабилизации процесса образования капли.

Ток в течение этого периода времени должен обеспечивать только поддержание капли и большей части объема ванны в жидком состоянии с учетом времени ее кристаллизации.

По данным ряда исследований [4,5,7], минимальные значения тока для проволоки диаметром  $d_{\text{э}} = 1,2$  мм лежат в пределах 30-50 А. Экспериментально установлено, что оптимальное пятно контакта капли с поверхностью ванны достигается для проволоки диаметром 1,2 мм при токе 35 А.

Необходимо отметить, что даже при образовании капли увеличенных объемов наблюдаются колебания в скорости плавления проволоки и скорости первичной кристаллизации капли [5]. При этом время кристаллизации составляет 0,0025-0,005 с. Это необходимо учитывать как при выборе времени задержки, так и тока **КЗ**.

Период времени  $f_{\text{КЗ}}$  при переходе капли в ванну также состоит из нескольких стадий:

$$f_{\text{КЗ}} = t_{\text{НИ}} + t_{\text{В}} + t_{\text{К}}$$

Период времени до начала действия импульса тока  $t_{\text{НИ}}$  после касания каплей ванны на стадии **КЗ** необходим, чтобы капля при переходе в сва-



рочную ванну деформировалась и в системе "электрод-капля-ванна" минимальная перемычка оставалась в области "электрод-капля". В этом случае пинч-эффект от импульса тока будет способствовать переходу капли в ванну (особенно для капель малого объема), усиливая действие сил поверхностного натяжения, т. е. сокращать время **КЗ**. Расчеты показывают, что при диаметре проволоки 2,0 мм и токе сварки менее 100 А  $t_{НИ} = 0,002$  с независимо от площади первоначального касания капель поверхности ванны, а для диаметра 1,2 мм - 0,001 с [8].

Время действия импульса тока  $t_{И}$  окончания короткого замыкания  $t_{К.З.}$  взаимосвязаны. Прежде всего следует отметить, что при подаче импульса тока время **КЗ** существенно сокращается только до определенного значения [8, 9]. С другой стороны, в этой области (до определенного значения тока) время действия **КЗ** может резко изменяться. Между этими посылками и следует выбирать: или меньшая амплитуда импульса - большее время его действия - меньший запас времени для снижения тока к концу КЗ или большая амплитуда импульса — меньшее время его действия - больший запас времени для снижения тока, так как:

$$t_{К} = t_{К.З.} - t_{НИ} - t_{И}$$

В табл. 3 в качестве примера приведены экспериментальные данные взаимосвязи этих временных параметров (диаметр проволоки 2,0 мм).

Таблица 3

$t_{К.З.}, с$	Параметры импульса		$t_{К}, с$
	$t_{И} \cdot 10^{-3}, с$	$I, А$	
0,0064	0—1,9	0	0
	1,9—2,64	154	
	2,64—3,64	113	
	3,64—4,79	97	
	4,79—6,4	87	
0,0054	0—1,9	0	0,0028
	1,9—2,6	413	
0,0045	0—1,9	0	0
	1,9—2,57	390	
	2,57—3,33	286	
	3,33—4,5	220	
0,0045	0—1,9	0	0,002
	1,9—2,5	667	

Видно, что для существенного (до 30 %) снижения времени КЗ необходимы импульсы большой амплитуды. Видимо, нецелесообразно для снижения времени **КЗ** рисковать стабильностью процесса, поэтому предлагается выбирать импульс тока постоянной амплитуды, так называемой "страховочной" величины. Этот импульс необходим прежде всего для переноса капель малого размера при появлении их из-за возможных отклонений процесса, затрудняющих их поглощение ванной одной поверхностной энергией. Расчеты показывают, что для проволоки диаметром  $d_э = 1,05$  мм  $V_K < 1$  мм<sup>3</sup>,  $d_э = 1,6$  мм - не более 6 мм<sup>3</sup>;  $d_э = 2,0$  мм - не более 8 мм<sup>3</sup>. Для капель оптимального объема импульс тока снизит время КЗ.

Расчетные ток импульса и время его действия, а также время задержки до окончания КЗ приведены в табл.4.

Таблица 4

$d_э$ , мм	$I_i$ , А	$t_{к.з} = t_{ни} + t_i + t_k$ , с			$t_{к.з} \cdot 10^{-3}$ , с
		$t_{ни} \cdot 10^{-3}$	$t_i \cdot 10^{-3}$	$t_k \cdot 10^{-3}$	
1,2	100	1,0	1,0	1—2	2—4
1,6	140	1,5	1,5	3—5	6—8
2,0	180	2,0	2,0	6—10	10—14

Таблица 5

Номер по порядку	$t_{вд} \cdot 10^{-3}$ , с	$t_{от} \cdot 10^{-3}$ , с	$t_э \cdot 10^{-3}$ , с	$t_d \cdot 10^{-3}$ , с	$t_{к.з} \cdot 10^{-3}$ , с	$T_{ц} \cdot 10^{-3}$ , с
1	0,7	7,3	0—25	8—33	3,0	11,0—36,0
2	1,1	10,4	0—25	11,5—36,5	3,5	15,0—40,0
3	1,5	12,5	0—25	14—39	4,0	18,0—43,0

Повторное возбуждение дуги на стадии  $t_{вд}$  можно осуществлять как контактным [7], так и бесконтактным способом — низковольтным импульсным разрядом [3].

Скорость подачи электродной проволоки  $V_э$  и допуски на ее стабильность должны определяться во взаимосвязи оптимального размера капли от временных допусков на ее образование и переход в ванну [10]. Конечно, это не исключает корректировку скорости подачи для реальных условий процесса, в частности, дополнительного учета теплофизических свойств газа, вылета проволоки, допуска на диаметр проволоки и т. п.

Скорость подачи электродной проволоки  $V_э$  при сварке с **КЗ** равна:

$$v_3 = \frac{l_3}{t_{60} + t_3 + t_{OK} + t_{К.З.}};$$

где  $l_3$  - длина участка проволоки, необходимая для образования капли оптимального объема.

В связи с возможными реальными отклонениями времени возбуждения дуги, образования капли и **КЗ** целесообразно оценивать скорость подачи проволоки с учетом времени задержки  $t_3$ . С другой стороны, полный цикл образования и переноса капли определяет частоту переноса капель, которая также должна учитываться при оценке скорости подачи проволоки. В работе [7] приведены оптимальные значения частоты переноса капель для процесса сварки с КЗ в стационарном режиме, широко применяемом в настоящее время. Исходя из этих соображений и следует выбирать диапазон скорости подачи проволоки.

Для примера оценим диапазон скоростей подачи проволоки диаметром 1,2 мм для капли объемом 2,2 мм<sup>3</sup>, что соответствует  $l_3 = 2,0$  мм. В табл. 5 приведены исходные данные для определения продолжительности цикла тепломассопереноса:

$$T_u = t_D + t_{К.З.}$$

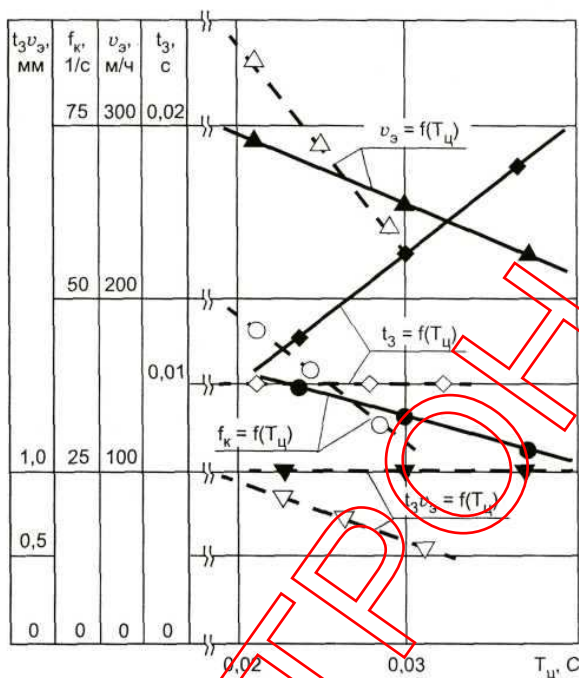
При оценке  $t_3$  исходили из двух возможных предположений о продолжительности времени  $t_D$  и оценки реальных циклов тепломассопереноса:

- $t_3$  постоянно и не превышает 0,01 с. Этот временной интервал выбран с учетом реальности его воспроизводимости аппаратурой управления процессом и сопоставимо с реальным диапазоном времени образования капли  $t_D$ ;

- путь прохождения капли до касания ею поверхности ванны  $t_3 v_3 = \text{const}$ .

Для упрощения расчетов примем его равным 1 мм, что исключает преждевременные контакты капли с поверхностью ванны из-за колебаний поверхности ванны и дискретности плавления электродной проволоки, возмущений при прохождении ее в тракте [10].

Обработка данных (рис. 5) показала, что скорость подачи проволоки при  $t_3 v_3 - \text{const}$  меньше (300-220 м/ч), чем при  $t_3 = \text{const}$  (340—260 м/ч), хотя отличие составляет 10-15 %.



**Рис. 5. Зависимость скорости подачи проволоки, времени задержки, частоты переноса капли, длины дугового промежутка от момента образования капли до ее касания поверхности ванны от времени полного цикла** (сплошные линии -  $t_3 v_3 = \text{const} = 1,0$  мм, штриховые -  $t_3 = \text{const} = 0,01$  мм, диаметр проволоки 1,2 мм)

Однако реальный диапазон частоты переноса капель  $t_K$  при  $t_3 = \text{const}$  выше и лежит в области рекомендуемых для плавящегося электрода при сварке с КЗ (36-41 1/с), чем при  $t_3 v_3 - \text{const}$  при  $t_K = 26-40$  1/с. Следует отметить, что путь перемещения капли 0,7-1,0 мм достаточен для оптимизации ее объема. Исходя из вышеизложенного, предпочтительнее выбирать диапазон скоростей подачи проволоки из условия  $t_3 = \text{const}$  и возможности корректировки времени образования капли, обеспечивающего ее оптимальный объем до перехода в ванну.

Для определения конкретного значения скорости подачи проволоки и частоты переноса рассмотрим диапазон изменения скорости подачи электродной проволоки диаметром 1,2 мм из условия  $t_3 = \text{const} = 0,01$  с. Естественно, что оптимальные установочные параметры соответствуют  $t_d =$

0,015 с и  $t_3 = 0,01$  с с тем, чтобы учесть возможные отклонения для  $t_{\text{вд}}$ ,  $t_{\text{ор}}$   $t_{\text{к.з}}$ . Исходя из этого получим оптимальное значение скорости  $v_{\text{э опт}} = 290$  м/ч.

С учетом необходимого запаса времени для компенсации возможных возмущений в системе подачи проволоки примем  $t_3 > 0,005$  с. В этом случае допустимая  $v_{\text{э max}} = 360$  м/ч. При снижении  $v_{\text{э}}$  ниже 290 м/ч запас  $t_3$  возрастет и уже не является регламентирующим для  $V_{\text{э min}}$ . В тоже время уменьшение скорости подачи проволоки  $V_{\text{э}}$  уменьшает частоту переноса капель, что является ограничением по возможному снижению  $v_{\text{э}}$ . Известно, что снижение частоты переноса капель  $f_K < 30$  1/с ухудшает формирование швов и увеличивает разбрызгивание [5]. Исходя из этого  $v_{\text{э}}$  должна составлять 220 м/ч, а  $t_3 - 0,018$  с.

Оценим диапазон изменения скорости подачи проволоки в зависимости от колебаний  $t_D$ .

*Верхний предел.* При  $t_D = 0,011$  с и скорости подачи проволоки  $V_{\text{э}} = 360$  м/ч имеем  $t_3 = 0,01$  с и  $f_K = 50$  1/с. Такое увеличение скорости допустимо. При  $t_D = 0,018$  с и  $V_{\text{э}} = 360$  м/ч  $t_3 = 0,002$  с и  $f_K = 50$  1/с. Видно, что в данном случае условие обеспечения оптимального тепломассопереноса для  $t_3$  не выполняется. Для  $t_D = 0,018$  с и  $f_3 > 0,005$ с  $v_{\text{э min}} = 310$  м/ч. Следовательно, верхний предел изменения скорости составляет уже не 360, а 310 м/ч.

*Нижний предел.* При  $t_D = 0,011$  с и  $V_{\text{э}} = 220$  м/ч  $f_3 = 0,022$  с и  $f_K = 30$  1/с. Снижение скорости до 220 м/ч допустимо. Следовательно, диапазон изменения скорости подачи проволоки диаметром 1,2 мм составляет 310-220 м/ч или от 7 до -24 %. Изменение скорости подачи проволоки взято от оптимального значения скорости, равного 290 м/ч. Если  $V_{\text{э}} = 290 \pm \Delta V_{\text{э}}$ , то допустимое отклонение скорости подачи  $\pm V_{\text{э}}$  для проволоки диаметром 1,2 мм.

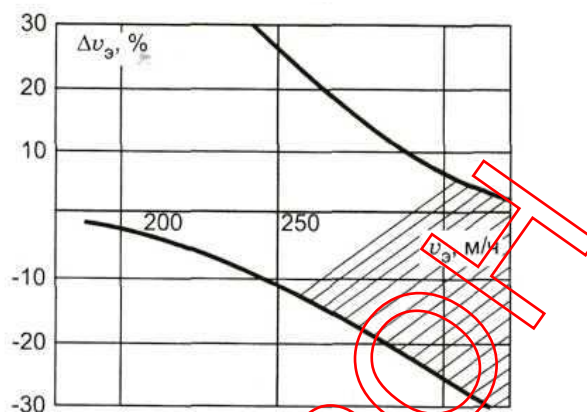
$$\Delta v_{\text{э}} = \frac{310 - v_{\text{э}}}{v_{\text{э}}}; \quad -\Delta v_{\text{э}} = \frac{v_{\text{э}} - 220}{-v_{\text{э}}}.$$

Например, при  $v_{\text{э}} = 240$  м/с,  $t_D = 0,015$  с,  $t_3 = 0,015$  с имеем следующие

допуски:

$$\Delta v_3 = \frac{310 - 240}{240} = 29\% ; \quad -\Delta v_3 = \frac{240 - 220}{-240} = -8\% .$$

На рис. 6 приведены допустимые отклонения скорости подачи проволоки диаметром 1,2 мм в зависимости от установочного значения.



**Рис. 6. Зависимость допустимых отклонений скорости подачи проволоки от установочного значения**

График позволяет оценить стабилизацию скорости подачи проволоки в зависимости от ее значения. Видно, что большой диапазон выбора скорости подачи проволоки требует большей стабилизации: при  $v_3$  - 230-280 м/ч степень стабилизации  $\pm 5\%$ ; при 240-270 м/ч -  $\pm 10\%$ , около 260 м/ч -  $\pm 15\%$ . Полученные значения хорошо согласуются с данными работ [11,12] и эти результаты можно экстраполировать с определенной погрешностью на другие диаметры проволок с учетом состава защитного газа в зоне горения дуги.

## Выводы

1. Импульсное управление переносом капель электродного металла при сварке плавящимся электродом с короткими замыканиями требует качественно иного подхода к выбору параметров циклограммы изменения тока и скорости подачи проволоки. При этом в зависимости от скорости подачи и диаметра электродной проволоки стабилизация электропривода находится в пределах от  $\pm 15\%$  до  $\pm 5\%$ .

2. Оценка параметров циклограммы по предложенной методике для проволоки диаметром 1,2 мм показала ее достаточную точность по оптимальной частоте переноса капель.

### Список литературы

1. *Тиходеев Г. М.* Энергетические свойства электрической сварочной дуги. - М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1961. - 256 с.
2. *Сараев Ю. Н., Шнигунова О. И.* Математическая модель плавления и переноса электродного металла с систематическими короткими замыканиями дугового промежутка // Сварочное производство. - 1992. - № 6. - С. 28-32.
3. *Сагиров Х. И., Дюргеров Н. Г., Морозкин И. С.* Зажигание сварочной дуги. - Ростов-на-Дону: Гэфест, 1999. - 200 с.
4. *Акулов А. И., Киселев М. И., Стцын В. В.* Действие газодинамического удара, возникающего при разрыве перемычки электродного металла при сварке в  $\text{CO}_2$  // Сварочное производство. - 1967. - № 12. - С. 18-20.
5. *Букаров В. А., Ермаков С. С.* Механизм образования капли и ее переход в ванну при дуговой сварке // Сварочное производство. - 1993. - № 11-12. - С. 20-23.
6. *Плавление электродной проволоки при кратковременном дуговом разряде / А. А. Буки, А. В. Утробин, А. Н. Исупов 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. *Управление переносом капли при сварке плавящимся электродом с короткими замыканиями дугового промежутка / С. И. Полосков, Ю.С. Ищенко, В. А. Лебедев, О. Б. Гецкин // Сварочное производство. - 2001. - № 6. - С. 6-9.*
9. *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.*
10. *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.*
11. *Патон Б. Е., Лебедев А. В.* Управление плавлением и переносом электродного металла при сварке в углекислом газе // Автоматическая сварка. - 1988. - № 11. - С. 1-5.
12. *Влияние особенностей газовой защиты сварочной ванны на некоторые технологические параметры процесса сварки плавящимся электродом / С. И. Полосков, Ю. С. Ищенко, В. А. Лебедев, О. Б. Гецкин // Сварка и смежные технологии. - М.: МЭИ (ТУ), 2000. - С. 26-28.*