



ПОКАЗАТЕЛИ СТАБИЛЬНОСТИ ПРОЦЕССА ДУГОВОЙ СВАРКИ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ

Ю. Н. ЛАНКИН, д-р техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Предложена формулировка термина стабильность процесса дуговой сварки плавящимся электродом. Рассмотрены и проанализированы объективные показатели стабильности. Для каждого способа сварки и характера переноса металла предложен набор показателей стабильности процесса.

Ключевые слова: дуговая сварка, плавящийся электрод, качество процесса сварки, стабильность процесса сварки, показатели стабильности

Одним из основных показателей качества процесса дуговой сварки плавящимся электродом является его стабильность, с которой тесно связаны такие показатели качества, как разбрызгивание и качество формирования сварного шва. В настоящее время не существует общепринятой формулировки понятия стабильности процесса сварки. Каждый исследователь понимает стабильность процесса сварки по-своему, и поэтому использует различные показатели стабильности.

Цель настоящей работы — сформулировать понятие стабильности процесса дуговой сварки плавящимся электродом и выбрать показатели стабильности в зависимости от способа сварки и типа переноса металла плавящегося электрода в сварочную ванну.

Известны несколько различных определений термина «стабильность процесса сварки». В ГОСТ 25616–83 (СТ СЭВ 3235–81) для ручной сварки штучным электродом введен термин «стабильность процесса сварки», однако не дана его формулировка [1]. Позже разработчики этих стандартов сформулировали термин «стабильность процесса сварки» для ручной и механизированной сварки следующим образом [2, 3]: «Под термином стабильный процесс сварки понимают процесс, обеспечивающий получение качественно сформированного сварного соединения с достаточно гладкой поверхностью и практически неизменными по всей длине основными параметрами — глубиной провара, шириной и высотой валика». Близкое определение предложили авторы работы [4]: «Стабильным процессом дуговой сварки принято считать процесс, обеспечивающий постоянство геометрических размеров сварного шва или отклонение последних в допустимых пределах». Фактически это является формулировкой не стабильности процесса сварки, а следствия стабильности этого процесса. Согласно данной форму-

лировке автоматически измерять показатели стабильности непосредственно в процессе сварки весьма затруднительно.

В широком смысле латинское слово *stabilis* означает постоянный, устойчивый. В работах [5–8], например, не делается разницы между понятиями «стабильный» и «устойчивый», а в [9] дано следующее определение: «Устойчивость дуги в пространстве называется стабильностью дуги». Однако в современной технической литературе термины стабильный и устойчивый, как правило, синонимами не являются.

Устойчивым принято считать процесс, возвращающийся в равновесное состояние после любых достаточно малых начальных отклонений, вызванных действием внешних возмущений. В сварке этим понятием пользуются при анализе так называемого явления саморегулирования дугового процесса.

Под стабильностью технологического процесса обычно понимают свойство последнего, обуславливающего постоянство распределения вероятностей для его параметров в течение некоторого интервала времени без вмешательства извне [10]. Иными словами, процесс, отклонение параметров которого от средних значений не превышает заданного уровня, называется стабильным. Соответственно мерой стабильности процесса является отклонение его параметров от среднего значения. Обычно в качестве меры отклонения дискретного сигнала от среднего значения \bar{x} принимаются дисперсия

$$\sigma^2(x) \approx \frac{1}{n-1} \sum_i^n (x_i - \bar{x})^2,$$

где n — количество измерений, или $\sigma(x) = \sqrt{\sigma^2(x)}$ — среднеквадратичное отклонение, или коэффициент вариации $K_V(x) = \sigma(x)/\bar{x}$.

Чаще всего под стабильностью процесса сварки понимают стабильность горения дуги и стабильность (регулярность) переноса металла электрода в сварочную ванну.



Набор показателей, используемых для характеристики стабильности процесса сварки, зависит от способа сварки и способа переноса металла электрода в сварочную ванну.

Ручная сварка покрытым электродом. Для этого способа сварки в большинстве случаев ограничиваются указанием — стабильная или нестабильная дуга. Иногда применяется экспертная оценка стабильности дуги по трех- [6] или четырехбалльной системе, как рекомендовано в ГОСТ 25616–83 (СТ СЭВ 3235–81) [1]. Стабильность процесса сварки независимо от рода тока оценивается сварщиком-испытателем по частоте обрывов дуги, равномерности ее горения, вибрации и характеру звучания дуги. Четких определений того, что именно подразумевается под равномерностью горения и вибрацией дуги, в стандарте не содержится. Излишне говорить, что экспертные оценки по своей сути являются субъективными и требуют высокой квалификации экспертов.

В принципе визуальные и акустические параметры стабильности процесса сварки, о которых идет речь в [1], можно фиксировать инструментальными средствами с дальнейшей математической обработкой для получения количественных оценок. Так, звучание дуги определяется микрофоном, а световое излучение — соответствующим фотоприемником. Акустическая эмиссия (звучание сварочной дуги, по интенсивности и характеру которого судят о стабильности процесса сварки) обусловлена колебаниями поверхности столба дуги. Интенсивность звучания дуги пропорциональна скорости колебаний ее мощности, т. е. скорости изменения тока дуги [11]. Изменения светового излучения также определяются колебаниями мощности дуги. Таким образом, световое и акустическое излучение дуги как параметры нестабильности процесса сварки являются вторичными по отношению к электрическим параметрам — сварочному току $I_{св}$ и напряжению на дуге U_d . Естественно, что по этой причине для объективной оценки стабильности дуги предпочтительнее использовать $I_{св}$ и U_d , поскольку их измерить проще, чем световое и акустическое излучение. Инструментальное определение обрывов дуги по напряжению или току также не представляет затруднений.

Ручная сварка покрытым электродом на переменном токе. При сварке на переменном токе вследствие падения его значения до нуля в каждом полупериоде напряжения сети дуга прерывается и через некоторое время снова зажигается. Такие естественные прерывания дуги не всегда заканчиваются ее повторным возбуждением в следующем полупериоде питающего напряжения. В результате сварка на переменном токе является наиболее нестабильным процессом из всех спо-

собов дуговой сварки, а частота обрывов дуги, бесспорно, — основным объективным показателем стабильности ее горения.

Первым предложил использовать частоту обрывов дуги для характеристики стабильности ее горения Е. М. Кузьмак [12]. В дальнейшем количество обрывов дуги на длину электрода $N_{об}$ использовалось в работе [13], а на единицу длины электрода — в работе [14]. Относительное количество обрывов дуги, несомненно, является прямым численным параметром стабильности горения дуги при переменном токе.

Помимо частоты обрывов дуги, предложено множество косвенных параметров, характеризующих не саму стабильность горения дуги, а вероятность ее повторного возбуждения. В основном это параметры, характеризующие остаточную плазму после обрыва дуги и электрические характеристики сварочной цепи, ответственные за повторное возбуждение дуги.

Г. И. Лесковым предложено оценивать стабильность дуги для электродов с различными покрытиями по начальной скорости нарастания тока при ее повторном возбуждении di_2/dt [15]. Чем выше значение этого показателя, тем более стабильным считается горение дуги [7]. Данный показатель определяется по фазовой характеристике $di/dt = f(i)$.

Поскольку скорость изменения сварочного тока при его переходе через нуль в значительной мере определяется его действующим значением, то для исключения влияния последнего В. Ю. Арлаускас и И. Р. Нарушкевичюс [8] предложили безразмерный показатель стабильности зажигания дуги

$$K_3 = \frac{di_2/dt}{di_1/dt} 100 \%,$$

где di_1/dt — максимальная скорость спада тока сварки перед погасанием дуги. Согласно этому показателю идеальная стабильность дуги имеет место при $K_3 = 100 \%$.

Не все исследователи считают применение этих показателей эффективными для оценки стабилизирующих свойств сварочных материалов. Например, по мнению В. А. Троицкого [16], нарастание преддугового тока и тока дуги в значительной степени зависят от линейности источника, а скорость перехода тока через нуль определяется только электрической характеристикой сварочного источника.

Еще один показатель стабильности горения дуги при сварке без коротких замыканий (КЗ) приведен в работе [17] $B_3 = I_3/(U_3 t_3)$, где U_3 , I_3 — напряжение на электродах и ток в межэлектродном промежутке в момент восстановления (зажигания) дугового разряда; t_3 — время прерывания



горения (зажигания) дуги. Чем выше значение этого показателя, тем более стабильной считается дуга.

Для ручной дуговой сварки без КЗ И. И. Зарубой и В. В. Дыменко [18] предложен показатель стабильности горения дуги $K_{ст} = I_{кр}/\tau$, где $I_{кр}$ — критический ток дуги в момент отрыва и прохождения через дугу капли электродного металла, ниже которого дуга может погаснуть; τ — критическое время, в течение которого наиболее вероятно разрушение плазмы дуги в результате переноса металла. Отрыв капли в конце полупериода сварочного тока может привести к тому, что последний исчезнет раньше естественного перехода его значения через нуль, при этом увеличивается бестоковый интервал времени t_3 . В отличие от предыдущих показателей стабильности $K_{ст}$ характеризует вероятность повторного возбуждения дуги после отрыва и переноса капли электродного металла.

Ни один из предложенных показателей, кроме частоты обрывов дуги, строго говоря не является показателем стабильности горения дуги или стабильности процесса сварки в целом. Для переменного тока его среднее значение равно нулю. Поэтому среднеквадратичное отклонение тока является не показателем его стабильности, а мерой его значения, и называется действующим значением тока I . В этом случае в качестве объективного показателя стабильности процесса сварки в соответствии с приведенным выше определением стабильности можно принять дисперсию $\sigma^2(I)$, среднеквадратичное отклонение $\sigma(I)$ или коэффициент вариации действующего значения сварочного тока K_V^I . Аналогично для падения напряжения на дуге в качестве показателя стабильности можно принять дисперсию $\sigma^2(U)$, среднеквадратичное отклонение $\sigma(U)$ или коэффициент вариации действующего значения напряжения на электродах K_V^U . Эти параметры являются показателями стабильности процесса только при сварке без регулярных КЗ.

При ручной дуговой сварке перенос металла осуществляется преимущественно с регулярными КЗ [15, 19]. Наличие КЗ, естественно, сказывается на вариациях действующих значений сварочного тока и напряжения на дуге. При этом эти изменения могут быть как больше, так и меньше вариаций, вызванных действием других возмущений. Поэтому вариации сварочного тока и напряжения на дуге недостаточно чувствительны к нестабильности КЗ. Более эффективно оценивать стабильность КЗ по среднеквадратичному отклонению их частоты $\sigma(f_{КЗ})$ и длительности $\sigma(\tau_{КЗ})$. Если режим сварки предусматривает отсутствие регулярных КЗ, то нестабильность процесса по

причине КЗ следует оценивать по значению $f_{КЗ}$: чем оно меньше, тем стабильнее процесс сварки.

Ручная сварка покрытым электродом на постоянном токе. Впервые количественную оценку стабильности горения дуги предложил К. К. Хренов [6], который оценивал устойчивость (стабильность) дуги по ее длине при обрыве: чем длиннее дуга при обрыве для неподвижно закрепленного электрода, тем меньше обрывов дуги при сварке, а следовательно, стабильнее ее горение. Недостатком данного метода являются ошибки, вызванные влиянием капель, не успевших оторваться от торца электрода перед разрывом дуги. Этот метод оценки дает разброс 15...30 % [7]. Строго говоря, длина дуги при обрыве является мерой ее «эластичности», которая выделена в отдельный показатель качества дуги [1] и связана с частотой обрывов последней лишь косвенно. В качестве меры равномерности горения дуги для оценки ее стабильности разными авторами используются некоторые статистические параметры сварочного тока и напряжения на дуге.

Так, В. М. Язовских с соавторами предложил в качестве показателей стабильности использовать дисперсию $\sigma^2(I_{св})$ [20], среднеквадратичное отклонение $\sigma(I_{св})$ или коэффициент вариации сварочного тока K_V^I [21, 22]. Авторы считают, что чем меньше значение этих параметров, тем стабильнее горение дуги.

В работе [5] проверена возможность оценки стабильности дуги по $\sigma^2(U_d)$. По мнению авторов, при сварке покрытыми электродами на постоянном токе этот показатель не коррелирован со стабильностью дуги.

Механизированная дуговая сварка на постоянном токе в защитных газах. Большинство опубликованных работ касаются стабильности сварки с КЗ, поскольку процесс сварки со струйным переносом стабильный по своей природе, а с капельным переносом нестабильный. В связи с этим последний способ сварки стараются не применять.

При сварке короткой дугой в углекислом газе и смесях газов перенос расплавленного металла с электрода в сварочную ванну осуществляется во время КЗ дугового промежутка. В результате мгновенные значения сварочного тока и напряжения на дуге периодически изменяются в широких пределах. Проведены многочисленные исследования сварочного тока и напряжения на дуге с целью определения показателей, отражающих стабильность процесса сварки. При этом прежде всего рассматривали статистические параметры сварочного тока и напряжения на дуге. Далеко не полный список этих параметров приведен в табл. 1.



Т а б л и ц а 1. Опубликованные данные о показателях стабильности процессов дуговой сварки

Параметр стабильности процесса сварки	Способ сварки с КЗ	Литературный источник
$\sigma^2(U_d)$	В углекислом газе	[23]
$\sigma(U_d)$	»	[24]
$K_{V^a}^U$	»	[3, 25]
$C_{V^a}^U$	»	[25]
$\sigma(I_{св})$	»	[24]
$K_{V^a}^I$	»	[3, 25]
$C_{V^a}^I$	»	[25]
$\sigma(I_{max})$	В углекислом газе, в смесях газов	[26, 27]
$\sigma(I_{min})$	В смесях газов	[28]
$K_{V^a}^{I_{max}}$	В углекислом газе	[2, 29]
$\sigma^2(\tau_{КЗ})$	»	[23]
$\sigma(\tau_{КЗ})$	» В углекислом газе и смесях газов	[24] [27]
$K_{V^a}^{\tau_{КЗ}}$	В углекислом газе В смесях газов	[3, 30] [31]
$\sigma^2(\tau_d)$	В углекислом газе	[23]
$\sigma(\tau_d)$	» В смесях газов	[24] [27]
$K_{V^a}^{\tau_d}$	В углекислом газе В смесях газов	[30] [31]
$\sigma^2(f_{КЗ})$	В углекислом газе	[32]
$N_{КЗ}^{сл}$	В смесях газов	[31]
$\sigma(\tau)$	В углекислом газе и смесях газов В смесях газов без КЗ	[26, 27, 33] [34]
$\sigma(U_d^a)$	Короткой дугой в углекислом газе	[23]
$\sigma(U_d^{КЗ})$	»	[23]
$\bar{\tau}_{КЗ}$	В углекислом газе	[3]
$K_{V^a}^{\tau_{об}}$	»	[30]
$(I_{св} - U_d)$ -диаграмма	В смесях газов без КЗ	[31]
9-й и 10-й квантили плотности распределения U_d	»	[24]
9-й и 10-й квантили плотности распределения $I_{св}$	»	[24]

Примечание. $C_{V^a}^U = K_{V^a}^U / f_{КЗ}$ — коэффициент вариации сварочного напряжения, отнесенный к частоте КЗ; I_{max} — амплитуда тока КЗ; $C_{V^a}^I = K_{V^a}^I / f_{КЗ}$ — коэффициент вариации сварочного тока, отнесенный к частоте КЗ; $\tau_{КЗ}$ — длительность действительного КЗ; $\bar{\tau}_{КЗ}$ — средняя длительность всех КЗ; τ_d — длительность горения дуги между КЗ; τ — среднеквадратичное отклонение длительности периода КЗ, $\tau = \tau_{КЗ} + \tau_d = 1/f_{КЗ}$; $N_{КЗ}^{сл} = n_{КЗ}^{сл} / n_{КЗ}^0$ — относительное число случайных кратковременных (длительностью менее 1,5 мс) КЗ, т. е. замыканий, при которых не происходит переход металла в сварочную ванну; $n_{КЗ}^{сл}$ — количество случайных КЗ; $n_{КЗ}^0$ — общее количество КЗ; U_d^a — напряжение в фазе горения дуги; $U_d^{КЗ}$ — напряжение во время КЗ; $K_{V^a}^{\tau_{об}} = \sigma(\tau_{об}) / \tau_{об}$ — коэффициент вариации длительности обрыва дуги $\tau_{об}$



Считается, что чем меньше значение любого из этих параметров, тем стабильнее процесс сварки. Однако для некоторых параметров это не всегда справедливо.

При сварке плавящимся электродом короткой дугой с периодическими КЗ дугового промежутка, импульсной сварке или сварке модулированным током напряжение на дуге и сварочный ток по своей природе имеют импульсный характер, т. е. периодически изменяют свои значения. Любой периодически изменяющийся (модулированный) сигнал по определению имеет значения σ^2 , σ и K_V , отличающиеся от нуля. В качестве примера на рис. 1, б, в приведены результаты моделирования сварочного тока и напряжения на дуге при сварке с периодическими КЗ плавящимся электродом (рис. 1, а). Моделирование проведено для напряжения холостого хода $E1 = 20$ В, напряжения, зависящего от приэлектродного падения напряжения и длины дуги $E2 = 12$ В, внутреннего активного сопротивления источника питания и сварочного контура $R1 = 0,05$ Ом, сопротивления вылета электрода $R2 = 0,05$ Ом, сопротивления столба дуги $R_d = 0,025$ Ом, $\tau = 20$ мс.

На рис. 2 показана зависимость $K_{V_{св}}^I$ и $K_{V_{д}}^U$ от коэффициента заполнения импульсов $D = \tau_{КЗ}/\tau$ и индуктивности дросселя L устройства (рис. 1, а). Кривые приведены для идеально стабильного процесса переноса расплавленного металла в сварочную ванну при постоянной частоте КЗ. Из рис. 2 видно, что даже при идеально стабильном процессе $K_{V_{св}}^I$ и $K_{V_{д}}^U$ имеют довольно большие значения, которые изменяются в широких пределах в зависимости от параметров сварочного контура и режима сварки. Нестабильность процесса сварки, т. е. случайные изменения частоты КЗ, времени КЗ, длины дуги и других параметров, естественно, приводят к увеличению коэффициентов вариации по сравнению с идеально стабильным процессом сварки. Но их влияние на $K_{V_{св}}^I$ и особенно на $K_{V_{д}}^U$ незначительно. Для примера далее приведены значения $\sigma(U)$ для прямоугольных импульсов единичной амплитуды U_{max} и с коэффициентом заполнения $D = t_{имп}/T = 0,7$ при случайных изменениях амплитуды T и длительности импульсов $\tau_{имп}$. Для возмущений амплитуды и длительности импульсов принят нормальный закон распределения со среднеквадратичными отклонениями $\sigma(U_{max})$ и $\sigma(t_{имп})$.

Как видно из представленных ниже данных, нестабильность времени горения дуги практически не сказывается на $\sigma(U)$:

$\sigma(t_{имп})$	0	0,05	0,10	0,15	0,20
$\sigma(U)$	0,25099	0,25106	0,25111	0,25118	0,25124

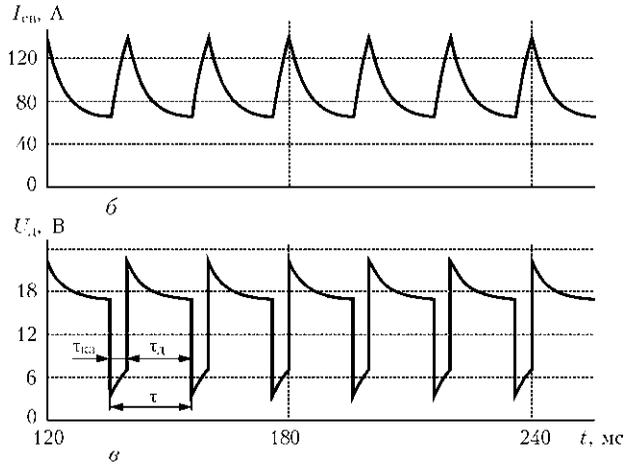
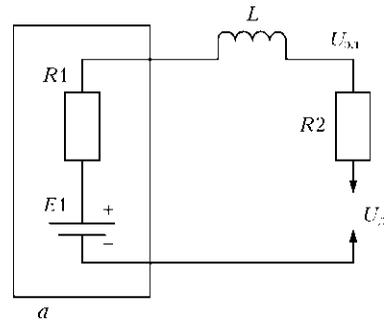


Рис. 1. Эквивалентная схема источника питания со сварочным контуром (а) и осциллограммы сварочного тока $I_{св}$ (б) и напряжения на дуге U_d (в) ($U_d = E_d + R_d I_{св}$)

При колебаниях амплитуды импульсов дисперсия $\sigma^2(U_{max})$ суммируется с дисперсией $\sigma_0^2(U)$, обусловленной только КЗ ($\sigma^2(U_{max}) = 0$):

$\sigma(U_{max})$	0	0,05	0,10	0,15	0,20
$\sigma(U)$	0,25099	0,25477	0,26527	0,28172	0,30316

Таким образом, при сварке с периодическими КЗ, импульсной сварке и сварке модулированным током σ^2 , σ и K_V тока сварки (напряжения) характеризуют в основном форму и параметры модуляции тока сварки (напряжения) и в меньшей степени — стабильность процесса сварки.

Отмеченные недостатки $\sigma(U_d)$ не имеют места, если использовать отдельно среднеквадратичные отклонения напряжения только во время КЗ $\sigma(U_{д}^{КЗ})$ и горения дуги $\sigma(U_{д}^д)$ [24].

При сварке без регулярных КЗ σ^2 , σ и K_V по определению являются показателями стабильности процесса сварки, отражая также такие нестабильности, как обрывы дуги и КЗ. Однако, если эти возмущения относительно редкие, то, как следует из рис. 2, их влияние на σ^2 , σ и K_V будет невелико. В этом случае целесообразнее измерять непосредственно частоту КЗ $f_{КЗ}$ и обрывов дуги $f_{об}$ в качестве показателей стабильности.

Следует иметь в виду, что точность оценки стабильности процесса при сварке без КЗ по значениям σ^2 , σ и K_V уменьшается вследствие помех,

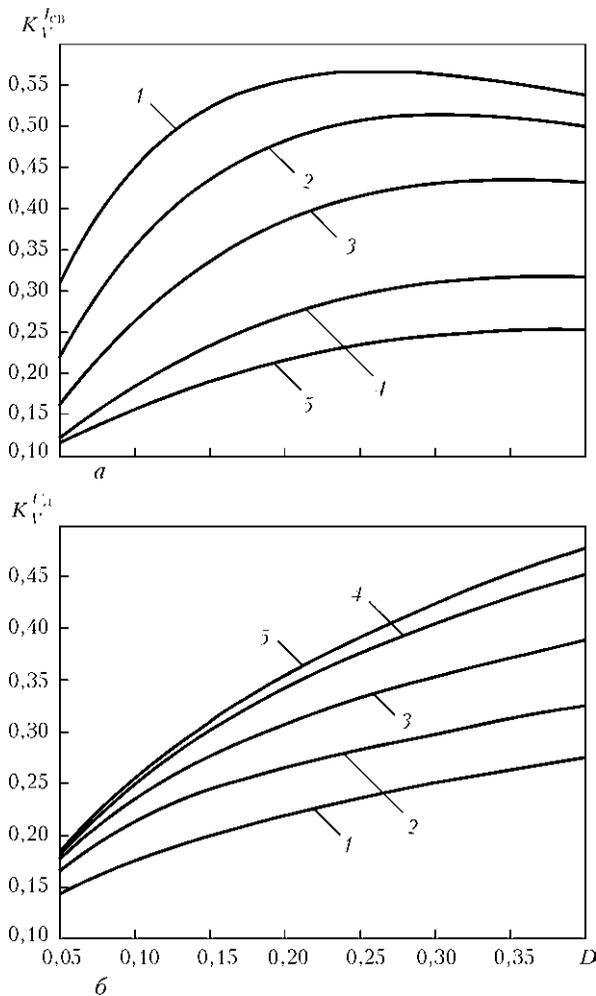


Рис. 2. Зависимость коэффициентов вариации сварочного тока $K_V^{I_{св}}$ (а) и напряжения на дуге $K_V^{U_d}$ (б) от коэффициента заполнения импульсов D при разных значениях индуктивности дросселя устройства (см. рис. 1, а): 1 — $L = 0,050$; 2 — $0,125$; 3 — $0,250$; 4 — $0,500$; 5 — $0,750$ мГн

вызванных пульсациями напряжения сварочного источника питания. В шестифазных мостовых выпрямителях, характерных для сварочных тиристорных источников питания, отношение действующего значения основной гармоники (300 Гц) к среднему значению выпрямленного напряжения на холостом ходу в зависимости от угла включения тиристоров может изменяться от 0,05 до 0,37 [37]. Эффективным средством повышения точности оценки параметров нестабильности процесса сварки в этом случае является фильтрация этих помех, поскольку частота изменения сварочного тока и напряжения, вызванные нестабильностью собственно процесса сварки, редко превышает 200 Гц.

В работе [31] для идентификации таких нестабильностей процесса сварки в смесях, как случайные кратковременные КЗ, ненормальное повышение напряжения во время повторного зажигания дуги после КЗ и горения дуги между КЗ, предложено анализировать диаграмму $I_{св} - U_d$.

Несколько в стороне находится довольно экзотический показатель стабильности, предложенный в работе [24], — разность между 9-м и 10-м квантилями плотности распределения напряжения на дуге и сварочного тока. Чем ниже их значения, тем стабильнее процесс сварки в смесях газов с КЗ.

Как следует из табл. 1, наиболее популярными для оценки стабильности процесса сварки с КЗ являются параметры стабильности $f_{КЗ}$ и $\tau_{КЗ}$. Можно показать, что эти параметры отражают стабильность переноса металла электрода в сварочную ванну. Действительно, для стабильного процесса сварки плавящимся электродом всегда соблюдается равенство средней объемной скорости плавления электрода и объемной скорости подачи электрода:

$$\bar{v}_{\text{под}} S_{\text{эл}} = f_{\text{КЗ}} Q_{\text{кап}}$$

где $\bar{v}_{\text{под}}$ — линейная скорость подачи электродной проволоки; $S_{\text{эл}}$ — площадь поперечного сечения электрода; $Q_{\text{кап}}$ — объем капли. Если распределение переменных $\bar{v}_{\text{под}}$, $S_{\text{эл}}$ и $Q_{\text{кап}}$ нормальные и их среднеквадратичные отклонения независимы, то для среднеквадратичного отклонения частоты КЗ на основании приведенной выше формулы можно записать:

$$\sigma(f_{\text{КЗ}}) = \sqrt{\left(\frac{S_{\text{эл}}}{Q_{\text{кап}}}\right)^2 \sigma^2(v_{\text{под}}) + \left(\frac{v_{\text{под}}}{Q_{\text{кап}}}\right)^2 \sigma^2(S_{\text{эл}}) + \left(\frac{v_{\text{под}} S_{\text{эл}}}{Q_{\text{кап}}^2}\right)^2 \sigma^2(Q_{\text{кап}})}$$

Из этой зависимости видно, что $\sigma(f_{\text{КЗ}})$ прямо характеризует нестабильность скорости подачи электродной проволоки, поперечного сечения проволоки и объема капли. В связи с тем, что нестабильность первых двух параметров невелика, $\sigma(f_{\text{КЗ}})$ в основном является мерой нестабильности объема капли.

Поскольку $f_{\text{КЗ}} = 1/(\tau_{\text{КЗ}} + \tau_d)$, аналогичные зависимости можно получить для $\sigma(\tau_{\text{КЗ}})$ и $\sigma(\tau_d)$

$$\sigma^2(\tau_{\text{КЗ}}) + \sigma^2(\tau_d) = \left(\frac{1}{v_{\text{под}} S_{\text{эл}}}\right)^2 \sigma^2(Q_{\text{кап}}) + \left(\frac{Q_{\text{кап}}}{v_{\text{под}}^2 S_{\text{эл}}^2}\right)^2 \sigma^2(v_{\text{под}}) + \left(\frac{Q_{\text{кап}}}{v_{\text{под}} S_{\text{эл}}}\right)^2 \sigma^2(S_{\text{эл}})$$

Как характеристика нестабильности $\bar{v}_{\text{под}}$, $S_{\text{эл}}$ и $Q_{\text{кап}}$ эта формула не имеет никаких преимуществ перед предыдущей. Поэтому достаточно оценивать только $\sigma(f_{\text{КЗ}})$. Однако совершенно очевидно, что, помимо нестабильности объема капли, $\sigma(\tau_{\text{КЗ}})$ и $\sigma(\tau_d)$ также несут информацию о флуктуациях других параметров процесса сварки. Например,



$\sigma(\tau_{КЗ})$ зависит от нестабильности формы капли, изменения ее положения на торце электрода, нестабильности формы тока КЗ, колебаний поверхности сварочной ванны и т. п. В свою очередь значения $\sigma(\tau_{д})$ зависят от изменения вылета электрода, колебаний сварочного тока и падения напряжения на дуге, объема оставшегося на торце электрода расплавленного металла при повторном зажигании дуги после окончания КЗ и т. д. Поэтому $\sigma(\tau_{КЗ})$ и $\sigma(\tau_{д})$ вместе более полно характеризуют стабильность процесса сварки с КЗ, чем только $\sigma(f_{КЗ})$.

В табл. 2 приведены рекомендуемые на основании изложенного выше параметры стабильности процесса дуговой сварки плавящимся электродом. Чем меньше значение приведенных параметров, тем стабильнее процесс сварки. Все перечисленные показатели стабильности процесса сварки определяются путем обработки только значений напряжения на дуге и сварочного тока.

Импульсная сварка и сварка модулированным током. Для указанных способов сварки показателями стабильности процесса могут служить в различных сочетаниях в зависимости от режима работы сварочного источника (стабилизация тока или напряжения) следующие параметры: $K_{V\text{имп}}^I, K_{V\text{баз}}^I, K_{V\text{имп}}^U, K_{V\text{баз}}^U$, где $I_{\text{имп}}$ — ток импульса; $I_{\text{баз}}$ — базовый ток; $U_{\text{имп}}$ — напряжение импульса; $U_{\text{баз}}$ — базовое напряжение.

Поскольку стабильность процесса сварки характеризуется несколькими показателями, возникает потребность сформировать из них один комплексный показатель (целевую функцию) с помощью коэффициентов весомости каждого показателя.

При этом используют следующую функциональную зависимость $\gamma = f(n, b_i, k_i)$, $i = 1, 2, 3, \dots, n$, где n — количество учитываемых единичных показателей; b_i — коэффициент весомости (важности) i -го показателя; k_i — i -й показатель.

Обычно используется функция вида $\gamma = \sum_i^n b_i k_i$ и крайне редко — $\gamma = \prod_i^n k_i^{b_i}$. Важ-

ным элементом формирования комплексного показателя является задание значений коэффициентов весомости. Существуют десятки способов их определения [35, 36], самый распространенный из них — определение коэффициентов весомости с помощью экспертов.

Для характеристики стабильности процесса сварки (сварка в углекислом газе с КЗ) пока предложен только один комплексный показатель [30]:

$$\gamma = k_0 K_{V\text{об}}^{\tau} + k_1 K_{V\text{КЗ}}^{\tau} + k_2 K_{V\text{д}}^{\tau},$$

где k_0 — относительное суммарное время обрывов дуги; k_1, k_2 — относительное суммарное время соответственно КЗ и горения дуги.

Минимальное значение коэффициента γ соответствует максимально стабильному процессу сварки.

Следует заметить, что в этом комплексном показателе стабильности учитываются обрывы дуги, имеющие место в основном в начале сварки при возбуждении дуги.

В работе [1] надежность установления процесса сварки (начальное зажигание дуги) выделена в отдельный показатель сварочных свойств источников питания и не относится к показателям стабильности процесса сварки.

Кроме того, выбор в качестве коэффициентов весомости k_0, k_1 и k_2 нельзя считать единственно возможным.

В работе [38] предложен простой комплексный параметр стабильности процесса сварки:

Т а б л и ц а 2. Рекомендуемые параметры стабильности процессов дуговой сварки плавящимся электродом

Параметр стабильности процесса сварки	Ручная сварка				Автоматическая и механизированная сварка в защитных газах	
	Переменный ток	Постоянный ток		с КЗ	без КЗ	
		с КЗ	без КЗ			
$N_{\text{об}}$	+	-	-	-	-	
$f_{\text{КЗ}}$	-	-	+	-	+	
$f_{\text{КЗ}}^{\text{л}}$	-	+	-	+	-	
$\sigma^2(I) \vee \sigma(I) \vee K_{V\text{д}}^I$	+	-	-	-	-	
$\sigma^2(U) \vee \sigma(U) \vee K_{V\text{д}}^U$	+	-	-	-	-	
$\sigma^2(I_{\text{св}}) \vee \sigma(I_{\text{св}}) \vee K_{V\text{св}}^I$	-	-	+	-	+	
$\sigma^2(U_{\text{д}}) \vee \sigma(U_{\text{д}}) \vee K_{V\text{д}}^U$	-	-	+	-	+	
$\sigma^2(I_{\text{св}}^{\text{КЗ}}) \vee \sigma(I_{\text{св}}^{\text{КЗ}}) \vee K_{V\text{св}}^I^{\text{КЗ}}$	-	+	-	+	-	
$\sigma^2(I_{\text{св}}^{\text{л}}) \vee \sigma(I_{\text{св}}^{\text{л}}) \vee K_{V\text{св}}^I^{\text{л}}$	-	+	-	+	-	
$\sigma^2(U_{\text{д}}^{\text{КЗ}}) \vee \sigma(U_{\text{д}}^{\text{КЗ}}) \vee K_{V\text{д}}^U^{\text{КЗ}}$	-	+	-	+	-	
$\sigma^2(U_{\text{д}}^{\text{л}}) \vee \sigma(U_{\text{д}}^{\text{л}}) \vee K_{V\text{д}}^U^{\text{л}}$	-	+	-	+	-	
$\sigma^2(f_{\text{КЗ}}) \vee \sigma(f_{\text{КЗ}}) \vee K_{V\text{КЗ}}^f$	-	+	-	+	-	
$\sigma^2(\tau_{\text{КЗ}}) \vee \sigma(\tau_{\text{КЗ}}) \vee K_{V\text{КЗ}}^{\tau}$	-	+	-	+	-	
$\sigma^2(\tau_{\text{д}}) \vee \sigma(\tau_{\text{д}}) \vee K_{V\text{д}}^{\tau}$	-	+	-	+	-	

Примечания. 1. $f_{\text{КЗ}}^{\text{л}}$ — частота ложных КЗ. 2. Знаком + показана применимость, а знаком - неприменимость параметра в зависимости от способа сварки и типа переноса металла с электрода в сварочную ванну.



$$PR = \frac{I_{bk} U_{bk}}{I_{mean} U_{mean}},$$

где I_{mean} , U_{mean} — средние значения сварочного тока и напряжения на дуге; U_{bk} — среднеарифметическое оцифрованное значение напряжения, меньшего U_{mean} в интервале измерений; I_{bk} — среднеарифметическое оцифрованное значение сварочного тока, меньшее I_{mean} .

Для стабильного процесса $0,2 < PR < 0,4$ (процесс с КЗ), $0,8 < PR < 0,9$ (капельный перенос), $0,95 < PR < 0,98$ (струйный перенос). В промежуточных зонах процесс сварки проходит нестабильно с повышенным разбрызгиванием.

В той же работе предложены критерии стабильности, представленные в виде набора правил на основе трех безразмерных параметров

$$TI = 1 - \frac{I_{min}}{I_{mean}}, TSI = \frac{I_{max}}{I_{mean}}, DCI = 1 - \frac{U_{bk}}{U_{mean}},$$

где I_{max} , I_{min} — соответственно максимальное и минимальное значения сварочного тока. Эти правила формулируются следующим образом:

если $((TI < 0,1)$ и $(DCI < 0,1)$ и $(TSI < 1,1)$) или $((0,3 < TI < 0,5)$ и $(0,5 < DCI < 0,8)$ и $(TSI < 0,2))$, то процесс сварки стабильный;

если $(0,3 < TI < 0,5)$ и $(0,3 < DCI < 0,5)$ и $(TSI < 0,2)$, то процесс сварки довольно стабильный.

Все численные значения границ приведенных параметров получены в результате обработки экспертных оценок сотрудников Кранфилдского университета (Великобритания).

Заключение. Процесс сварки, отклонение параметров которого от средних значений не превышает заданного уровня, называется стабильным. Мерой стабильности процесса сварки является отклонение его параметров от среднего значения. В качестве отклонения параметра от среднего значения принимается его дисперсия, среднеквадратичное отклонение или коэффициент вариации.

Для оценки стабильности процесса сварки плавающим электродом наиболее просто оценивать стабильность его электрических параметров. Для оценки стабильности процесса импульсной сварки, сварки модулированным током и сварки с переносом металла при периодических КЗ дугового промежутка нецелесообразно использовать дисперсию, среднеквадратичное отклонение или коэффициент вариации сварочного тока и напряжения на дуге.

Набор показателей стабильности процесса сварки зависит от способа сварки и характера переноса металла электрода в сварочную ванну. Набор показателей стабильности процесса сварки объединяется в один комплексный показатель стабильности с учетом коэффициента весомости.

Стабильность процесса сварки зависит от сварочных материалов, сварочного оборудования и режима сварки.

Поэтому сравнивать, например, сварочные материалы исходя из обеспечения стабильности сварки необходимо на одном и том же оборудовании и при одинаковом режиме сварки. Аналогичные условия должны соблюдаться и при исследовании зависимости стабильности процесса сварки от сварочного оборудования и режимов сварки.

1. *ГОСТ 25616–83 (СТ СЭВ 3235–81)*. Источники питания для дуговой сварки. Методы испытания сварочных свойств. — Введ. 28.01.83.
2. *Критерии оценки стабильности процесса дуговой сварки на постоянном токе / И. К. Походня, И. И. Заруба, В. Е. Пономарев и др. // Автомат. сварка. — 1989. — № 8. — С. 1–4.*
3. *Заруба И. И., Латанский В. П., Троицкая Н. В.* Статистические показатели стабильности при оценке сварочных свойств источников питания для дуговой сварки // Новые сварочные источники питания: Сб. науч. тр. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1992. — С. 86–94.
4. *Ленивкин В. А., Дюргеров Н. Г., Сагиров Х. Н.* Технологические свойства сварочной дуги в защитных газах. — М.: Машиностроение, 1989. — 264 с.
5. *Металлургия дуговой сварки: Процессы в дуге и плавление электродов / И. К. Походня, В. Н. Горпенюк, С. С. Миличенко и др.; под ред. И. К. Походни. — Киев: Наук. думка, 1990. — 224 с.*
6. *Хренов К. К.* Электрическая сварочная дуга. — М.; Киев: Машгиз, 1949. — 204 с.
7. *Шафранский Л. Г., Орлов Л. Н., Абрашин А. В.* Оценка устойчивости дуги переменного тока // Автомат. сварка. — 1972. — № 4. — С. 18–19.
8. *Арлаускас В. Ю., Нарушкевичюс И. Р.* Количественная оценка стабильности повторного возбуждения сварочной дуги // Там же. — 1974. — № 8. — С. 9–10.
9. *Оборудование для дуговой сварки: Справ. пособие / Под ред. В. В. Смирнова. — Л.: Энергоатомиздат, 1986. — 656 с.*
10. *Орлов А. И.* Математика случая: Вероятность и статистика — основные факты: Учеб. пособие. — М.: МЗ-Пресс, 2004. — 110 с.
11. *Ланкин Ю. Н.* Акустическая эмиссия сварочной дуги (Обзор) // Автомат. сварка. — 2001. — № 2. — С. 25–31.
12. *Кузьмак Е. М.* Вопросы шихтования электродных покрытий // Автоген. дело. — 1938. — № 12. — С. 6–9.
13. *Tsuboi J., Sasaki H.* Interruption mechanism of the covered electrode arc // Trans. Jap. Welding Soc. — 1971. — № 2. — P. 67–70.
14. *Лугин В. П.* Сравнительная оценка стабильности горения дуги при сварке штучными электродами переменным током // Свароч. пр-во. — 1975. — № 1. — С. 39–40.
15. *Лесков Г. И.* Электрическая сварочная дуга. — М.: Машиностроение, 1970. — 336 с.
16. *Троицкий В. А.* Влияние индуктивности на форму кривой переменного тока сварочной дуги // Автомат. сварка. — 1974. — № 1. — С. 8–11.
17. *Методика определения стабильности дуги переменного тока / И. К. Походня, В. Н. Горпенюк, А. Е. Марченко и др. // Там же. — 1979. — № 12. — С. 16–18.*
18. *Заруба И. И., Дыменко В. В.* Влияние капельного переноса на устойчивость сварочной дуги переменного тока // Там же. — 1983. — № 12. — С. 14–20.
19. *Походня И. К.* Газы в сварных швах. — М.: Машиностроение, 1972. — 255 с.
20. *Пат. 2063316 РФ, МПК В 23 К 31/12, В 23 К 9/073.* Метод оценки стабильности горения дуги / В. М. Язовских,



- В. Я. Беленький, Е. А. Кривоносова и др. — Оpubл. 10.07.96.
21. *Yazovskikh V. M., Shumyakov V. I., Boronenkov V. N.* Estimation of the welding electrodes quality by the computer analyses of oscillograms of welding current and voltage // Proc. of the 8th Intern. conf. «Computer technology in welding», June 22–24, 1998, Paris. — Paris, 1998. — 10 p.
 22. *Методика* оценки стабильности горения сварочной дуги / В. М. Язовских, В. Я. Беленький, Л. Н. Кротов, И. Ю. Летягин // Свароч. пр-во. — 1997. — № 4. — С. 18–20.
 23. *On-line* quality monitoring in sort-circuit gas metal arc welding / S. Adolfsson, A. Bahrami, G. Bolmsjo, I. Claesson // Welding J. — 1999. — № 2. — P. 59–73.
 24. *Gupta S. R., Gupta P. C., Rehfeldt D.* Process stability and spatter generation during dip transfer in MAG welding // Welding Rev. — 1988. — Nov. — P. 232–241.
 25. *Методы* сравнительной оценки технологических свойств сварочного оборудования и материалов / И. К. Походня, И. И. Заруба, В. Е. Пономарев и др. // Автомат. сварка. — 1990. — № 5. — С. 1–5.
 26. *Dutra J. C.* Statistical analysis of arc stability in MIG–MAG welding with short-circuit transfer. — S.l., [1990]. — 18 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. XII-1172–90).
 27. *Baixo C. E. I., Dutra J. C.* The study of metal transfer on the GMAW process, using a projector and voltage and current oscillographic processing. — S.l., [1990]. — 14 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. XII-1174–90).
 28. *Shinoda T., Nishikawa H., Shimizu T.* The development of data processing algorithms and assessment of arc stability as affected by the titanium content of GMAW wires during metal transfer // Proc. of the 6th Intern. conf. «Computer technology in welding», June 9–12, 1996, Lanaken, Belgium. — Lanaken, 1996. — P. 11.
 29. *Методики* комплексной оценки сварочно-технологических свойств источников питания и сварочных материалов / И. К. Походня, И. Сурджан, В. Е. Пономарев и др. // Информ. материалы СЭВ. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1991. — Вып. 1 (37). — С. 44–55.
 30. *Orszagh P., Sencak V.* Criterion of optimalization of GMA/CO₂ welding processes. — S.l., [1989]. — 22 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. SG 212-735–89).
 31. *Shinoda T., Kaneda H., Takeuchi Y.* An evaluation of short circuiting arc phenomena in GMA welding // Welding & Metal Fabrication. — 1989. — Dec. — P. 522–525.
 32. *Hermans M. J. M., Den Ouden G.* Process behavior and stability in short circuit gas metal arc welding // Welding J. — 1999. — Apr. — P. 137s–141s.
 33. *Liu S., Siewert T. A.* Metal transfer in gas metal arc welding: Droplet rate // Welding J. — 1989. — Febr. — P. 53–58.
 34. *Dutra J. C.* Computerized procedure of metallic drop transfer analysis for the determination of pulsed welding variables. — S.l., [1990]. — 11 p. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. XII-1171–90).
 35. *Методы* определения коэффициентов важности критериев / А. М. Анохин, В. А. Глотов, В. В. Павельев, А. М. Черкашин // Автомат. и телемеханика. — 1997. — № 8. — С. 3–35.
 36. *Домарев В. В.* Безопасность информационных технологий. Системный подход. — Киев: ООО ТИД «ДиаСофт», 2004. — 992 с.
 37. *Каганов И. Л.* Электронные и ионные преобразователи. Ч. III. — М.; Л.: Госэнергоиздат, 1956. — 528 с.
 38. *Ogunbiyi B., Norrish J.* GMAW metal transfer and arc stability assessment using monitoring indices // Proc. of the 6th Intern. conf. «Computer technology in welding», June 9–12, 1996, Lanaken, Belgium. — 10 p.

Formulation of the «stability of GMA welding process» term is suggested. The objective indices of stability are considered and analysed. A set of the indices of process stability is offered for each welding method and metal transfer character.

Поступила в редакцию 25.06.2010,
в окончательном варианте 26.09.2010

НОВАЯ КНИГА

Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах: Сб. докл. междунар. конф. / Под ред. профессора В. И. Махненко. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, 2010. — 244 с.

В сборнике представлены доклады Пятой международной конференции «Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах», в которых отражены достижения за последние годы в области математического моделирования физических явлений, протекающих при сварке, наплавке и других родственных процессах. Авторами 37-и докладов являются известные специалисты из Украины, России, Германии, Финляндии и Австралии.

Для научных и инженерно-технических работников, занятых в области сварки, резки, наплавки, пайки, нанесения защитных покрытий и других родственных процессов.

**Сборник можно заказать в редакции журнала
«Автоматическая сварка».**

