



# МЕТОД ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ МНОГОФАКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ СВАРОЧНЫМ ПРОЦЕССОМ

И. А. ТАРАРЫЧКИН, канд. техн. наук (Восточноукр. нац. ун-т, г. Луганск)

Предложен метод оценки эффективности предупреждающих действий, направленных на повышение точности многофакторного управления сварочным процессом. Сформулированы критерии, позволяющие определять характер изменения точности и стабильность контролируемого процесса. Возможности метода рассмотрены на примере дуговой сварки в узкий зазор кольцевого шва толстостенной цилиндрической обечайки.

*Ключевые слова:* дуговая сварка в узкий зазор, управление процессами, статистическое регулирование, качество продукции, предупреждающие действия, критерии точности

Метод статистического регулирования, изложенный в работе [1], позволяет управлять состоянием одномерного технологического процесса по предвзительно установленной характеристике точности. Реальные сварочные процессы, как правило, являются многомерными, а их текущее состояние определяется сочетанием большого количества факторов (параметров режима). Управление многофакторными технологическими процессами связано с необходимостью контроля их состояния и периодического выполнения предупреждающих действий, направленных на повышение точности контролируемого процесса [2–4].

Анализ точности многофакторных систем затруднен из-за отсутствия методик, позволяющих объективно оценивать их состояние. Выполнение такого анализа связано с необходимостью оценки эффективности предупреждающих действий.

Возникающие при этом сложности обусловлены тем обстоятельством, что целенаправленное изменение состояния процесса по одной или нескольким характеристикам точности может привести к изменению значений других характеристик из-за наличия скрытой или явной корреляции. При этом может возникнуть ситуация, когда попытка изменить состояние процесса с целью повышения его точности приведет к обратному результату.

Если до выполнения предупреждающих действий состояние  $n$ -мерного процесса описывалось вектором  $\mathbf{G}^*$  с координатами  $g_{s1}^*, g_{s2}^*, \dots, g_{sn}^*$ , а после их осуществления характеризовалось вектором  $\mathbf{G}^{**}$  с координатами  $g_{s1}^{**}, g_{s2}^{**}, \dots, g_{sn}^{**}$ , то требуется установить, действительно ли зафиксированное изменение состояния процесса соответствует случаю повышения его точности.

Предположим, что до начала и после завершения предупреждающих действий точность  $n$ -мерного процесса обеспечивалась, т. е. выполнялись условия  $g_{si}^* < 1$  и  $g_{si}^{**} < 1$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ), а целью осуществления этих действий было повышение точности. Для случая трех переменных состо-

яние процесса может быть описано в системе координат  $g_{s1} g_{s2} g_{s3}$  (рис. 1). Граница предельного состояния в этом случае представляет собой поверхность единичного куба. Произвольная точка  $\mathbf{G}$ , расположенная внутри куба, имеет координаты  $g_{s1}, g_{s2}, g_{s3}$ . При этом, чем меньше угол  $\omega$  между вектором  $\mathbf{G}$  и диагональю куба (вектором  $\mathbf{M}$ ), тем выше точность процесса, поскольку с увеличением  $\omega$  вектор  $\mathbf{G}$  приближается к границе предельного состояния. Кроме того, последнее происходит и с увеличением длины радиуса-вектора  $\rho$ .

В соответствии с изложенным подходом оценку эффективности предупреждающих действий следует выполнять следующим образом. Если начальное положение вектора  $\mathbf{G}^*$  характеризуется набором значений  $\rho^*$  и  $\omega^*$ , а после выполнения таких действий вектору  $\mathbf{G}^{**}$  соответствуют значения  $\rho^{**}$  и  $\omega^{**}$ , то точность процесса повышается при соблюдении условия

$$\begin{cases} \Delta\rho = \rho^* - \rho^{**} > 0; \\ \Delta\omega = \omega^* - \omega^{**} > 0. \end{cases} \quad (1)$$

Точность процесса не изменится, если

$$\begin{cases} \Delta\rho = 0; \\ \Delta\omega = 0, \end{cases} \quad (2)$$

и понизится при

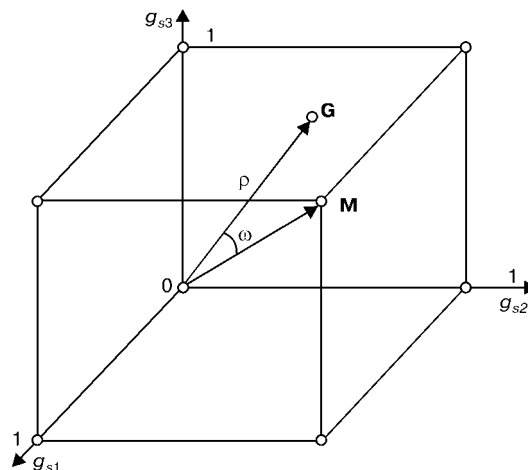


Рис. 1. Схема взаимного расположения векторов  $\mathbf{G}$  и  $\mathbf{M}$  в системе координат  $g_{s1}g_{s2}g_{s3}$

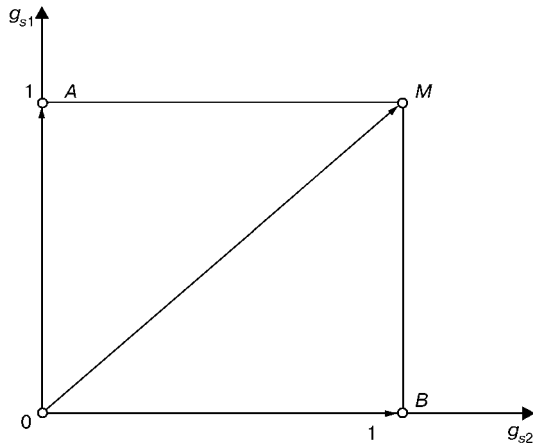


Рис. 2. Схема определения состояния двумерного процесса сварки с использованием комплексных критериев точности  $g_{s1}$  и  $g_{s2}$

$$\begin{cases} \Delta\rho < 0; \\ \Delta\omega < 0. \end{cases} \quad (3)$$

Если же параметры  $\Delta\rho$  и  $\Delta\omega$  имеют разные знаки, т. е. выполняется одно из условий

$$\begin{cases} \Delta\rho < 0, & \Delta\rho > 0, \\ \Delta\omega > 0, & \Delta\omega < 0, \end{cases} \quad (4)$$

то сделать однозначное заключение о характере изменения состояния процесса невозможно.

Реализация предложенного алгоритма оценки эффективности предупреждающих действий связана с необходимостью определения следующих параметров:

угла  $\omega^*$  между векторами  $\mathbf{G}^*$  и  $\mathbf{M}$  в  $n$ -мерном пространстве факторов  $g_{si}$  [5]

$$\omega^* = \arccos \left( \frac{\sum_{i=1}^n g_{si}^* / \sqrt{n \sum_{i=1}^n g_{si}^{*2}}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n g_{si}^{*2}}} \right);$$

угла  $\omega^{**}$  между векторами  $\mathbf{G}^{**}$  и  $\mathbf{M}$

$$\omega^{**} = \arccos \frac{\sum_{i=1}^n g_{si}^{**}}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n g_{si}^{**2}}};$$

приращения угла  $\Delta\omega$

$$\Delta\omega = \arccos \left( \frac{\sum_{i=1}^n g_{si}^* / \sqrt{n \sum_{i=1}^n g_{si}^{*2}}}{\sum_{i=1}^n g_{si}^{**} / \sqrt{n \sum_{i=1}^n g_{si}^{**2}}} \right) - \arccos \left( \frac{\sum_{i=1}^n g_{si}^{**} / \sqrt{n \sum_{i=1}^n g_{si}^{**2}}}{\sum_{i=1}^n g_{si}^* / \sqrt{n \sum_{i=1}^n g_{si}^{*2}}} \right); \quad (5)$$

модуля вектора  $\mathbf{G}^*$

$$\rho^* = \sqrt{\sum_{i=1}^n g_{si}^{*2}};$$

модуля вектора  $\mathbf{G}^{**}$

$$\rho^{**} = \sqrt{\sum_{i=1}^n g_{si}^{**2}};$$

приращения модуля  $\Delta\rho$

$$\Delta\rho = \sqrt{\sum_{i=1}^n g_{si}^{*2}} - \sqrt{\sum_{i=1}^n g_{si}^{**2}}. \quad (6)$$

Эффективность предупреждающих действий оценивается в зависимости от знака критериев  $\Delta\omega$  и  $\Delta\rho$  в соответствии с установленными неравенствами (1)–(4).

Возможности предлагаемого метода рассмотрим на примере заполнения V-образной разделки многослойным швом по схеме: один слой за проход. Для обеспечения проплавления кромок горелка, направляемая по центру зазора, совершает поперечные колебательные движения. В результате воздействия случайных и систематических причин условия осуществления сварочного процесса с течением времени могут изменяться. Так, по мере заполнения разделки ее текущая ширина будет увеличиваться, что может стать причиной появления непроваров у стенок. В процессе сварки возможно изменение амплитуды колебаний, что также может сопровождаться появлением непроваров. Анализируя состояние двумерного процесса с контролем по текущей ширине зазора  $2B$  (критерий точности  $g_{s1}$ ) и амплитуде колебаний горелки  $A_r$  (критерий точности  $g_{s2}$ ), следует отметить, что точка  $A$  (рис. 2), характеризующая граничное состояние процесса, соответствует случаю возможного образования непроваров при дальнейшем увеличении текущей ширины разделки.

Таблица 1. Статус контролируемых параметров точности процесса сварки

Статус контролируемого параметра точности процесса	Ожидаемые последствия от снижения точности процесса по параметру	Рекомендации по управлению и документированию состояния процесса
Критический	Обязательно приведет к образованию труднообнаруживаемых дефектов, требующих последующего исправления	Управление с использованием систем статистического регулирования по комбинированной схеме [2]. Документирование с использованием контрольных карт [6] и карт контроля состояния [1]
Важный	Велика вероятность образования дефектов, часть из которых потребует последующего исправления	Управление с использованием первой или второй схемы регулирования [2]. Документирование с использованием контрольных карт или карт контроля состояния
Значительный	Может привести к образованию дефектов, обнаружение и исправление которых не вызовет серьезных проблем	Управление с использованием критериев $g_{si}$ и документирование текущего состояния в тех случаях, когда обнаружена неудовлетворительная точность процесса
Незначительный	Не следует ожидать образования дефектов, которые могут потребовать последующего исправления	Управление по текущим показаниям измерительных приборов. Документирование не выполняется



Таблица 2. Поля допусков, установленные для контролируемых параметров процесса

Контролируемый параметр сварочного процесса	Номинальное значение параметра	Граница поля допуска, мм		Обозначение соответствующего комплексного критерия точности
		верхняя	нижняя	
$2B$ (мм)	Принимается равным среднему значению $2B_{cp}$ для текущей ширины зазора $2B$ при сварке отдельного слоя	$2B_{cp} + 2$	$2B_{cp} - 2$	$g_{s1}$
$A_r$ (мм)	$0,5(2B_{cp} - 10)$	$0,5(2B_{cp} - 10) + 1$	$0,5(2B_{cp} - 10) - 1$	$g_{s2}$
$U_d$ (В)	30	32	28	$g_{s3}$
$v_{св}$ (см/с)	0,52	0,54	0,5	$g_{s4}$
$I_{св}$ (А)	320	330	310	$g_{s5}$

При этом принимается  $g_{s2} = 0$ , т. е. предполагается, что амплитуда колебаний горелки соответствует номинальному значению, а сами колебания осуществляются относительно оси, совпадающей с центром разделки.

Точке  $B$  (рис. 2) соответствует граничное состояние процесса, при котором дальнейшее уменьшение амплитуды колебаний горелки сопровождается образованием непроваров. При этом предполагается, что отклонения геометрических размеров разделки кромок отсутствуют ( $g_{s1} = 0$ ).

Таким образом, с точки зрения возможного образования непроваров состояние сварочного процесса для точек  $A$  и  $B$  (рис. 2) оказывается эквивалентным, несмотря на отличия в условиях его осуществления.

Если воспользоваться предложенной методикой и определить состояние процесса в точке  $A$  набором значений  $g_{s1}^* = 1, g_{s2}^* = 0$ , а в точке  $B$  соответственно  $g_{s1}^{**} = 1, g_{s2}^{**} = 1$ , то  $\Delta\omega = 0$  и  $\Delta\rho = 0$ . Это означает, что с точки зрения возможного образования непроваров указанные состояния процесса следует признать равнозначными.

Рассмотренный пример показывает, что при использовании предложенной методики контролируемые параметры точности процесса следует выбирать, исходя из условия существенного влияния на характеристики качества продукции, а сами параметры должны иметь одинаковый или близкий статус, определяемый по рекомендациям, представленным в табл. 1.

Проанализируем возможность оценки эффективности предупреждающих действий при управлении состоянием многофакторного процесса дуговой сварки в узкий зазор кольцевого шва обечайки с толщиной стенки 75 мм. Угол раскрытия односторонней разделки кромок составляет  $5^\circ$ . Недовольствительная точность многофакторного процесса сварки может привести к образованию непроваров боковых стенок. Последующее обнаружение и исправление таких дефектов, залегающих в толстом металле на большой глубине, связано с возникновением серьезных технических проблем.

На возможное образование непроваров оказывает влияние ряд факторов таких, как текущая ширина зазора  $2B$ , амплитуда колебаний горелки  $A_r$ , а также напряжение на дуге  $U_d$ . В процессе заполнения разделки кольцевым швом происходит

постепенное увеличение скорости сварки  $v_{св}$  (в результате вертикального смещения горелки от оси вращения), что сопровождается уменьшением погонной энергии и может привести к образованию непроваров. Сварочный ток  $I_{св}$  также является параметром, влияющим на погонную энергию, поэтому должен учитываться при контроле состояния процесса.

Таким образом, по мере приближения контролируемого пятимерного процесса к границе предельного состояния следует выполнять корректирующие действия, связанные с уменьшением скорости сварки (угловой скорости вращения обечайки) и увеличением амплитуды колебаний горелки. Такого рода корректировка состояния процесса из-за наличия корреляционных связей между параметрами режима будет сопровождаться общим изменением характеристик точности. При этом выполняемые предупреждающие действия, направленные на предотвращение образования непроваров, должны сопровождаться реальным, а не предполагаемым повышением точности процесса.

Для того чтобы обеспечить возможность оценки точности многофакторного процесса сварки, необходимо предварительно установить номинальные значения и допустимый диапазон изменения контролируемых характеристик (сформулировать конструкторский допуск). Номинальные значения и поле конструкторского допуска для таких характеристик могут устанавливаться на основании имеющегося производственного опыта, путем сварки пробной партии образцов на этапе отработки технологии, по результатам анализа литературных источников, с учетом мнений экспертов и т. п.

Применительно к рассматриваемому случаю сварки кольцевого шва обечайки установленные

Таблица 3. Значения комплексных критериев точности процесса дуговой сварки в узкий зазор

Контролируемый параметр сварочного процесса	Значения критериев точности при осуществлении предупреждающих действий	
	до	после
$2B$ (мм)	$g_{s1}^* = 0,57$	$g_{s1}^{**} = 0,62$
$A_r$ (мм)	$g_{s2}^* = 0,83$	$g_{s2}^{**} = 0,64$
$U_d$ (В)	$g_{s3}^* = 0,77$	$g_{s3}^{**} = 0,83$
$v_{св}$ (см/с)	$g_{s4}^* = 0,81$	$g_{s4}^{**} = 0,71$
$I_{св}$ (А)	$g_{s5}^* = 0,66$	$g_{s5}^{**} = 0,70$



поля допусков для контролируемых характеристик точности процесса приведены в табл. 2.

В табл. 3 приведены значения комплексных критериев точности, рассчитанные в соответствии с методикой работы [1], до и после выполнения предупреждающих действий, связанных с корректировкой угловой скорости вращения обечайки и амплитуды колебаний сварочной горелки. При обработке данных табл. 3 с использованием зависимостей (5) и (6) определяли значения  $\Delta\omega$  и  $\Delta\rho$ :

$$\begin{cases} \Delta\rho = 0,069, \\ \Delta\omega = 0,03. \end{cases}$$

Положительные значения расчетных критериев  $\Delta\rho$  и  $\Delta\omega$  свидетельствуют о том, что в результате выполнения предупреждающих действий повышается точность контролируемого процесса сварки. Это означает, что указанные действия эффективны.

Таким образом, предложенный метод оценки эффективности предупреждающих действий целесообразно использовать в тех случаях, когда к точности контролируемого многофакторного процесса сварки и качеству сварных соединений предъявляются повышенные требования.

1. Тарарычкин И. А. Статистическое регулирование сварочных технологических процессов с использованием метода построения карт контроля состояния // Автомат. сварка. — 2001. — № 10. — С. 33–36.
2. Тарарычкин И. А. Статистические методы обеспечения качества продукции сварочного производства. — Луганск: Изд-во Восточноукр. ун-та им. В. Даля, 2002. — 336 с.
3. ИСО 9001-2001. Системы менеджмента качества. Требования. — Введ. 01.01.2001.
4. ИСО/ТО 10017-99. Руководящие указания по выбору статистических методов применительно к ИСО 9001:1994. — Введ. 01.01.99.
5. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. — М.: Наука, 1973. — 832 с.
6. Статистические методы контроля качества продукции / Л. Ноулер, Дж. Хауэлл, Б. Голд и др. — М.: Изд-во стандартов, 1984. — 104 с.

The paper suggests a method to evaluate the effectiveness of preventive measures, aimed at improvement of the accuracy of the multifactorial welding process. Criteria are defined, which allow determination of the nature of the change of the accuracy and stability of the process being controlled. The possibilities of the method are considered in the case of narrow-gap arc welding of a circumferential weld on a thick-walled cylindrical shell.

Поступила в редакцию 27.05.2002,  
в окончательном варианте 18.12.2002

## НОВОСТИ НКМЗ

### НКМЗ обосновался на Урале

На Каменск-Уральском металлургическом заводе (Свердловская обл., Россия) с помощью Новоκραматорского машиностроительного завода (г. Краматорск, Донецкой обл.) завершен первый этап широкомасштабной реконструкции стана 2840 горячей прокатки алюминия. За два года после победы в тендере с участием немецкой фирмы «Маннесманн», французской «Клессим» и российского Уралмаша НКМЗ изготовил и поставил уральцам около полутысячи тонн сложных наукоемких машин и агрегатов, в том числе оригинальную напольную моталку, ленточный захлестыватель, дисковые кромкообрезные ножницы, рольганги, гидравлические манипуляторные линейки.

В торжествах по поводу сдачи нового оборудования в эксплуатацию приняли участие губернатор Свердловской области Эдуард Россель, первый вице-президент СУАЛ-холдинга Владимир Скорняков, мэр Каменска-Уральского Виктор Якимов, представители многих российских, зарубежных промышленных и научно-исследовательских предприятий, организаций и фирм. Выступивший на митинге губернатор Свердловской области, известный политик и хозяйственник Эдуард Россель, обращаясь к новокраматорцам, заявил: «Молодцы! Отстаивая свои и наши интересы, вы вступили в серьезную борьбу с именитыми фирмами мира, а выиграв бой, в сжатые сроки изготовили и поставили нам современнейшую технику... Вы многим утерли нос, в том числе и нашим...». Э. Россель выразил надежду на дальнейшее плодотворное сотрудничество с НКМЗ.

Впервые в истории старейшего предприятия Урала алюминиевая полоса получена в современных товарных рулонах, а ее качественные характеристики не уступают мировым образцам. Ввод в эксплуатацию обновленной линии прокатного стана позволит уральцам увеличить ассортимент товара, широко применяемого в строительстве, авиационной, автомобильной и других областях промышленности.

Пресс-служба НКМЗ