

# СТАТИСТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ СВАРОЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ПОСТРОЕНИЯ КАРТ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ

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

Предложена методика построения карт контроля состояния технологического процесса без использования графических построений. Алгоритм оценивания упрощается благодаря использованию комплексного критерия. Рассмотрены возможности методики на примере выполнения стыкового соединения дуговой сваркой в узкий зазор.

*Ключевые слова:* статистическое регулирование, обеспечение качества, оценка состояния процесса, методика, карты контроля, сварка в узкий зазор, корректирующие действия

Статистическое регулирование сварочных технологических процессов связано с необходимостью периодической оценки их состояния при решении задач обеспечения качества продукции [1–4]. Оценка такого рода должна предусматривать определение текущего состояния процесса и тенденции его изменения с течением времени (разработка прогнозных оценок); своевременное воздействие на состояние процесса с последующей оценкой эффективности корректирующих действий; документирование состояния процесса в целях формирования данных его истории, что соответствует требованиям объективности и доказательности, в том числе в конкретных ситуациях, когда представители заказчика или органа по сертификации имеют возможность ознакомиться с контрольной документацией, характеризующей ход выполнения заказа.

Среди статистических методов, позволяющих отслеживать и прогнозировать качество продукции и соответственно состояние процесса на различных этапах производства, наиболее распространен метод построения контрольных карт [5]. Традиционная схема использования метода контрольных карт (карт Шухарта) связана с необходимостью периодического отбора выборок из потока продукции и статистической обработкой результатов выполнения контрольных операций. Это означает, что регулирование процессов с помощью карт Шухарта в наибольшей степени соответствует условиям крупносерийного и массового производства, когда есть возможность периодического контроля отдельных партий или групп изделий. Однако применительно к условиям единичного или мелкосерийного производства этот метод может быть неприемлемым или малоэффективным. Если единичное производство характеризуется высокой стоимостью единицы продукции, сложностью осуществления контрольных операций, высокой трудоемкостью работ по устранению дефектов, то целесообразно

контролировать состояние технологического процесса непосредственно.

Таким образом, разработка эффективных методов контроля, регулирования и документирования состояния технологических процессов в условиях единичного и мелкосерийного производства является актуальной задачей, возникающей, например, при использовании таких процессов, как сварка в узкий зазор, электрошлаковая, электронно-лучевая сварка крупногабаритных конструкций. В этих условиях представляет интерес разработка методики построения карт контроля состояния процесса, по внешнему виду которых можно было бы оценивать его текущее состояние и прогнозировать тенденцию развития.

Для решения сформулированных задач необходимо предварительно определить контролируемый параметр процесса  $X$ , который существенно влияет на его состояние и, как следствие, на качество продукции. Затем должны быть сформулированы требования к допускаемому диапазону изменения  $X$  (указан конструкторский допуск). Количество контрольных замеров  $n$  и периодичность их выполнения должны быть установлены по технологической документации.

Методика обработки данных связана с определением следующих характеристик:

среднего значения контролируемого параметра  $\bar{x}$  и стандартного отклонения  $S$

$$\bar{x} = \sum x_i / n, \quad (1)$$

$$S = \sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 / (n - 1)}; \quad (2)$$

величины реального диапазона изменения контролируемого параметра процесса (технологического поля допуска)  $\Delta U$

$$\Delta U = \sqrt{2} S \Phi^{-1}(P), \quad (3)$$

где  $P$  — вероятность, с которой случайная величина  $X$  попадает в границы технологического поля допуска;  $\Phi^{-1}(P)$  — функция, обратная функции Лапласа [6]. Значения  $\Phi^{-1}(P)$  можно определить по данным таблицы в зависимости от требований,

Требования к точности технологического процесса

Параметр проч-ности процесса	Точность		
	умеренная и средняя	повышенная	высокая
$P$	0,94...0,97	0,97...0,99	0,99...0,999
$\Phi^{-1}(P)$	1,33...1,54	1,54...1,82	1,82...2,35

предъявляемых к точности технологического процесса;

коэффициента рассеяния  $\eta$ , характеризующего соотношение полей технологического и конструкторского допусков:

$$\eta = \Delta U / (W_b - W_n), \quad (4)$$

где  $W_b, W_n$  — соответственно верхняя и нижняя границы конструкторского поля допуска, устанавливаемые на этапе разработки технологии исходя из необходимости обеспечения заданных условий протекания процесса. Это могут быть, например, требования по точности к процессу, выполнение которых обеспечивает отсутствие образования дефектов формы шва;

коэффициента смещения настройки  $\theta$ , характеризующего смещение центра распределения контролируемой характеристики  $X$  относительно середины поля конструкторского допуска

$$\theta = 2 |\bar{x} - W_0| / (W_b - W_n), \quad (5)$$

где  $W_0 = (W_b + W_n) / 2$  — середина конструкторского поля допуска.

Текущее состояние технологического процесса можно характеризовать положением точки  $Z(\theta, \eta)$  в системе координат  $\theta\eta$ . Несложно убедиться, что если состояние процесса удовлетворительное, то точка  $Z(\theta, \eta)$  попадает в область  $D$  (рис. 1) [7]. В противном случае процесс не соответствует предъявляемым требованиям и требует корректировки. Поскольку характеристики точности процесса  $\theta$  и  $\eta$  со временем могут изменяться, то состояние процесса можно описывать последовательной системой точек  $Z_1, Z_2, \dots, Z_k$  на плоскости  $\theta\eta$ , определяемых для моментов времени  $t_1, t_2, \dots, t_k$ . Если состояние процесса удовлетворяет требованиям по точности, то все точки  $Z_1, Z_2, \dots, Z_k$  будут находиться в пределах области  $D$  (рис. 2, схема 1). Если с момента времени  $t_j$  соответствующая точка  $Z_j$  выходит за пределы области  $D$ , это означает, что процесс не соответствует предъявляемым требованиям по точности и необходима корректировка (рис. 2, схема 2).

Таким образом, анализ состояния технологического процесса сводится к определению текущего положения точки  $Z(\theta, \eta)$  относительно области  $D$  на плоскости  $\theta\eta$ . Для получения более детальной информации о состоянии процесса область  $D$  целесообразно разбить на три области меньшего размера  $D_1, D_2, D_3$  (рис. 1). Их границы можно определить исходя из соображений практического характера, если в качестве оптимального принять такое состояние процесса, при котором выполняется условие  $0,5 < \theta + \eta < 0,85$ , которое определяет границы области  $D_2$  и тем самым положение об-

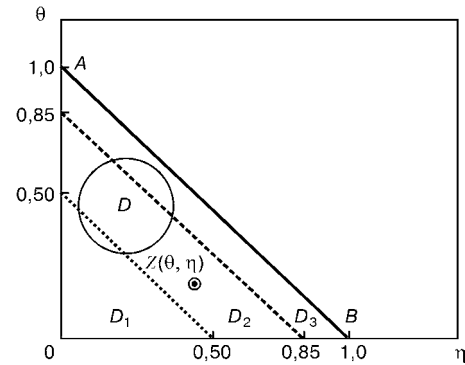


Рис. 1. Схема взаимного расположения областей  $D, D_1, D_2, D_3$

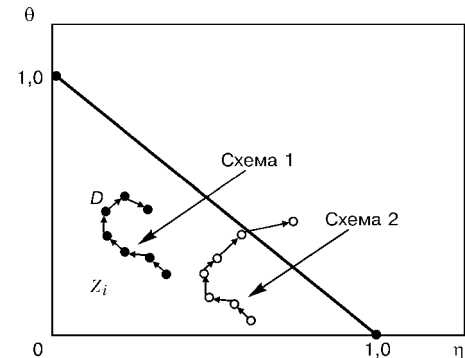


Рис. 2. Схематическое представление различных вариантов изменения точности технологического процесса с течением времени

ластей  $D_1$  и  $D_3$  (рис. 1). Наличие области  $D_3$  обеспечивает некоторый запас по точности прежде, чем процесс приблизится к границе предельного состояния (рис. 1, отрезок  $AB$ ), что позволяет получить определенный резерв времени для принятия решений и выполнения соответствующих корректирующих действий. Процесс, для которого положение точки  $Z(\theta, \eta)$  соответствует области  $D_1$ , является избыточно точным, и использование в данном случае высокоточного оборудования, вероятно, неоправданно [8]. Применение графических построений на плоскости  $\theta\eta$  позволяет выполнять периодическую оценку состояния процесса в соответствии с предлагаемым алгоритмом. Состояние процесса следует признавать удовлетворительным, если текущее положение точки  $Z_i$  соответствует области  $D_1$  или  $D_2$ . Если точка  $Z_i$  переходит в область  $D_3$ , то следует выяснить причины нарушения точности и выполнить корректировку. В том случае, если точка  $Z_i$  выходит за пределы области  $D$ , то процесс производства должен быть приостановлен для выявления и устранения причин нарушения точности.

Представленная схема позволяет оценивать состояние процесса с использованием графических построений на плоскости  $\theta\eta$ . Однако следует отметить, что в условиях реального производства выполнение таких построений создает определенные сложности. В то же время алгоритм оценивания может быть заметно упрощен, если использовать комплексный критерий точности  $g_s$  следующего вида:

$$g_s = \theta + \eta = \frac{2 |\bar{x} - W_0| + \Delta U}{W_b - W_n}, \quad (6)$$

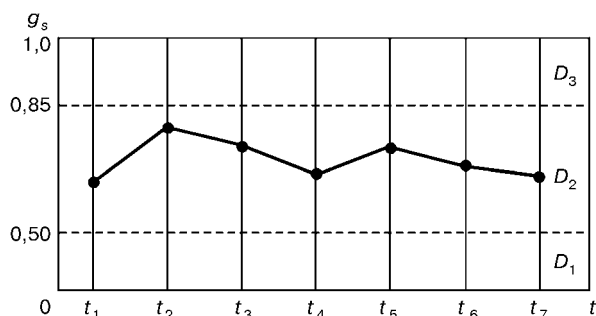


Рис. 3. Вид карты контроля состояния технологического процесса с нанесенными контрольными линиями и границей предельного состояния

который позволяет определить положение точки  $Z(\theta, \eta)$  относительно областей  $D, D_1, D_2, D_3$  и оценить состояние процесса, не прибегая к графическим построениям.

Так, если  $g_s < 0,50$ , то анализируемый процесс отвечает предъявляемым требованиям, являясь при этом избыточно точным (рис. 1, область  $D_1$ ). Если  $0,50 < g_s < 0,85$ , то процесс протекает в оптимальном режиме (рис. 1, область  $D_2$ ). Если  $0,85 < g_s < 1$ , то процесс характеризуется приемлемым состоянием, однако требует корректировки, поскольку протекает вблизи границы предельного состояния (рис. 1, область  $D_3$ ). Если  $g_s > 1$ , то точка  $Z(\theta, \eta)$  находится за пределами области  $D$  и, следовательно, анализируемый процесс не соответствует предъявляемым требованиям точности.

Таким образом, предлагаемая методика построения карт контроля состояния процесса сводится к построению системы значений  $g_s(t_i)$ , определяемых для установленных моментов времени  $t_i$ , в соответствии с изложенным подходом. Наличие контрольных линий вида  $g_s = 0,85$  и  $0,50$ , а также границы предельного состояния  $g_s = 1,0$  на карте контроля состояния процесса упрощают процедуру оценивания и делают ее более наглядной.

Построение карт контроля предлагается осуществлять следующим образом:

состояние процесса оценивать периодически для моментов времени  $t_i, i = 1, 2, \dots, m$  с определением соответствующих значений  $X_i$  и  $S_i$ ;

для текущего момента времени  $t_i$  определять значение параметра  $g_s(t_i)$  по формуле (6);

расчетные значения  $g_s(t_i)$  наносить на карту контроля состояния процесса, вид которой представлен на рис. 3.

Состояние процесса следует оценивать таким образом:

если характер изменения положения контрольных точек  $g_s(t_i)$  соответствует схеме 1 (рис. 4), то корректировку процесса следует выполнять после шестого контрольного замера;

если процесс протекает по схеме 2 (рис. 4) то, начиная со второго контрольного замера, он не соответствует предъявляемым требованиям, и качество продукции, возможно, не будет обеспечиваться;

если процесс протекает по схеме 3, то имеет место непрерывное повышение точности и с момента времени  $t_3$  он становится избыточно точным.

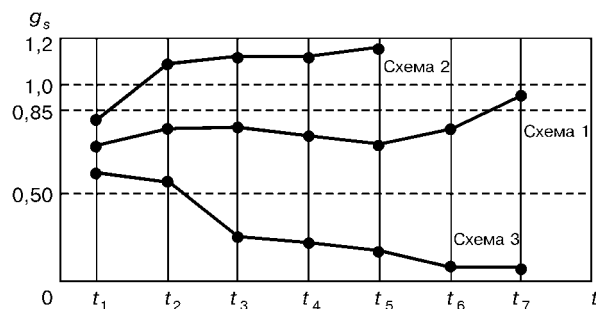


Рис. 4. Вид карт контроля состояния в зависимости от схемы протекания технологического процесса

Наиболее приемлемыми свойствами характеризуются процессы, для которых положение контрольных точек соответствует области  $D_2$  (рис. 3).

Следует отметить, что разработанная методика построения карт контроля состояния процесса не может рассматриваться как обобщение или альтернатива картам Шухарта. Предложенный метод статистического регулирования технологических процессов представляет собой самостоятельный инструмент, который имеет свою область рационального применения, связанную прежде всего с непосредственным контролем и документированием состояния процесса в условиях единичного или мелкосерийного производства.

Рассмотрим возможности предлагаемой методики оценки состояния процесса на примере дуговой сварки в узкий зазор стыкового соединения металла толщиной 60 мм. Заполнение разделки выполняется по схеме один слой за проход (рис. 5), поэтому отклонение электрода от оси зазора может привести к образованию дефектов формы слоя в виде подрезов или неславлений. В соответствии с требованиями технологии отклонение оси электрода от середины зазора не должно превышать 12 % текущей ширины зазора  $2B$ . Контроль точности позиционирования электрода в зазоре выполнялся в трех точках по длине соединения ( $n = 3$ ). Соответствующие значения параметра  $g_s(m)$  для семи проходов ( $m = 1, 2, \dots, 7$ ) нанесены на карту контроля (рис. 6, схема 1).

Полученные данные свидетельствуют о том, что точность процесса со временем возрастает. Объясняется это тем, что по мере заполнения разделки текущая ширина зазора  $2B$  увеличивается и соот-

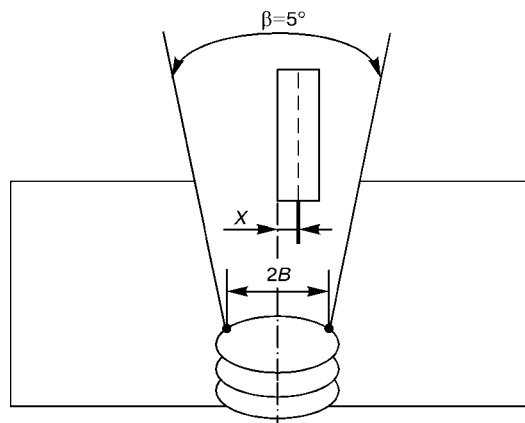


Рис. 5. Схема возникновения отклонения электрода от оси зазора при сварке

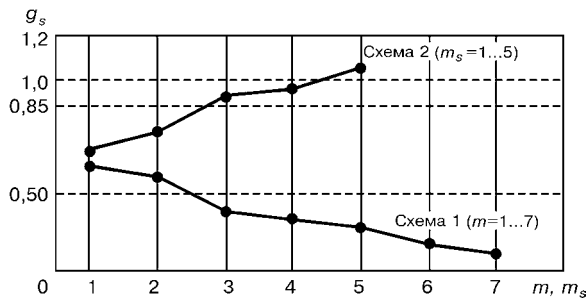


Рис. 6. Характер изменения состояния процесса от слоя к слою (схема 1) и от изделия к изделию (схема 2)

ответственно возрастает допустимое значение отклонения электрода от оси зазора.

На этой же карте нанесены данные состояний процесса при сварке первых проходов для пяти последовательно выполненных сварных соединений ( $m_s = 1...5$ ). Очевидно (рис. 6, схема 2), что точность процесса постепенно снижается. Это, вероятно, связано с эффектом постепенного износа контактного наконечника горелки. В результате первый слой пятого соединения ( $m_s = 5$ ) выполняется в условиях, не отвечающих требованиям, предъявляемым к процессу. При соответствующей организации работ в рамках функционирующей системы качества на предприятии поиск причин нарушения точности в данном случае должен выполняться после сварки третьего или четвертого соединения. При этом методика осуществления работ должна предусматривать установление причин возникновения отклонений, принятие мер по их устранению с последующей оценкой эффективности корректирующих действий [9].

Рассмотренный пример связан с анализом одномерного процесса, когда его состояние оценивается с помощью одного контролируемого параметра. Реальные сварочные процессы являются, как правило, многомерными, и именно для таких процессов задача контроля состояния и обеспечения качества продукции является наиболее актуальной.

Оценка состояния многомерных процессов с использованием предложенных карт контроля состояния осуществляется аналогично одномерным. Отличие заключается в том, что одновременно выполняется построение нескольких карт для каждого из определенных заранее контролируемых параметров процесса  $X_1, X_2, \dots, X_r$ . Состояние процесса признается удовлетворительным, если все соответствующие критерии  $g_{s1}, g_{s2}, \dots, g_{sr}$  по своему значению не превышают единицы.

Проанализировав случай сварки в узкий зазор металла толщиной 60 мм, следует отметить, что возможность образования дефектов формы при сварке связана не только с отклонением электрода от оси зазора, но и с возможными изменениями ширины зазора  $2B$  в результате развития угловых деформаций, вылета электрода  $h_э$ , скорости сварки  $v_{св}$ , сварочного тока  $I_{св}$ , напряжения на дуге  $U_{д'}$ . Если

Method of construction of control charts of the technological process condition without use of graphs is suggested.

The assessment algorithm is simplified due to use of a complex criterion. Feasibilities of the method are described on the example of making butt joint by the narrow-gap welding.

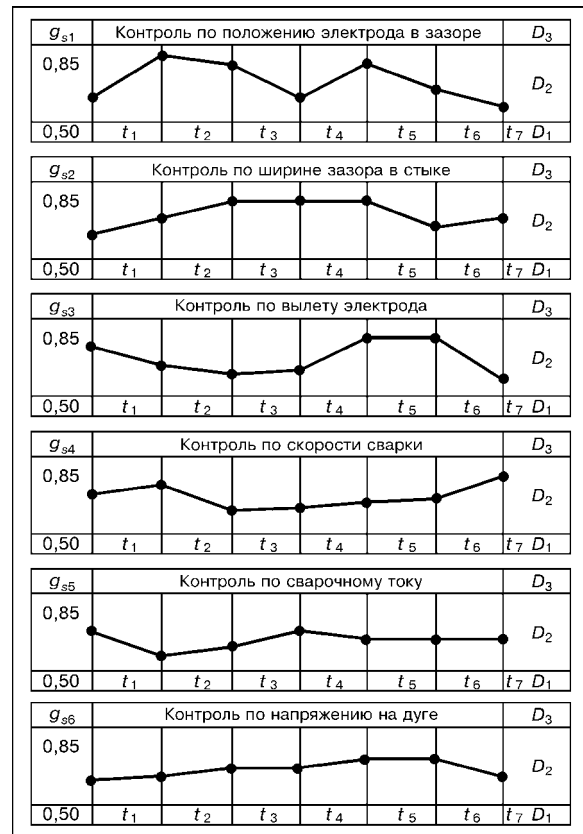


Рис. 7. Вид контроля состояния многомерного процесса сварки

контроль и документирование состояния процесса выполнять по всем перечисленным параметрам, то контролироваться будет шестимерная система, для описания состояния которой требуется одновременное построение шести карт контроля состояния. Внешний вид карт контроля состояния процесса для рассмотренной шестимерной системы, отвечающей всем требованиям точности, приведен на рис. 7.

1. ISO 9001: 1994. Системы качества. Модель обеспечения качества при проектировании, разработке, производстве, монтаже и обслуживании.
2. ISO 9002: 1994. Системы качества. Модель обеспечения качества при производстве, монтаже и обслуживании.
3. ДСТУ ISO 9004-1-95. Управление качеством и элементы системы качества. Ч. 1. Руководящие указания.
4. Контроль качества сварки / В. Н. Волченко, А. К. Гурвич, А. Н. Майоров и др. — М.: Машиностроение, 1975. — 328 с.
5. Статистические методы контроля качества продукции / Л. Ноулер, Дж. Хауэлл, Б. Голд и др. — М.: Изд-во стандартов, 1984. — 104 с.
6. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. — М.: Физматгиз, 1962. — 564 с.
7. Тарарычкин И. А. Разработка методов оценки характеристик технологического процесса, основанных на требованиях международных стандартов ISO серии 9000 // Вісн. Східноукр. нац. ун-ту. — 2000. — № 9. — С. 238-242.
8. Тарарычкин И. А. Оптимизация технологии сварочных процессов при решении задач обеспечения качества продукции // Свароч. пр-во. — 2001. — № 1. — С. 48-50.
9. Семь инструментов качества в японской экономике. — М.: Изд-во стандартов, 1990. — 88 с.

Поступила в редакцию 27.05.2001