ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

УДК 004.932: 519.64

ИНФОРМАЦИОННО УПРАВЛЯЮЩАЯ СИСТЕМА СВАРКОЙ ПРОДОЛЬНЫХ ШВОВ ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА В АВТОМАТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

Д. С. Доков, генеральный директор ООО НПП «Когерент», Рязань, Россия;
orcid.org/0009-0006-6729-0788, e-mail: dokov@mail.ru
А. И. Новиков, д.т.н., доцент, профессор кафедры ЭВМ РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0002-8166-8234, e-mail: novikovanatoly@yandex.ru

Рассматривается задача обеспечения работы в автоматическом режиме сварочного комплекса при сварке внешних швов труб большого диаметра. Основная задача автоматизации процесса сварки заключается в необходимости установки головки сварочного комплекса точно по центру разделки шва. Для этого необходимо выполнять в режиме реального времени слежение за центром стыка с разделкой кромок. Решение задачи обеспечивается работой оптико-электронного блока, осуществляющего сканирование с частотой 100 Гц поверхности трубы в ее поперечном сечении вдоль шва, и программно-алгоритмического комплекса, осуществляющего обработку результатов сканирования и выдачу управляющего воздействия на положение головки сварочного комплекса относительно центра разделки шва. ***Целью работы*** *является создание системы, состоящей из оптико-электронного блока и программно-алгоритмического комплекса, которые должны обеспечивать управление в автоматическом режиме сварочным комплексом при дуговой сварке или сварке под флюсом продольных швов труб большого диаметра. Разработанные оптико-электронный блок и программно-алгоритмический комплекс успешно апробированы в условиях реального производства на одном из металлургических заводов России. Алгоритмы и реализующее их программное обеспечение по управлению работой сварочного комплекса в автоматическом режиме подтвердили заявленные характеристики.*

Ключевые слова: *лазерный профилометр, край шва, граничная точка шва, сварочный комплекс, линейный оператор, векторная маска, свертка.*

DOI: 10.21667/1995-4565-2025-93-213-223

Введение

Автоматизация процессов контроля параметров изделий и управления технологическими процессами в отраслях обрабатывающей промышленности России развивается ускоренными темпами. В полной мере это относится и к металлургической отрасли. Решение многих задач стало возможно благодаря совместному использованию оптико-электронных устройств для сканирования поверхностей обрабатываемых изделий и компьютерных систем с развитым математическим обеспечением для обработки поступающей на них информации. Одной из таких задач является задача управления в автоматическом режиме положением головки сварочного аппарата в процессе сварки продольных швов труб различного диаметра.

Головка сварочного комплекса в процессе непрерывной сварки при продольном движении вдоль трубы должна находиться точно по центру разделки шва. Смещения головки должны выполняться плавно, без рывков. В ручном режиме управление положением головки обеспечивает оператор. Автоматизация процесса управления положением головки сварочного комплекса предполагает решение нескольких задач:

– сканирование поверхности разделки шва в поперечном сечении трубы;

– обнаружение граничных (угловых) точек перехода левой и правой кромки разделки шва в поверхность трубы по результатам сканирования поверхности в окрестности разделки шва;

– вычисление координат центра разделки шва в поперечном сечении и выдача управляющего воздействия.

На рисунке 1 приведено изображение трубы с разделкой шва. На переднем плане наблюдается изображение линии от лазера профилометра (лазерного дальномера), перпендикулярное к кромкам продольной разделки шва.

Рисунок 1 – Труба с продольным швом и поперечной линией от профилометра
Figure 1 – Pipe with longitudinal seam and transverse line from profilometer

Сварочный комплекс является сложным устройством (рисунок 2). В его состав входит механизм продольного перемещения трубы с заданной скоростью, механизм поперечного и вертикального перемещения сварочной головки, система электродов, трубок подачи проволоки и флюса.

Рисунок 2 – Вид на автоматический сварочный комплекс сбоку
Figure 2 – Side view of automatic welding complex

Автоматическая работа сварочного аппарата обеспечивается компьютерной программой, реализующей соответствующий алгоритм установки головки сварочного аппарата по центру разделки свариваемого шва. На вход программы поступают результаты сканирования профилометром (лазерным дальномером) трубы в поперечном сечении (рисунок 1). Соответ-

ствующая линия – результат сканирования поверхности трубы в области разделки шва – в виде облака точек приведена на рисунке 3.

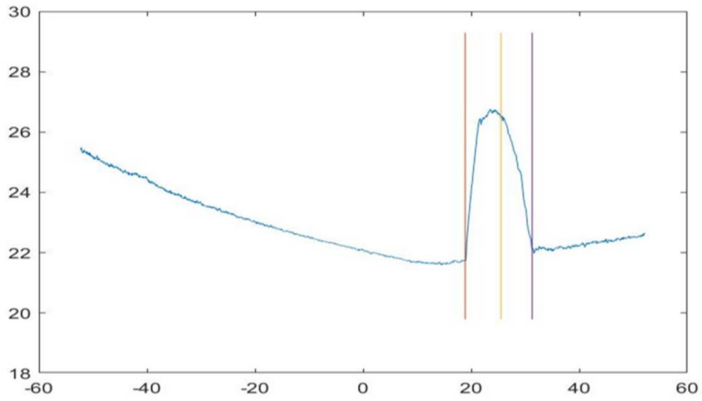


Рисунок 3 – Облако точек от сенсора в окрестности шва
Figure 3 – A cloud of points from sensor in seam vicinity

Облако точек является результатом сканирования профилометром поверхности трубы в окрестности свариваемого шва с заданным шагом 0,1 мм. Задача заключается в обнаружении и корректном определении координат угловых точек перехода кромок разделки в поверхность трубы (на рисунке 3 они выделены вертикальными линиями). Задача формирования управляющих воздействий для автоматической установки головки сварочного аппарата по центру относительно разделки кромок сварочного шва на первый взгляд кажется не слишком сложной. Действительно, можно предложить различные способы ее решения. Некоторые из них обсуждаются в данной работе.

Программно-аппаратный комплекс должен в режиме реального времени обеспечивать обнаружение границ разделки сварного шва, корректно определять координаты угловых точек кромок разделки шва и обеспечивать выдачу управления для установки головки сварочного комплекса точно по центру разделки шва. Сложность задачи заключается, во-первых, в жестких требованиях по точности фиксации угловых точек (ошибка – не более 0.1 мм) и, во-вторых, профили в некоторых поперечных сечениях, как увидим ниже, оказываются более сложными по сравнению с приведенным на рисунке 3. Источниками искажения профиля являются: ненормированный выступ через стык металла сварки внутреннего шва (W-образная форма разделки), переотражения лазерного луча сканера на блестящей поверхности кромок разделки, замятия металла перехода поверхности кромки в поверхность трубы. Нестандартный вид профиля в области разделки шва может приводить к ошибкам в фиксировании границ разделки шва и, как следствие, к ошибкам в установке головки сварочного аппарата.

Формализация задачи и алгоритмы решения

Научные публикации по тематике автоматизации работы сварочных аппаратов весьма скудны. Можно отметить патенты, полученные сотрудниками Челябинского трубопрокатного завода в 2014 [1] и 2017 [2] годах соответственно. В первом патенте указано, что «перед сваркой продольного шва выполняют прихваточный шов, во время сварки которого фиксируют с внешней стороны через определенные расстояния по всей длине трубы три точки на виртуально получаемой поперечной плоскости: точку стыка кромок и две точки их краев, лежащих на касательной плоскости к поперечной плоскости труб» [1]. Предварительная подготовка перед запуском сварочного аппарата для сварки внешнего шва предлагается и во втором патенте: «… на наружную поверхность трубы наносятся линии с помощью лазерного маркера вдоль притупления кромок на расстоянии 3-5 мм от линий до стыка кромок, которую сканируют посредством первого лазерного датчика по длине трубы с занесением в базу данных…». Затем «…с помощью сканирующего поперек второго лазерного датчика определяют расстояние между линиями разметки и на основании полученных ранее данных опре-

деляют точное положение стыка кромок, на который наводят лазерный луч» [2]. Общие вопросы сварочного дела обсуждаются во многих учебных пособиях [3-5]. Наиболее близкой к решаемой в данной статье задаче является информация, представленная в электронном ресурсе [6]. В ней приведены параметры лазерной системы слежения за стыком для станов наружной сварки продольных швов ROVICOR STS-200-NS.

Авторы настоящей работы ставят цель обнаружения краев разделки наружного сварочного шва и, как следствие, установки головки сварочного автомата непосредственно в процессе его движения вдоль свариваемого шва в режиме реального времени. Перейдем к формализованной постановке задачи. Введем систему координат $Oxyz$ следующим образом: ось Ox – горизонтальная ось, ось Oy – перпендикулярна к ней и направлена вверх, ось Oz перпендикулярна к плоскости Oxy и направлена по продольной оси трубы (по продольной линии шва) в направлении движения сварочного аппарата. Управление положением головки сварочного автомата в каждый момент времени формируется по поперечному профилю, отвечающему этому моменту времени (рисунок 3). Поэтому можно ограничиться исследованием облака точек в отдельном поперечном сечении, то есть оставаясь в системе координат Oxy.

Достаточно естественным кажется подход к построению алгоритма обнаружения граничных точек на кромках свариваемого шва, основанный на локальной аппроксимации фрагмента облака точек, приведенного на рисунке 3, многочленом второй степени. Затем выполнять прогноз на 2-3 точки вперед и оценивать отклонение прогнозных значений от фактических. Если отклонение превышает определенный порог, то фиксировать наличие граничной точки. В рамках такого подхода придется решать проблему ложного срабатывания алгоритма из-за неидеальной геометрии сканируемых поверхностей. Такой подход, очевидно, был реализован в программном комплексе одной из иностранных компаний, ушедшей с российского рынка, продукт которой должен заместить разрабатываемый программно-алгоритмический комплекс.

В настоящей работе предлагается подход, основанный на применении для обнаружения граничных точек линейных операторов с векторными масками, каждая из которых реализует получение локальной оценки производной первого или второго порядка. Допустим, что $f(x)$ – некоторая непрерывная функция, адекватно аппроксимирующая кривую (дискретное облако точек), приведенную на рисунке 3. Очевидно, что ее первая и вторая производные в угловых точках кромки шва будут принимать максимальные по модулю значения. Эту особенность производных логично использовать для детектирования указанных угловых точек. Для локальной аппроксимации кривой, образуемой облаком точек вне сварного шва, целесообразно использовать многочлен второй степени.

$$f(x_i) = a_0 + a_1 x_i + a_2 x_i^2 + \xi_i,\ x_i = \overline{x_{i_0} - k, x_{i_0} + k};\ \xi_i \in N(0, \sigma^2) \qquad (1)$$

Длина $(2k+1)$ «отрезка» $\lfloor x_{i_0-k}, x_{i_0+k} \rfloor$ (окна скольжения) подбирается сообразно цели исследования. Оптимальные значения оценок коэффициентов $\hat{A} = (\hat{a}_0, \hat{a}_1, \hat{a}_2)$ могут быть получены двумя способами. Во-первых, в рамках стандартной процедуры метода наименьших квадратов [7-9]:

$$\hat{\mathbf{A}} = (\mathbf{T}^T\mathbf{T})^{-1}\mathbf{T}^T\mathbf{F}. \qquad (2)$$

В составе формулы (2):

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 1 \\ -k & -k+1 & \dots & -1 & 0 & 1 & \dots & k-1 & k \\ k^2 & (k-1)^2 & \dots & 1 & 0 & 1 & \dots & (k-1)^2 & k^2 \end{pmatrix}^T$$ – матрица размером $(2k+1)\times 3$;

$\mathbf{F} = \left(f(x_{i_0}-k), \dots, f(x_{i_0}-1), f(x_{i_0}), f(x_{i_0}+1), \dots, f(x_{i_0}+k)\right)^T$ – вектор наблюдений.

Во-вторых, оценку $\hat{\mathbf{A}} = (\mathbf{T}^T\mathbf{T})^{-1}\mathbf{T}^T\mathbf{F}$ можно переписать в виде вектора сверток [10, 11]:

$$\begin{pmatrix} \hat{a}_0 \\ \hat{a}_1 \\ \hat{a}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{q}_0 * \mathbf{F} \\ \mathbf{q}_1 * \mathbf{F} \\ \mathbf{q}_2 * \mathbf{F} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Свертки $\mathbf{q}_0 * \mathbf{F}$, $\mathbf{q}_1 * \mathbf{F}$, $\mathbf{q}_2 * \mathbf{F}$ дают МНК-оценки соответственно значения функции $f(x)$ в точке x_{i_0}, ее производной первого порядка $f'(x_{i_0}) = a_1$ и производной второго порядка $f''(x_{i_0}) = 2a_2$. Элементами $2k+1$ – мерных векторов $\mathbf{q}_0, \mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2$ являются соответственно элементы 1-й, 2-й и 3-й строк матрицы $\mathbf{Q} = \left(\mathbf{T}^{\mathbf{T}}\mathbf{T}\right)^{-\mathbf{1}}\mathbf{T}^{\mathbf{T}}$. Элементы q_j, $j = \overline{-k,k}$ этих векторов образуют коэффициенты искомых масок, обеспечивающих получение оценок значений функции $f(x)$ и ее производных в точке x_{i_0}.

Коэффициенты q_j, $j = \overline{-k,k}$ находятся по следующим формулам [9, 10]:

– для вектора $\mathbf{q}_0$: $q_j = \dfrac{3}{(4k^2-1)(2k+3)}\left(3k^2+3k-1-5j^2\right)$, $j = \overline{-k,k}$; (4)

– для вектора $\mathbf{q}_1$: $q_j = \dfrac{3}{k(k+1)(2k+1)}j$, $j = \overline{-k,k}$; (5)

– для вектора $\mathbf{q}_2$: $q_j = \dfrac{15}{k(k+1)(4k^2-1)(2k+3)}\left(3j^2-k(k+1)\right)$, $j = \overline{-k,k}$. (6)

Поскольку аппаратно-программный комплекс должен работать в реальном времени, то для получения оценок производных целесообразно использовать свертки (3) фрагментов облака точек определенной длины (вдоль оси Ox) с соответствующей маской, обеспечивающей получение оптимальной оценки производной первого или второго порядка, то есть

$$\mathbf{A}(\mathbf{y}) = \mathbf{q} * \mathbf{y} = \sum_{j=-k}^{k} q_j \cdot y_{x+j}.$$

Здесь $\mathbf{A}$ – символ линейного оператора, $\mathbf{q} * \mathbf{y}$ – обозначение свертки. Использование сверточных операций позволит получить алгоритм с низкой вычислительной сложностью, так как свертка с векторной маской длиной $2k+1$ требует лишь $2k+1$ операций умножения и $2k$ операций сложения.

Приведем значения коэффициентов q_j для каждого из трех векторов $\mathbf{q}_0, \mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2$ для двух значений длин $\ell = 2k+1 = 7$ и $\ell = 2k+1 = 9$:

$$\mathbf{q}_0(7) = \frac{1}{21}(-2,3,6,7,6,3,-2), \mathbf{q}_0(9) = \frac{1}{231}(-21,14,39,54,59,54,39,14,-21);$$

$$\mathbf{q}_1(7) = \frac{1}{28}(-3,-2,-1,0,1,2,3), \mathbf{q}_1(9) = \frac{1}{60}(-4,-3,-2,-1,0,1,2,3,4);$$

$$\mathbf{q}_2(7) = \frac{1}{84}(5,0,-3,-4,-3,0,5), \mathbf{q}_2(9) = \frac{1}{924}(28,7,-8,-17,-20,-17,-8,7,28).$$

Отметим, что маски (4) – (6) дают оптимальные значения оценок значений функции $f(x)$ и ее производных в точке x_{i_0}. Однако они не являются единственно возможными. Например, практически важные результаты в рассматриваемой задаче с детектированием угловых точек можно получить с помощью свертки фрагмента маски заданной длины $\ell = 2k+1 = 7$ с простейшей симметричной векторной маской вида

$$\left(-\frac{1}{2}, 0, ..., 0, 1, 0, ..., 0, -\frac{1}{2}\right). \quad (7)$$

На выходе свертки последовательного множества дискретных значений линейной функции $y = a + bx, \quad x = \overline{-k,k}$ с данной маской будет 0. Действительно,

$$\left(y(x-k),...,y(x),...,y(x+k)\right)\cdot\left(-\frac{1}{2},0,...,0,1,0,...,0,-\frac{1}{2}\right) = -\frac{1}{2}\left(a+b(x-k)\right)+$$

$$+1\cdot\left(a+bx\right)-\frac{1}{2}\left(a+b(x+k)\right)=0.$$

Легко проверить, что на выходе свертки последовательного множества дискретных значений квадратичной функции $y = a + bx + cx^2, x = \overline{-k,k}$ с данной маской будет константа $-ck^2$.

Рассмотрим теперь работу такой свертки на последовательности дискретных значений, представленных облаком точек на рисунке 3. Это множество можно рассматривать как сумму двух квадратичных функций. Первая квадратичная функция $y_1(x) = a_1 + b_1x + c_1x^2, x = \overline{1,N}$, описывает глобальное изменение на всей области задания множества точек. Как следует из вида кривой на рисунке 3, коэффициент c_1 при x^2 в ней имеет небольшое значение. На промежутке от первой угловой точки $M_1(x_1,y_1)$ до второй $M_2(x_2,y_2)$ к значениям $y_1(x),\ x = \overline{x_1,x_2}$ первой квадратичной функции прибавляются значения второй квадратичной функции $y_2(x) = a_2 + b_2x + c_2x^2, x = \overline{x_1,x_2}$, коэффициент c_2 при x^2 в которой отрицателен и существенно больше по модулю 1.

Применение приведенной выше простейшей векторной маски (7) к такой функции приведет к появлению на выходе свертки локальных минимумов в угловых точках M_1 и M_2, которые являются точками интереса в данной задаче.

Недостатком простейшей векторной маски (7) является то, что в условиях дискретного белого шума дисперсия сигнала на выходе свертки будет в 1,5 раза выше по сравнению с дисперсией входного сигнала:

$$D[\mathbf{q}\bullet\xi] = \sum_{j=-k}^{k} q_j^2\cdot D[\xi] = \left(\left(-\frac{1}{2}\right)^2+1^2+\left(\frac{1}{2}\right)^2\right)D[\xi] = 1{,}5\cdot D[\xi].$$

Указанный недостаток векторной маски (7) легко исправить, представив ее в следующем виде:

$$\left(-\frac{1}{2(2k+1)},...,-\frac{1}{2(2k+1)},0,...,0,\frac{1}{2k+1},...,\frac{1}{2k+1},0,...,0,-\frac{1}{2(2k+1)},...,-\frac{1}{2(2k+1)}\right). \quad (8)$$

Для такой маски оценка дисперсии выходного сигнала будет уже такой:

$$D[\mathbf{q}\bullet\xi] = \left(2(2k+1)\frac{1}{4(2k+1)^2}+(2k+1)\frac{1}{(2k+1)^2}\right)D[\xi] = \frac{3}{2(2k+1)}D[\xi]. \quad (9)$$

Применение векторной маски (8) эффективно для больших значений длин окна скольжения ($\ell > 21$). Например, при длине маски $\ell = 31$ и $2k+1 = 5\,(k=2)$ будем иметь $D[\mathbf{q}\bullet\xi] = D[\xi] = \frac{3}{2\cdot 5}D[\xi] = 0{,}3\cdot D[\xi]$. А это вполне приемлемый результат.

Заметим, что в рассматриваемой реальной задаче (рисунок 3) детектирования угловых точек рабочая маска вида (8) имела общую длину $\ell = 51$ и длину каждой из трех ненулевых областей в ее составе, равной 9, т. е. $2k+1 = 9\,(k=4)$:

$$\left(-\frac{1}{18},...,-\frac{1}{18},0,...,0,\frac{1}{9},...,\frac{1}{9},0,...,0,-\frac{1}{18},...,-\frac{1}{18}\right). \quad (10)$$

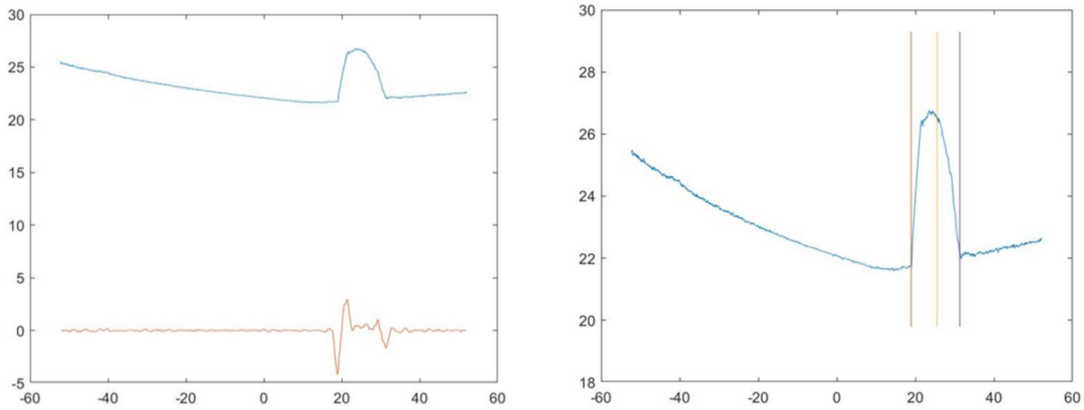
В каждой из двух областей маски (10), заполненных нулями, содержится по 12 нулей. Как следствие, в этом случае в соответствии с формулой (9) при $k = 4$ получаем, что

$$D[\mathbf{q} * \xi] = \frac{1}{6} D[\xi].$$

Преимущества маски (8) перед масками (5) и (6) заключаются в простоте ее формирования с учетом особенностей детектируемого сигнала в реальной задаче и меньшей вычислительной сложности формирования сверток (за счет нулевых значений коэффициентов).

Экспериментальные исследования

Для применения в реальных системах управления работой сварочного аппарата при сварке продольного шва в автоматическом режиме предложены два программно-алгоритмических комплекса. Оба комплекса построены по схеме с дублированием способов обнаружения граничных точек на «берегах» разделки шва. Первый комплекс построен на использовании исключительно сверточных операций $\mathbf{q} * \mathbf{y} = \sum_{j=-k}^{k} q_j \cdot y_{x+j}$. В нем вычисляются свертки $\mathbf{q}_1 * \mathbf{F}$, $\mathbf{q}_2 * \mathbf{F}$, обеспечивающие получение МНК-оценок производных первого и второго порядков в каждой точке кривой. Кроме этого, вычисляется свертка с маской (10). На рисунке 4 приведен типичный поперечный профиль в окрестности шва и результаты его обработки. На рисунке 4, *а* изображены: в верхней части – профиль поперечного сечения, в нижней части результат применения свертки с маской (10) к исходному набору точек. На рисунке 4, *б* изображен поперечный профиль с выделенными на нем левой и правой граничными точками и центром шва (все точки отмечены вертикальными линиями).



а (a) **б (b)**

Рисунок 4 – Поперечный профиль и результат его обработки (а), профиль с выделенными на нем граничными точками и центром шва (б)

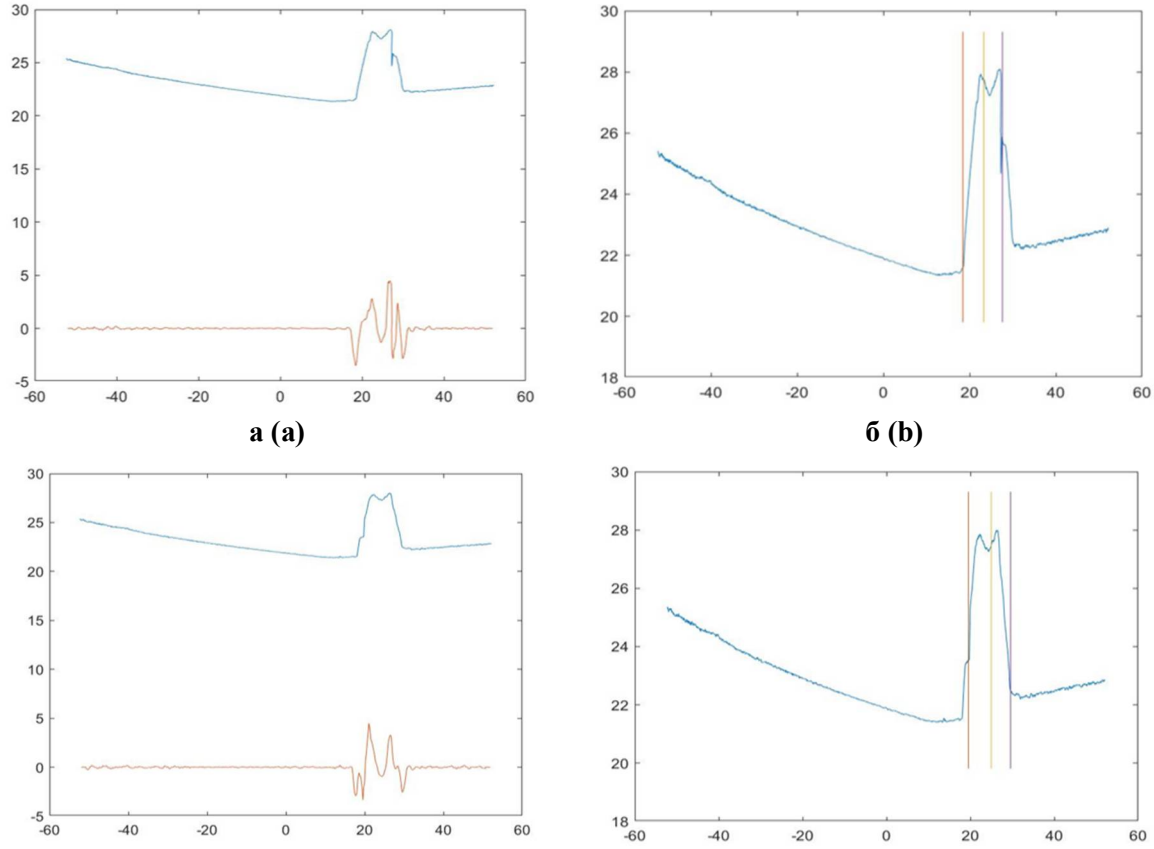
Figure 4 – Transverse profile and the result of its processing (a), profile with highlighted boundary points and seam center (b)

Целесообразно отметить, что, во-первых, на промежутках до и после шва на выходе свертки получается значение, близкое к нулю (нижний график на рисунке 2, *а*). Во-вторых, как и отмечалось выше, граничным точкам профиля отвечают локальные минимумы на выходе фильтра. Локальные минимумы фиксировались системой при дополнительном условии, что их значения меньше заданных порогов. Пороги вводились на основании статистического анализа большого числа (более 500) результатов обработки профилей. Введение порогов продиктовано необходимостью исключения срабатывания алгоритма на локальных неровностях на поверхности трубы. Реакция предложенных алгоритмов на такие неровности хотя и меньше по амплитуде, но аналогична по форме реакции на краевые точки шва.

В разработанной системе выполнено дублирование обнаружения граничных точек по трем алгоритмам. Необходимость дублирования обусловлена тем, что иногда обнаруживается негладкий характер кривой в области шва. Это, с одной стороны, связано с негладкостью

поверхности внутреннего шва при выполнении операции прихватывания и, с другой, с замятием края листа при сворачивании его в трубу гидравлическим прессом. На выборке из 540 профилей были обнаружены нестандартные ситуации, когда алгоритм обнаружения граничных точек на основе свертки с масками (6) и (10) давал ошибочные результаты. Нетипичных профилей на такой выборке было не более 1 %.

На рисунке 5 приведены примеры таких нетипичных профилей в области сварочного шва.



а (a) **б (b)**

в (c) **г(d)**

Рисунок 5 – Примеры нетипичных профилей в области сварочного шва и результаты детектирования граничных точек

Figure 5 – Examples of atypical profiles in welding area and the results of boundary point detection

На рисунке 5, *а* в верхней части приведен профиль в окрестности шва с нетипичной правой кромкой, а в нижней части – график результата сверточной операции с маской (10). Как следствие, правая угловая точка зафиксирована с ошибкой по оси *Ox* (рисунке 5, *б*). Аналогичная ситуация наблюдается и на рисунке 5, *в*, но теперь уже дефект на левой кромке шва и ошибочный выбор первой угловой точки (рисунке 5, *г*). Для обнаружения нетипичных ситуаций и, если получится, то и исправления ошибок, реализована обработка профилей одновременно по трем алгоритмам. Это алгоритмы, использующие маски (5), (6) и (10). Дополнительно при возникновении нестандартных ситуаций выполняется сглаживание облака точек с помощью медианного фильтра.

На рисунке 6 приведены результаты работы трех названных алгоритмов на шве с эффектом замятия на правом краю листа. Полученные значения координаты правой граничной точки во втором и третьем результатах (по порядку следования на рисунке 6) практически совпадают. В первом результате на рисунке 6 положение правой граничной точки найдено с ошибкой. В итоге второй и третий результаты будут усреднены и приняты системой в качестве правой граничной точки. В разработанной системе предусмотрена защита от резких и больших по величине смещений головки сварочного комплекса при движении вдоль шва.

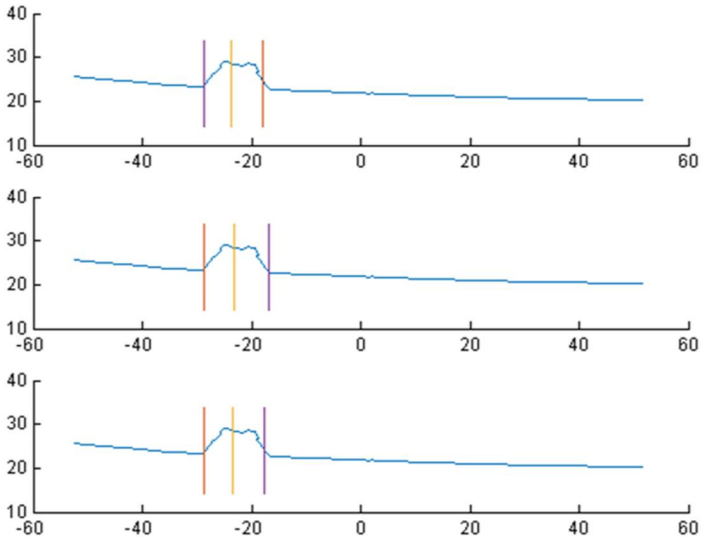


Рисунок 6 – Результаты обнаружения граничных точек и центра шва по трем алгоритмам
Figure 6 – The results of detecting boundary points and seam center using three algorithms

Во втором программно-алгоритмическом комплексе обнаружение граничных точек производится сначала с помощью сверточной операции с одной из масок (6) или (10), дающих оценку производной второго порядка. После этого для подтверждения полученного результата (правильности нахождения граничных точек) производится построение параболической модели (1) по данным измерений слева от зафиксированной левой граничной точки и соответственно справа от зафиксированной правой граничной точки. При этом оптимальные МНК-оценки $\hat{A} = (\hat{a}_0, \hat{a}_1, \hat{a}_2)$ параметров модели находятся в виде сверток $\hat{a}_0 = \mathbf{q}_0 * \mathbf{F}$, $\hat{a}_1 = \mathbf{q}_1 * \mathbf{F}$, $\hat{a}_2 = \mathbf{q}_2 * \mathbf{F}$. Построенная параболическая модель используется затем для получения прогнозных значений $\hat{y}^{prgn}_{x_{i0}+k+t}$, $t = 1,2,...,m$ на m шагов вперед и разностей $\Delta_{x_{i0}+k+t} = y_{x_{i0}+k+t} - \hat{y}^{prgn}_{x_{i0}+k+t}, t = 1,2,...,m$. Если последовательность $\{\Delta_{x_{i0}+k+t}\}_{t=1}^{m}$ получается монотонно возрастающей, то выносится решение о правильности обнаружения граничной точки.

Заключение

Приведено описание системы, состоящей из блока лазерных профилометров (лазерных дальномеров), и программно-алгоритмического комплекса, выполняющего обработку данных от профилометров и выдачу управляющего воздействия на устройство позиционирования головки сварочного комплекса точно по центру шва. Основное внимание в описании работы комплекса уделено алгоритмам определения координат граничных точек шва в каждом поперечном сечении трубы. От корректности и надежности работы этих алгоритмов зависит качество сварочного шва, формируемого сварочным комплексом в автоматическом режиме. Предложено два варианта алгоритмов. Каждый вариант реализован с дублированием контроля правильности формируемых решений.

Построенная информационно-управляющая система работой сварочного комплекса прошла апробацию на одном из металлургических предприятий России в условиях реального производства труб большого диаметра. Система обеспечила траекторию движения головки сварочного комплекса точно по центру шва по всей длине трубы.

Библиографический список

1. **Романцов А.И., Романцов И.А., Черняев А.А., Котлов А.О., Федоров М.А.** Способ лазерной сварки труб большого диаметра. Патент RU 2564504C1. 22.07 2014.

2. **Романцов А.И., Федоров М.А., Черняев А.А., Котлов А.О.** Способ лазерной сварки труб. Патент RU 2637034C1. 30.01 2017.

3. **Романцев Б.А., Коликов А.П., Самусев С.В.** Развитие теории и технологии производства бесшовных и сварных труб // Сталью 2009. № 3. 46 с.

4. **Данченко В.Н., Коликов А.П., Романцев Б.А., Самусев С. В.** Москва: Интермет Инжиниринг, 2002 (ППП Тип. Наука). 638 с.

5. **Романцев Б.А., Гончарук А.В., Вавилкин Н.М., Самусев С.В**. Трубное производство. М.: Изд. Дом МИСиС, 2011. 970 с.

6. Лазерная система автоматического слежения за стыком для станов сварки продольных швов труб ROVICOR STS-200-NS // ИЭИ им. Е.О. Патона НАН Украины ISSN 0235-3474. Техн. диагностика и неразруш. контроль, 2017, № 2.

7. **Кендалл М.Дж., Стьюарт А.** Многомерный статистический анализ и временные ряды. М.: Изд-во «Наука», 1976. 736 с.

8. **Андерсон Т.** Статистический анализ временных рядов. М.: Издательство «МИР». 1976. 753 с.

9. **Novikov A.I.**. The Formation of Operators with Given Properties to solve Original Image Processing Tasks // Pattern Recognition and Image Analysis. 2015. Vol. 25. № 2. Pp. 230-236. DOI: 10.1134/S1054661815020194.

10. **Новиков А.И., Пронькин А.В.** Линейные операторы с векторными масками в задачах цифровой обработки изображений // Компьютерная оптика, 2023. Т. 47, № 4. С. 596-604.

11. **Новиков А.И.** Опыт применения математических методов в цифровой обработке сигналов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2025. № 91. С. 168-182. DOI: 10.21667/1995-4565-2025-91-168-182.

UDC 004.932: 519.64

INFORMATION CONTROL SYSTEM TO WELD LONGITUDINAL SEAMS OF LARGE DIAMETER PIPES IN AUTOMATIC MODE

D. S. Dokov, CEO in NPP Coherent LLC, Ryazan, Russia;
orcid.org/0009-0006-6729-0788, e-mail: dokov@mail.ru
A. I. Novikov, Dr in Technical Sciences, Associate Professor, Professor, Department of Electronic computing machines, RSREU, Ryazan, Russia;
orcid.org/0000-0002-8166-8234, e-mail: novikovanatoly@yandex.ru

The task of providing the automatic operation of welding complex when welding outer seams of large-diameter pipes is considered. The main task of automating the welding process is to install welding head precisely in the center of seam cutting. To do this, it is necessary to perform real-time tracking of the center of joint with cutting edges. The solution to the problem is provided by the operation of optoelectronic unit that scans pipe surface with the frequency of 100 Hz in its cross-section along the seam, as well as software and algorithmic complex that processes scanning results and issues control actions on welding head position relative to seam cutting center. The aim of the work is to create a system consisting of optoelectronic unit and software and algorithmic complex, which should provide automatic control of welding complex during arc welding or submerged welding of longitudinal seams of large-diameter pipes. The developed optoelectronic unit together with software and algorithmic complex has been successfully tested in real production conditions at one of metallurgical plants in Russia. The algorithms and the software implementing them to control welding complex operation in automatic mode confirmed the characteristics stated.

Keywords: *laser profilometer, seam edge, seam boundary point, welding complex, linear operator, vector mask, convolution.*

DOI: 10.21667/1995-4565-2025-93-213-223

References

1. **Romancov A.I., Romancov I.A., Chernyaev A.A., Kotlov A.O., Fedorov M.A.** Sposob lazernoj svarki trub bol'shogo diametra. *Patent RU 2564504S1*. 22.07.2014.

2. **Romancov A.I., Fedorov M.A., Chernyaev A.A., Kotlov A.O.** Sposob lazernoj svarki trub. *Patent RU 2637034S1*. 30.01 2017.

3. **Romancev B.A., Kolikov A.P., Samusev S.V.** Razvitie teorii i tekhnologii proizvodstva besshovnykh i svarnykh trub. *Stal'yu 2009*, no. 3, 46 p.

4. **Danchenko V.N., Kolikov A.P., Romancev B.A., Samusev S.V.** Moskva: I*ntermet Inzhiniring*, 2002 (PPP Tip. Nauka). 638 p.

5. **Romancev B.A., Goncharuk A.V., Vavilkin N.M., Samusev S.V.** Trubnoe proizvodstvo. M.: *Izd. Dom MISIS*, 2011, 970 p.

6. Lazernaya sistema avtomaticheskogo slezheniya za stykom dlya stanov svarki prodol'nykh shvov trub ROVICOR STS-200-NS. IEHI im. E.O. Patona NAN Ukrainy ISSN 0235-3474. *Tekhn. diagnostika i nerazrush. kontrol'*, 2017, no. 2.

7. Kendall M.Dzh., St'yuart A. Mnogomernyj statisticheskij analiz i vremennye ryady. M.: *Izd-vo «NaukA»*, 1976, 736 p.

8. **Anderson T**. Statisticheskij analiz vremennykh ryadov. M.: *Izdatel'stvo «MIR»*. 1976. 753 p.

9. **Novikov A.I.** The Formation of Operators with Given Properties to solve Original Image Processing Tasks. *Pattern Recognition and Image Analysis*. 2015, vol. 25, no. 2, pp. 230-236. DOI: 10.1134/S1054661815020194.

10. **Novikov A.I., Pron'kin A.V.** Linejnye operatory s vektornymi maskami v zadachakh cifrovoj obrabotki izobrazhenij. *Komp'yuternaya optika*. 2023, vol. 47, no. 4, pp. 596-604.

11. **Novikov A.I.** Opyt primeneniya matematicheskikh metodov v cifrovoj obrabotke signalov. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2025, no. 91, pp. 168-182. DOI: 10.21667/1995-4565-2025-91-168-182. (in Russian).