

В. Е. МАХОВ, А. Г. ПАЛАЕВ, А. И. ПОТАПОВ

## АВТОМАТИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ ШВОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Рассматривается задача автоматизации контроля качества сварных швов с использованием компьютерных технологий на основе контрольно-измерительной системы технического зрения с элементами робототехники. Приводится описание комплексного виртуального прибора, предназначенного для управления микроконтроллером и обработки изображения.

**Ключевые слова:** ультразвуковые технологии, компьютерные технологии, контроль качества сварных швов.

Использование ультразвуковых технологий позволяет получать высокое качество обработки различных полимерных материалов и изделий на их основе. Так, например, по сравнению с традиционными методами сварки ультразвуковая сварка полимеров [1] обладает такими преимуществами, как высокая прочность соединения свариваемых материалов и отсутствие внутренних напряжений сварного шва; кроме того, не требуется предварительная подготовка поверхности изделия и зачистка поверхности шва после сварки.

Технология с применением ультразвука для изготовления различных изделий требует решения ряда проблем, связанных с выбором оптимальных режимов обработки, влияющих на качество получаемого изделия. Так, на качество сварки влияют амплитудно-частотная характеристика ультразвукового инструмента; акустическая мощность, вводимая в зону сварки; усилие прижима ультразвукового инструмента к свариваемому изделию; скорость перемещения ультразвукового инструмента. Объективный контроль качества получаемого изделия (в частности, прочности и дефектности сварного шва) непосредственно связан с выбором оптимальных режимов обработки и является самой трудоемкой операцией в технологическом процессе. Даже после отработки технологических режимов ультразвуковой сварки в большинстве случаев требуется хотя бы выборочный контроль получаемых изделий. Существующие в настоящее время методы контроля качества изделий [2], получаемых по ультразвуковой технологии, довольно трудоемки. В связи с этим задача автоматизации контроля качества таких изделий весьма актуальна.

Одним из эффективных методов неразрушающего контроля является оптический метод. Сварные изделия из полимерных материалов имеют различную толщину и разные оптические свойства, что затрудняет автоматизацию процесса контроля. Этим обуславливается необходимость разработки схемы (и методики) контроля, которая может быть встроена в технологический цикл производства таких изделий. Кроме того, система контроля должна предусматривать возможность использования различного технологического оборудования для ультразвуковой сварки. Типичные примеры сварочного оборудования представлены на рис. 1, где 1 — ультразвуковой генератор УЗГ-200 со сварочным пистолетом; 2 — ультразвуковой станок для прошивки камня; 3 — ультразвуковой диспергатор; 4 — ультразвуковая сварочная машина; 5 — генератор УЗДН-1.

Для экспериментальных исследований контроля качества были выбраны образцы сварных изделий, в частности: две части полотна толщиной 340+340 мкм и крепежный кант, а также две части прозрачного полотна толщиной 180+180 мкм.

Исследования проводились с использованием метода оптической микроскопии „на просвет“ [3]. Основной трудностью при проведении контроля этим методом является распределение дефектов сварки по объему шва материала (к дефектам сварки относятся, например,

непрояр, присутствие воздушных пузырей, расслоение). При использовании микрообъективов невозможно получить резкое изображение внутренней структуры материала по всей толщине с требуемым оптическим увеличением.

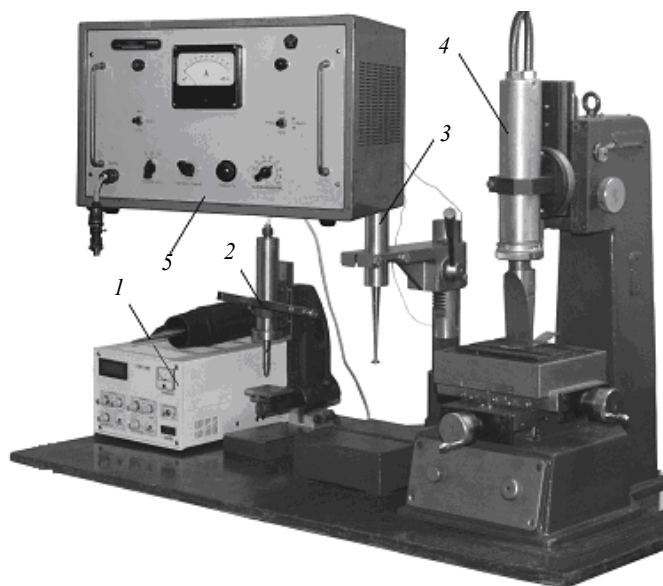


Рис. 1

Существующие в настоящее время автоматизированные системы получения и обработки объемного изображения имеют высокую стоимость. Например, универсальный цифровой видеомикроскоп высокого разрешения HIROX KH-7700 (производства Японии) позволяет производить запись 3D-изображений дефектов и измерение размеров элементов структуры, а также сохранять изображения объектов и результаты измерений с возможностью документирования и передачи по компьютерной сети, однако он не допускает требуемой модернизации алгоритмов контроля при обработке изображения.

Для проведения экспериментов по контролю качества сварных швов были использованы компьютерные технологии фирмы “National Instruments” (NI — США), включающие контрольно-измерительную систему технического зрения на базе оптического микроскопа с элементами робототехники [4]. Эти технологии позволяют обеспечить программно управляемое пошаговое изменение плоскости фокусировки.

Внешний вид макета автоматизированной системы контроля качества сварного шва представлен на рис. 2. Система контроля состоит из универсального оптического микроскопа 1 (ОРТИТЕСН XSP-128-102) с тремя ахроматическими объективами:  $4\times$ ,  $10\times$  и  $40\times$ . Вместо окуляра использована универсальная электронно-оптическая система регистрации изображения 2 (окулярная цифровая камера “MYscope 130 M”) с функцией улучшения частотно-контрастной характеристики изображения при съемке микрообъектов. Цифровая камера имеет чувствительный элемент — матрицу КМОП размером  $1/2''$ . Максимальное разрешение одиночного кадра —  $1280\times 1024$ .

Пошаговая фокусировка на объект контроля 6 осуществляется с помощью электропривода 3, связанного с механизмом тонкой фокусировки. Управление электроприводом осуществляется микроконтроллером NXT 4, управляемым, в свою очередь, виртуальным прибором (ВП). Для контроля сварного шва необходимо получить серию изображений с пределами плоскости фокусировки микроскопа от нижней поверхности образца до верхней поверхности. Предварительным сканированием плоскости фокусировки определяется верхняя поверхность контролируемого изделия. Во время сканирования определяется также толщина контролируемого изделия; изображение с цифровой камеры передается в компьютер 5. Захват кадров изображения и его обработка осуществляются виртуальным прибором, созданным в прило-

жении NI “Vision Assistant” с драйвером видекамеры USB (webcam 1.4.1). Прямое механическое управление микроскопом (через микроконтроллер NXT) реализуется с использованием компьютера при помощи ВП управления.

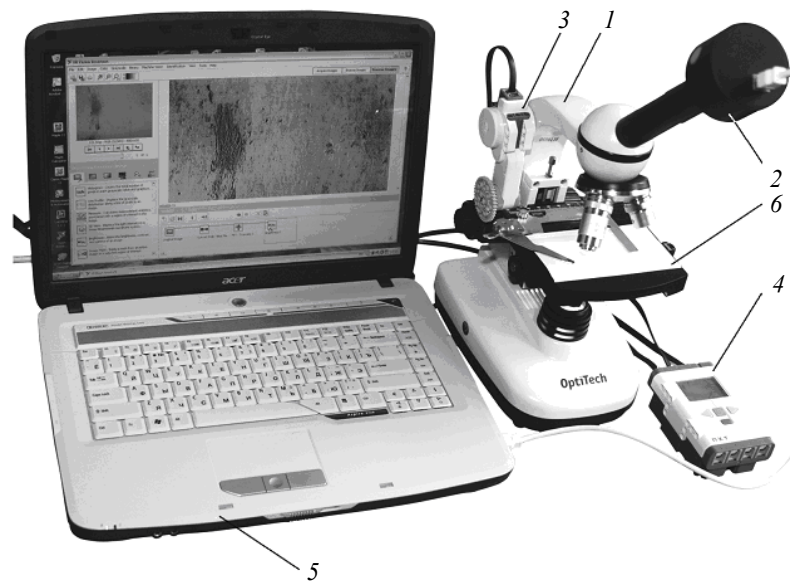


Рис. 2

Для механического привода столика микроскопа по вертикали в данном макете системы контроля использован электропривод 3 со встроенным редуктором от конструктора “LEGO MINDTORMS”. Электропривод с зубчатым колесом (диаметром  $D = 41,5$  мм и числом зубьев  $n = 40$ ) закреплен с левой части станины микроскопа. На левой рукоятке микроскопа, осуществляющей вертикальный подъем предметного столика, закреплен венец зубчатого колеса (с вырезанной центральной частью), наружный диаметр зубчатого венца  $D = 37$  мм,  $n = 36$ . Один шаг двигателя ( $1^\circ$ ) обеспечивает перемещение предметного столика на  $\Delta h = \beta/360$ , где  $\beta = 40/36$  — коэффициент редукции. Аналогичным образом может быть реализовано автоматическое горизонтальное перемещение предметного столика по двум другим координатам. Возможности микроконтроллера позволяют использовать контактные датчики для фиксации перемещения предметного столика в верхнем и нижнем положении, а световой датчик — для контроля освещенности. Управление микроконтроллером может осуществляться как по кабелю (USB), так и по беспроводному каналу связи (Bluetooth).

Для автоматизации контроля был разработан комплексный виртуальный прибор, на лицевой панели которого отображены элементы изображений и элементы управления микроскопом (группы „калибровка“, „толщина“ и „контроль“). ВП первоначально отображает полученные оптические изображения контролируемого изделия, а после обработки — окончательное изображение. На основе выбора критерия дефектности сварного шва (пузыри, расслоения, непровар) задается алгоритм анализа фрагмента изображения. В состав ВП входит ряд виртуальных приборов нижнего уровня, обеспечивающих управление микроконтроллером и обработку изображения [5, 6]:


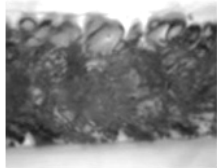



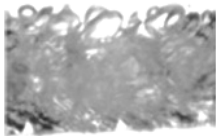

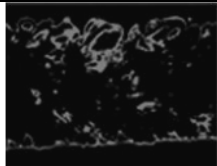


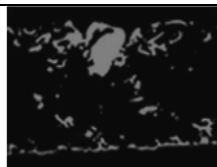
- ВП<sub>1</sub> — приведение столика в крайнее нижнее положение;
- ВП<sub>2</sub> — приведение столика в крайнее верхнее положение;
- ВП<sub>3</sub> — определение толщины слоя образца;
- ВП<sub>4</sub> — фокусировка на верхнюю поверхность образца;
- ВП<sub>5</sub> — получение серии фотоснимков с пошаговым изменением плоскости фокусировки;
- ВП<sub>6</sub> — обработка изображений;
- ВП<sub>7</sub> — измерение параметров дефектности слоя материалов.

Виртуальные приборы ВП<sub>6</sub> (анализ) и ВП<sub>7</sub> (измерение) осуществляют контроль исследуемого образца по полученной серии изображений  $\{Im_k\}_{k=1}^M$  при различном положении плоскости оптической фокусировки микроскопа: изображение  $Im_1$  получено с верхней поверхности образца, изображение  $Im_M$  — с нижней поверхности, а изображение  $Im_k, 1 < k < M$ , получено при плоскости фокусировки внутри слоя образца. Шаг перемещения плоскости фокусировки определяется толщиной  $H$  слоя образца и дискретностью шага:  $h = H / (M - 1)$ . Таким образом, координата плоскости фокусировки от верхней поверхности образца равна  $z = (i - 1)h$ . Для различных образцов использовались различные ВП обработки и анализа полученных изображений.

Для выявления параметров дефектности сварных швов необходимы различные алгоритмы обработки. Поэтому на стадии исследования создавался скрипт (последовательность действий) алгоритма обработки в программе “Vision Assistant”, версия 8.2.1 [6, 7]. Так, например, основой алгоритма обработки сварного шва, имеющего некоторое количество пузырей, является обработка нескольких изображений, полученных путем последовательного изменения плоскости фокусировки.


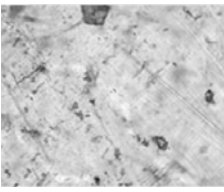


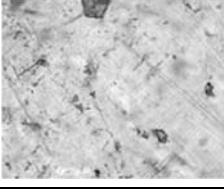

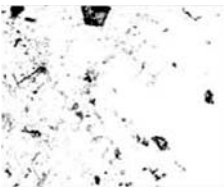






Технология построения алгоритма обработки изображения (в программе “Vision Assistant”) и результат ее применения для определения дефектности сварных швов при наличии пузырей представлены в табл. 1.

Таблица 1






№ п/п	Иконка функции	Функция	Параметры настройки функции	Результат (изображение сварного шва)
1		Получение изображения ( <i>Get Image 1</i> )	—	
2		Запись изображения в буфер ( <i>Add Buffer</i> )	Операция: запоминание в буфере	То же
3		Получение следующего изображения ( <i>Get Image 2</i> )	—	Промежуточное изображение
4		Арифметические и логические операции с изображениями	Сложение полученного изображения с изображением, записанным в буфере	
5		Пороговая обработка — преобразование цветного изображения в битовое ( <i>Color Threshold</i> )	Ручная настройка минимальных и максимальных значений компаратора для RGB-канала	
6		Фильтрация с использованием быстрого преобразования Фурье — отсечение низких частот ( <i>FFT Filter ⇒ Truncate</i> )	Режим — прохождение низких частот	Промежуточное изображение
7		Дополнительные морфологические функции ( <i>Advanced Morphology</i> )	Заполнение замкнутых полос в изображении	

При исследовании другого образца — двух частей прозрачного полотна — для определения дефектности сварного шва с непроваром использовалось изображение, полученное положением плоскости фокусировки в середину слоя шва. Основной проблемой является получение такого изображения в процессе автоматического сканирования плоскости фокусировки. Если свариваемые пленки имеют равную толщину (как в исследуемом образце), то эта плоскость находится посередине между верхней и нижней поверхностью изделия. Критерием фокусировки на поверхность сварного шва служит появление высокочастотных составляющих сигнала в непрерывной серии получаемых изображений. Алгоритм обработки изображения для сварных швов с непроваром реализуется функциями [6,7], представленными в табл. 2.

Таблица 2

№ п/п	Иконка функции	Функция	Параметры настройки функции	Результат (изображение сварного шва)
1		Получение исходного изображения, извлечение цветовой составляющей (RGB, HSV или HSL) ( <i>Color Plane Extraction</i> )	Составляющая "green"	
2		Фильтрация — медианное сглаживание ( <i>Filters</i> $\Rightarrow$ <i>Smoothing</i> — <i>Median</i> )	Настройка зависит от полученного изображения	Промежуточное изображение
3		Фильтрация — „свертывание с ядром“ в целях детализации изображения в ярких зонах ( <i>Filters</i> $\Rightarrow$ <i>Convolution</i> — <i>Highlight Details</i> )	Размер матрицы ядра — 3×3: $\begin{pmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 10 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{pmatrix}$	
4		Пороговая обработка — преобразование изображения градаций серого в битовое; ручная настройка ( <i>Threshold</i> )	Выбор порогового диапазона зависит от полученного изображения	
5		Дополнительные морфологические функции — удаление (1) малых фрагментов структуры изображения ( <i>Advanced Morphology</i> $\Rightarrow$ <i>Remove Small Objects 1</i> )	Число итераций — 6	Промежуточное изображение
6		Дополнительные морфологические функции — разделение фрагментов ( <i>Advanced Morphology</i> $\Rightarrow$ <i>Separate Objects</i> )	Размер матрицы — 3×3, число итераций — 1	Промежуточное изображение
7		Фильтрация с использованием быстрого преобразования Фурье — отсечение низких частот ( <i>FFT Filter</i> $\Rightarrow$ <i>Truncate</i> )	Режим — прохождение низких частот	
8		Инверсия бинарного изображения ( <i>Binary Image Inversion</i> )	—	

Продолжение табл. 2

№ п/п	Иконка функции	Функция	Параметры настройки функции	Результат (изображение сварного шва)
9		Дополнительные морфологические функции — удаление (2) малых фрагментов структуры изображения ( <i>Advanced Morphology =&gt; Remove Small Objects 2</i> )	Число итераций — 12	
10		Анализ частиц изображения ( <i>Particle Analysis</i> )	Определение параметров частиц	 Число элементов — 6
11		Нахождение в частицах изображения вписанных окружностей ( <i>Circle Detection</i> )	Диапазон радиусов: $R_{\min} = 3 \text{ пкс} \div R_{\max} = 200 \text{ пкс}$	 Число найденных окружностей — 8

Некоторые функции представленного в табл. 2 алгоритма обработки (например, разделение фрагментов) являются избыточными для отдельных типов образцов, т.е. мало влияют на конечный результат обработки изображения. Однако введение таких избыточных функций позволяет сделать алгоритм более универсальным и использовать его для широкого круга изделий. В итоге это позволяет сократить количество типов изделий и критериев контроля и, как следствие, количество виртуальных приборов обработки изображений.

Использование алгоритма, приведенного в табл. 2, для обработки изображения сварного шва с пузырями не дает удовлетворительного результата (выявляются центры крупных пузырей, появляются темные кластеры). И наоборот, применение алгоритма обработки „пузырных“ швов не совсем эффективно для контроля расслоений. Поэтому для каждого типа изделий оценка качества должна производиться по собственному алгоритму.

Алгоритмы, аналогичные рассмотренным, были разработаны и для других типов образцов, что позволило адекватно определять и численно оценивать дефектность сварных швов. Практическим критерием дефектности является прочность шва. В основе всех алгоритмов лежат функции пороговой обработки цветного изображения, а также функции фильтрации и измерения параметров бинарного изображения. Функция пороговой обработки при различном положении плоскости фокусировки дает достаточно хорошее представление о бездефектности сварного шва. При фокусировке в середину слоя сварного шва, после пороговой обработки изображения, можно достаточно точно оценить его качество.

Анализ различных сварных швов показал возможность быстрого и надежного определения дефектности контролируемого шва по целому ряду параметров изображения. Система контроля обучаемая и позволяет на основе визуального сравнения дефектов в изображении шва изделия и результатов обработки контролировать работу алгоритма. В дальнейшем планируется создание автоматизированного технологического процесса ультразвуковой обработки изделий со встроенной контрольно-измерительной системой (АСУ) на базе единой технологической платформы фирмы “National Instruments” (с использованием пакета “Control Design Toolkit”).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волков С. С., Орлов Я. Н., Черняк Б. Я. Сварка пластмасс ультразвуком. М.: Энергия, 1974.
2. Гурвич А. К., Ермолов И. Н. Ультразвуковой контроль сварных швов. Киев: Техника, 1972.
3. Скворцов Г. Е., Панов В. А., Поляков Н. И., Федин Л. А. Микроскопы. Л.: Мишиностроение, 1969.
4. Махов В. Е., Палаев А. Г., Потапов А. И. Автоматизация контроля сварных швов на базе технологий фирмы “National Instruments”. Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии “National Instruments” // Сб. тр. VI Междунар. науч.-практ. конф. М.: РУДН, 2007. С. 384—393.
5. Getting Started with the LabVIEW Toolkit for LEGO® MINDSTORMS® NXT [Электронный ресурс]: <www://ni.com>.
6. NI Vision Assistant Tutorial USA: National Instruments Corporation, 2005.
7. Визальтер Ю. В., Желтов С. Ю., Князь В. А. и др. Обработка и анализ цифровых изображений с примерами на LabVIEW IMAQ Vision. М.: ДМК Пресс, 2007.

*Сведения об авторах*

- Владимир Евгеньевич Махов** — канд. техн. наук, доцент; Северо-Западный государственный заочный технический университет, кафедра приборов контроля и систем экологической безопасности, Санкт-Петербург; E-mail: mahov@nwpi.ru
- Александр Григорьевич Палаев** — Северо-Западный государственный заочный технический университет, Санкт-Петербург; директор научно-исследовательского центра; E-mail: alexpalaev@yandex.ru
- Анатолий Иванович Потапов** — д-р техн. наук, профессор; Северо-Западный государственный заочный технический университет, кафедра приборов контроля и систем экологической безопасности, Санкт-Петербург; E-mail: potapov@nwpi.ru

Рекомендована кафедрой  
приборов контроля  
и систем экологической безопасности

Поступила в редакцию  
03.12.07 г.