

В. П. БЕССМЕЛЬЦЕВ, Е. Д. БУЛУШЕВ, Н. В. ГОЛОШЕВСКИЙ

## ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМА ЛАЗЕРНОЙ МИКРООБРАБОТКИ

Предложена экспертная система принятия решений для оптимизации режимов лазерной микрообработки. Результаты обработки оцениваются с помощью электронных датчиков.

*Ключевые слова:* лазерная микрообработка, система поддержки принятия решений, экспертные системы, составные сканаторы, оптические сканеры, системы технического зрения.

Большинство лазерных технологий микрообработки — резка, сверление, сварка, фрезерование — опираются на методы локального воздействия мощного излучения на обрабатываемый материал. Возникающие при этом термические, термохимические, гидродинамические процессы нестационарны и плохо поддаются математическому моделированию. Кроме того, в процессе лазерной микрообработки в материалах происходят фазовые превращения, изменяются их структура и кристаллическая решетка, возникают внутренние напряжения и т.д. В области лазерного воздействия формируются участки, содержащие продукты взаимодействия материала и окружающей среды, с характеристиками, отличающимися от характеристик основного объема вещества [1]. Также на процесс физико-химического взаимодействия излучения с веществом влияют параметры сканирующей системы (точность, быстродействие). Например, недостаточная скорость перемещения лазерного луча может приводить к нежелательному обгоранию поверхности либо ее деформации вследствие локального перегрева. Сложность

настройки лазерной системы под конкретную технологическую задачу обусловлена многообразием обрабатываемых материалов, различными требованиями к характеру обработки и ее результатам, а также регулируемые параметрами лазерных систем.

Известные программно-аппаратные решения, позволяющие автоматизировать процесс настройки оборудования, можно условно разделить на три типа.

1. Экспертные системы, или системы поддержки принятия решения (СППР), упрощающие настройку режима обработки до начала эксперимента [2].

2. Системы управления, позволяющие корректировать режим лазерной обработки, основываясь на оценке оператором результатов предыдущих экспериментов по определенной совокупности параметров [3].

3. Системы контроля, анализирующие взаимодействие лазерного луча с материалом в режиме реального времени и автоматически корректирующие режим лазерной обработки [4, 5].

Однако ни одно из перечисленных решений в настоящее время не позволяет точно определить параметры лазерной обработки исходя из компьютерных моделей и учета свойств материала.

Объединив возможности систем первого и второго типа, можно обеспечить автоматическую работу созданной системы. В полученной системе поступление информации о качестве лазерной обработки и ее анализ происходят автоматически, с использованием высокоразрешающей системы технического зрения, профилометра и спектрофотометра. Программные средства обеспечивают оперативное пополнение базы данных СППР и оптимизацию режима лазерной обработки на основе накопленной информации. В настоящей работе основное внимание уделяется использованию системы технического зрения при оценке качества обработки и формировании базы СППР.

**Аппаратная реализация.** В Институте автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук создано устройство лазерной микрообработки на основе принципа составного (комплементарного) сканирования, функционально аналогичное устройству, рассмотренному в [2]. В устройство встроены аппаратные средства контроля, обеспечивающие регистрацию изображения зоны обработки (система технического зрения), профиля полученного объекта (микропрофилометр) и спектра излучения при локальной термообработке (спектрофотометр). Структура устройства представлена на рис. 1.

В качестве источника излучения в системе используется YAG-лазер с длиной волны излучения 1064 нм. Сканирующая головка содержит сканеры СТ 6420 и объектив плоского поля с областью записи 20×20 мм при размере сфокусированного пятна 10 мкм и точности позиционирования лазерного пучка ±3 мкм. Обработка по всему полю 300×300 мм обеспечивается перемещением сканирующей головки с помощью сервоприводов портального механизма, положение которого контролируется оптическими линейками с разрешением 0,5 мкм. Для фокусировки лазерного пучка используется объектный стол.

Система технического зрения позволяет получать двумерное изображение обработанной поверхности материала. Ее аппаратная часть состоит из видеокамеры VEI-545 USB производства ООО „ЭВС“ с телецентрическим 1,7-кратным объективом, что при разрешении фотоматрицы 5 Мпкс дает разрешение в плоскости изображения менее 1 мкм; геометрические искажения изображения, связанные с дисторсией объектива видеокамеры, также не превышают ±1 мкм. Система технического зрения калибруется для взаимной привязки систем координат видеокамеры и оптико-механического модуля лазерной микрообработки. Поле зрения видеокамеры (≈ 2×2 мм) обычно значительно меньше зоны лазерной обработки (100×100 мм и более), поэтому полное изображение синтезируется покадрово. В программной части системы технического зрения реализован алгоритм сшивки кадров, который позволяет получить

изображение структуры, сформированной в процессе микрообработки, с погрешностью не более  $\pm 2$  мкм (в поле 50 мм).

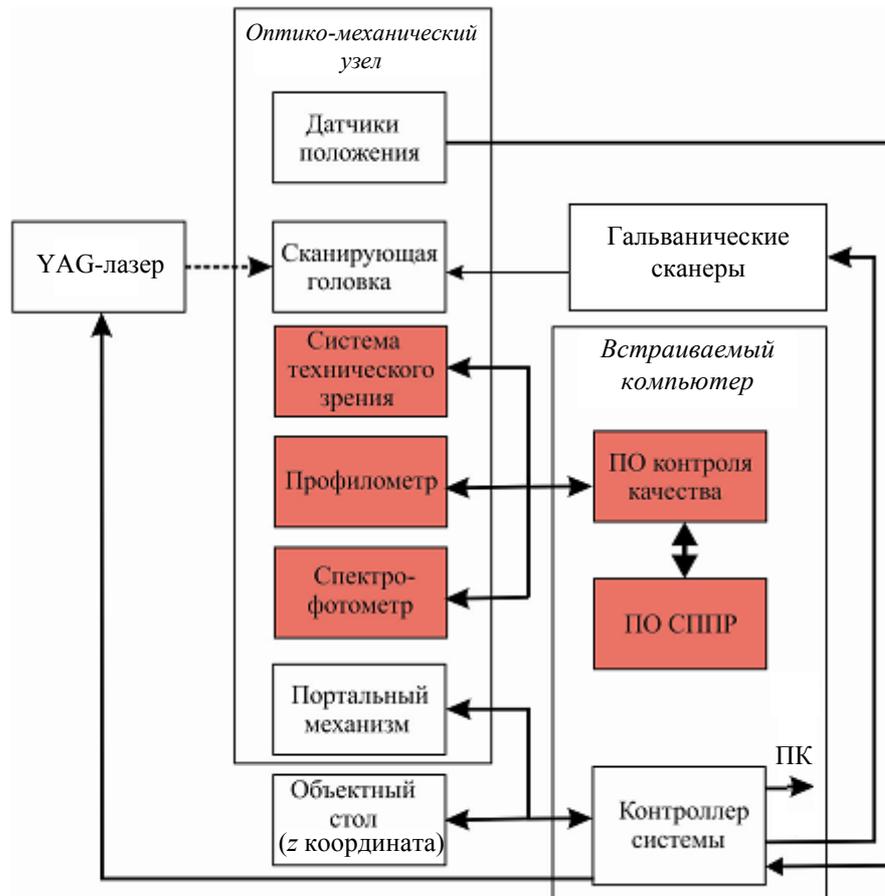


Рис. 1

**Программная реализация.** Программные компоненты системы позволяют решать следующие задачи.

1) Обнаружение и измерение геометрических параметров структуры. Геометрия сформированной структуры может значительно отличаться от требуемой вследствие неполного учета физико-химических процессов, связанных с технологией лазерной обработки, а также вследствие аппаратно-программных ошибок управления лазерным лучом. Для автоматического определения отклонения координат элементов лазерной обработки от заданных предварительно вычисляются геометрические параметры структуры (размеры, форма, расположение), а также выявляются различные геометрические искажения ее составных элементов: разрывы, изгибы, изменения линейных размеров.

2) Оценка качества лазерной микрообработки для определения соответствия качества лазерной обработки требованиям задачи.

3) Сохранение настроек и результатов эксперимента в базу данных экспертной системы.

Используя программное совмещение исходной модели и результатов микрообработки, можно определять зону поиска структуры на изображении. Пользовательский интерфейс позволяет визуально представить результаты совмещения. На рис. 2 приведены: заданный фрагмент области микрообработки (а), структура, полученная с помощью лазерной обработки (б), совмещение изображений (в).

Траектория лазерного луча при формировании структуры на материале определяется в модели. На данном этапе работы реализован алгоритм поиска структур на изображении для

случая незначительного перекрытия контуров (при использовании алгоритма задача обнаружения структур сводится к задаче локализации составляющих контуров).

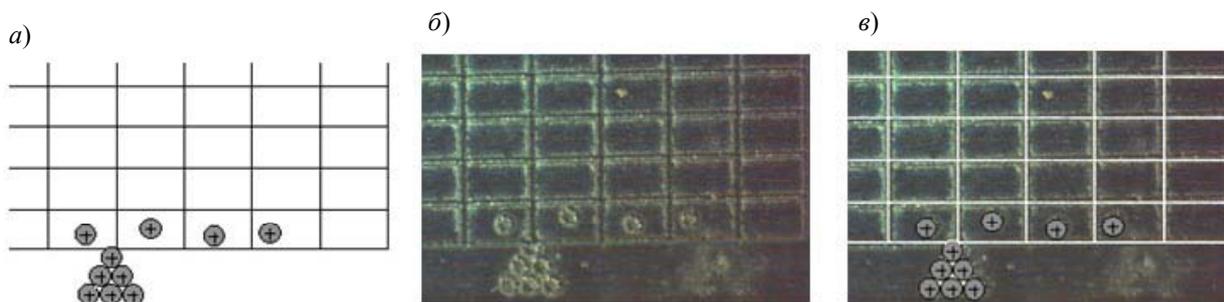


Рис. 2

Использование бестеневого кольцевого освещения в большинстве случаев обуславливает две характеристики: однородность освещения фона и контрастность границ контуров изображения. Первая характеристика определяет возможность сегментирования структуры и фона на изображении по яркости с помощью единого порогового значения для всего изображения. Вторая характеристика позволяет использовать алгоритмы выделения границ для поиска структур. Для уменьшения влияния случайных факторов используется высокочастотная фильтрация. На первом шаге алгоритма изображение пропускается через медианный фильтр (матрица  $10 \times 10$  пикселей). На следующем шаге производится бинаризация изображения; определение порога можно автоматизировать, используя алгоритм Оцу [6]. В дальнейшем для черно-белого изображения производится последовательный поиск контуров (поиск границ, построение скелета и его фильтрация). На рис. 3 приведена обнаруженная структура, состоящая из нескольких контуров.

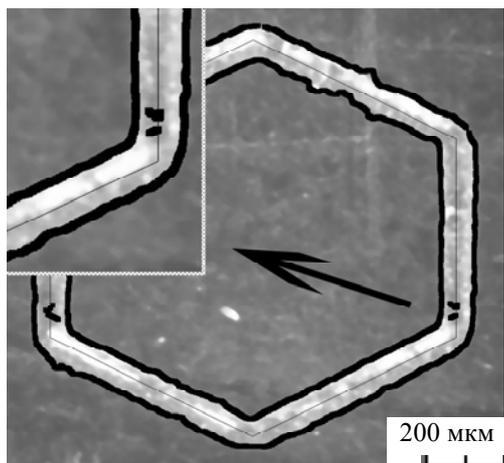


Рис. 3

Автоматически измеряются размеры, положение на плоскости и форма найденных структур. Алгоритмическая точность определения названных величин может быть оценена в 10 точек (размер матрицы медианного фильтра). Далее путем сравнения измеренных параметров с требуемыми значениями оценивается качество лазерной обработки по критериям, сформированным на основе стандартной системы допусков. Вычисляются следующие параметры: ошибки положения, длины, ширины, отклонение границ от прямолинейности, расширение контура. Кроме того, для задач, в которых важна скорость обработки, вычисляется быстродействие. Параметры качества автоматически сохраняются в базу данных экспертной системы и могут быть использованы для оптимизации режима лазерной обработки.

На настоящем этапе работы создано программно-аппаратное решение, позволяющее автоматически оценивать качество лазерной микрообработки путем анализа изображений обработанной поверхности материала. В ходе работы реализован алгоритм поиска структур на изображении с незначительным перекрытием контуров. Алгоритм позволяет находить и оценивать различные геометрические искажения структуры: изменение линейных размеров, разрывы и изгибы контуров. Также реализован программный компонент для сохранения результатов экспериментов в базу данных СППР. Показано, что система технического зрения высокого разрешения позволяет упростить и автоматизировать процесс получения данных для СППР в задачах лазерной микрообработки.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tünnermann A., Nolte S.* Femtosecond vs. Picosecond Laser Material Processing Challenges in Ultrafast Precision Laser Micromachining of Metals at High Repetition Rates // *LITJ*. 2010. P. 34—38.
2. *Майоров В. С., Майоров С. В., Стернин М. Ю.* Компьютерные системы поддержки принятия решений для лазерных технологических процессов обработки материалов // *Лазерные технологии обработки материалов*. 2009. С. 494—506.
3. Patent 6345205 USA. Support system for laser beam machine, and laser beam machine including the same / *Inamasu, Toru, Aoki, Takayuki*. 1998.
4. *Chen H. B., Brookfield D. J., Williams K., and Steen W. M.* Laser Process Monitoring with Dual Wavelength Optical Sensors // *Proc. ICALEO '91*. 1991. Vol. 74. P. 113—122.
5. Patent 5659479 USA. Method and apparatus for real-time control of laser processing of materials / *Duley, Walter, Kinsman, Grant*. 1996.
6. *Otsu N.* A threshold selection method from gray-level histograms // *IEEE Trans. Syst., Man, and Cybern.* 1979. Vol. SMC-9. P. 62—66.

**Сведения об авторах****Евгений Дмитриевич Булушев**

— Институт автоматизации и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, кафедра автоматизации физико-технических исследований, Новосибирск; инженер-программист; E-mail: e.d.bulushev@gmail.com

**Виктор Павлович Бессмельцев**

— канд. техн. наук; Институт автоматизации и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, кафедра автоматизации физико-технических исследований, Новосибирск; заведующий лабораторией; E-mail: bessmelt@iae.nsk.su

**Николай Владимирович Голошевский**

— Институт автоматизации и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, кафедра автоматизации физико-технических исследований, Новосибирск; младший научный сотрудник; E-mail: nickolayg@iae.nsk.su

Рекомендована  
программным комитетом Конференции

Поступила в редакцию  
08.09.10 г.