

10.12.15 № 72-388  
На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_



«УТВЕРЖДАЮ»  
Врио директора ИСОИ РАН,  
д.ф.-м.н., профессор

Казанский Н.Л.

**О Т З Ы В**  
ведущей организации

на диссертацию Булушева Евгения Дмитриевича

«Разработка алгоритмов и программных средств

для определения оптимальных параметров лазерной микрообработки по данным систем технического зрения и оптических профилометров», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

Диссертационная работа Булушева Е.Д. посвящена разработке и реализации методов автоматизации определения технологических режимов лазерной микрообработки для получения изделий с высоким качеством при высокой производительности обработки. **Актуальность** работы обусловлена недостаточной разработанностью методик определения диапазона параметров лазерной микрообработки (энергии импульсов, частоты импульсов, скорости обработки) для получения изделий с высокими показателями качества, с хорошим соответствием размеров заданным в CAD-модели при высокой производительности обработки. Несмотря на большое количество работ по исследованию процессов, протекающих при взаимодействии лазерного излучения с веществом, методы математического моделирования имеют ограничения и не всегда эффекты для решения данной задачи. В настоящее

время в основном применяется экспериментальный подход, основанный на построение статистических зависимостей по данным тестовой серии экспериментов. Однако данный подход является трудоёмким, требует активного участия оператора по измерению образцов и анализу данных. Соответственно актуальным является разработка комплексного подхода к решению данной задачи, включающего высокоточные и помехоустойчивые средства и алгоритмы для измерения объектов, формируемых в процессе лазерной микрообработки, сопоставления с САД-моделью, определения показателей качества изделий и оптимизации режимов лазерной микрообработки на основе полученных данных.

Автором разработан комплекс программ и алгоритмы для автоматизации контроля качества векторной 2D и 2,5D и растровой 3D лазерной микрообработки, включающие алгоритмы сопоставления с САД-моделью и определения показателей качества изделий (отклонения по размерам, шероховатости дна, наличию сколов). В диссертации важное место занимает исследовательская работа по обоснованию направления исследования, анализу методов определения наилучших режимов лазерной микрообработки и установлению наиболее подходящих методов измерения профиля объектов, формируемых в процессе лазерной микрообработки. Разработаны методы математического моделирования для получения изображений и профилограмм поверхности, обработанной лазерным излучением, позволившие провести тщательное тестирование всех разработанных средств. Дополнительно тестирование проведено на большом количестве реальных объектов, сформированных на различных материалах (металлах, стекле и др.). На примере высокоскоростной фемтосекундной лазерной микрообработки стекла продемонстрирована возможность автоматического определения наилучших параметров лазерной микрообработки и построения модели процесса по полученным данным.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. *Во введении* даётся обоснование актуальности и направления

проведения исследования, кратко описаны проблемы, возникающие, при использовании экспериментального подхода для определения наилучших режимов лазерной микрообработки и контроле качества формируемых изделий, сформулирована цель и задачи работы.

*В первой главе* проведён развернутый анализ возможности применения методов математического моделирования на основе тепловой модели для получения зависимостей размеров формируемых изделий от технологических режимов микрообработки. На основе анализа литературных источников указаны недостатки и ограничения данного подхода. Рассмотрена проблема измерения объектов, формируемых в процессе лазерной микрообработки и контроля качества 2D, 2.5D, 3D лазерной микрообработки. Показано, что при измерении оптическими методами с субмикронным разрешением изображения и профилограммы характеризуются большими объёмами, данные зашумлены, имеются различные искажения и отклонения от модели обработки. Указано, что приведенные особенности затрудняют использование методов контроля качества, применяемых в схожих областях производства, для определения размеров и показателей качества изделий по изображениям и профилограммам поверхности. Подробно рассмотрен экспериментальный подход определения наилучших режимов лазерной микрообработки, указаны проблемы, возникающие при его применении на практике.

*Вторая глава* посвящена разработке метода контроля качества векторной лазерной микрообработки. Разработан метод математического моделирования для получения изображений структур при различных уровнях шума, форме границ объектов и изменении яркости на границе объект-фон, с его использованием проведено тестирование алгоритма и установлены ограничения при его использовании. Также приведены результаты по тестированию метода на экспериментальных данных.

*В третьей главе* рассматривается задача контроля качества растровой лазерной микрообработки. Разработан алгоритм для быстрого сопоставления

карт высот обработанной поверхности и САД-модели с помощью алгоритма *Ciratefi* и пирамиды изображений. Предложен метод математического моделирования, позволивший провести тестирование алгоритма на большом количестве искусственных изображений. Метод позволяет получить карты высот поверхности, обработанной лазерным излучением, с учётом его дефокусировки, распределения интенсивности в виде функции Гаусса, образования неоднородностей, шумов и других искажений, вносимых при измерении объектов оптическими методами. Также приведены результаты применения алгоритма, показано, что точности совмещения соответствуют результатам применения алгоритма полного перебора и алгоритма *Ciratefi*, однако быстродействие на порядок выше.

*В четвёртой* главе рассмотрена реализация предложенных алгоритмов в виде комплекса программ «MarkInspector» и «Profilometer», показано их применение для контроля качества фемтосекундной лазерной микрообработки стекла на примере задачи создания микроканалов, прецизионных сеток и биочипов. Показана возможность определения наилучших параметров обработки и построения регрессионной модели зависимости глубины от энергии, перекрытия импульсов и количества слоёв по результатам автоматического анализа данных измерений тестовых объектов, полученных с помощью оптического профилометра, посредством применения разработанных алгоритмов.

*В заключении* сформулированы основные результаты работы.

Все предложенные методы программно реализованы, разработаны математические модели для получения искусственных изображений и профилограмм поверхности, проведены вычислительные и реальные эксперименты, на данных которых показана высокая эффективность разработанных методов. Е.Д. Булушеву удалось показать эффективность применения комплексного подхода к решению задачи определения наилучшего режима лазерной микрообработки, включающего как этапы автоматизации

измерений, анализа данных и сопоставления с САД-моделью, так и этап построения моделей на основе данных измерений. По теме диссертации имеется 4 публикации в изданиях из перечня ВАК РФ, достаточно полно отражающих основные её результаты.

В то же время диссертация имеет некоторые недостатки:

1. Заявленная задача оптимизации поставлена и решена не вполне строго. В частности, из утверждений вида *«...для сетки выполняются заданные технологические требования, соответственно режим лазерной обработки – оптимален...»*, *«режим обработки в данном случае не являлся оптимальным, т.к. сколы на границах объекта имеют большие размеры, чем ограничено допусками»* и т.п. становится понятно, что под «оптимальным режимом» автор понимает не режим, обеспечивающий экстремум некоторого показателя качества, а режим, удовлетворяющий заданному набору ограничений.

2. Для некоторых утверждений результаты подтверждающих экспериментов не приводятся. Примеры утверждений: *«Экспериментально установлено, что для характерных изображений зоны лазерной микрообработки ... наиболее подходящим критерием является максимальный градиент яркости в поперечном направлении ...»*, *«В ходе исследования установлено, что в настоящей задаче нормализованная взаимная корреляционная функция является наиболее подходящим критерием...»*.

3. Некоторые термины используются недостаточно корректно. Например, в работе упоминается «согласованный фильтр с гауссовой маской», но при этом автор явно опирается не на общепринятое понятие согласованного фильтра, для которого кроме шаблона искомого объекта необходимо еще задать спектр мощности фона.

4. Выбор тривиального одномерного детектора границ с пятиэлементной маской для обнаружения границ обработанных областей недостаточно обоснован, так как численные результаты сравнения с конкурентными решениями не приводятся.

5. Большинство результатов экспериментов оформлено в виде таблиц, а не в виде графиков, что затрудняет анализ представленных зависимостей. Кроме того, многие численные результаты больше похожи на примеры использования, а не на результаты исследования, т.к. проведены при достаточно ограниченном наборе параметров.

6. В работе присутствуют многочисленные мелкие неточности, например в формуле (3.1) суперпозиция функций в правой части записана в неправильной последовательности, аналогичная неточность допущена в формуле (3.2); в работе упоминается шум, который *«не зависит от пространственных координат»*, но такой «шум» был бы константой (скорее всего, имеется ввиду стационарный шум) и т.п.

Следует отметить, что приведенные замечания не снижают ценности и весомости полученных диссертантом результатов и не влияет на общую положительную оценку диссертационной работы. Диссертация Булушева Е.Д. представляет законченную научно-исследовательскую работу, посвящённую актуальной теме, выполненную на высоком научном уровне и представляющую несомненную теоретическую и практическую ценность.

**Научная новизна** работы состоит в том, что разработаны новые быстрые алгоритмы обработки изображений и профилограмм микро-модифицированной лазерным излучением поверхности. С их использованием впервые показана возможность автоматического определения наилучших режимов лазерной микрообработки с помощью экспериментального подхода.

**Практическая ценность работы** заключается в том, что разработанные методы реализованы в виде программного комплекса, и могут быть использованы при отработке технологий и в серийном производства изделий с помощью технологий лазерной микрообработки. В настоящее время они уже используются при формировании прецизионных сеток для нужд оптико-механического производства на АО «Швабе-Оборона и Защита» - г. Новосибирск.

**Рекомендации по использованию** результатов диссертации. Полученные результаты могут быть использованы на предприятиях Холдинга Швабе, в МГТУ им. Н.Э. Баумана, ИФП СО РАН, КТИ НП СО РАН, ИТМО, ИЛФ СО РАН, а также в других учреждениях и организациях.

В связи с вышеизложенным считаем, что диссертация Булушева Е.Д. «Разработка алгоритмов и программных средств для определения оптимальных параметров лазерной микрообработки по данным систем технического зрения и оптических профилометров», представленная на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», соответствует требованиям ВАК, а её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук.

Отзыв утвержден на научно-техническом семинаре лаборатории «Математических методов обработки изображений» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт систем обработки изображений Российской академии наук, протокол № 6 от 27 ноября 2015 г.

Руководитель семинара –  
заведующий лабораторией,  
д.т.н., профессор



В.В.Сергеев

Старший научный сотрудник, к.т.н.



М.В.Гашников

Ученый секретарь НТС –  
старший научный сотрудник, к.т.н.



М.А.Чичева