

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Булушева Евгения Дмитриевича «Разработка алгоритмов и программных средств для определения оптимальных параметров лазерной микрообработки по данным систем технического зрения и оптических профилометров», представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

Диссертация Е.Д. Булушева посвящена разработке комплекса программно-алгоритмических средств для автоматизации измерений и контроля качества объектов, формируемых в процессе лазерной микрообработки. Измерения производятся системой оптической микроскопии и профилометрии. Автором разработаны быстродействующие алгоритмы анализа изображений зоны лазерной обработки и контроля качества обрабатываемых изделий, обеспечивающие точность, необходимую для построения математических моделей зависимости показателей качества изделий от параметров лазерной микрообработки. Полученные модели обеспечивают возможность выбора оптимальных режимов лазерной микрообработки.

**Актуальность** работы не вызывает сомнений. С появлением на рынке высокоточных, быстродействующих измерительных систем появилась возможность проверки выполнения технологических требований путем поэлементного сравнения результатов микро- формообразования с САД- моделью. Однако анализ данных измерений является трудоёмким процессом. Поэтому необходима его автоматизация, чему и посвящена большая часть работы. Применение разработанных автором решений является важным шагом на пути автоматизации сложного технологического процесса высокоточной лазерной микрообработки.

**Практическая и научная значимость** диссертационной работы заключается в применении автором комплексного подхода к задаче определения режимов лазерной микрообработки, обеспечивающих создание объектов с минимальными дефектами при высокой производительности. Разработанный в диссертационной работе комплекс программно-алгоритмических средств для контроля качества изделий, обработанных лазерным излучением, позволяет определить эти режимы.

**Во введении** обоснована актуальность темы исследований, сформулирована цель и задачи работы, приведены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** представлен обзор применения методов математического моделирования для оценки зависимости геометрических размеров формируемых объектов от режимов лазерной микрообработки. Показаны ограничения и недостатки применения математического моделирования, а именно сложность оценки изменения физико-химических свойств вещества в процессе обработки и учёта нестационарности протекающих процессов. Рассмотрен статистический подход для анализа экспериментальных методов определения параметров лазерной микрообработки. Оценена его трудоёмкость при измерении и анализе большой серии тестовых объектов. Дано обоснование необходимости разработки специальных методов анализа данных измерений, получаемых с помощью систем технического зрения и оптических профилометров.

**Во второй главе** рассмотрены возможности применения алгоритмов выделения контуров изображений для определения границ и размеров структурных элементов объектов, формируемых в процессе векторной лазерной микрообработки. Автором предложен новый алгоритм, основанный на последовательном выделении границ структурных элементов путем совмещения с CAD-моделью обработки и обнаружения

яркостных перепадов. Тестирование алгоритма проведено на экспериментальных данных. Также предложен метод компьютерного моделирования изображений структурных элементов. Для изображений, полученных в результате моделирования, также проведен анализ погрешностей работы алгоритма определения границ и размеров структурных элементов.

**Третья глава** посвящена исследованию проблемы измерения объектов и контролю качества 3D лазерной микрообработки. Для совмещения обработанной лазерным излучением поверхности с CAD-моделью предложен алгоритм, основанный на алгоритме Ciratefi, быстродействие которого улучшено с помощью пирамидального поиска максимума. На экспериментальных и моделируемых данных проведен сравнительный анализ алгоритма полного перебора и алгоритма Ciratefi. Показано значительное улучшение быстродействия модифицированного алгоритма Ciratefi при высокой точности совмещения. Показана устойчивость алгоритма к шумам, отклонению по глубине от CAD-модели и дефектам обработки. Разработаны программные средства для получения показателей качества изделий по результатам совмещения.

**В четвёртой главе** разработанные алгоритмы контроля качества лазерной микрообработки объединены в комплекс программных средств. Приведены результаты применения разработанных алгоритмов совмещения и выделения границ структурных элементов для контроля качества сеток и микроканалов, формируемых фемтосекундным лазерным излучением на стекле. С использованием алгоритмов проведено комплексное исследование процесса высокоскоростной фемтосекундной лазерной микрообработки стекла ВК7, в ходе которого получены математические модели зависимости глубины микроканалов от параметров лазерной микрообработки и определены диапазоны технологических параметров для получения микроканалов с минимальными сколами и шероховатости дна при высокой производительности обработки.

**В заключении** сформулированы основные выводы и результаты работы.

**Достоверность** проведенных исследований подтверждается результатами экспериментальных исследований как на модельных, так и на экспериментальных данных для различных CAD-моделей, материалов и источников лазерного излучения. Также **новизну и достоверность** проведенных исследований подтверждают 19 печатных работ по теме диссертации, из них 4 работы опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК. Ряд результатов был представлен на Всероссийских и Международных научных конференциях.

Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Несомненным плюсом работы является внедрение результатов исследования и их использование при автоматизации производства изделий микро- оптики нового поколения.

Вместе с тем можно отметить следующие недостатки диссертационной работы.

1. Судя по приведенным в диссертационной работе изображениям реальных структурных элементов, предложенная автором модель (раздел 2.2.1), использующая отрезки квазидетерминированных гармонических сигналов, является неадекватной. Следовательно, нельзя считать обоснованными условия формирования изображений реальных структурных элементов, полученные для данной модели.
2. Не убедительным является отказ от алгоритмов на основе преобразования Фурье-Меллина в пользу алгоритма Ciratefi. Известно, что первые алгоритмы обладают высоким быстродействием и успешно применяются при близких размерах эталонного и анализируемого изображений.

3. Некорректным является утверждение автора, что в алгоритме *Ciratefi* ранее не использовались пирамиды изображений. Пирамиды изображений были применены разработчиками алгоритма в 2011 г. с целью повышения его эффективности при значительных масштабных искажениях. Новым результатом Е.Д. Булушева является применение пирамид изображений в алгоритме *Ciratefi* для повышения скорости оценивания параметров сдвига и поворота изображений.
4. В тексте отсутствует внятное описание, обоснование, а также анализ эффективности некоторых предложенных алгоритмов и подходов, а именно:
  - алгоритма выделения границ криволинейных элементов;
  - применения одномерной дифференцирующей маски  $[1,1,0,-1-1]$ , представляющей собой результат свертки стандартной дифференцирующей маски  $[1,0,-1]$  с импульсной характеристикой  $[1,1,1]$  фильтра нижних частот.

Замечания по оформлению.

1. Рисунки и подрисуночные подписи к ним часто расположены на разных страницах (стр.22, 32,49...).
2. Результат свертки сигнала с нечетным ядром называется корреляционной функцией (стр. 54).
3. Не совпадают шрифты, используемые при написании символов в формулах и в тексте.
4. Автор часто использует обратный слеш вместо прямого (стр.13, 16, 22, 66...).

Однако указанные замечания не умаляют значимость полученных результатов и не снижают общую высокую ценность работы. Диссертационная работа Евгения Дмитриевича Булушева «Разработка

алгоритмов и программных средств для определения оптимальных параметров лазерной микрообработки по данным систем технического зрения и оптических профилометров» соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а её автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Доктор технических наук, профессор,  
ведущий научный сотрудник Федерального  
государственного бюджетного  
образовательного учреждение высшего  
образования «Новосибирский  
государственный технический университет»

И. С. Грузман

Подпись И.С. Грузмана заверяю.

Ученый секретарь НГТУ,  
доктор технических наук, профессор



Г.М. Шумский