

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
НАУКИ ИНСТИТУТ АВТОМАТИКИ И ЭЛЕКТРОМЕТРИИ СИБИРСКОГО  
ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

На правах рукописи

**БУЛУШЕВ ЕВГЕНИЙ ДМИТРИЕВИЧ**

**Разработка алгоритмов и программных средств для определения  
оптимальных параметров лазерной микрообработки по данным  
систем технического зрения и оптических профилометров**

Специальность 05.13.18 – «Математическое моделирование,  
численные методы и комплексы программ»

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
кандидат технических наук,  
Бессмельцев Виктор Павлович

**Новосибирск – 2015**

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Список сокращений .....	4
Введение .....	5
Глава 1      Оптимизация режимов лазерной микрообработки.....	11
1.1      Взаимодействие лазерного излучения с веществом.....	11
1.2      Методы лазерной микрообработки поверхности .....	18
1.3      Методы контроля качества микротопографии поверхности.....	22
1.4      Анализ экспериментальных методов определения оптимальных режимов лазерной микрообработки.....	34
1.5      Выводы.....	45
Глава 2      Разработка алгоритма анализа изображений зоны векторной лазерной микрообработки .....	46
2.1      Алгоритм выделения границ структурных элементов.....	53
2.2      Результаты .....	55
2.3      Выводы.....	67
Глава 3      Разработка алгоритма анализа профилограмм поверхности, обработанной лазерным излучением .....	68
3.1      Исследование эффективности оптических методов для измерения микротопографии поверхности .....	68
3.2      Алгоритм совмещения изображений .....	72
3.3      Результаты .....	82
3.4      Выводы.....	94

Глава 4	Создание комплекса программных средств и применение разработанных алгоритмов .....	95
4.1	Программное обеспечение «MarkInspector» и «Profilometer».....	95
4.2	Контроль качества прецизионных сеток .....	97
4.3	Определение оптимальных режимов фемтосекундной лазерной микрообработки стекла .....	105
Заключение	.....	125
Список литературы	.....	128

## Список сокращений

*CAD-модель* – двумерная или трехмерная модель, создаваемая в системе автоматизированного проектирования, содержащая информацию о размерах, форме и относительном расположении объектов

*СТЗ* – система технического зрения

$R_a$  – средняя шероховатость обработанной поверхности

*MRR* – скорость удаления материала ( $\text{мм}^3/\text{сек}$ )

*ПФЭ* – полный факторный эксперимент

*ЭС* – экспертная система

*OFAT* – метод планирования экспериментов, в котором исследование влияния факторов на отклик проводится по отдельности

*ЦКП* – центральное композитное планирование

*ИНС* – искусственные нейронные сети

*SNR* – отношение сигнал-шум

*Алгоритм Ciratefi* – быстрый алгоритм совмещения изображений, предложенный в статье Araujo S.A., Kim H.Y, 2007.

*Стекло BK7* – марка боросиликатного стекла высокого качества, широко используемого в оптической промышленности

$\lambda$  – длина волны лазерного излучения

$\tau$  – длительность импульсов

*NA* – числовая апертура объектива

$\sigma$  – стандартное отклонение

*N* – количество слоёв при лазерном микрофрезеровании

*E* – энергия импульсов

*O* – перекрытие импульсов

## **Введение**

Широкое применение лазерных технологий микрообработки в промышленном производстве обуславливается возможностью проведения прецизионной обработки различных материалов, в том числе сверхтвердых, высокотемпературных и тугоплавких по произвольным трехмерным моделям (CAD-моделям) с высокой скоростью, недостижимой другими методами. В настоящее время существенно возросли требования как к показателям качества обрабатываемого изделия (разрешению, точности размеров, и др.), так и к производительности лазерной микрообработки. При разработке новых и усовершенствовании существующих технологических процессов лазерного формообразования возникает задача определения диапазона параметров (энергии импульсов, частоты импульсов и др.), оптимизирующей соотношение качество/скорость обработки материала [1]. Эта задача может быть решена как на математическом (модельном) уровне, так и на техническом (экспериментальном). Вследствие многообразия и нелинейности физико-химических процессов, протекающих при взаимодействии лазерного излучения с веществом, и недостаточности знаний об изменении свойств материалов в процессе обработки, использование методов математического моделирования для решения данной задачи не всегда эффективно.

Ранее показано [2–5], что для определения оптимальных режимов микросекундной и наносекундной лазерной микрообработки может быть использован экспериментальный подход, состоящий из следующей последовательности этапов: проведение тестовых экспериментов (от двадцати до нескольких сотен) при различных режимах обработки; измерение объектов: определение их размеров и показателей качества; построение математической модели зависимости показателей качества изделия от технологических параметров обработки; определение области оптимальных значений параметров на основе модели. На этапе построения модели используются

регрессионный анализ и искусственные нейронные сети, что позволяет достичь хорошего согласия экспериментальных и расчётных данных (средняя ошибка менее 10%) [6]. Необходимым условием для получения адекватной модели с минимальными ошибками аппроксимации является наличие точных и надежных средств измерения формируемых объектов и сравнения геометрических и физических параметров изделий с требуемыми значениями.

Для измерения размеров объектов, формируемых в процессе лазерной микрообработки, целесообразно использовать оптические методы измерения, т.к. они позволяют получать изображения и профили с разрешением до десятков нанометров за время, сравнимое со временем обработки поверхности лазерным пучком. Однако при измерении возникают ошибки и погрешности, связанные с ограничениями динамического диапазона и чувствительности измерительной системы, при этом данные характеризуются пропущенными значениями, геометрическими искажениями, высоким уровнем шума, а также большими объёмами (более 1 Гбайт). Всё это ужесточает требование к помехоустойчивости и быстродействию программно-аппаратных средств контроля качества изделий и затрудняет использование существующих методов, применяемых в механическом и оптико-электронном производстве, для определения геометрических характеристик объектов. Таким образом, актуальной является задача создания алгоритмов и программного комплекса для получения и исследования математических моделей зависимостей показателей качества изделий, формируемых в процессе лазерной микрообработки, от технологических параметров обработки. Для решения поставленной задачи необходимым является создание методов и средств для анализа изображений и профилей поверхности, обработанной лазерным излучением, получаемых с помощью систем технического зрения и оптических профилометров, и их сопоставления с САД-моделями.

Целью диссертационной работы является создание комплекса программно-алгоритмических средств для автоматизации определения режимов

лазерной микрообработки, при которых выполняются технологические требования, как по производительности, так и по качеству обрабатываемых изделий, что включает разработку алгоритмов и программных средств быстрого и высокоточного контроля качества по данным измерений, получаемым с помощью систем оптической микроскопии и профилометрии. Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие задачи:

1. Исследовать эффективность методов математического моделирования и экспериментальных методов для определения оптимальных режимов лазерной микрообработки;
2. Экспериментально исследовать и установить ограничения оптических методов при измерении профиля поверхности, модифицированной лазерным излучением;
3. Разработать алгоритмические и программные средства для анализа изображений зоны векторной лазерной микрообработки, получаемых с помощью системы технического зрения, и определения размеров структур;
4. Разработать алгоритмические и программные средства для сопоставления профилограммы поверхности, модифицированной лазерным излучением, с САД-моделью обработки;
5. Исследовать эффективность применения разработанных алгоритмов для измерения размеров и показателей качества структур на изображениях и профилограммах поверхности, обработанной лазерным излучением;
6. Применить разработанные алгоритмы для контроля качества изделий оптико-механической промышленности, обработанных фемтосекундным лазерным излучением, и по полученным данным определить технологические параметры, обеспечивающие создание объектов с минимальными дефектами при высокой производительности обработки.

Содержание диссертации изложено в четырех главах.

В первой главе, носящей обзорный характер, исследована проблема определения оптимальных режимов лазерной микрообработки. Проведен анализ литературных источников, в которых для определения зависимостей

размеров объектов от технологических режимов обработки использованы как модельный, так и экспериментальный подход. Рассмотрены сложности, возникающие при измерении и контроле качества поверхности, обработанной лазерным излучением. Во второй главе исследована проблема контроля качества 2D и 2,5D векторной лазерной микрообработки по изображениям модифицированной лазерным излучением поверхности, получаемым с помощью системы технического зрения. Показана сложность решения задачи выделения границ структур на изображениях зоны лазерной обработки и рассмотрена возможность её решения с помощью методов обработки изображений, применяемых в схожих областях. Предложен новый алгоритм, протестирована его эффективность на модельных и экспериментальных данных.

Третья глава посвящена исследованию проблемы измерения профиля поверхности, обработанной лазерным излучением, и контроля качества объектов, формируемых в процессе лазерного микрофрезерования. На основе анализа литературных источников и экспериментального тестирования установлено, что конфокальные методы являются наиболее подходящим методом измерения. Показано, что основной задачей является обеспечение быстрого и точного совмещения CAD-модели и профилограммы поверхности. Предложен новый алгоритм, показано, как по результатам совмещения могут быть определены показатели качества изделий (отклонения по размерам, средняя шероховатость дна и др.). В четвёртой главе рассмотрено применение разработанных алгоритмов для контроля качества и определения оптимальных режимов прямой фемтосекундной лазерной записи сеток и микроканалов на поверхности стекла. Описано разработанное программное обеспечение, получены регрессионные модели зависимости глубины микроканалов от технологических параметров обработки, определены оптимальные режимы обработки стекла ВК7 по критериям качества границ, минимальной шероховатости дна и максимальной производительности.

В заключении формулируются основные результаты, в конце приводится список цитируемой литературы.

Основные результаты работы опубликованы в рецензируемых журналах [7–10] и материалах конференций. Результаты работы докладывались на конференциях: Pattern Recognition and Image Analysis (PRIA, Санкт-Петербург 2010 г.), Fundamentals of Laser-Assisted Micro- and Nanotechnologies (FLAMN, Санкт-Петербург, 2010 и 2013 гг.), Лазеры. Измерения. Информация (Санкт-Петербург, 2012 г.), Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине (Новосибирск, 2013), СибОптика (Новосибирск, 2014), Laser Optics (Санкт-Петербург, 2014), Всероссийская конференция молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям (Тюмень, 2014), Advanced Laser Technologies (Касис, Франция, 2014) и на научном симпозиуме Taiwan-Russia Bilateral Symposium on Material Processing at Micro and Nano Level (Новосибирск, 2013 г.).

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Метод измерения размеров объектов, формируемых в процессе векторной лазерной микрообработки, основанный на совмещении изображений зоны лазерной обработки с САД-моделью и поточечном выделении контуров объектов в поперечном направлении к каждому вектору САД-модели, имеет максимальную погрешность, не превышающую 10%, при ширине объектов менее 50 мкм, разрешении системы технического зрения  $\sim 1$  мкм и отношении сигнал-шум изображений не менее 5.
2. Метод совмещения САД-модели с изображением поверхности, обработанной лазерным излучением, основанный на алгоритме Ciratefi и итеративном поиске максимума, при отношении сигнал-шум измерений не менее 3,3 имеет погрешности совмещения не хуже, чем у алгоритма полного перебора, при быстродействии на порядок выше.
3. По результатам применения созданных алгоритмов сопоставления и выделения границ могут быть получены математические модели

зависимости показателей качества изделий от технологических режимов микрообработки, обеспечивающие хорошее соответствие расчётных и экспериментальных данных (средняя ошибка аппроксимации менее 10%);

4. При проведении высокоскоростной (50 кГц) фемтосекундной лазерной (1026 нм, 232 фс) микрообработки стекла ВК7 оптимальным диапазоном технологических параметров по критериям качества границ и минимальной шероховатости дна является: 0,91-2,27 мкДж энергия импульсов, 50-62% перекрытие импульсов, количество слоёв по глубине – больше трёх.

## **Глава 1 Оптимизация режимов лазерной микрообработки**

В настоящей главе исследована проблема определения оптимальных режимов лазерной микрообработки. Проведен анализ литературных источников, в которых для определения влияния технологических режимов лазерной микрообработки на размеры формируемых объектов использованы методы математического моделирования. Рассмотрены особенности изображений и профилограмм, получаемых при измерении поверхности, обработанной лазерным излучением. Сделан обзор экспериментальных методов определения оптимальных режимов лазерной микрообработки материалов.

### **1.1 Взаимодействие лазерного излучения с веществом**

#### *1.1.1 Математические модели*

За 50 лет применения лазерного излучения для формообразования накоплен большой объём фактического материала, позволяющий во многих случаях получить информацию о влиянии технологических параметров обработки на показатели качества изделия. Приведём основные параметры, определяющие процесс лазерной обработки вещества [1]:

1) параметры лазера: выходная мощность, длина волны, поляризация излучения, режим непрерывный или импульсный, энергия импульса, длительность и форма импульсов, частота импульсов, расходимость и профиль интенсивности лазерного пучка;

2) технологические параметры: размер и форма сфокусированного пятна излучения, перекрытие световых пятен, сопутствующий газ, стратегия обхода областей сканирования, положение фокальной плоскости при обработке и глубина фокуса, скорость перемещения лазерного пучка, точность фокусировки, точность перемещения лазерного пучка и управления его выходной мощностью;

3) свойства материала:

а. оптические (коэффициенты отражения, поглощения и преломления);

б. термодинамические (теплоёмкость, теплопроводность, температура плавления и кипения, удельная теплота плавления и испарения, коэффициент термического расширения);

с. механические (размеры подложки, шероховатость поверхности, плотность, твёрдость, хрупкость, упругость).

В литературе подробно описаны процессы, протекающие при взаимодействии лазерного излучения с веществом, и модели для их оценки [11–19]. В основном в моделях при расчётах распространения и локализации энергии лазерного излучения в материале применяются закон Бугера-Ламберта-Бера (формула 1.1), описывающий поглощение лазерного излучения в веществе, и уравнение теплопроводности (формула 1.2), задающее распространение тепловой энергии и нагрев вещества под воздействием лазерного излучения.

$$I(x, y, z) = I_0(x, y) A e^{-k_\lambda z}, \quad (1.1)$$

где  $I(x, y, z)$  – интенсивность в точке  $(x, y, z)$ ,  $z$  – глубина,  $k_\lambda$  – показатель поглощения (1/м),  $A$  – коэффициент поглощения,  $I_0(x, y)$  – интенсивность входящего пучка.

$$\frac{\partial T(r, t)}{\partial t} = \alpha \Delta T(r, t) + \frac{q(r, t)}{\rho c_p},$$

(1.2)

где  $T(r, t)$  – температура, а  $q(r, t)$  – плотность мощности объемного теплового источника в точке  $r(x, y, z)$  в момент времени  $t$ , зависящая от поглощательной способности материала и интенсивности лазерного пучка;  $\Delta T(r, t)$  – Лапласиан температуры,  $\rho$  – плотность,  $\alpha$  – коэффициент температуропроводности,  $c_p$  – удельная теплоёмкость. Зная распределение

температуры в веществе можно определить зону плавления и испарения вещества, а также геометрические характеристики формируемых объектов. Изменение плотности мощности объемного теплового источника  $q(r,t)$  рассчитывается по формуле 1.3 [12]:

$$\frac{\partial q(r,t)}{\partial z} = -AI_0(x,y)k_\lambda \exp\left(-\int_0^z k_\lambda dz\right), \quad (1.3)$$

При малом  $\alpha$  (меньше  $10^{-6}$  м<sup>2</sup>/сек) теплообмен незначителен и удаление вещества происходит в основном в области, где интенсивность лазерного излучения превышает пороговую  $I_{th}$  [20]. В этом случае для расчёта формы кратера достаточно использовать уравнение 1.1. В моделях обычно рассматриваются гауссовы пучки, т.е. считается, что распределение интенсивности лазерного пучка  $I(x,y,z)$  можно представить в виде гауссовой функции [21][22]:

$$I(x,y,z) = I_0 \left(\frac{w_0}{w}\right)^2 \exp\left(\frac{-(x+y)^2}{2w^2(z)}\right),$$

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \frac{(z)^2}{z_R^2}}, \quad (1.4)$$

$$z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda},$$

где  $r$  – расстояние от центра пучка в латеральной плоскости  $(x,y)$ ,  $I_0$  – интенсивность в центре пучка,  $w_0$  – радиус пятна фокусировки,  $w(z)$  – изменение радиуса пятна при дефокусировке на расстоянии  $z$  от фокальной плоскости,  $z_R$  – глубина фокуса,  $\lambda$  – длина волны лазерного излучения.

В некоторых случаях как, например, при обработке вещества непрерывным лазерным излучением с гауссовым профилем интенсивности с постоянной скоростью уравнение 1.2 может быть решено аналитически [23]. Сложность модели значительно возрастает при учёте фазовых переходов, химических реакций, давления насыщенных паров, образования плазмы. В большинстве случаев для решения уравнения теплопроводности применяются

численные методы: используются специальные программные средства (например, ANSYS, FLUENT), кластеры и системы распределённых вычислений [24]. При выполнении расчётов необходимо задать размеры обрабатываемой заготовки, свойства вещества ( $c_p$ ,  $A$ ,  $\rho$ ,  $\alpha$  и др.), граничные условия, описывающие процесс теплообмена с окружающей средой, начальные условия, пространственно-временное распределение интенсивности лазерного пучка, и.т.д. Кроме того, для повышения точности вычислений требуется учитывать возможность изменения физико-химических свойств вещества в зоне обработки на несколько порядков [15][25], например с помощью приближения 1.5:

$$A = A_0 + bT, \quad (1.5)$$

где  $A_0$  – коэффициент поглощения металла, определяемый рассеянием электронов проводимости на примесях и дефектах,  $b$  – параметр, определяемый электропроводностью металла и плазменной частотой,  $T$  – температура.

### *1.1.2 Моделирование процессов лазерной микрообработки*

Рассмотрим применение приведенных моделей для оценки геометрических характеристик объектов, формируемых в процессе лазерной микрообработки. В работе [26] проведено моделирование влияния мощности лазерного излучения на форму микроканалов с помощью уравнения теплопроводности (1), с учётом нагревания, плавления и охлаждения вещества сопутствующим газом. Экспериментально показано, что модель применима только при средних мощностях лазерного излучения ( $10^4$ – $10^7$  Вт/см<sup>2</sup>), так как при больших – происходит испарение вещества и образование плазмы, что не учитывается в модели. В [27] исследовалась обработка металлов лазерными импульсами большой интенсивности ( $10^7$ – $10^{10}$  Вт/см<sup>2</sup>), уравнение теплопроводности (1.2) решалось с использованием численных методов при учёте плавления, испарения вещества и образования плазмы. Установлено, что модель адекватна только в узком диапазоне интенсивностей ( $1,06$ – $1,8 \times 10^8$

Вт/см<sup>2</sup>), при значениях выше  $5 \times 10^9$  Вт/см<sup>2</sup> происходит образование плазмы и экранирование излучения, что корректируется посредством добавления поправки, однако не указано, как устанавливается её величина (Рис. 1а). В [28] форма кратера, образующегося в стали под воздействием лазерного излучения, рассчитывается с помощью уравнения 1.2, учитывается теплопроводность, нагревание, плавление, испарение. Утверждается, что модель применима при плотностях энергий выше 2.5 Дж/см<sup>2</sup> (Рис. 1б). Однако, на наш взгляд, модель недостаточно хорошо описывает экспериментальные данные (средняя ошибка превышает 15%).

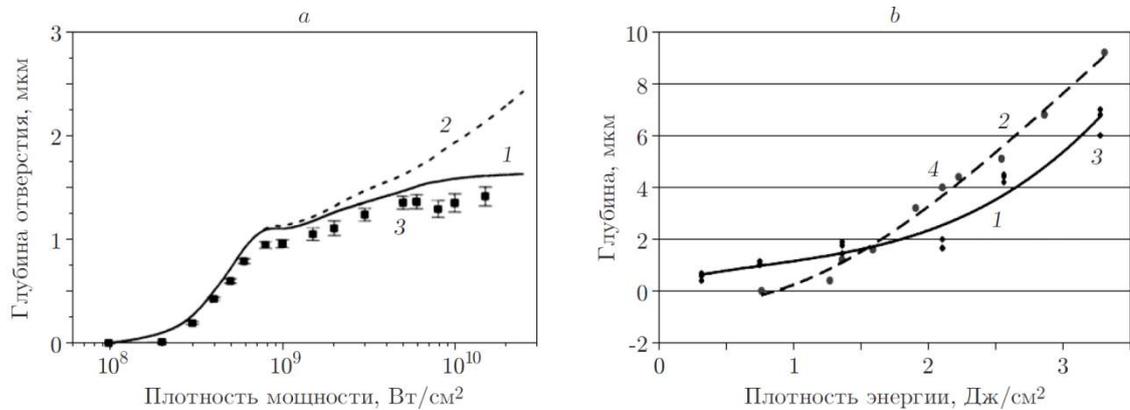


Рис. 1 Сравнение экспериментальных данных и данных моделирования процесса обработки Nd:YAG лазером: (а) – меди (кривая (1) – с коррекцией, (2) – без коррекции, (3) – экспериментальные результаты) [27]; (б) – нержавеющей стали (кривые (1-2) – полиномиальные аппроксимации данных эксперимента и (3-4) – моделирования)

В приведённых работах экспериментальные результаты согласуются с данными математического моделирования только в узком диапазоне значений параметров, что объясняется тем, что протекающие термофизические, термохимические и фотохимические процессы являются нелинейными и нестационарными, а свойства вещества (коэффициент поглощения, теплопроводность и др.) изменяются в процессе обработки. При этом для определения величины их изменения в процессе обработки необходимо проводить дополнительные исследования (например, [15][25]). Кроме того,

некоторые эффекты сложно учесть при моделировании (в частности, образование микротрещин и сколов), так как соответствующий математический аппарат недостаточно разработан. Отклонение экспериментальных результатов от данных моделирования в некоторых случаях объясняется неоптимальным управлением компонентами системы лазерной микрообработки [29] (Рис. 2), абберациями оптической системы и др. Учёт всех приведённых особенностей является сложной задачей.

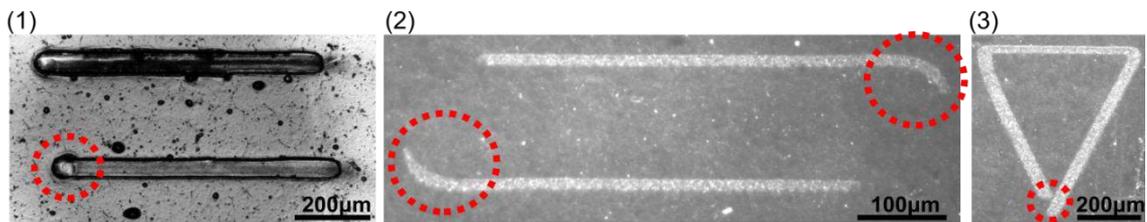


Рис. 2 Локальные дефекты обработки (выделены красными кругами), возникновение которых связано с неоптимальным заданием режима лазерной микрообработки и синхронизацией управления компонентами системы. (1) – расширение структурного элемента, связанное с неоптимальным временем начала выдачи лазерных импульсов; (2) – отклонение линий от прямолинейности, связанное с неконтролируемым изменением положения сканеров; (3) – контур не замкнут, что связано с ошибками синхронизации перемещения сканеров и выдачи лазерных импульсов

В ряде работы также отмечено, что некоторые экспериментальные результаты недостаточно хорошо согласуются с теоретическими предположениями и модельными расчётами. В [30] отмечается, что при обработке керамики  $\text{Nd:YVO}_4$  лазером (1064 нм) максимальная производительность в диапазоне скоростей обработки 50-400 мм\сек достигается при средних скоростях (100-200 мм\сек). В [31] показано, что при обработке материалов большой твёрдости Nd:YAG лазером ( $\tau = 20-200$  нс) при высоких частотах импульсов возможна обработка поликристаллического алмаза, но не карбида вольфрама. В [32] продемонстрировано, что при обработке сапфира Nd:YAG лазером ( $\lambda = 355$  нм) при плотности энергии в

диапазоне 1-100 Дж/см<sup>2</sup> эффективность абляции максимальна в диапазоне 5-15 Дж/см<sup>2</sup> (Рис. 3а), в то время как для кремния эффективность абляции в широких пределах не зависит от плотности энергии (Рис. 3б). В [33] установлено, что экспериментальные данные обработки керамики Nd:YAG лазером хорошо согласуются с моделью, только если считать, что коэффициент поглощения керамики равен 1, тогда как табличное значение коэффициента – 0,1. При обработке алюминия волоконным двухкаскадным лазером ( $\lambda = 1064$  нм,  $\tau = 3-8$  нс, пятно фокусировки 11 мкм) отмечается, что шероховатость дна уменьшается при сокращении длительности импульсов, в то время как для нержавеющей стали она практически не зависит от формы импульса, что объясняется меньшей теплопроводностью стали [34].

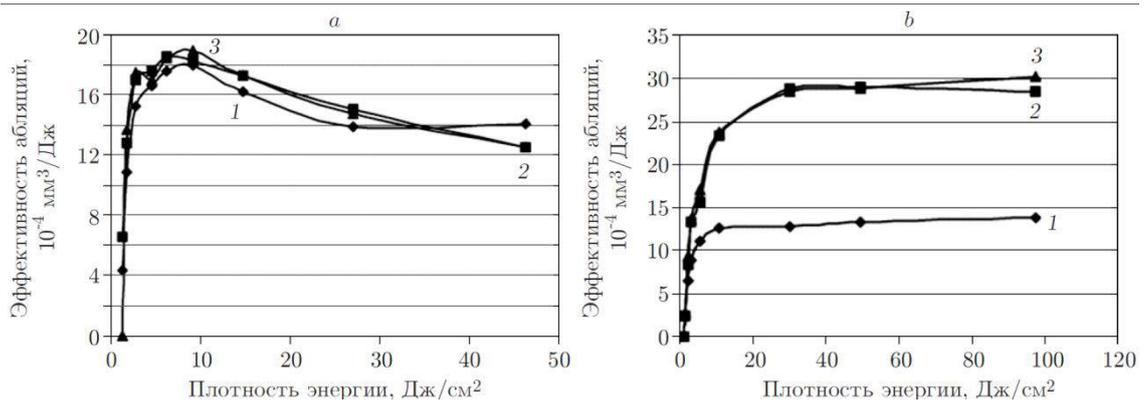


Рис. 3 Производительность лазерной микрообработки от плотности энергии импульсов Nd:YAG лазера: (а) – сапфира (кривая 1 – 5, 2 – 10, 3 – 20 мм/сек); (б) – кремния (кривая 1 – 20, 2 – 50, 3 – 100 мм/сек) [32].

В результате анализа литературных источников (см. дополнительно [35,36]) установлено, что методы математического моделирования процессов лазерной микрообработки эффективны только в узком диапазоне значений технологических параметров. Автором в сотрудничестве с Шоевым С.А. дополнительно исследована эффективность применения тепловой модели [37] для оценки влияния параметров обработки на глубину и ширину микроканалов, формируемых на поверхности металлов (алюминий и сталь) с помощью Nd:YAG лазера ( $\lambda = 1,064$  мкм,  $\tau = 10$  нс, размер пятна 10 мкм, частота импульсов 10 кГц) [38]. Установлено, что отклонение модельных расчётов от

экспериментальных данных меньше 15% только при энергиях импульсов 50-100 мкДж и перекрытии импульсов 30-70%.

Таким образом, в настоящее время методы математического моделирования не позволяют полностью решить проблему определения оптимальных режимов лазерной микрообработки, что объясняется зависимостью протекающих процессов более чем от двух десятков параметров лазерной системы и свойств материала, которые зависят от температуры, давления, и.т.д. Рассмотрим основные методы прямой лазерной обработки поверхности и проблемы, возникающие при измерении формируемых объектов.

## 1.2 Методы лазерной микрообработки поверхности

При прямой лазерной записи перемещение лазерного пучка относительно материала производится по векторным и растровым траекториям (Рис. 4). При векторном сканировании траектории имеют произвольную форму (окружность, спираль, прямая и др.), задаются в САД-модели в векторном формате (plt, dxf), при этом при переходе между траекториями материал не удаляется. Растровым сканированием называют метод перемещения лазерного пучка по прямоугольному растру (по типу телевизионной развёртки) [39]. Различные глубины рельефа получаются за счёт изменения режима обработки: энергии импульсов, скорости перемещения лазерного пучка, количества слоёв и др.

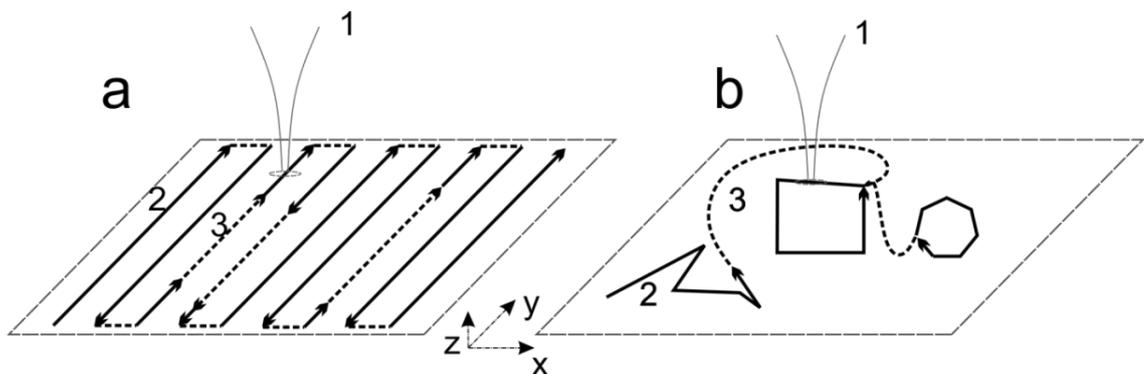


Рис. 4 Схемы лазерного сканирования. (а) – растровое сканирование, (б) – векторное сканирование. (1) – лазерный луч; сплошные линии (2) – траектории, при перемещении по которым лазерного пучка производится удаление вещества; пунктирные линии (3) – переход между траекториями.

Векторное лазерное сканирование применяется в 2D и 2,5D лазерной микрообработке. В первом случае целью обработки является локальная модификация физико-химических свойств вещества в зоне лазерного воздействия, во втором производится удаление материала в поверхностном слое полочки, посредством плавления и испарения вещества под действием лазерного излучения. Формируемые объекты имеют два уровня по высоте: уровень поверхности и обработанного материала (Рис. 5).

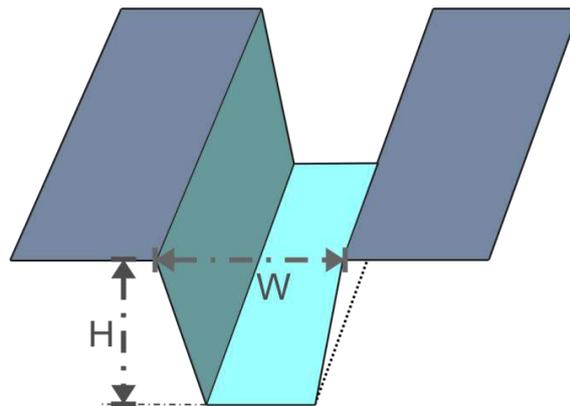


Рис. 5 Модель микроканала в разрезе, формируемого в процессе 2,5D лазерной микрообработки. ( $W$ ) – ширина ( $H$ ) – глубина микроканала.

Одним из применений векторной 2,5D лазерной микрообработки является создание микроканалов на поверхности материалов и нанесение маркировки. Перспективность использования лазерных технологий для указанных задач определяется возможностью гибкого задания формы и расположения микроканалов, посредством изменения CAD-модели, и возможностью обработки различных материалов на одной технологической установке. Площади обработки достигают  $100 \times 100 \text{ мм}^2$ ; ширина и глубина формируемых микроканалов находится в диапазоне 1-100 мкм. На Рис. 6 приведен результат 2,5D лазерной микрообработки поверхности стекла BK7 (2-4) по CAD-модели (1), состоящей из нескольких сотен микро- векторов.

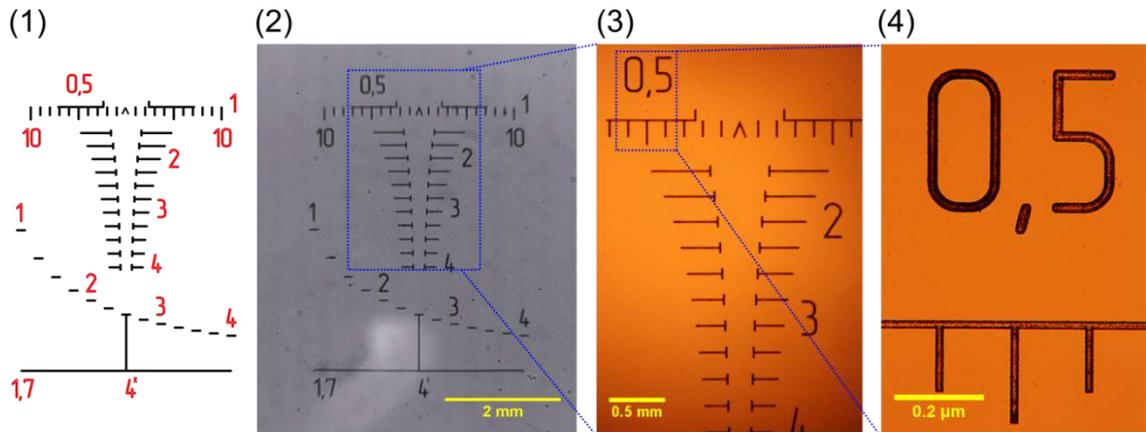


Рис. 6 2,5D лазерная микрообработка ВК-7 стекла. (1) CAD-модель. (2-4) изображения полученного объекта.

Далее в тексте использована следующая терминология: структурным элементом называется объект на поверхности материала, соответствующий вектору CAD-модели, а структурой – объект, соответствующий нескольким векторам CAD-модели (Рис. 7).

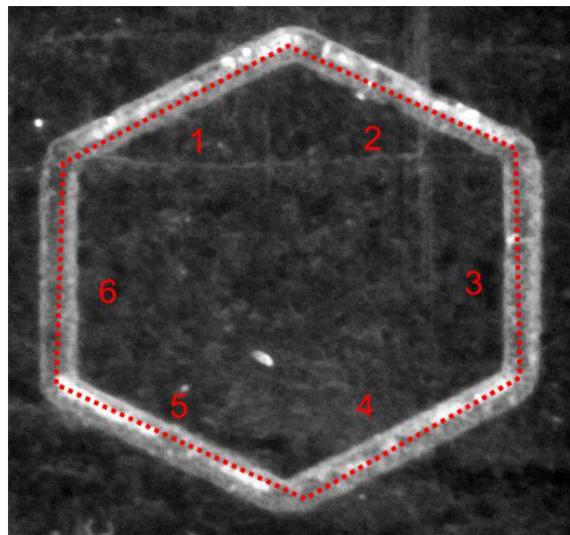


Рис. 7 Изображение структуры, состоящей из шести структурных элементов. (1)-(6) – показывают вектора, по которым проведена обработка поверхности лазерным пучком.

При 3D лазерной микрообработке поверхности, например, при микрофрезеровании основным методом сканирования является растровый: материал удаляется послойно, так что на каждом слое лазерный пучок

обрабатывает материал по растровому шаблону, после чего в соответствии с толщиной снимаемого слоя происходит смещение плоскости обработки по оси Z. Для вычисления растровых шаблонов и разбиения исходной CAD-модели на слои применяются системы технологической подготовки производства (САМ – Computer-aided Manufacturing). При размере пятна фокусировки 1-10 мкм типичное разрешение объектов 1-20 мкм, объём удаляемого вещества порядка  $10 \times 10 \times 10 \text{ мм}^3$ , средняя шероховатость поверхности 0,1-10 мкм, время обработки – несколько минут.

На Рис. 8 представлено изображение исходной трехмерной модели (CAD-модели), её карта высот (вид сверху) и трехмерные модели поверхности после удаления соответственно 5 и 9 слоёв вещества лазерным пучком, полученные с помощью системы технологической подготовки производства. Картами высот называют 16-битные изображения в градациях серого, в которых яркость задаёт относительную глубину. При измерении поверхностей, обработанных лазерным излучением, с субмикронным разрешением, карты высот содержат несколько миллионов точек.

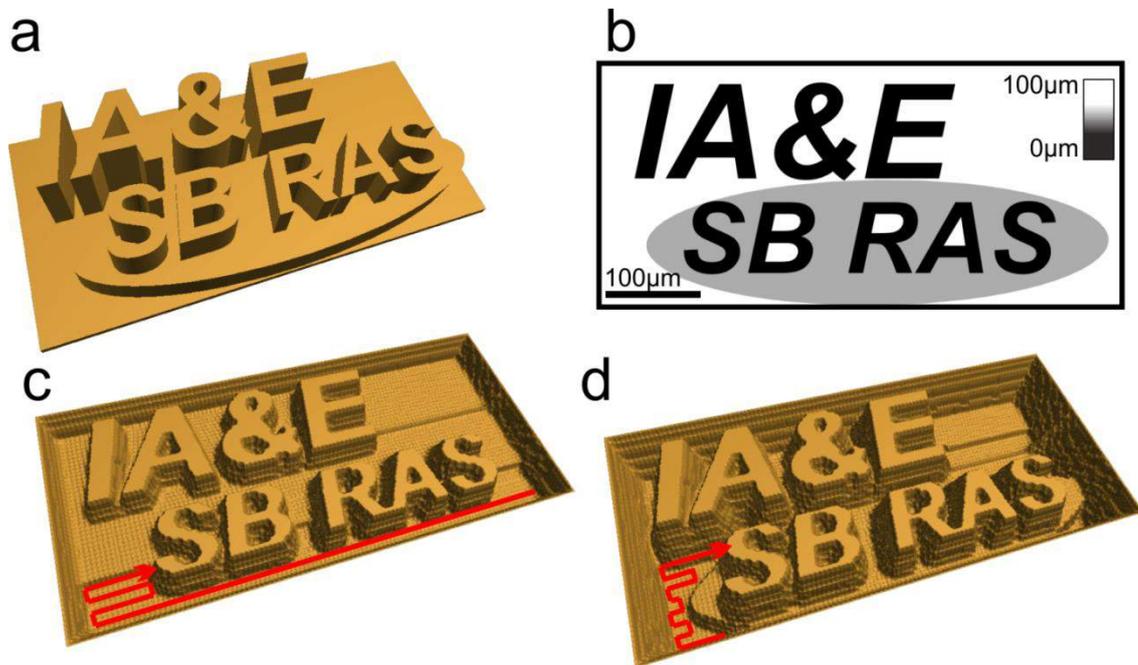


Рис. 8 Схема лазерного микрофрезерования. (1) – 3D модель, (2) – карта высот, (3)(4) – 3D модель поверхности после удаления 5 и 9 слоёв вещества. Стрелки, показывают траектории перемещения лазерного пучка при удалении материала

В настоящей работе основное внимание уделено задаче контроля качества векторной 2,5D и растровой 3D лазерной микрообработки вещества.

### 1.3 Методы контроля качества микро топографии поверхности

#### 1.3.1 Показатели качества лазерной микрообработки

В [1,40] структурированы как показатели качества изделий, формируемых в процессе лазерной микрообработки поверхности, так и самого процесса:

1) геометрические характеристики: отклонение размеров и углов от заданных в САD-модели, разрешение структурных элементов, средняя шероховатость обработанной поверхности ( $R_a$ );

2) производительность: скорость удаления материала ( $MRR$  – *Material Removal Rate*, мм<sup>3</sup> \ сек) – объём вещества, удаляемый за 1 секунду; скорость абляции - объём вещества, удаляемый одним лазерным импульсом; эффективность удаления материала – объём вещества, удаляемый лазерным излучением с заданной энергией; толщина слоя материала ( $D_m$ ), снимаемого лазерным излучением за один слой (Рис. 9);

3) характеристики вещества в зоне лазерного воздействия: размеры зоны термического влияния (HAZ – heat affected zone), наличие облоя и грата, их размеры (см. Рис. 9), наличие неоднородностей и дефектов. Облоем называют выпуклости на границе зоны лазерного воздействия, а гратом – тонкую плёнку и капли, которые образуются при затвердевании материала, удаленного давлением паров в расплавленном виде из зоны обработки. Для уменьшения облоя и грата применяется химическая постобработка [41] и (или) обработка в инертной атмосфере.

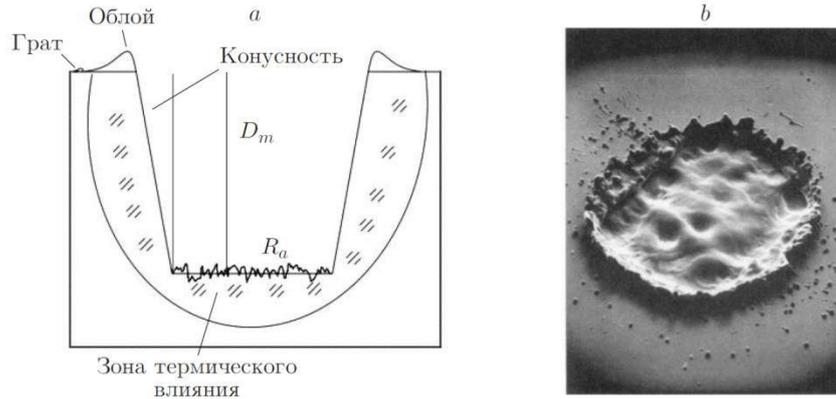


Рис. 9 Показатели качества лазерной микрообработки: (а) – схема профиля микроканала; (б) – кратер на поверхности стали (SEM-изображение, диаметр участка 1,8 мм [15])

Рассмотрим некоторые из приведенных показателей качества подробнее. Шероховатость поверхности определяет важнейшие эксплуатационные свойства изделия, и зависит практически от всех параметров лазерной микрообработки. Величина микронеровностей и их распределение сложно поддается оценке с помощью методов математического моделирования даже для случая механической обработки [42], поэтому основным методом определения зависимости шероховатости от технологических режимов лазерной микрообработки является экспериментальный подход. Влияние длительности и временной формы импульсов на величину средней шероховатости дна исследовано в [34][43]. Шероховатость поверхности зависит от перекрытия световых пятен как в направлении лазерного сканирования, так и в перпендикулярном направлении (Рис. 10). Перекрытие импульсов в направлении лазерного сканирования ( $PO$  – *Pulse Overlap*) равно 0%, если расстояние между центрами соседних пятен превышает их диаметр  $D$ , а иначе зависит от частоты импульсов  $f$  и скорости перемещения лазерного пучка  $v$ :

$$PO = \left(1 - \frac{v}{fD}\right) \times 100\%. \quad (1.6)$$

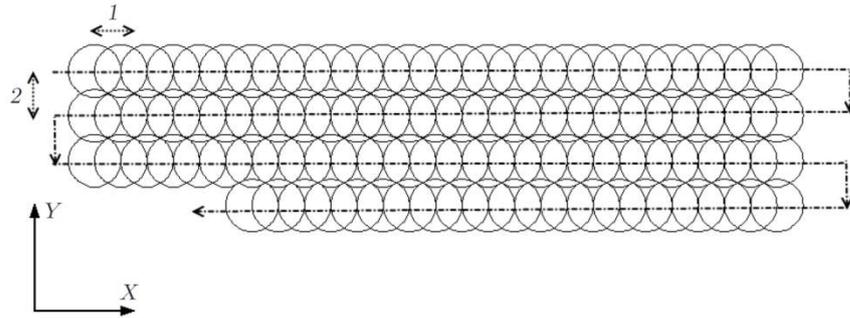


Рис. 10 Схема перекрытия лазерных импульсов: (1) – 50% в направлении лазерной обработки, (2) – 30% в перпендикулярном направлении

Для металлов минимальная шероховатость дна получается при обработке с перекрытием импульсов  $\sim 50\%$  [44,45]. При лазерном микрофрезеровании областей большой площади (больше  $0,1 \times 0,1 \text{ мм}^2$ ) шероховатость обработанной поверхности зависит и от метода лазерного сканирования [46]. В отличие от механической обработки (фрезерования) толщина снимаемого лазером слоя может изменяться нелинейно от слоя к слою, поскольку зависит не только от перемещения обрабатывающего инструмента относительно заготовки, но и от большого числа технологических параметров (длительности импульсов, длины волны, выходной мощности и др.).

Зоной термического влияния называют объём материала, в котором произошло изменение физико-химических свойств вещества, в том числе структурно-фазовые переходы, перестройка кристаллической решётки [47]. Например, в зоне лазерной обработки коэффициент поглощения может отличаться на 2–3 порядка [48], что объясняется образованием окислов на поверхности, интерференцией, рассеянием и переотражением светового пучка на микронеровностях. Размеры зоны термического влияния можно оценить из соотношения:

$$L_d \approx \sqrt{a\tau}, \quad (1.7)$$

где  $a$  – коэффициент температуропроводности,  $\tau$  – длительность импульсов. На Рис. 11 показаны изображения микроотверстий,

сформированных лазерным излучением в нержавеющей стали при различных длительностях импульсов, видны облой, грат, зона термического влияния.

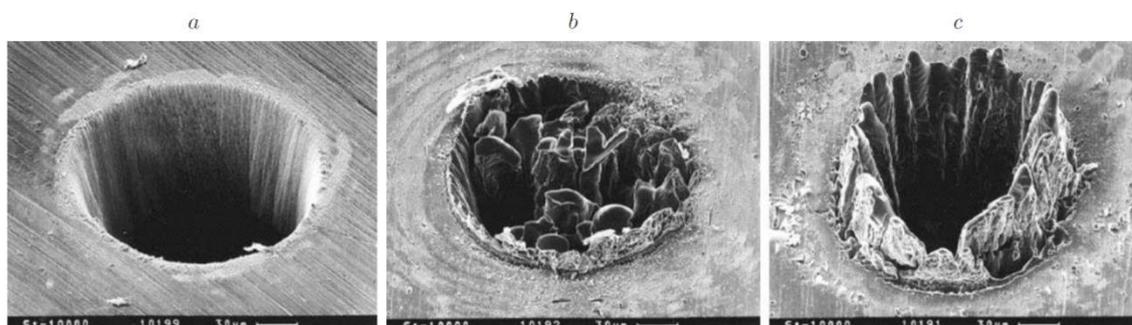


Рис. 11 SEM изображения лазерного сверления отверстий в фольге из нержавеющей стали (100 мкм толщина,  $\lambda = 780$  нм) при различных длительностях и энергиях импульсов [49]. а) 200 фс, 120 мкДж, 0,5 Дж/см<sup>2</sup>; б) 80 пс, 900 мкДж, 3,7 Дж/см<sup>2</sup>; в) 3,3 нс, 1 мДж, 4,2 Дж/см<sup>2</sup>

В настоящее время до сих пор не получены универсальные оценки влияния технологических параметров лазерной микрообработки на показатели качества изделий. В [36] предпринята попытка их структурирования, однако, как показывает наш опыт и анализ литературных источников, приведённые зависимости неточны, так, например, для уменьшения зоны термического влияния обычно снижают длительность импульсов [43][49], а для уменьшения шероховатости проводят обработку на высоких скоростях [3,50]. Проведение оптимизации технологических параметров обработки при большом количестве контролируемых показателей качества является сложной задачей, т.к. улучшение одних показателей может ухудшить другие [43][50].

В зависимости от задачи под прецизионной лазерной микрообработкой понимают обработку, при которой точность и повторяемость размеров обрабатываемых объектов находится в пределах 1-50 мкм, погрешности расположения объектов на площади более 100 мм<sup>2</sup> не превышают 50 мкм, толщина зоны термического влияния меньше 10 мкм, размеры неоднородностей (сколы, грат и др.) и шероховатость дна не превышают размера пятна сканирующего пучка [1]. При размере пятна сканирующего

пучка  $\sim 1$  мкм для получения информации о показателях качества изделия, необходимо использовать оборудование, обеспечивающие субмикронное разрешение измерений. Рассмотрим особенности получаемых изображений и профилограмм и возможность применения существующих методов для решения задачи контроля качества лазерной микрообработки.

### *1.3.2 Методы контроля качества*

Получение изделий с показателями качества, удовлетворяющими технологическим требованиям, является основной задачей при использовании различных методов лазерного формообразования. Контроль качества состоит из следующих этапов: измерение объектов, сопоставление с САД-моделью и сравнение размеров элементов с заданными величинами с использованием системы допусков, определение показателей качества изделия [51]. В зависимости от разрешения метода обработки для измерений формируемых объектов используются контактные профилометры, сканирующие зондовые, электронные микроскопы и оптические микроскопы и профилометры.

Контактные профилометры интенсивно применяются при контроле качества механической обработки, эффективность их работы не зависит от оптических свойств поверхности, однако они не позволяют измерять микронеровности с размерами меньше диаметра кончика иглы (обычно 1–5 мкм) и могут повредить поверхность материала. Сканирующая зондовая микроскопия также используется для «прямых» измерений профиля объектов, но в нанометровом диапазоне, при этом является медленным методом (время сканирования объема  $1 \times 1 \times 0,01$  мм<sup>3</sup> больше 1 ч.) и не позволяет измерять объекты с перепадами глубин больше 10 мкм. Сканирующая электронная микроскопия является быстрым методом измерения в широком диапазоне разрешений (1 нм – 1 мм), однако используют вакуумную камеру с ограниченным объемом, требует предварительной подготовки образца (напыление металла) и обычно используется для получения 2D изображений

объектов, а не профилограммы. Последние два метода в основном применяются для измерения объектов с разрешением выше 100 нм, например, в [52,53] для контроля качества лазерной литографии и последующей оптимизации формы фотолитографических масок [54,55].

Оптические методы измерения размеров и профиля объектов в настоящее время встраиваются в системы производства для оперативного контроля качества изделий, получаемых в процессе микро- формообразования [56,57], т.к. обеспечивают субмикронное разрешение при высокой скорости получения данных (млн. точек в секунду). Оптические методы активно используются при измерении объектов микроэлектроники, микрооптики и основаны на различных принципах измерения. Одним из принципов является интерферометрический, он позволяет получать профиль объектов с высоким аксиальным разрешением (выше 100 нм), однако, неэффективен при измерении рассеивающих поверхностей и областей с большими локальными углами наклона ( $> 30$  градусов), вследствие высокой плотности интерференционной картины в таких областях [58]. Другим широко используемым методом является конфокальная микроскопия, в которой высокое разрешение достигается с помощью диафрагмы, пропускающей излучение только из небольшой окрестности фокальной плоскости объектива [59,60]. Посредством аксиального перемещения объекта конфокальный микроскоп позволяет получить стек изображений оптических срезов, по которым с помощью программных методов может быть восстановлена профилограмма поверхности. Изображения большой площади формируются посредством смещения объекта и программной сшивки изображений. Конфокальные лазерные сканирующие микроскопы являются эффективным средством быстрого контроля качества лазерной литографии на больших площадях с разрешением до 50 нм [53].

После проведения измерений и получения профилограммы для объектов простейшей формы могут быть определены геометрические характерные: ширина, глубина, радиусы, средняя шероховатость. Для объектов сложной

формы, состоящих из нескольких сотен структурных элементов, при необходимости получения полной информации о размерах и показателях качества изделия требуется провести поточечное сравнение профилограммы объекта ( $H_2$ ) и САД-модели ( $H_1$ ). Для этого необходимо совместить точки САД-модели и профилограммы: провести относительное позиционирование, поворот и масштабирование, так чтобы соответствующие точки были наложены друг на друга. Задача совмещения формулируется следующим образом: требуется найти пространственное преобразование  $f$  для точек  $(x,y,z)$  профилограммы  $H_2$  такое что:

$$H_1(x, y, z) = f(H_2(x, y, z)). \quad (3.1)$$

В зависимости от особенностей задачи  $f$  задаёт ортогональное, аффинное, проективное преобразование или другие. На практике, в результате наличия шумов, возникающих при измерении, и различных искажений достичь равенства не удаётся, поэтому задача совмещения является оптимизационной задачей: требуется минимизировать функцию расстояния  $E$  между двумя множествами точек:

$$E(H_1(x, y, z), f(H_2(x, y, z))) \rightarrow \min_f. \quad (3.2)$$

Перебор всех возможных относительных расположений является трудоёмким процессом, поэтому в схожих областях производства разработаны и используются различные алгоритмы сопоставления. Например, при контроле качества механической обработки стандартом [61,62] является итеративный алгоритм ближайших точек (ICP – Iterative Closest Point) [63] и его модификации [64]. На вход алгоритму подаются два облака точек: САД-модели и восстановленной 3D модели (профилограммы). Облаком точек называют множество точек в 3D пространстве с координатами  $(x,y,z)$ . На каждой итерации с помощью метода ближайшего соседа устанавливается соответствие между точками двух моделей, вычисляется суммарное расстояние между облаками точек и определяются параметры преобразования, которые позволяют

уменьшить рассогласование, производится преобразование одного из облаков точек. Алгоритм сходится к глобальному экстремуму, если облака точек изначально грубо совмещены, однако является чувствительным к шумам и искажениям данных.

Рассмотрим характеристики объектов, формируемых при лазерном микрофрезеровании поверхности, и особенности их измерения оптическими методами. На Рис. 12 приведены карты высот CAD-модели и объекта, измеренного с помощью конфокального лазерного сканирующего микроскопа Carl Zeiss LSM 700.

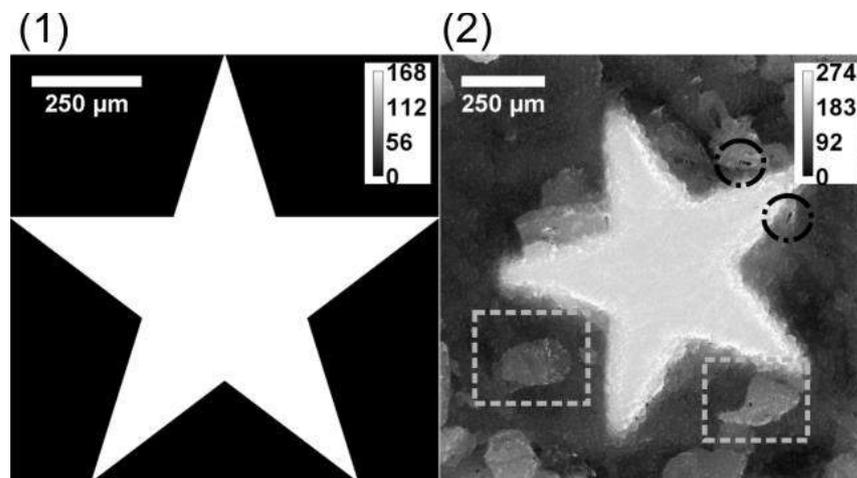


Рис. 12 Лазерное микрофрезерование. Карты высот: (1) CAD-модели; (2) обработанной поверхности. Прямоугольниками отмечены локальные дефекты обработки, кругами – зоны с ошибками измерений

Для профилограмм, модифицированной лазерным излучением поверхности, характерно большие объемы ( $> 1$  ГБайт), наличие шумов и ошибок измерений, связанных с ограничениями чувствительности измерительного оборудования. При этом, как показывает практика, профиль объектов при неоптимальном задании режима обработки может отличаться от заданного в CAD-модели более чем на 30% по высоте и на 5% по ширине во всей зоне обработки, и дополнительно иметь локальные дефекты, т.е. связанные области с площадью более  $100 \text{ мкм}^2$  и с более чем 10% отличием по глубине от

средней глубины слоя, возникновение которых связано как с ошибками обработки, так и с неоднородностью обрабатываемого материала.

Стандартным решением для при контроле качества 2D и 2,5D лазерной микрообработки является использование систем технического зрения (СТЗ) [65][66], которые обычно включают высокоразрешающую видеокамеру, систему освещения и программные средства анализа изображений, состоящие из алгоритмов выделения границ, фильтрации, пороговой обработки и др. [67]. СТЗ позволяют оператору определить характерные размеры объектов и найти дефекты обработки. В [40] для автоматизации контроля качества лазерной векторной микрообработки по изображениям, получаемым с помощью оптического микроскопа, использован пороговый алгоритм [68]. В указанной работе изделия измеряются в проходящем свете, что обеспечивает высокий контраст объектов на изображениях. Однако, данный метод неприменим для контроля качества объектов, формируемых на металлических подложках.

Рассмотрим характерные изображения структур, сформированных по векторной CAD-модели и измеренных в режиме отражённого света (Рис. 13). Объекты записаны на металлических подложках (латунь, алюминий, сталь) с помощью системы лазерной микрообработки с Nd:YAG лазером  $\lambda = 1064$  нм,  $\tau = 100$  нс, размер сфокусированного пятна 10 мкм. Описание установки приведено в разделе 2.2.2. Измерения проведены на оптическом микроскопе Leica IM RDB в режиме на отражение. В результате анализа изображений структур, сформированных на различных материалах, установлено, что в большинстве случаев для них характерны следующие свойства:

1. Неоднородный фон (различие текстуры, яркости, локальные дефекты);
2. Внутриклассовая изменчивость структурных элементов (различия по ширине, профилю, соединению элементов, и.т.д.).

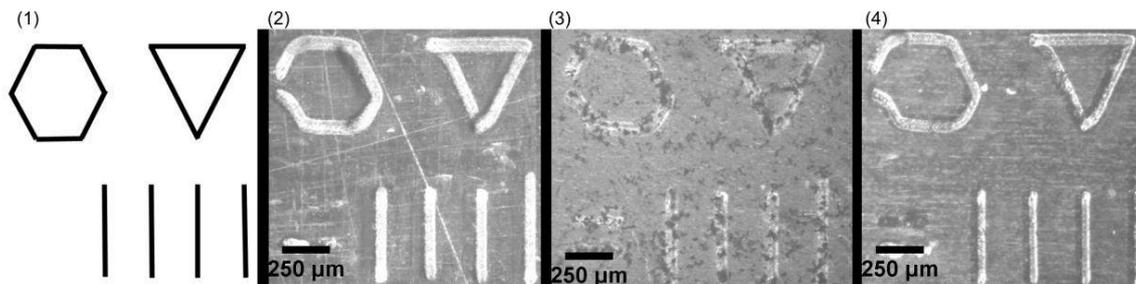


Рис. 13 Изображения микроканалов на металлических подложках, полученные в отраженном свете. (1) CAD-модель и изображения структур на латуни (2), алюминии (3) и стали (4). Изображения получены в отраженном свете на оптическом микроскопе Leica IM RDB.

Изображения имеют различный локальный контраст и яркость, что объясняется как различием оптических свойств поверхностей исходных материалов, так и их локальным изменением в процессе лазерной микрообработки. Вторая характеристика связана с тем, что обработка производится по CAD-моделям с различной геометрией, при этом форма и размеры объектов определяются и режимами лазерной микрообработки и свойствами материала. Структурные элементы являются формами ленточного типа или лентами (ribbon-like shape) [69]. «Лентой называется продолговатая область, форма которой приблизительно симметрична относительно главной оси». Построение ленты осуществляется путем перемещения объекта генератора заданной формы вдоль главной оси [70]. При векторной лазерной микрообработке траектория перемещения лазерного пучка является главной осью ленты, а пятно фокусировки – генератором ленты. Ленты с дисковым генератором с центром на главной оси (Рис. 14) называются лентами Блума [71] и характеризуются гладкими границами.

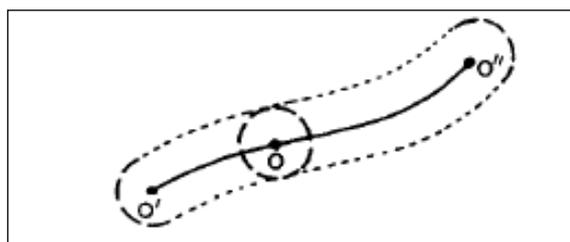


Рис. 14 Траектория перемещения лазерного пучка при векторной обработке представима в виде ленты Блума [71]

На практике для анализа данных измерений и определения геометрических параметров объектов применяются стандартные пакеты обработки изображений (Image Pro, ImageJ, MountainsMap), визуализации и анализа 3D моделей (VRMesh, GeoMagic, MeshLab, ParaView). Однако, вследствие указанных особенностей изображений и профилограмм, приведенные решения не обеспечивают автоматического определения показателей качества изделий и требуют активного участия оператора. Их использование для анализа данных серии тестовых объектов является времязатратным и трудоёмким процессом.

Рассмотрим методы, применяемые в наиболее близких задачах: при контроле качества дифракционных элементов и микро- структурированной поверхности, по изображениям, полученным в отраженном свете. Для контроля качества дифракционных элементов применяется корреляционный анализ в пространственно-частотной области [72,73]. Для изображений исследуемого и эталонного дифракционных элементов производится Фурье преобразование, после чего вычисляется взаимная корреляция двух спектров. Считается, что дифракционный элемент высокого качества если максимальное значение корреляции превышает заданный порог, т.к. большая часть энергии области находится в основной частоте. В [74] для контроля качества дифракционных элементов используется предварительная обработка изображения (медианная фильтрация, пороговая обработка), после чего вычисляется корреляция с эталонным изображением.

В [75,76] сделаны обзоры методов поиска дефектов микро- модификации поверхности, при этом под дефектами понимается нарушение текстуры поверхности. Используется текстурный анализ, автокорреляционные и статистические алгоритмы. Алгоритмы используют предположение об

однородности текстуры поверхности и позволяют определить области изображения с отклонением яркости, дисперсии или направления от статистических значений, полученных по всему изображению, однако определение таких областей проводится очень приблизительно и используется в основном для упрощения работы оператора системы по поиску дефектов на поверхности.

В результате установлено, что во многих областях производства обеспечение высокоточного контроля качества является необходимым условием получения изделий с требуемыми характеристиками, тем не менее, на практике для контроля качества лазерной микрообработки до сих пор применяются программные средства, которые лишь незначительно упрощают решение данной задачи и требуют участия оператора. Установлено, что изображения и профили, обработанной лазерным излучением, получаемые с помощью оптических микроскопов и профилометров, имеют особенности, нехарактерные для других видов микро- модификации поверхности. Проведенный обзор литературных источников, показывает что алгоритмы и методы, применяемые в близких областях производства, не могут быть использованы для решения настоящей задачи, т.к. либо не устойчивы к ошибкам измерений, шуму, искажениям и значительным отклонениям от CAD- модели, либо применяются для решения более простой задачи качественный оценки поверхности изделий, часто посредством сравнения с эталоном, без проведения измерений размеров отдельных структурных элементов и сопоставления с CAD- моделью. Поэтому, необходима разработка специальных программно-алгоритмических средств контроля качества двумерной и трехмерной лазерной микрообработки. Далее рассмотрим применение экспериментального подхода для определения оптимальных режимов лазерной микрообработки.

## **1.4 Анализ экспериментальных методов определения оптимальных режимов лазерной микрообработки**

Стандартным подходом, применяемым при определении режимов лазерной микрообработки, для получения изделий с показателями качества, соответствующими технологическим требованиям производства, является метод проб и ошибок. Оператор системы задаёт режим обработки на основе собственного опыта и методических руководств, проводит тестовые эксперименты, анализирует полученные результаты и при необходимости выполняет дополнительные эксперименты до тех пор, пока не будут сформированы структуры с высокими показателями качества или установлено, что достичь нужного качества невозможно. Метод проб и ошибок трудоёмок и требует больших временных затрат, поэтому в настоящее время используются статистические методы, обеспечивающие высокую устойчивость к ошибкам и позволяющие определить параметры близкие к оптимальным за небольшое число экспериментов (несколько десятков). Далее мы считаем, что количество экспериментов большое, если для  $n$  факторов оно превышает  $10n$ . Очевидно, что желательно проведение небольшого числа экспериментов, так как в этом случае временные затраты и трудоёмкость минимальны. Используя стандартную терминологию, технологические параметры будем называть факторами, а показатели качества – откликом. Зависимость отклика от факторов называется функцией отклика, а её геометрическое представление – поверхностью отклика. Рассмотрим статистические методы, применяемые как при проведении экспериментов, так и при анализе тестовых экспериментов.

### *1.4.1 Планирование экспериментов*

Планирование экспериментов – это систематизированный подход, который позволяет установить связь между факторами и откликом за минимальное количество экспериментов [77]. Основы теории планирования экспериментов заложены Дж. Боксом и К. Вилсоном [78]. Задача планирования

эксперимента формулируется следующим образом: нужно выбрать такое расположение точек в факторном пространстве, чтобы получить наилучшее представление о поверхности отклика. При этом исследуемый объект рассматривается как чёрный ящик, имеющий входы – факторы и выходы – отклики. Планированию экспериментов предшествует этап решений по выбору области экспериментирования. В публикациях по лазерной микрообработке данный шаг обычно не описывается.

Метод OFAT (One-factor-at-a-time) является простейшим методом планирования экспериментов, в котором исследование влияния факторов на отклик проводится по отдельности, например, сначала изменяется только выходная мощность, затем скорость обработки и т.д. В [79] отмечены недостатки OFAT по сравнению со стандартными методами планирования экспериментов: полным факторным экспериментом и центральным композиционным планированием, – которые будут рассмотрены далее.

1) Метод OFAT требует больше ресурсов (количества экспериментов, времени, материалов и др.) для получения того же объёма информации об объекте исследования;

2) Не оценивается комбинированное влияние факторов на отклик (например, одновременного увеличения выходной мощности и скорости обработки), что приводит к худшему соответствию экспериментальных данных зависимостям и моделям, получаемым с помощью метода OFAT.

Тем не менее, вследствие своей простоты, OFAT до сих пор используется в комбинации с методом проб и ошибок в исследованиях по лазерной обработке материалов [30–32]. Далее рассмотрим применение стандартных методов планирования экспериментов [80][81]: полного факторного эксперимента (ПФЭ), центрального композиционного планирования (ЦКП) и метода Тагучи – для исследования процесса и оптимизации режимов лазерной микрообработки.

#### 1.4.1.1 Полный факторный эксперимент (ПФЭ)

В ПФЭ значения факторов комбинируются во всех возможных сочетаниях. Нормированные значения факторов называются уровнями. Для двухуровневого эксперимента ( $p = 2$ ) нормированные факторы принимают значения -1 и 1. Если каждый из  $n$  факторов имеет  $p$  уровней, то проводится  $p^n$  экспериментов. Проведение ПФЭ с большим числом уровней  $p = 3-5$  может позволить получить более точную модель процесса, однако при этом растут временные затраты как на проведение экспериментов, так и на анализ данных. На Рис. 15 показаны области экспериментирования. Центр области соответствует нулевому уровню факторов и называется центром плана. Центр плана выбирается вблизи ожидаемого значения оптимума, например, устанавливается в точку факторного пространства, в которой в процессе предварительной серии экспериментов получено лучшее значение отклика. Значения факторов выбираются так, чтобы соответствующий отклик отличался от значения в центре плана, однако диапазон значений откликов не должен быть широким. По результатам тестовых экспериментов для каждого отклика  $y$  можно получить функцию отклика  $f$  (в частности, с помощью полиномиальной регрессии):

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) + \varepsilon, \quad (1.8)$$

где  $x_1, x_2, \dots, x_n$  – факторы,  $\varepsilon$  – случайная составляющая функции отклика. Линейная регрессия позволяет определить направление поиска оптимума, полиномиальные кривые могут иметь экстремумы, и используются при поиске оптимальных значений факторов.

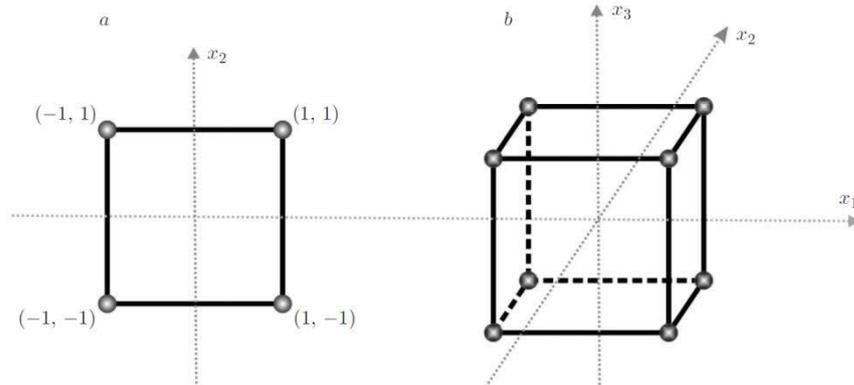


Рис. 15 Полный факторный эксперимент. (а) – область для  $p = 2$  и  $n = 2$ , (б) – область для  $p = 2$ ,  $n = 3$ . Вершины куба – точки экспериментирования.

Важным требованием в методологии планирования экспериментов является воспроизводимость результатов, для исследования которой проводится несколько экспериментов в одной и той же точке факторного пространства (репликации). Воспроизводимость обычно высокая, если все факторы управляемые, однако существуют и неуправляемые (температура в помещении, неоднородность заготовки и другие). Значимыми называют факторы, изменение которых оказывает наибольшее влияние на протекающие процессы. Их определение позволяет уменьшить количество экспериментов и ускорить определение оптимальной комбинации факторов.

В работе [50] ПФЭ использован для нахождения оптимального режима микрообработки стали Nd:YAG лазером. Потребовалось проведение 54 экспериментов при различных значениях факторов: выходная мощность 35–45%, частота импульсов 35–40%, скорость перемещения лазерного пучка 200–400 мм/с, количество уровней соответственно 9, 3, 2. По экспериментальным данным построена регрессионная модель зависимости откликов (ошибки по ширине, высоте, шероховатость) от факторов. По модели проведена многоцелевая оптимизация, которая позволила в пространстве откликов найти точки, оптимальные по Парето (Рис. 16), т.е. такие, для которых улучшение одного из откликов невозможно без ухудшения других. Показана возможность получения объектов прямоугольной формы с ошибкой по размерам, не

превышающей 10%, и шероховатостью меньше 0,5 мкм. Недостатками работы является большое число тестовых экспериментов, определение показателей качества изделия вручную по данным измерений, узкий диапазон параметров, который, как указано в работе, должен быть расширен в дальнейших исследованиях, так как оптимальные значения факторов найдены на границе области экспериментирования.

При анализе и многоцелевой оптимизации микрофрезерования сплава алюминия Nd:YAG лазером в [46] использован ПФЭ. По данным 24 экспериментов построена модель зависимости откликов (толщины снимаемого слоя, производительности, шероховатости) от следующих факторов: скорости перемещения лазерного пучка (диапазон 0,4-1,6 м/сек), частоты импульсов, стратегии обработки – соответственно при 3, 4 и 2 уровнях. В результате показано, что все факторы являются значимыми, а максимальная производительность достигается в диапазоне скоростей 0,8-1,2 мм/сек. Определён диапазон значений факторов, для которого достигается высокая производительность  $> 10 \text{ мм}^3/\text{мин}$  при низкой шероховатости ( $< 4 \text{ мкм}$ ). Отметим, что в отличие от [50] многоцелевая оптимизация проведена эвристическим методом, при этом и в [46] и в [50] не проведена проверка адекватности полученных моделей путём дополнительных экспериментов. В [2][82] ПФЭ использован при исследовании микрообработки различных металлов иттербиевым волоконным лазером. Модели зависимости шероховатости, толщины снимаемого слоя и производительности от факторов получены с помощью полиномиальной регрессии. В [82] проведена верификация модели (восемь экспериментов), которая показала, что ошибка моделирования не превышает 15%. В работах не решается задача многоцелевой оптимизации, кроме того, их недостатком является большое число экспериментов (~100).

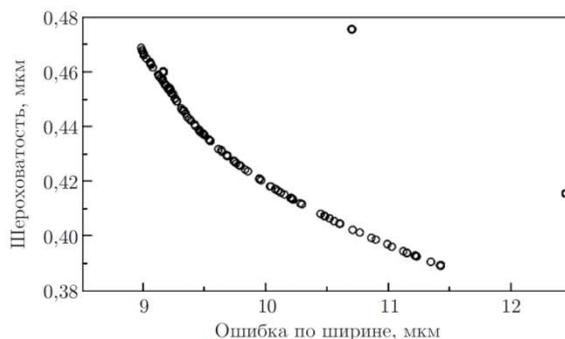


Рис. 16 Оптимальный фронт по Парето для стали при обработке Nd:YAG-лазером [50]. Уменьшение ошибок обработки приводит к увеличению шероховатости поверхности.

#### 1.4.1.2 Центральные композиционные планы (ЦКП)

ЦКП обычно применяются при построении функции отклика ( $y_k$ ) в виде полинома второй степени от факторов ( $x_i$ ), при этом для квадратичной модели требуется меньшее количество экспериментов, чем в ПФЭ:

$$y_k = a_{00} + \sum a_i x_i + \sum a_{ii} x_i^2 + \sum a_{ij} x_i x_j + \varepsilon_k, \quad (1.9)$$

Центральные композиционные планы состоят из трёх наборов экспериментов (Рис. 17): двухуровневого полного факторного эксперимента (уровни -1 и 1); репликаций в центре области экспериментирования; аксиальных точек для всех факторов, смещённых относительно центра плана по оси на величину  $\alpha$ . Требуемое количество экспериментов  $N = 2^k + 2k + u$ , где  $k$  – количество факторов, первый член – это стандартный двухуровневый ПФЭ, второй – аксиальные точки, третий – репликации (обычно 5). Если  $\alpha$  для аксиальных точек равно  $F^{0.25}$  ( $F$  – количество экспериментов в ПФЭ), то такой дизайн называют рототабельным ЦКП. В [83] с помощью ЦКП определены оптимальные режимы обработки керамики  $Al_2TiO_5$  Nd:YAG лазером при пяти факторах. Преимуществом ЦКП по сравнению с ПФЭ является наличие у каждого фактора пяти уровней, что позволило за небольшое число экспериментов (32) получить модель с меньшей средней ошибкой аппроксимации. Аналогичные преимущества показаны в [84–87]. Установлено,

что ЦКП, как и ПФЭ эффективен для получения статистических зависимостей и определения оптимальных режимов лазерной микрообработки, однако применяется только в том случае, если положение оптимума приблизительно известно.

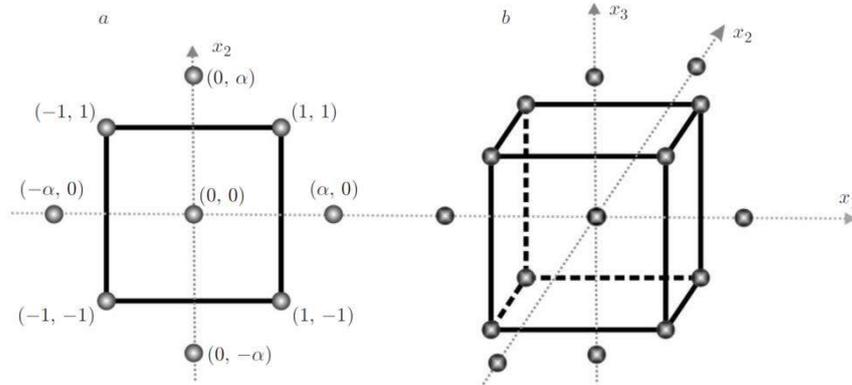


Рис. 17 ЦКП включает точки полного факторного эксперимента (вершины квадрата и куба), аксиальные точки (точки на осях, смещённые на величину  $\alpha$ ) и репликации в центре области эксперимента: (a) – 2 фактора, (b) – 3 фактора

#### 1.4.1.3 Метод Тагучи

Метод Тагучи предложен в 1987 году и используется для быстрого определения значимых факторов [88], в том числе на предварительном этапе перед использованием ЦКП или ПФЭ. Метод устойчив к шумам и неконтролируемым факторам [40]. Значения факторов выбираются так, чтобы присутствовали все их возможные парные комбинации (ортогональная матрица). На Рис. 18 показано расположение точек ортогональной матрицы для 3 факторов и 3 уровней (по три точки снизу, сверху и на центральном срезе куба), количество экспериментов равно 9.

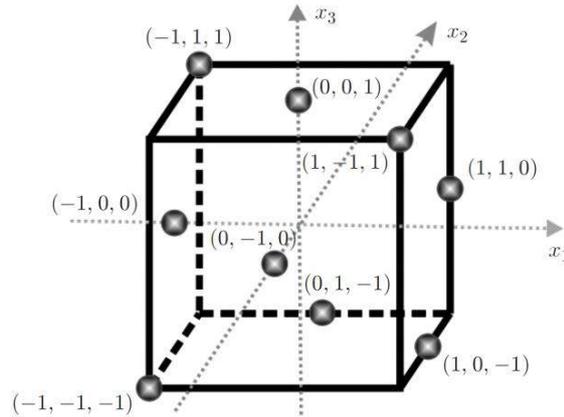


Рис. 18 Точки экспериментирования для метода Тагучи (3 фактора и 3 уровня)

Метод Тагучи использован для определения значимых факторов в задачах создания фотошаблонов Nd:YAG лазером [89] и микрофрезерования стали иттербиевым волоконным лазером [90]. В обоих случаях количество экспериментов меньше 20 при 5 и 4 факторах. Посредством последовательного применения двух методов планирования экспериментов [3] проведена оптимизация режимов микрофрезерования ТА6V-сплава Nd:YAG лазером за небольшое число экспериментов (32) при изначально широком диапазоне значений факторов. Показатели качества: производительность (MRR) и шероховатость Ra. Сначала с помощью метода Тагучи (16 экспериментов) установлено, что из четырёх факторов: выходная мощность, скорость перемещения лазерного пучка, частота импульсов, перекрытие импульсов – значимыми являются только первые два. Затем использован ЦКП (16 экспериментов, 2 фактора в узком диапазоне значений), построена регрессионная модель и определен экстремум функции  $s = MRR/R_a$ , что позволило определить значения факторов, при которых производительность максимальна, а шероховатость меньше пороговой (5 мкм).

#### 1.4.2 Искусственные нейронные сети (ИНС)

Искусственная нейронная сеть является вычислительной системой, состоящей из связанных слоёв, каждый из которых содержит несколько элементарных единиц – искусственных нейронов. Искусственный нейрон

получает на вход сигналы с предыдущего слоя, преобразует их с помощью передаточной функции и подаёт сформированный сигнал на вход нейронам в следующем слое. Искусственные нейронные сети предварительно обучаются на тестовой выборке, что позволяет установить вид передаточной функции для каждого из нейронов. Вследствие заложенного в архитектуру параллелизма ИНС устойчивы к ошибкам в данных и в отличие от полиномиальной регрессии предоставляют возможность описывать сложные, нелинейные связи между факторами. Процесс обучения и адаптации ИНС представлен в [91,92]. В [5] ИНС применена при исследовании микрофрезерования стали Nd:YAG лазером. Проведён ПФЭ (27 экспериментов): 19 наборов данных использованы для обучения, 8 – для тестирования ИНС. Интересно, что в отличие от большинства работ, где тестовыми объектами являлись углубления простейшей формы, здесь формировались микроканалы Т-формы размерами  $4 \times 12 \times 9$  мм (Рис. 19а) и исследовалось влияние технологических режимов обработки на следующие показатели качества: шероховатость дна, отклонение размеров  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  от заданных в САД-модели и производительность. С помощью ИНС определены значения откликов, оптимальные по Парето. В работе [6] исследована зависимость толщины снимаемого слоя стали и высоты облоя от давления сопутствующего газа, выходной мощности, частоты и длительности импульсов Nd:YAG лазера. С помощью ИНС получена модель по результатам 24 экспериментов. По данным 9 тестовых экспериментов показано, что средняя ошибка ИНС не превышает 5%. Проведена многоцелевая оптимизация: для  $5^4$  сгенерированных с помощью ИНС наборов данных построен фронт, оптимальный по Парето (Рис. 19б). С применением ИНС в [93] получена модель, позволяющая оценивать толщину слоя сплава алюминия с магнием, снимаемого при микрофрезеровании Nd:YVO<sub>4</sub> лазером ( $\lambda = 1064$  нм) с ошибкой менее 5%. Выходная мощность, частота и перекрытие импульсов имеют по 2 уровня. Сначала проведён ПФЭ (24 эксперимента) для определения области экспериментирования и значимых факторов. Затем при изменении только двух

факторов (частота и перекрытие импульсов) выполнено ещё 70 экспериментов, по данным которых проведено обучение ИНС.

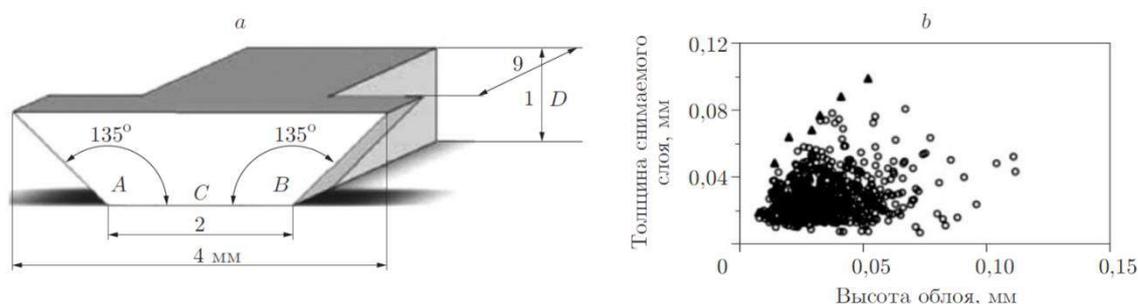


Рис. 19 Микрофрезерование стали Nd:YAG лазером. (a) – CAD-модель формируемого канала Т-формы [5]; (b) – модельная зависимость толщины снимаемого слоя от высоты облоя, полученная с помощью искусственных нейронных сетей [6] (▲ – оптимальное значение, ○ – неоптимальное значение)

В [94] показано, что модель на основе ИНС, точнее описывает данные экспериментов, чем, полученная методом полиномиальной регрессии в задаче прецизионного формирования микроканалов на стекле  $\text{CO}_2$  лазером. Три подхода моделирования (полуаналитический, на основе ИНС и генетического программирования) толщины снимаемого слоя при изменении выходной мощности, скорости обработки, коэффициента поглощения и удельной теплоты испарения использованы при исследовании лазерного микрофрезерования пластика  $\text{CO}_2$  лазером [4]. Обучение и адаптация ИНС проведены по данным 170 экспериментов. Все модели хорошо описывают экспериментальные данные (максимальная ошибка не превышает 10%).

#### 1.4.3 Эволюционное программирование.

Эволюционное программирование включает множество методов (например, генетические алгоритмы [95], метод роя частиц [96]), использующих принципы генетики и эволюционного отбора для решения сложных задач. Применение эволюционного программирования для определения оптимальных параметров лазерной микрообработки является относительно новым, малоизученным подходом, при этом в схожей задаче:

определения оптимальных технологических параметров при механическом фрезеровании – он используется давно и эффективно [97–99] (для увеличения производительности или уменьшения стоимости производства при сохранении высокого качества поверхности). Соответственно некоторые решения могут быть адаптированы для задачи определения оптимальных режимов лазерной микрообработки, более того в [5] [50] для решения сложных задач оптимизации уже использован метод роя частиц.

#### *1.4.4 Экспертные системы (ЭС).*

ЭС используются для решения трудных, слабоструктурированных задач, не имеющих удовлетворительного алгоритмического решения [100]. В информатике ЭС рассматриваются совместно с базами знаний и включают процедуры логического вывода и принятия решений. База знаний ЭС содержит факты (сведения о предметной области) и правила (набор инструкций, благодаря которым можно получать новые факты), при этом решения ЭС могут быть объяснены пользователю на качественном уровне. Главным их преимуществом является использование знаний о моделях и проведённых экспериментах, накопленных за несколько десятилетий применения лазерных технологий. Эффективность ЭС обусловлена в первую очередь размерами базы знаний, которая пополняется при взаимодействии с человеком-экспертом. В [101] описано применение экспертной системы при задании режима лазерной закалки материалов. В системе логического вывода используется подход суждения по прецедентам, т.е. поиск ближайшего по характеристикам эксперимента и адаптация факторов под текущую задачу. В работе [102] создана ЭС для контроля качества селективного лазерного спекания: программа написана на языке CLIPS, разработан набор правил, по которым проводится измерение показателей качества изделия. В патентах [103][104] описано применение ЭС для определения оптимальных параметров лазерной микрообработки, однако нам не удалось найти экспериментального

подтверждения их эффективности. Недостатками ЭС являются необходимость структурирования большого объема данных и использование эвристических алгоритмов. Тем не менее, на наш взгляд, использование ЭС для определения диапазона оптимальных режимов лазерной микрообработки является перспективным подходом.

## **1.5 Выводы**

Таким образом, несмотря на большой опыт, накопленный за время применения лазерных технологий для обработки материалов, и обширные исследования в области взаимодействия лазерного излучения с веществом, математическое моделирование не всегда позволяет точно оценить влияние технологических параметров обработки на размеры и показатели качества объектов. Проведенное исследование показало, что в настоящий момент наиболее подходящим методом определения оптимальных режимов лазерной микрообработки является экспериментальный подход на основе статистических методов анализа экспериментальных данных. Данный подход позволяет получать модели со средней ошибкой на тестовых данных, не превышающей 10%, и определять по ним оптимальные режимы обработки, однако в настоящее время неизвестно, возможно ли его использовать для определения оптимальных параметров при их большом числе и большом числе показателей качества изделия (больше четырех). В этом случае значительно возрастает количество экспериментов и соответственно трудоемкость измерений объектов. Поэтому актуальной является задача разработки специальных методов анализа данных измерений, получаемых с помощью систем технического зрения и оптических профилометров, обеспечивающих как высокое быстродействие, так и высокую достоверность результатов.

## Глава 2 Разработка алгоритма анализа изображений зоны векторной лазерной микрообработки

В настоящей главе исследована проблема контроля качества 2D и 2,5D векторной лазерной микрообработки по изображениям обработанной лазерным излучением поверхности, получаемым с помощью системы технического зрения (СТЗ). Как показано в разделе 1.3.2 изображения структур, формируемых в процессе векторной лазерной обработки поверхности материала, имеют различный контраст, яркость, текстуру, ширину элементов (см. Рис. 13 и Рис. 2). Требуется обеспечить помехоустойчивое выделение их границ на изображении, что обеспечит возможность сравнения геометрических параметров объектов с заданными в CAD-модели значениями. Для выделения контуров объектов известного класса могут быть использованы методы *высокоуровневой сегментации изображений* (семантической сегментации) [105,106]. В нашем случае задача формализуется следующим образом, для каждого вектора  $l_i$  CAD-модели, требуется найти кривую  $C(x_0, y_0)$ , такую что все точки изображения  $I$  между точками границ  $(x_0, y_0)$  принадлежат изображению структурного элемента с индексом  $i$ , сформированного по вектору  $l_i$ . Границами объекта на изображении  $I$  называют точки  $(x_0, y_0)$ , в которых изменение яркости изображения в направлении градиента яркости  $g$  максимально [107].

$$\left. \frac{\partial^2 I(x, y)}{\partial g_0^2} \right|_{(x, y) = (x_0, y_0)} = 0, \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial g_0} = g_0 \nabla, \quad g_0 = g(x_0, y_0) = \frac{\nabla I(x_0, y_0)}{|\nabla I(x_0, y_0)|}.$$

Такой метод определения точек границ является чувствительным к шумам, поэтому в [108] предложено использовать следующее определение: точки  $(x_0, y_0)$  принадлежат кривой  $C$ , если значение градиента в направлении локальной нормали  $n(x_0, y_0)$  к  $C$  максимально:

$$\frac{\partial |\nabla I(C(x_0, y_0))|}{\partial n(C(x_0, y_0))} = 0. \quad (2.2)$$

По результатам выделения контуров объектов должны быть определены следующие показатели качества структурных элементов: ширина и прямолинейность границ, наличие и размеры локальных дефектов обработки, связанных с неоптимальным управлением системой лазерной микрообработки. Вследствие необходимости создания метода контроля качества, применимого и в серийном производстве при измерение объектов на площадях более  $100 \times 100 \text{ мм}^2$ , актуальным является обеспечение высокого быстродействия разрабатываемых решений. Согласно типичным требованиям, предъявляемым к методам контроля качества лазерной микрообработки, обработка изображений зоны лазерной микрообработки площадью  $\sim 10 \text{ мм}^2$ , полученным с разрешением порядка 1 мкм, должна проводиться на персональном компьютере за время менее 1 минуты. Проанализируем возможность использования алгоритмов, применяемых в схожих задачах [109], для решения поставленной задачи. При анализе изображений сетчатки глаза требуется определить размеры и расположение сосудов, что осложняется их пересечением, различием контраста и яркости областей изображения [110]. На рис. 20 приведено типичное изображение и результат его сегментации.

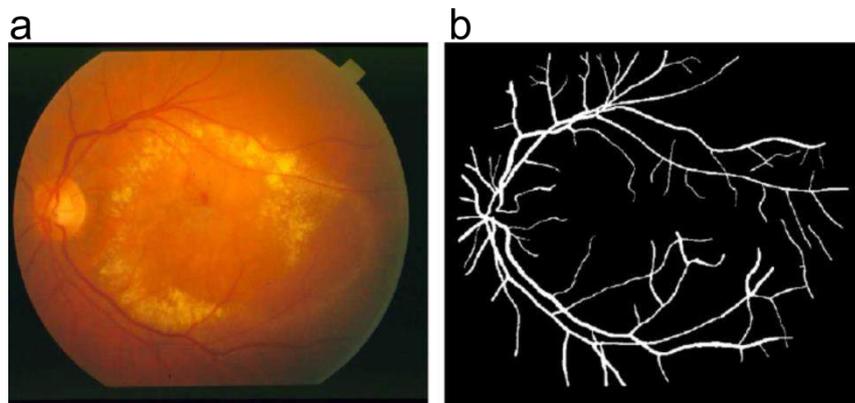


Рис. 20 Выделение границ сосудов на изображении сетчатки глаза. (a) – исходное изображении, (b) – результат высокоуровневой сегментации [111]

Стандартными методами сегментации изображений являются детекторы границ и их модификации [112], согласованные фильтры, морфологические операторы, алгоритмы отслеживания контуров [113], многомасштабные методы, деформируемые модели, методы машинного обучения. В большинстве случаев считается, что поперечный профиль интенсивности сосудов на изображении имеет вид гауссовой функции, поэтому для их выделения используется свертка изображения  $f(x,y)$  с согласованным фильтром  $D(\theta)$  [114] с гауссовой маской, при различных смещениях и поворотах маски относительно изображения:

$$s(x, y) = \max_{\theta} (f(x, y) \otimes D(\theta)), \quad (2.3)$$

где  $\otimes$  - свертка,  $s(x,y)$  – результат действия согласованного фильтра, соответствует максимальному значению свертки, полученному при различных относительных углах поворота  $f(x,y)$  и  $D(\theta)$ . Разделение точек фона и границ сосудов производится с помощью порогового критерия, который задается либо глобально, либо вычисляется адаптивно [111,115]. Алгоритмы отслеживания контуров сосудов имеют высокую помехоустойчивость вследствие того, что поиск точек границ производится последовательно с использованием данных о расположении точек границ, найденных ранее [116].

Для аэрокосмических изображений характерны те же особенности, что и для изображений сетчатки глаза, что обуславливает использование схожих алгоритмов [117,118] для выделения контуров дорог [119] (рис. 21).



Рис. 21 Аэрокосмическое изображение после выделения границ дорог [118].

Метод деформируемых моделей [120] обеспечивает высокую точность сегментации при решении обоих типов задач. Метод основан на итеративной оптимизации энергетического функционала  $E$ :

$$E = \int_0^1 E_{snake}(v(s)) ds = \int_0^1 E_{int}(v(s)) + E_{image}(v(s)) + E_{con}(v(s)) ds, \quad (2.4)$$

$$v(s) = (x(s), y(s)),$$

где  $v(s)$  – кривая, состоящая из точек границ сегментируемой области, расположение и форма которой изменяется в процессе оптимизации,  $E_{int}$  – энергия, зависящая от формы  $v(s)$ ,  $E_{image}$  – энергия, зависящая от яркости точек изображения в окрестности точек  $v(s)$ ,  $E_{con}$  – энергия, описывающая дополнительные ограничения. Для сегментации лент (вытянутых объектов, имеющих симметрию относительно главной оси) в [108] предложена модификация метода деформируемых моделей, в [121–123] рассмотрены методы сегментации лент при их различной топологии и особенностях границ. Главным недостатком метода деформируемых моделей является высокая вычислительная сложность, а также зависимость результатов работы алгоритмов от большого числа параметров.

Рассмотрим возможность применения приведенных алгоритмов для выделения границ объектов на характерном изображении зоны лазерной векторной микрообработки (рис. 22). Обработка проведена Nd:YAG лазером,  $\lambda=1064$  нм,  $\tau = 100$  нс, диаметр сфокусированного пучка 30 мкм, верхний структурный элемент записан при скорости обработки в два раза меньшей, чем нижний; измерение проведено на оптическом микроскопе Leica IM RDB (20x, 5 МПкс) в режиме на отражение.

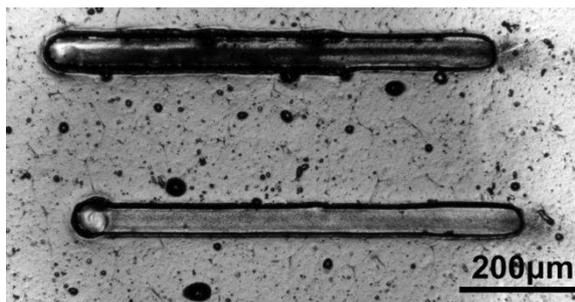


Рис. 22 Изображение структурных элементов на пленке для лазерной микрообработки. Микроскоп Leica IM RDB, объектив 20х.

На изображении видно, что при изменении режима лазерной обработки профиль структурных элементов в поперечном направлении может значительно изменяться, что затрудняет применение согласованных фильтров для выделения таких объектов. При этом на границе структурный элемент – фон изменяется яркость, что предполагает возможность выделения объектов с помощью детекторов границ. Рис. 23 показывает применение оператора Собеля к изображению Рис. 22, видно, что оператор успешно выделил точки не только контура структурных элементов, но и точки неоднородностей фона, разделение которых по яркости затруднительно. Градиент изображения  $\nabla g(x, y)$  вычислялся по формуле [124]:

$$\nabla g(x, y) = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial g}{\partial x} \\ \frac{\partial g}{\partial y} \end{bmatrix}, \quad |\nabla g| = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}, \quad (2.5)$$

где  $G_x$ ,  $G_y$  результаты свертки изображения с масками детекторов границ, ориентированными соответственно в направлениях  $x$ ,  $y$ . Другие детекторы границ (Превитта и Кэнни [107]) также не обеспечили однозначного разделения двух множество точек.

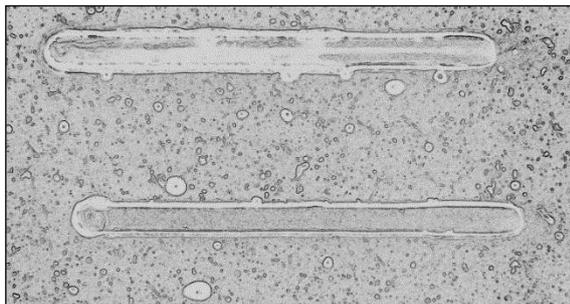


Рис. 23 Свертка изображения с  $3 \times 3$  масками Собеля. Большое значение яркости соответствует большому значению градиента

Метод деформируемых моделей тестировался с помощью программного пакета Creaseg [125], который включает десять современных алгоритмов, каждый из которых настраивается с помощью большого числа параметров (больше 10). Параметры определяют вид функционала  $E$  в формуле 2.4, изменение которого приводит к различным результатам выделения контуров структурных элементов. В процессе тестирования установлено, что для изображения Рис. 22 время выделения структурного элемента ~10 мин. на персональном компьютере с характеристиками Intel Pentium Dual-Core 2,50 ГГц. Так как параметров у каждого алгоритма много, а изображения зоны лазерной микрообработки имеют различные характеристики, то выбор подходящих параметров работы алгоритмов является трудоёмкой задачей. Лучший результат получен с помощью алгоритма [126] (рис. 24), особенностью которого является устойчивое выделение границ объектов на сильно зашумленных изображениях за счёт взвешенного усреднения градиента яркости в локальной окрестности точек.

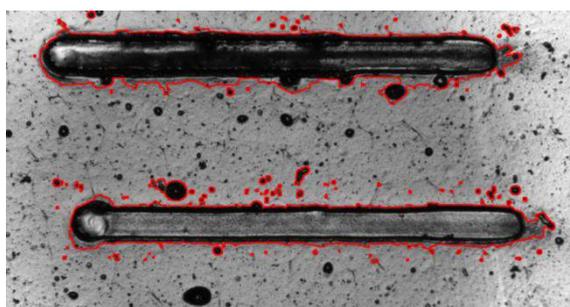


Рис. 24 Контур выделен методом деформируемых моделей [126]

Сегментирование изображения может быть проведено по яркости с помощью порогового преобразования. Глобальное пороговое преобразование – это операция, преобразующая яркость пикселей изображения  $f(x,y)$  по закону:

$$g(x,y) = \begin{cases} 255, & f(x,y) > T \\ 0, & f(x,y) \leq T \end{cases}, \quad (2.6)$$

где  $g(x,y)$  – результат порогового преобразования,  $T$  – значение порога. Результат порогового преобразования зависит от значения порога, выбор которого не однозначен [127]. На Рис. 25а показан результат пороговой обработки рис. 22 при глобальном пороге равном 75, вычисленном с помощью алгоритма Оцу [128], и гистограмма изображения (Рис. 25b). Установлено, что пороговая обработка не позволяет однозначно выделить контур объектов и соответственно неэффективна при необходимости точных измерений объектов.

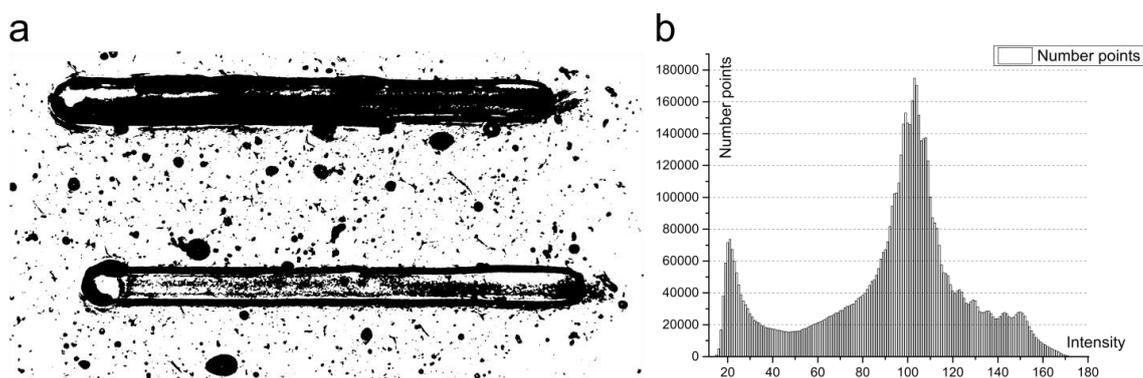


Рис. 25 Пороговое преобразование. (а) – при значении порога 75, (b) – гистограмма изображения

Проведенное исследование показывает, что алгоритмы обработки изображений, используемые для высокоуровневой сегментации изображений в схожих задачах, напрямую не применимы для сегментации изображений зоны лазерной микрообработки, вследствие особенностей изображений, отмеченных ранее, поэтому требуется разработка нового алгоритма.

## 2.1 Алгоритм выделения границ структурных элементов

Для выделения границ структурных элементов на изображениях зоны векторной лазерной микрообработки предложен метод, использующий совмещение с исходной CAD-моделью лазерной микрообработки и последовательное выделение границ в перпендикулярном направлении к каждому вектору CAD-модели. Первоначально производится совмещение изображения с CAD-моделью обработки, что может быть проведено посредством калибровки системы технического зрения (СТЗ) при встраивании её в систему лазерной микрообработки, либо посредством использования алгоритмов совмещения. После чего, зная характерную ширину структурного элемента, каждому вектору CAD-модели в соответствие можно поставить прямоугольную область на изображении – «зону интереса» (Рис. 26).

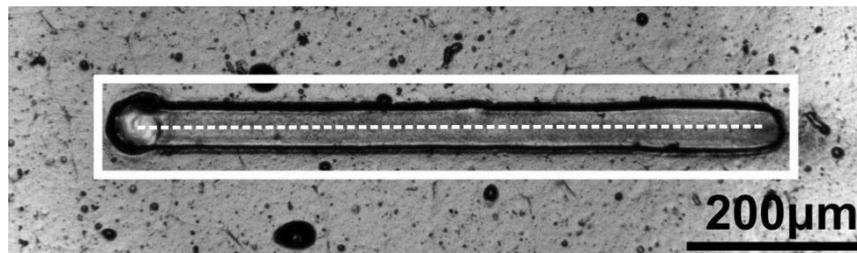


Рис. 26 Структурный элемент, вектор CAD-модели (штриховая линия) и его зона интереса (белый прямоугольник)

Затем последовательно для каждого вектора CAD-модели производится поиск точек контуров в зоне интереса поточечно в поперечном направлении к вектору CAD-модели. Схема работы алгоритма выделения границ приведена на Рис. 27. При выделении границ (5)-(6) структурного элемента точка (1) с индексом  $i$  перемещается по направлению вектора (2) в пределах зоны интереса, стрелки (3)-(4) показывают направление поиска.

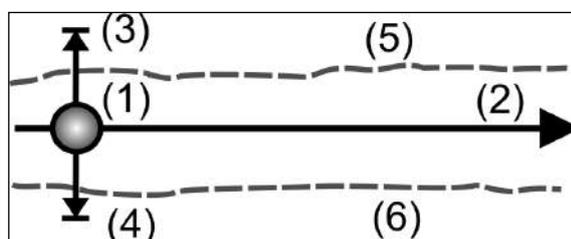


Рис. 27 Схема выделения точек границ (5)-(6). (1) – точка на векторе САД-модели (2); (3)-(4) – направление нормали

Экспериментально установлено, что для характерных изображений зоны лазерной микрообработки, получаемых на оптическом микроскопе или с помощью СТЗ в режиме на отражение, наиболее подходящим критерием является максимальный градиент яркости в поперечном направлении (3)-(4). Определение точек границ (5)(6) производится посредством вычисления взаимной корреляции поперечного профиля яркости структурного элемента (направления (3)-(4)) с одномерным детектором границ  $D$  с маской (1;1;0;-1;-1). Введем корреляционные функции  $H_i^1(x, y)$  и  $H_i^2(x, y)$ :

$$\begin{aligned} H_i^1(x, y) &= P_i^1(x, y) \otimes D, \\ H_i^2(x, y) &= P_i^2(x, y) \otimes D \end{aligned} \quad (2.7)$$

где  $P_i^1(x, y)$  и  $P_i^2(x, y)$  - профили яркости структурного элемента соответственно в направлениях (3)(4) для точки с индексом  $i$ ,  $\otimes$  - свертка, границами считаются точки  $(x_i^1, y_i^1)$  и  $(x_i^2, y_i^2)$ , в которых значение корреляционных функций максимально. По точкам границ определяется множество точек  $(x_s, y_s)$  равноудаленных от соответствующих точек границ. Такие точки называются скелетом структурного элемента (Рис. 28).

$$(x_i^s, y_i^s) = \left( \frac{x_i^1 + x_i^2}{2}, \frac{y_i^1 + y_i^2}{2} \right). \quad (2.8)$$

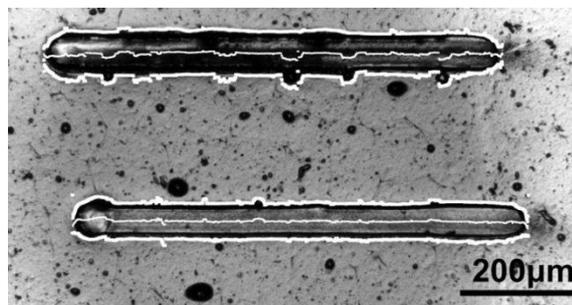


Рис. 28 Выделение границ структурных элементов и определение точек скелета

Вычисление средней ширины структурного элемента ( $w$ ) и величины отклонения от прямолинейности границ ( $\sigma_w$ ) производится по формуле 2.9.

$$w_i = \sqrt{(x_i^1 - x_i^2)^2 + (y_i^1 - y_i^2)^2}, w = \frac{\sum_{i=1}^N w_i}{N},$$

$$\sigma_w = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (w_i - w)^2}{N}},$$
(2.9)

где  $N$  – количество точек (1), для которых проводился поиск границ,  $w_i$  – расстояние между границами с индексом  $i$ . Ширина структурного элемента соответствует размеру зоны термического влияния, а величина отклонения от прямолинейности показывает наличие и размеры неоднородностей и дефектов (например, сколов, грат), полученных в процессе формообразования. В зависимости от требований задачи изгибы и отклонения структурного элемента могут быть автоматически локализованы на изображении. На Рис. 29 изгибы контура найдены с помощью метода скользящего окна (размер 30 точек), который выделяет точки, смещенные относительно соседних точек больше чем на  $3\sigma$  от средней ширины.

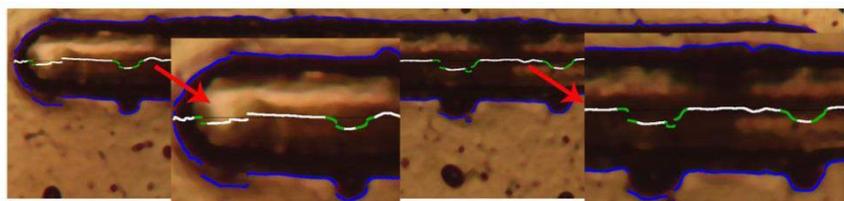


Рис. 29 Фильтрация (белые точки – скелет, зеленные – выбросы, которые в дальнейшем не рассматриваются, синие точки – точки границы).

## 2.2 Результаты

Рассмотрим тестирование разработанного метода контроля качества векторной лазерной микрообработки, проведённое как с использованием искусственных изображений, так и данных тестовых экспериментов.

### 2.2.1 Разработка метода математического моделирования изображений структурных элементов

В настоящей главе описан метод получения искусственных изображений структурных элементов с границами сложной формы при различном отношении сигнал-шум. Компьютерное моделирование позволяет получить большое количество изображений структурных элементов с различной яркостью, формой, шириной, отклонением границ от прямолинейности, при учёте искажений, возникающих при получении изображений с помощью видеокамеры. В отличие от экспериментального подхода такой метод получения тестовых данных является менее трудоёмким и времязатратным, так как не требует проведения реальных экспериментов и измерений и позволяет установить погрешности работы алгоритма на большом количестве данных. Моделирование микроскопических изображений является сложной задачей, требует применения методов физической оптики в сочетании с радио-оптическим подходом к физике дифракции [129]. В общем случае производится моделирование функции отражения (пропускания) образцов и процесса формирования изображений на оптико-электронном устройстве, используемом при их получении. В нашей задаче процесс моделирования можно описать следующей последовательностью шагов:

1. Моделирование профилей необработанной лазером поверхности  $S(x,y)$ ;
2. Построение 3D модели поверхности  $M(x,y)$ , получаемой в процессе векторной лазерной микрообработки поверхности  $S(x,y)$ ;
3. Моделирование процесса формирования изображения поверхности  $M(x,y)$  на цифровой матрице оптической измерительной системы.

Поверхность материала  $S(x,y)$  может быть описана с помощью совокупности случайной и периодической функций высоты и наклона микронеровностей [130]. Для приблизительного описания шероховатой поверхности  $S(x,y)$ , распределение высот  $\xi$  неровностей которой подчиняется нормальному закону, обычно используется набор статистических параметров:

дисперсию  $\sigma$ , средний угол наклона микронеровностей  $\gamma$ , радиус корреляции  $l$  и тип корреляционной функции  $W$ . Для расчётов профилограммы поверхности  $M(x,y)$  могут быть применены методы математического моделирования взаимодействия лазерного излучения с веществом. Однако, как показано в главе 1 математические модели описывают образование дефектов (грата, сколов, микротрещин) и других неоднородностей недостаточно эффективно, более того они не позволяют оценить распределение микро-неровностей на стенках и дне микроканалов. Для расчёта рассеяния и отражения излучения неоднородной поверхностью при попадании на неё светового потока используются различные методы: метод Кирхгофа, метод возмущений, двухмасштабная модель, метод Вороновича, метод квантовой аналогии – однако, все они имеют ограничения и недостаточно точны для реальных поверхностей [130].

Моделирование всех приведенных шагов трудоёмко, поэтому в предложенном методе получения искусственных изображений учитывается только шаг формирования изображения на цифровой матрице измерительной системы. Согласно [124] входное изображение  $f(x,y)$  можно упрощено представить в виде произведения величины светового потока  $i(x,y)$  от источника освещения и относительной доли светового потока  $r(x,y)$ , отраженного и рассеянного сценой и зарегистрированного видеокамерой:

$$\begin{aligned} f(x,y) &= i(x,y)r(x,y), \\ 0 \leq r(x,y) &\leq 1. \end{aligned} \tag{2.10}$$

При регистрации изображения с помощью системы технического зрения входное изображение  $f(x,y)$  претерпевает искажения, которые можно представить в виде пространственно-инвариантной системы с импульсным откликом  $h(x,y)$  и в появлении случайных шумов  $n(x,y)$  [124][131]. Возникновение цифрового шума изображения определяется процессами получения изображения (темновые токи, дефекты матрицы), квантования и дискретизации. Выходное изображение представимо в следующем виде:

$$g(x, y) = f(x, y) \otimes h(x, y) + n(x, y), \quad (2.11)$$

где  $\otimes$  - оператор свертки. Для восстановления входного изображения  $f(x, y)$  требуется знать вид импульсного отклика  $h(x, y)$  оптической системы и спектральной мощности шума  $n(x, y)$ , которые, однако, в большинстве случаев неизвестны, что объясняет необходимость работы с изображением  $g(x, y)$ . В разрабатываемом методе моделирования считается, что искажения, вносимые оптической системой, приводят к размытию входного изображения, что связано с дифракционным пределом оптико-электронной измерительной системы; шум является Гауссовым, имеет нулевое среднее значение, не коррелирует с самим изображением и не зависит от пространственных координат. При этом вид импульсного отклика определяется функцией рассеяния точки для данной оптической системы, и может быть представлен в виде Гауссовой функции 2.12, а функция плотности распределения вероятности шума задаётся уравнением 2.13.

$$h(x, y) = \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2p^2}\right), \quad (2.12)$$

$$\psi(z) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{2\sigma^2}\right), \quad (2.13)$$

где  $p$  – среднеквадратичное отклонение, определяющее степень размытия изображения, а  $\sigma$  – среднеквадратичное отклонение случайной величины.

Предложен способ получения изображений структурных элементов с различной формой границ и распределением коэффициента отражения излучения  $r(x, y)$  в приближении, что освещение сцены  $i(x, y)$  равномерно; схема приведена на Рис. 30.

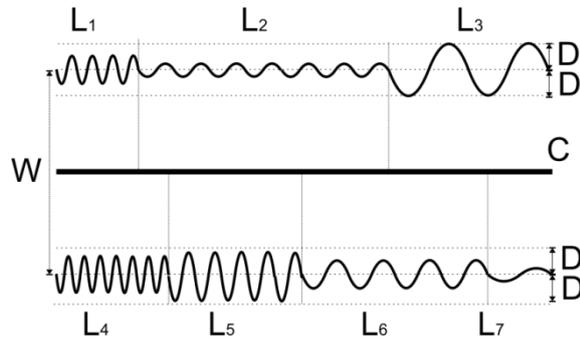


Рис. 30 Способ, показывающий получение изображения структурных элементов с границами сложной формы. «С» - центральная линия, «L<sub>1</sub> – L<sub>3</sub>» - верхняя граница структурного элемента; «L<sub>4</sub>-L<sub>7</sub>» – нижняя граница структурного элемента. «W» - средняя ширина; «D»- определяет максимальный диапазон колебаний границ в поперечном направлении

Для каждого искусственного изображения задаётся средняя ширина структурного элемента ( $W$ ), вся длина структурного элемента  $L$  разбивается на интервалы с длинами  $L_1-L_7$ . При этом  $j$  интервалу принадлежит  $N_j$  точек границ, для каждой точки интервала с индексом  $i$  ( $i \in [1; N_j]$ ) вычисляется смещение в поперечном к оси  $C$  направлении с использованием гармонической функции, что позволяет задать различные колебания границ объектов:

$$shift_i = A \sin\left(\frac{2.0\pi i}{T}\right), \quad (2.14)$$

где  $A$  – амплитуда,  $T$  – период. Для получения различных изображений и проведения статистического анализа погрешностей работы алгоритма используется функция  $random(x; y)$ , возвращающая случайное число, равномерно распределенное в диапазоне  $(x; y)$ . При получении изображений использованы значения параметров, приведенные в таблице 1.

Таблица 1 Значения параметров, использованные при получении искусственных изображений

Параметр	Описание параметра	Значение параметра
$W$	Ширина структурного элемента (пкс.)	$random(50; 100)$
$D$	Максимальное изменение ширины	$W/5$

	(пксл.)	
$L_j$	Длина $j$ участка элемента (пксл.)	$random(L/5; L)$ ,
$A_j$	Амплитуда колебаний на $j$ участке элемента (пксл.)	$random(0; D)$
$T_j$	Период колебаний на $j$ участке структурного элемента (пксл.)	$L_j/random(1; 10)$ .
$r_1$	Коэффициент отражения структурного элемента	$0,2+random(-0,2; 0,2)$
$r_2$	Коэффициент отражения фона	$0,8+random(-0,05; 0,05)$
$i_0$	Уровень освещения	255
$p$	Размытие изображения	1
$\sigma_{noise}$	Дисперсия шума	от 0 до 60,0.
$\delta s$	Ошибка позиционирования	$random(-2; 2)$
$W_s$	Характерная ширина структурного элемента	$W+random(-D; D)$
$W_z$	Ширина зоны интереса структурного элемента	$4W_s$

При стандартном разрешении системы технического зрения 0,2-1 мкм средняя ширина структурного элемента  $W_{model}$  принимает значения в диапазоне 10-100 мкм. Точкам изображений задавались различные коэффициенты отражения излучения, степень размытия изображения  $p = 1$ ; уровень шума  $\sigma_{noise}$  варьировался от 0,0 до 60,0 (формулы 2.10-2.11). При совмещении вектора  $C$  с изображением структурного элемента считается, что возможна ошибка позиционирования в поперечном направлении  $\delta s$ .

В результате при различных значениях уровня шума ( $\sigma_{noise}$ ) получено по  $N=1000$  изображений, для которых проведено выделение границ с помощью разработанного алгоритма. На Рис. 31 приведены примеры моделируемых изображений.

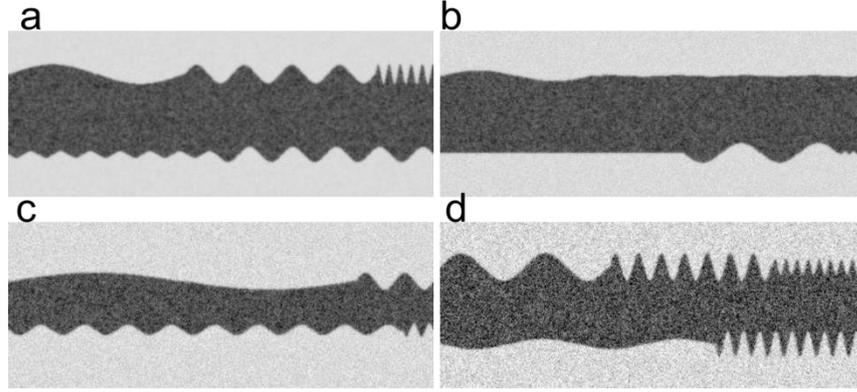


Рис. 31 Искусственные изображения структурных элементов, полученные при различном Гауссовом шуме. (a-d) –  $\sigma$  соответственно 0, 10, 20, 40

Отношение сигнал-шум ( $SNR$  – signal to noise ratio) для изображений вычислялось по формуле:

$$SNR = \frac{\mu_{signal}}{\sigma_{signal}} = \frac{\mu_{r_2} i_0}{\sigma_{noise}}, \quad (2.15)$$

где  $\mu_{signal}$  – среднее значение яркости фона,  $\sigma_{signal}$  – стандартное отклонение яркости сигнала,  $\mu_{r_2}$  – среднее значение коэффициента отражения фона. Оценка погрешностей работы алгоритма проведена по критериям:

$$\Delta w^i = \left| W_{model}^i - W_{measured}^i \right|, \quad \Delta w = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta w^i}{N}, \quad i \in [1; N],$$

$$\delta w^i = \frac{\Delta w^i}{W_{model}^i}, \quad \delta w = \frac{\sum_{i=1}^N \delta w^i}{N}, \quad (2.16)$$

$$\max_{\Delta w} = \max_{i=1;N}(\Delta w^i), \quad \max_{\delta w} = \max_{i=1;N}(\delta w^i),$$

где  $N$  – количество искусственных изображений,  $\Delta w$  – абсолютная погрешность определения ширины,  $\delta w$  – относительная погрешность определения ширины,  $\max(x)$  – функция, определяющая максимальное значение элемента в массиве данных. В Таблица 2. приведены результаты работы алгоритма. Установлено, что максимальная погрешность при определении

ширины структурных элементов для изображений с отношением сигнал-шум ( $SNR$ ) не ниже 10 не превышает 1%.

Таблица 2. Оценка погрешностей работы алгоритма.

$\sigma_{\text{noise}}$	SNR	$\Delta w$ (пиксел)	$\delta w$ (%)	$\max_{\Delta w}$ (пиксел)	$\max_{\delta w}$ (%)
0	-	0,1	0,13	0,41	0,52
10	20	0,1	0,13	0,51	0,53
20	10	0,13	0,17	0,79	0,89
30	7	0,28	0,36	2,5	2,9
40	5	0,91	1,14	4,38	4,71

Дополнительно исследована возможность применения разработанного алгоритма для анализа зашумленных изображений ( $SNR$  ниже 10), результаты приведены в Таблица 3. Установлено, что предварительная низкочастотная фильтрация (фильтром Гаусса,  $\sigma = 1.0$ ) повышает устойчивость работы алгоритма, при этом для изображений с  $SNR$  не ниже 5 максимальная погрешность на модельных данных не превышает 1%.

Таблица 3 Оценка погрешностей работы алгоритма для сильно зашумленных изображений.

$\sigma_{\text{noise}}$	SNR	$\Delta w$ (пиксел)	$\delta w$ (%)	$\max_{\Delta w}$ (пиксел)	$\max_{\delta w}$ (%)
0	-	0,1	0,13	0,68	0,76
10	20	0,1	0,13	0,69	0,76
40	5	0,11	0,15	0,67	0,7
60	3,5	0,13	0,17	1,14	1,31

Таким образом, проведено исследование эффективности разработанного алгоритма выделения границ на большом числе искусственных изображений структурных элементов при изменении формы их границ в диапазоне  $\pm 20\%$  от максимальной ширины, яркости точек структурного элемента в диапазоне

$\pm 100\%$ , яркости точек фона в диапазоне  $\pm 6\%$  и отношения сигнал-шум изображений – 3,5-20. Установлено, что при средней ширине структурных элементов на изображении менее 100 пикселей максимальные погрешности не превышают 1% для изображений, отношение сигнал-шум которых не ниже 5.

### 2.2.2 Тестирование алгоритма на реальных изображениях зоны векторной микрообработки

Ниже приведено тестирование разработанного метода контроля качества векторной лазерной микрообработки, проведенное с использованием объектов, сформированных на системе лазерной микрообработки, разработанной в ИАиЭ СО РАН и аналогичной устройствам [132,133]. На Рис. 32 показана функциональная схема устройства. Источником излучения является Nd:YAG лазер (мощность 20 Вт,  $\lambda = 1064$  нм,  $\tau = 100$  нс). Сканирующая головка содержит сканеры СТ 6420 и объектив плоского поля с областью записи  $50 \times 50$  мм<sup>2</sup>, размером сфокусированного пятна 10 мкм и обеспечивает разрешение 0,3 мкм в поле 20 мм. Перемещение сканирующей головки по всему полю  $300 \times 200$  мм<sup>2</sup> записи производится сервоприводами портального механизма.

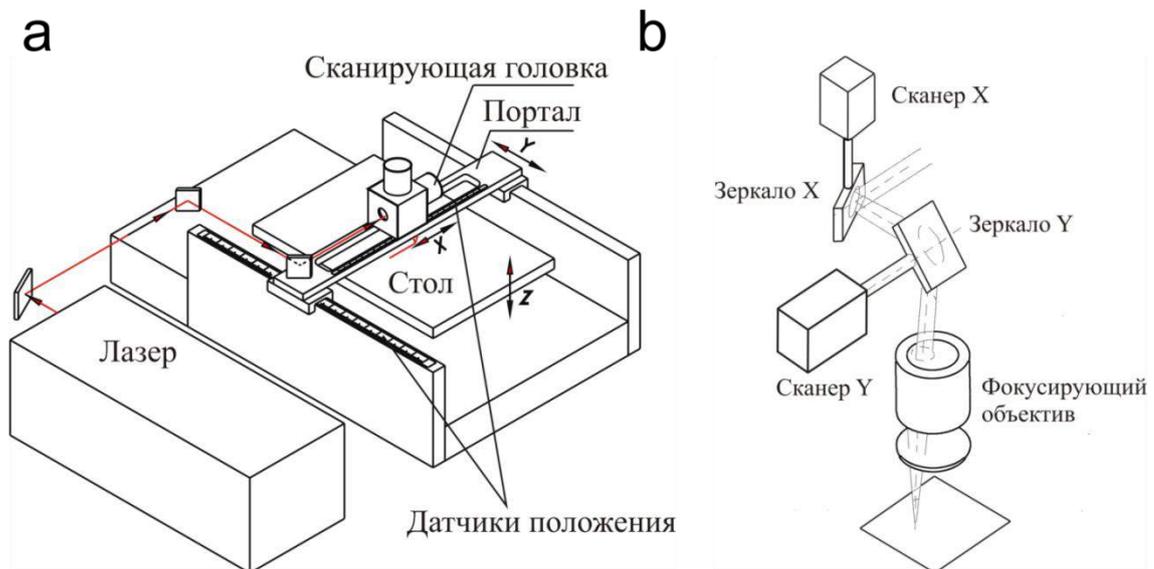


Рис. 32 Функциональная схема системы лазерной микрообработки. а) – общий вид; б) – сканирующая головка

В систему лазерной микрообработки перпендикулярно плоскости обработки встроена система технического зрения (СТЗ), которая содержит высокоразрешающую видеокамеру с телецентрическим 1,7 кратным объективом, матрицу 5 МПкс и кольцевой бестеновой осветитель. Разрешение в плоскости изображения 1,26 мкм, размер зоны контроля  $2,7 \times 2$  мм<sup>2</sup>. С помощью предварительной калибровки определены смещения систем координат СТЗ и системы лазерной микрообработки, что позволило автоматизировать совмещение изображений с САД-моделью. Автором реализованы специальные программные средства для автоматизации измерений: алгоритм автоматической фокусировки и совмещения (сшивки) изображений на основе алгоритмов, предложенных в [134,135], позволяющие получать изображения большой зоны лазерной микрообработки (больше  $10 \times 10$  мм<sup>2</sup>) с высоким суммарным разрешением (больше 1 ГПкс). Экспериментально установлено, что погрешность фокусировки не превышает 20 мкм, при глубине фокуса видеокамеры 100 мкм, а сшивки 10 мкм во всём поле обработки.

С помощью приведенной системы лазерной микрообработки проведена запись серии тестовых объектов на различных материалах, после чего получены их изображения. На Рис. 33 показан результат выделения границ структурных элементов, сформированных на пленке для лазерной микрообработки и на стали. Успешно выделены локальные дефекты (изгибы) (Рис. 33а) и структуры, состоящие из нескольких структурных элементов (Рис. 33б). Время анализа таких изображений на персональном компьютере Intel Pentium Dual-Core 2,50 ГГц составляет менее 1 секунды.

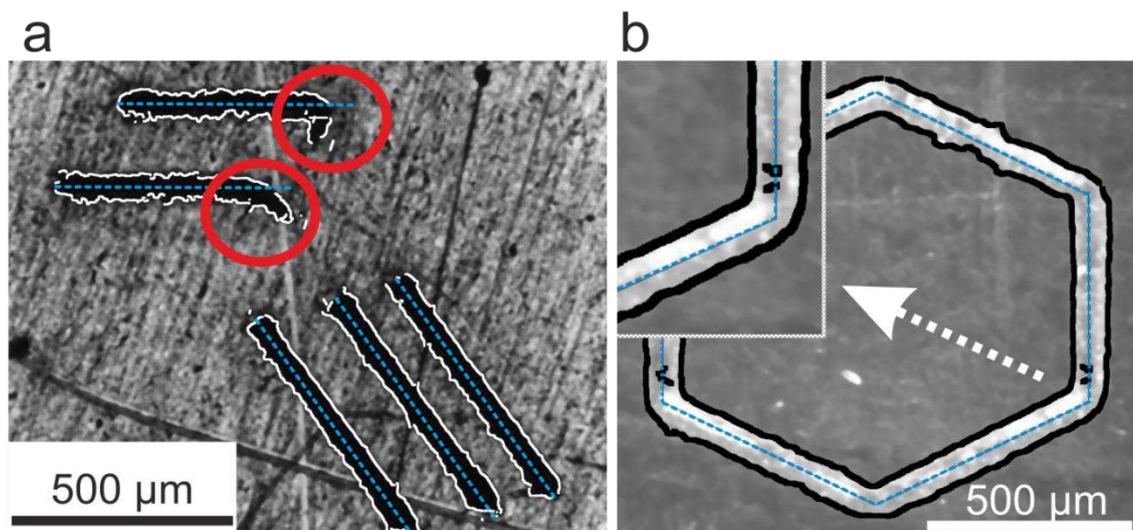


Рис. 33 Выделение границ структур. Штриховая линия – векторы САD-модели.  
 (а) – выделение изгибов структурных элементов (круги); (b) – выделение связанных структурных элементов, сформированных на стальной подложке.

Исследована погрешность определения размеров объектов, посредством сравнения с результатами измерений, полученных оператором «вручную» по изображениям оптического и конфокального микроскопов. В последних двух случаях ширина определялась посредством усреднения 10 значений в различных положениях структурного элемента. Тестовым объектом является сетка, сформированная на стали, изображения которой приведены на Рис. 34. Результаты измерений представлены в Таблица 4, сделан вывод, что при разрешении системы технического зрения  $\sim 1$  мкм и ширине структурного элемента менее 50 мкм средняя погрешность измерений не превышает 10%.

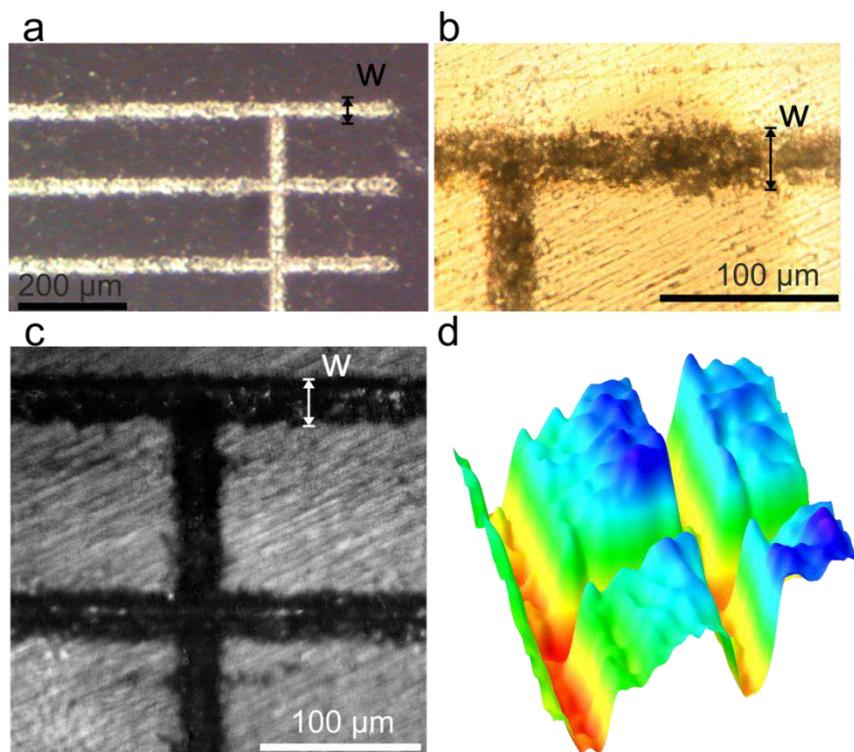


Рис. 34 Изображения сетки, сформированной на стали. (a) – изображение, полученное с помощью системы технического зрения; (b) – измерение на оптическом микроскопе Leica IM RDB (40x); (c) изображение расширенного фокуса, восстановленное по изображениям оптических срезов, полученных на конфокальном микроскопе, с помощью алгоритма [136]; (d) – 3D модель поверхности (c); ( $w$ ) – ширина структурного элемента

Таблица 4 Определение погрешностей измерения ширины

	СТЗ	Оптический микроскоп	Конфокальный микроскоп
Средняя ширина (мкм)	30,51	29,12	31,53
Стандартное отклонение (мкм)	2,6	3,13	1,95
Разрешение (мкм\пксл)	1,26	0,05	0,5

### 2.3 Выводы

Разработан метод определения размеров структур, формируемых в процессе векторной лазерной микрообработки. Измерения производятся автоматически по изображениям, получаемым с помощью системы технического зрения. Алгоритм основан на совмещении изображения зоны лазерной микрообработки с САД-моделью и выделении контуров объектов с помощью детектора границ в поперечном направлении к каждому вектору САД-модели. Метод позволяет определить ширину, прямолинейность границ структурных элементов и выделить локальные дефекты, связанные с неоптимальным управлением и синхронизацией компонент системы лазерной микрообработки. На модельных данных, показано, что максимальная погрешность определения ширины не превышает 1% при отношении сигнал-шум изображений не ниже 5 и ширине объектов менее 100 пикселей. На экспериментальных данных получено, что при разрешении системы технического зрения  $\sim 1$  мкм, ширине объектов менее 50 мкм средняя погрешность измерений не превышает 10%, а время обработки данных – 1 минуты для площади  $10 \text{ мм}^2$ .

## **Глава 3 Разработка алгоритма анализа профилограмм поверхности, обработанной лазерным излучением**

Настоящая глава посвящена исследованию эффективности применения оптических методов для измерения профиля поверхности, обработанной лазерным излучением, и разработке метода контроля качества объектов, формируемых в процессе 3D лазерной микрообработки.

### **3.1 Исследование эффективности оптических методов для измерения микротопографии поверхности**

В настоящем разделе экспериментально исследована эффективность различных коммерческих систем оптической профилометрии для измерения микротопографии объектов, формируемых в процессе 3D лазерной микрообработки вещества. Тестовый объект сформирован на подложке из сплава магния (Рис. 35с) по САD-модели (Рис. 35а,б), состоящей из 25 ступенек разной высоты с размерами  $100 \times 100$  мкм<sup>2</sup>. Особенности САD-модели: компактный размер  $500 \times 500$  мкм, большое количество слоев, различные сочетание высот соседних ступенек. Микрофрезерование проведено на системе лазерной микрообработки аналогичной [132] при параметрах: выходная мощность 12,3 Вт,  $\tau = 10$  нс, скорость обработки 50 мм/с, частота импульсов 40 кГц,  $\lambda = 1064$  нм, размер пятна фокусировки 20 мкм – при этом центральная ступенька не удалялась лазером, ступенька правее центральной снималась на первом слое, и.т.д.

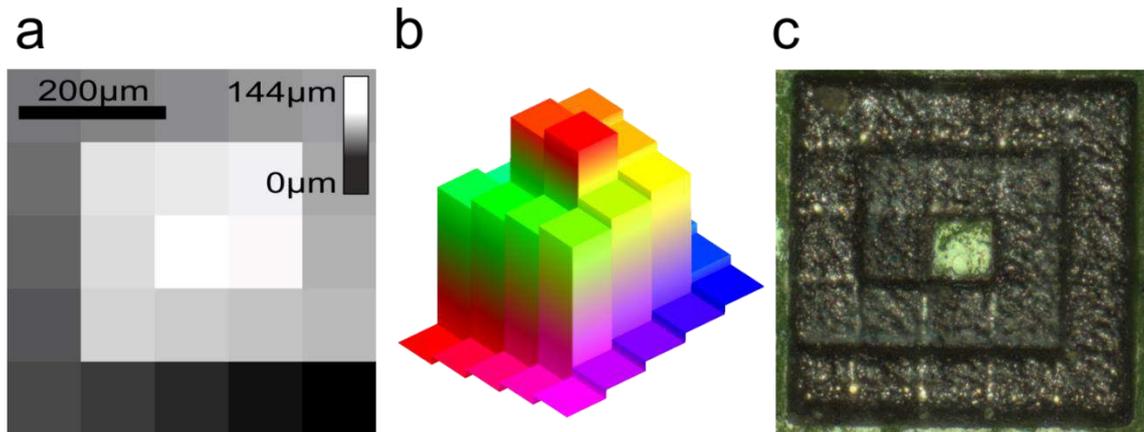


Рис. 35 Тестовый объект и его модель. (а) – карта высот CAD-модели, (b) – 3D визуализация, (с) – изображение сформированного объекта.

Измерения проведены на следующих системах, при указанных параметрах:

- 1) Конфокальный микроскоп Carl Zeiss LSM 700: аксиальный шаг 2,2 мкм, 20x объектив, длина волны 455 нм, время измерения 10 минут;
- 2) Оптический микроскоп Carl Zeiss Axio Observer, 3D измерения с помощью метода вариации фокуса [137]: аксиальный шаг 3 мкм, 10x объектив, время измерения 1 минута;
- 3) Оптический микроскоп Carl Zeiss Axio Imager X2, 3D измерения с помощью метода структурного освещения на основе фазового сдвига [138]: 20x объектив, время измерений 3 минуты.

Во всех трёх методах проводится вертикальное сканирование объекта, т.е. формируется стек изображений оптических срезов, по которым с помощью программных методов формируется карта высот поверхности. В результате установлено, что карта высот, полученная с помощью конфокального микроскопа (Рис. 36а), имеет лучшее отношение сигнал-шум (выше на 30%), чем карта высот, полученная на оптическом микроскопе Carl Zeiss Axio Observer (Рис. 36б). При восстановлении карты высот по данным Carl Zeiss Axio Observer применялись два подхода: алгоритм на основе максимальной дисперсии яркости и алгоритм на основе вейвлет-преобразования [136].

Установлено, что восстановление профилограммы с помощью метода вариации фокуса неоднозначно и зависит от выбора критерия контраста [139], при этом на наклонных поверхностях тестового объекта различие может достигать 10 мкм. Метод структурного освещения оказался неэффективным, т.к. при получении изображения проецируемые на поверхность объекта шаблоны освещения имеют низкий контраст, что объясняется ограничением чувствительности видеокамеры и приводит к значительным ошибкам при восстановлении профилограммы поверхности.

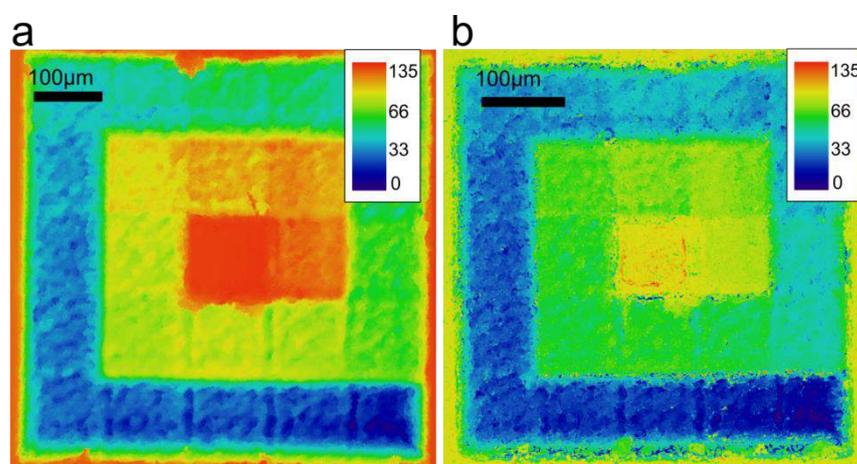


Рис. 36 Карты высот тестового объекта, полученные с помощью конфокального микроскопа (а) и метода вариации фокуса (б).

В Таблица 5 структурированы преимущества и ограничения методов измерения микро- рельефа поверхности, сформулированные на основе проведенного исследования и анализа литературы [58][140].

Таблица 5 Анализ методов 3D измерений микро- объектов

Принцип измерения	Преимущества	Ограничения
Контактная профилометрия	Большой диапазон XYZ, контакт с поверхностью образца	Возможность повреждения поверхности образца, низкое разрешение
Вариация фокуса [137]	Возможность измерения высококонтрастных объектов	Сложность измерения гладких поверхностей, разрешение XYZ не выше 0,5 мкм, неоднозначность

Интерферометрия белого света [141]	Высокое быстродействие и разрешение Z (выше 100 нм)	выбора критерия для оценки контраста Разрешение XY не выше 0,5 мкм, максимальный угол наклона 30°
Конфокальная микроскопия [59]	Высокое разрешение XYZ (до 100 нм), максимальный угол наклона выше 70°	Сложность измерения высококонтрастных объектов
Конфокальная хроматическая микроскопия [142]	Высокое разрешение Z (выше 100 нм), возможность измерения высококонтрастных объектов	Разрешение XY не выше 0,5 мкм, Низкое быстродействие (~10000 точек\сек)
Структурное освещение [138]	Высокое разрешение Z для гладких объектов ([143])	Разрешение XY не выше 0,5 мкм, разрешение Z для шероховатых объектов – 0,5 мкм, сложность измерения высококонтрастных объектов
Сканирующая электронная микроскопия	Высокое разрешение XY (нм) и быстродействие	Сложность измерения профиля объекта, требуется предварительная подготовка образца
Сканирующая зондовая микроскопия	Высокое разрешение XYZ (нм)	Низкое быстродействие, ограниченный диапазон XYZ

В результате проведенного исследования установлено, что сканирующая лазерная конфокальная микроскопия является наиболее подходящими методом измерения трехмерных объектов с размерами до сотен миллиметров и структурными элементами в диапазоне от 0,1 до 10 мкм, т.к. обеспечивает высокое разрешение XYZ (до 100 нм), быстродействие (до  $10^6$  точек в секунду) и позволяет измерять объекты с углом наклона стенок выше 70°. Большинство карт высот объектов, приведенных далее получено с помощью конфокального лазерного сканирующего микроскопа Carl Zeiss LSM 700 (Рис. 37).

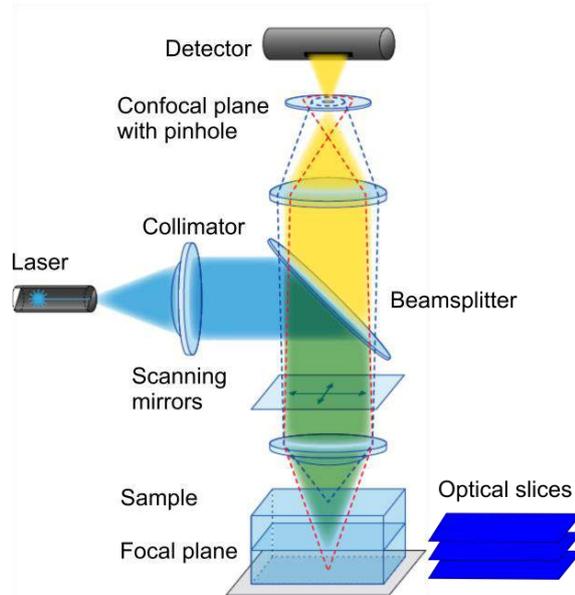


Рис. 37 Схема конфокального лазерного сканирующего микроскопа Carl Zeiss LSM 700.

### 3.2 Алгоритм совмещения изображений

После проведения измерений основной задачей является сопоставление CAD-модели объекта и профилограммы поверхности. В случае лазерного микрофрезерования задача формализуется следующим образом: для карт высот  $I_1(x,y)$  и  $I_2(x,y)$  необходимо оптимизировать функционал  $S(g,h)$ , т.е. определить пространственное преобразование  $g$  и преобразование яркости  $h$  точек  $(x,y)$ , при которых мера близости изображений  $E_{image}$  минимальна:

$$S(g,h) = E_{image}(I_1(x,y), h(I_2(g(x,y)))) \rightarrow \min_{g,h} \quad (3.1)$$

В качестве меры близости могут быть использованы различные критерии, например среднеквадратичное отклонение. В данной задаче мы считаем, что  $h$  задаёт ортогональное преобразование, т.е. задача совмещения имеет три степени свободы: смещение XY и угол поворота в плоскости XY. Масштабные коэффициенты известны из настроек оборудования, смещение в направлении Z проводится так, чтобы совместить уровни необработанной или наименее обработанной лазером поверхности. Рис. 38 демонстрирует результат

совмещения карт высот, приведенных на Рис. 12 (совмещение проведено оператором «вручную»). Шкала справа демонстрирует отклонение карт высот по глубине: положительные и отрицательные значения соответственно показывают, что материала удалено меньше и больше, чем задано в CAD-модели. После совмещения CAD-модели и профилограммы могут быть определены размеры и показатели качества объектов: глубина, шероховатость дна, размеры дефектов обработки, т.е. областей с площадью более  $10 \times 10 \text{ мкм}^2$  и средним отклонением по глубине больше порога (например, 10 мкм).

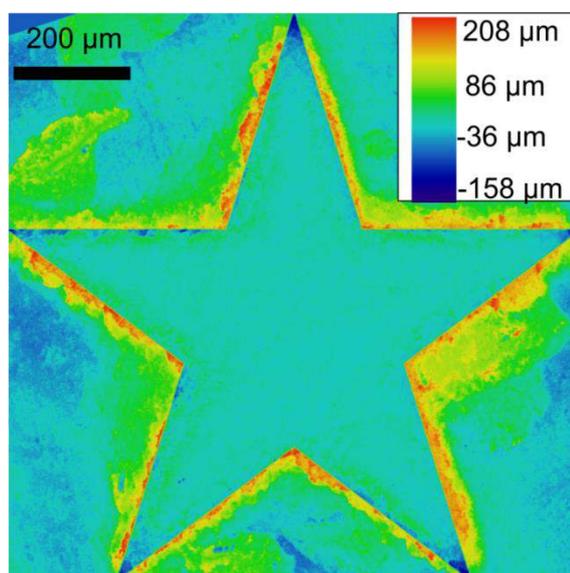


Рис. 38 Совмещение CAD-модели и профилограммы поверхности, приведённых на Рис. 12; шкала справа показывает отклонение по глубине

Совмещение необходимо осуществлять посредством поиска соответствия либо между фрагментами, либо между характерными точками изображений, т.к. специальные метки не всегда могут быть добавлены на поверхность материала. *Характерными точками* (точками интереса) называют точки изображения, обладающие высокой локальной информативностью, например границы, углы объектов. Вследствие приведенных в разделе 1.3.2 особенностей изображений данная задача совмещения имеет следующую специфичность: различие по яркости и контрасту изображений, высокая зашумленность данных, наличие отклонений (локальных дефектов) – областей и контуров на карте высот обработанной поверхности, которых нет в исходной CAD-модели. Разрабатываемые программно-алгоритмические средства должны быть

устойчивы к указанным особенностям и обеспечивать совмещение карт высот САД-модели и обработанной поверхности с разрешениями выше 1 МПкс/л с погрешностью не более 1 пикселя за время 1 мин. на персональном компьютере, что позволит измерять объекты за время сравнимое со временем их формирования.

Рассмотрим основные методы, используемые при совмещении изображений [144]. Классическим подходом является применение корреляционных алгоритмов, при этом для оценки меры близости изображений может быть использована корреляционная функция 3.2. При всех возможных относительных смещениях  $(x, y)$  изображений  $I_1$  и  $I_2$  вычисляется суммарное произведение яркостей точек  $(x', y')$ . Максимум корреляции соответствует наилучшему совмещению.

$$R(x, y) = \sum_{x', y'} I_1(x', y') I_2(x + x', y + y'). \quad (3.2)$$

Фурье методы, например, метод фазовой корреляции, позволяет ускорить вычисление взаимной корреляционной функции, преобразование Фурье-Меллина и метод [145] позволяют дополнительно определить относительный поворот изображений и масштабные коэффициенты. Существует множество методов, в которых при совмещении используются характерные точки и дескрипторы изображений, например моменты изображений. Смещение в плоскости XY можно определить с помощью моментов нулевого и первого порядка, а угол поворота ( $\alpha$ ) относительно горизонтальной оси – по формуле:

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{2m_{11}}{m_{20} - m_{02}}\right) + \frac{\pi}{2} n, \quad (3.3)$$

где  $n = 1, 2, \dots$ ,  $m_{pq}$  - центральные моменты порядка  $(p, q)$ , которые для изображения  $I(x, y)$  вычисляются по всем точкам  $(x, y)$  по формуле:

$$m_{pq} = \sum_{x, y} (x - \mu_x)^p (y - \mu_y)^q I(x, y) \quad (3.4)$$

где  $\mu_x, \mu_y$  средневзвешенные значения яркости по осям  $x$  и  $y$ .

В [146] совмещение портретных изображений проводилось с помощью преобразования Фурье-Меллина и алгоритма на основе моментов. Параметры рассогласования: смещение  $X$  и  $Y$ , поворот, масштабирование. Установлено, что преобразование Фурье-Меллина обеспечивает лучшее совмещение, чем метод на основе моментов при небольшом рассогласовании изображений (угол поворота в пределах  $\pm 30^\circ$ , масштаб и смещение – соответственно в пределах 20% и 10% от размера исходного изображения). В [147] показано, что, метод моментов имеет более высокое быстродействие, чем алгоритм на основе преобразования Фурье-Меллина, однако не устойчив при высоком уровне шума. В [148] для определения параметров смещения изображений с квазирегулярной структурой разработан алгоритм быстрого корреляционного совмещения. В [149] совмещение изображений проводится по линиям, которые предварительно детектируются с помощью преобразования Хафа [69].

Мы протестировали большинство рассмотренных алгоритмов на различных объектах (в том числе Рис. 12 и Рис. 35) и проанализировали их эффективность. Установлено, что из-за наличия шумов и различия изображений по яркости и контрасту Фурье методы и итеративный алгоритм ближайших точек (ICP) не обеспечивают точного совмещения. Методы на основе моментов изображения неэффективны при наличии искажений. Современные алгоритмы детектирования характерных точек: на основе детектора углов Харриса [150], SIFT [151], SURF [152], FAST [153], ORB [154] – выделяют большое число точек в окрестности локальных дефектов обработки, что затрудняет определение параметров преобразования даже с помощью устойчивых алгоритмов, например RANSAC [155]. На Рис. 39 показан результат работы алгоритма SURF и найденные с помощью критерия ближайшего соседа соответствия для карт высот, приведенных на Рис. 12.

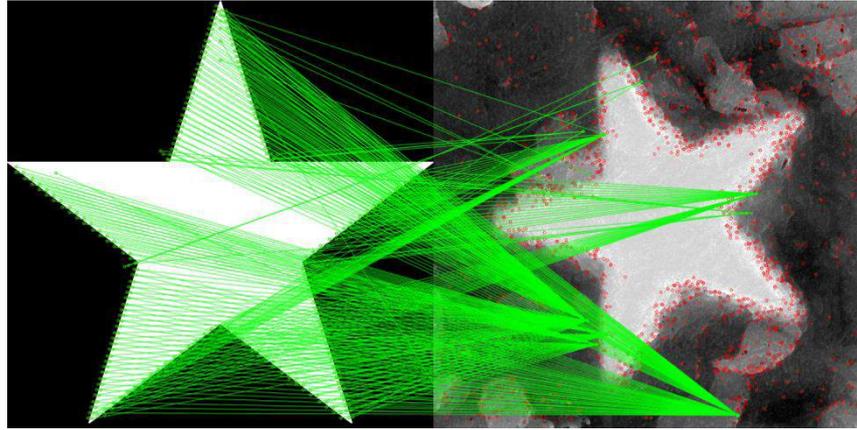


Рис. 39 Определение соответствия зон изображений с помощью алгоритма SURF и критерия ближайшего соседа. Зелёные линии – найденные соответствия, зелёные и красные круги – характерные точки. Для красных точек соответствие не найдено.

В ходе исследования установлено, что в настоящей задаче нормализованная взаимная корреляционная функция является наиболее подходящим критерием близости изображений, т.к. устойчива к различию изображений по яркости и контрасту и при большом количестве статистических данных устойчива к шумам и наличию отклонений формы и размеров объектов. Для двух векторов  $v$ ,  $w$  она представима в следующем виде:

$$R(v, w) = \frac{v'w'}{\|v'\| \|w'\|}, \quad (3.5)$$

где  $v' = v - \mu_v$ ,  $w' = w - \mu_w$ ,  $\mu_v$  и  $\mu_w$  – соответственно средние значения  $v$  и  $w$ ;  $\|\cdot\|$  – модули (длины) векторов. При этом наиболее подходящими алгоритмами совмещения являются алгоритм полного перебора и алгоритм Ciratefi (Circular, Radial and Template Matching Filter) [156], далее они рассмотрены подробнее.

### 3.2.1 Алгоритм полного перебора

Алгоритм полного перебора проверяет все возможные наборы параметров рассогласования. Изображение карты высот САД-модели ( $I_1$ )

скользящим окном перемещается относительно изображения карты высот поверхности ( $I_2$ ), и в точках  $(x,y)$  вычисляется нормализованная взаимная корреляция  $R(x,y)$  по формуле:

$$R(x,y) = \frac{\sum_{x',y'} (I_1(x',y') - \mu_{I_1}) (I_2(x+x',y+y') - \mu_{I_2})}{\sqrt{\sum_{x',y'} (I_1(x',y') - \mu_{I_1})^2 \sum_{x',y'} (I_2(x+x',y+y') - \mu_{I_2})^2}}, \quad (3.6)$$

где  $\mu_{I_1}$  и  $\mu_{I_2}$  соответственно средние значения яркостей точек перекрытия  $(x',y')$  карт высот CAD-модели и поверхности при совмещении. Функция (3.6) вычисляется для карт высот, повернутых относительно друг друга на различные углы с заданным угловым шагом  $\delta\alpha$ , после чего определяется максимальное значение  $R_{max}$ , которое соответствует лучшему совмещению карт высот. Алгоритм тестировался на картах высот, приведенных на Рис. 12 и Рис. 35 (разрешение выше 1 МПксл,  $500 \times 500$  возможных смещений). Установлено, что совмещение визуально корректно, однако, скорость вычислений низкая ( $> 1$  часа на персональном компьютере с характеристиками Intel Core i5 CPU, 3,2 ГГц). При этом для ускорения вычислений  $R(x,y)$  не могут быть использованы решения [157][158], т.к. карты высот обработанной поверхности содержат статистические выбросы, связанные с ошибками измерений, и пропущенные значения, которые добавляются при повороте изображения.

### 3.2.2 Алгоритм *Ciratefi*

Алгоритм *Ciratefi* [156] ранее не использовался для совмещения двух изображений высокого разрешения, и применен в оригинальной публикации для совмещения изображения высокого разрешения – «сцены» с изображением низкого разрешения – «шаблоном». Алгоритм не требует выделения характерных точек, инвариантен к смещению, повороту, масштабированию, яркости и контрасту изображений. Алгоритм состоит из трех этапов: *Cifi*, *Rafi* и *Tefi*. Обозначим точки сцены, с которыми может быть совмещен центр шаблона – множеством  $\{M\}$ . На этапе *Cifi* для каждой точки множества  $\{M\}$  определяется коэффициент масштабирования. Анализ этапа *Cifi* в настоящей работе

необязателен, т.к. масштабные коэффициенты известны из настроек оборудования, поэтому рассмотрим сразу принцип работы второго и третьего этапов на картах высот, приведенных на Рис. 40. Карту высот САД-модели назовем шаблоном, карту высот поверхности – сценой. Для наглядности и упрощения объяснения будем считать, что требуется провести совмещение с точностью 1 пиксель и 15 градусов. На этапе *Rafi* для центра шаблона и для каждой точки множества  $\{M\}$ , выделенного на Рис. 40b черным квадратом, строятся радиальные линии с угловым шагом  $\delta\alpha = 15$  градусов, который соответствует требуемой точности совмещения (Рис. 40a). Для каждой радиальной линии вычисляется суммарная яркость: для шаблона получается массив из 24 значений яркости  $v$ , а для каждой точки сцены  $(x,y)$  получается массив  $w(x,y)$ .

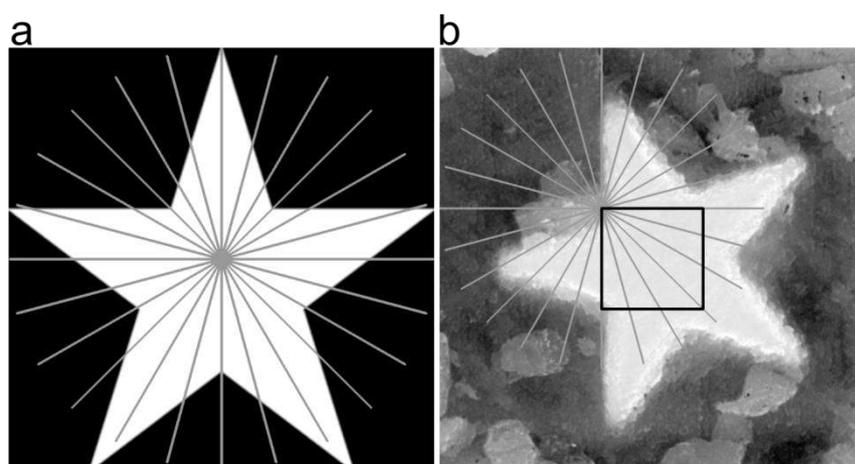


Рис. 40 Принцип работы алгоритма *Ciratefi*. (a) карта высот САД-модели с радиальными линиями, (b) карта высот обработанной поверхности. Черным квадратом выделена зона возможного совмещения с САД-моделью  $\{M\}$ . Для верхней левой точки визуализированы радиальные линии

При различных относительных циклических сдвигах массивов  $v$  и  $w(x,y)$  по формуле (3.5) вычисляется нормализованная взаимная корреляция. Относительный угол поворота  $\alpha(x,y)$ , при котором корреляция имеет максимум, называется «ожидаемым углом поворота» шаблона в точке  $(x,y)$ . После этапа *Rafi* выполняется этап *Tefi*: для всех точек  $\{M\}$  вычисляется нормализованная

взаимная корреляция по формуле (3.6), при этом для каждой точки  $(x,y)$  вычисление проводится один раз только для угла  $\alpha(x,y)$ . После чего для  $\{M\}$  определяется максимум корреляции, положение точки максимума  $(x_m, y_m)$  и соответственно смещение шаблона относительно сцены. Угол поворота  $\alpha(x_m, y_m)$  считается углом рассогласования изображений.

Таким образом, ускорение работы алгоритма *Ciratefi* по сравнению с алгоритмом полного перебора достигается за счёт того, что при вычислении корреляции в каждой точке  $(x,y)$  возможного совмещения достаточно проверить один угол  $\alpha(x,y)$ , а не весь диапазон относительных поворотов. Особенностью алгоритма является возможность ускорения вычислений посредством удаления части точек с наименьшим значением корреляции из множества  $\{M\}$  после этапа *Rafi*. Тестирование алгоритма *Ciratefi* показало, что совмещение визуально корректно, при этом время вычислений на порядок меньше, чем у алгоритма полного перебора. Тем не менее, для характерных изображений совмещение осуществляется за несколько десятков минут на персональном компьютере, что является неприемлемым, поэтому решено исследовать возможность ускорения алгоритма *Ciratefi*.

### 3.2.3 Алгоритм совмещения на основе *Ciratefi* и пирамидального поиска максимума

Предложено два подхода для улучшения быстродействия алгоритма *Ciratefi*. Во-первых, ускорение может быть достигнуто за счет применения сначала грубого поиска по углам (например, с шагом  $\delta\alpha = 15$ ), а затем – с высокой дискретизацией ( $\delta\alpha = 1$ ) для точек с максимальным значением нормализованной взаимной корреляции. Во-вторых, можно осуществлять поиск параметров преобразования сначала для изображений низкого разрешения, полученных из исходного изображения высокого разрешения, а затем для изображений высокого разрешения с использованием найденных параметров. Мы реализовали оба подхода и установили, что первый подход не даёт

преимущества, т.к. в алгоритме *Ciratefi* этап *Tefi* требует наибольших временных затрат, однако его быстродействие практически не зависит от дискретизации по углам, т.к. угол поворота для каждой точки определяется на этапе *Rafi*. При этом дополнительные временные затраты, возникающие при использовании грубого поиска по углам, сравнимы со временем работы этапа *Rafi*. Экспериментальная проверка показала, что второй подход значительно улучшает быстродействие при использовании пирамиды изображений. Пирамидой изображений называется последовательность изображений, каждое последующее изображение которой получается из предыдущего путем его высокочастотной фильтрации и децимации каждого второго отчёта. Пирамида изображений  $L(x,y,i)$  может быть представлена в следующем виде:

$$\begin{aligned} S(x, y, i + 1) &= L(x, y, i) \otimes h(x, y), \\ L(x, y, i + 1) &= S(2x, 2y, i + 1), \end{aligned} \quad (3.7)$$

где  $\otimes$  - оператор свертки,  $i$  – индекс изображения в последовательности,  $L(x,y,0)$  – исходное изображение;  $S(x,y,i)$  – результат свертки изображения с маской  $h(x,y)$ .

В разработанном алгоритме для карт высот САD-модели и обработанной поверхности сначала строится пирамида изображений; при фильтрации используется гауссов фильтр, децимация проводится до размера изображения не ниже  $128 \times 128$  точек. Затем, начиная с изображения самого низкого разрешения, осуществляется поиск параметров рассогласования по алгоритму *Ciratefi*. Вокруг максимума определяется зона интереса  $\{H\}$  (например,  $20 \times 20$  точек), для точек которой проводится поиск параметров для следующего изображения стека, затем снова определяется зона интереса, и.т.д. Параметры рассогласования, найденные для изображений исходного разрешения, являются искомыми. На Рис. 41 показана схема поиска максимума по пирамиде изображений. Использование пирамиды изображений для ускорения обработки и совмещения изображений является известным подходом [159][160], однако

ранее он не применялся в комбинации с алгоритмом *Ciratefi* для совмещения зашумленных изображений при наличии искажений.

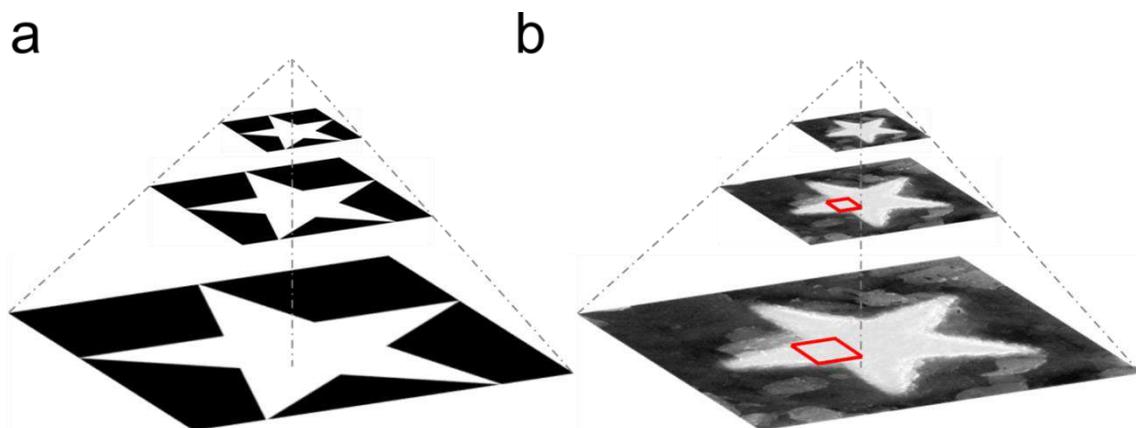


Рис. 41 Пирамиды изображений, для карт высот САД-модели (а) и обработанной поверхности (б). Квадратами отмечены зоны интереса, в которых производится поиск максимума для изображений более высокого разрешения.

Приведём сравнение вычислительной сложности алгоритма полного перебора, алгоритма *Ciratefi* и разработанного алгоритма. Примем за  $m$  – количество радиальных шагов,  $K$  – количество точек шаблона,  $N$  – количество точек множества  $\{M\}$ ,  $N_2$  – количество точек множества  $\{M\}$ , оставшихся после фильтрации после этапа *Rafi*. Для алгоритма полного перебора для каждого значения  $m$  и каждой точки  $N$  при вычислении нормализованной взаимной корреляции требуется выполнить  $O(M)$  простейших операций. Таким образом, вычислительная сложность алгоритма полного перебора  $O(m \times K \times N)$ .

Алгоритму *Ciratefi* на этапе *Rafi* требуется  $O(m \times K^{0,5} \times N)$  простейших операций при вычислении суммарных яркостей радиальных линий и  $O(m \times K^{0,5} \times N)$  простейших операций для вычисления нормализованной взаимной корреляции радиальных линий. На этапе *Tefi* требуется  $O(K \times N)$  операций, что в  $m$  раз меньше, чем для алгоритма полного перебора. Таким образом, суммарная вычислительная сложность  $O(N \times (K + m \times K^{0,5}))$ .

Для разработанного алгоритма примем, что  $H$  – количество точек зоны интереса  $\{H\}$ ,  $K_r$  – количество точек для изображения наименьшего разрешения

в пирамиде изображений,  $H_r$  – количество точек возможного совмещения для изображений самого низкого разрешения. Тогда вычислительная сложность определяется формулой 3.9, где первая компонента – вычислительная сложность алгоритма *Ciratefi* в зоне интереса  $\{H\}$  для всех шагов алгоритма кроме первого, вторая компонента – вычислительная сложность для изображений самого низкого разрешения.

$$O(\log(\frac{K}{K_r})H \times (K + m \times \sqrt{K})) + O(H_r \times (K_r + m \times \sqrt{K_r})), \quad (3.8)$$

Для характерных размеров  $N = 10^6$ ,  $m = 360$ ,  $K = 10^6$  количество простейших операций для алгоритма полного перебора  $10^{14}$ , для алгоритма *Ciratefi*  $10^{12}$ , что на два порядка меньше. Примем  $H = 10^3$ ,  $K_r = 10^4$ ,  $H_r = 10^4$ , тогда разработанному алгоритму потребуется  $10^9$  простейших операций на совмещение.

### 3.3 Результаты

#### 3.3.1 Тестирование алгоритма совмещения на экспериментальных данных

Анализ быстродействия и корректности работы разработанного алгоритма проведен на большом наборе экспериментальных данных. Во всех случаях полученные результаты соответствуют результатам работы алгоритма полного перебора по точности совмещения, при этом быстродействие на несколько порядков выше. Приведем показатели, полученные для карты высот САД-модели Рис. 35а и карты высот поверхности, приведенной на Рис. 36а, размер зоны возможного совмещения  $430 \times 430$  точек. Совмещение проводилось при следующих параметрах: фильтрация оставляет 50% точек после этапа *Rafi*, размер зоны поиска сокращается до области  $20 \times 20$  точек вокруг максимума, угловая точность совмещения  $\delta\alpha = 1$  градус, пространственная – 1 пиксель. Для повышения устойчивости совмещение на этапе *Tefi* проводилось не только для углов  $\alpha(x,y)$ , найденных на этапе *Rafi*, но и для соседних  $\alpha(x,y) - \delta\alpha$  и  $\alpha(x,y) + \delta\alpha$ . На Рис. 42, показан результат совмещения при найденных параметрах

рассогласования:  $\Delta x = 1060$ ,  $\Delta y = 980$ ,  $\Delta \alpha = 272$  градусов. Положительные и отрицательные значения на шкале справа показывают соответственно насколько меньше и больше удалено материала, чем задано в CAD-модели.

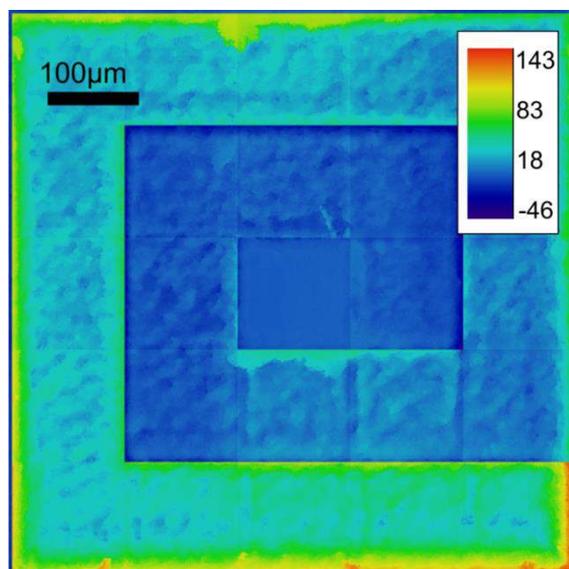


Рис. 42 Совмещение карты высот CAD-модели и обработанной поверхности.

Сравнение разработанного алгоритма с алгоритмом *Ciratefi* и алгоритмом полного перебора приведено в Таблица 6, где  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta \alpha$  – искомые параметры рассогласования. Тестирование алгоритмов проведено на персональном компьютере с Intel Core i5 CPU 3,2 ГГц, в (3)(4) размер зоны поиска сокращается до области  $20 \times 20$  точек вокруг максимума, в (2)(3) после этапа *Rafi* фильтрация оставляет 50% точек.

Таблица 6 Сравнение алгоритмов совмещения.

Алгоритм	$\delta \alpha$	Результат совмещения $\Delta x; \Delta y; \Delta \alpha$	Время (мин.)
(1) Полный перебор	15	1059; 982; 270	>600
(2) <i>Ciratefi</i>	15	1059; 982; 270	20
	1	1060; 980; 272	27
(3) <i>Ciratefi</i> с пирамидой изображений	1	1060; 980; 272	0,5

(4) Полный перебор с пирамидой изображений	15 1059; 982; 270	6
--	-------------------	---

---

Установлено, что при  $\delta\alpha = 15$  градусов параметры преобразования, найденные с помощью алгоритма *Ciratefi*, соответствуют параметрам, определенным с помощью алгоритма полного перебора. При этом время вычислений с помощью алгоритма *Ciratefi* в 30 раз меньше. При  $\delta\alpha = 1$  градус время вычисления *Ciratefi* увеличивается, но незначительно, тогда как для алгоритма полного перебора оно изменяется в 15 раз. Параметры преобразования, найденные с помощью алгоритма *Ciratefi* и разработанного алгоритма, идентичны, при этом быстродействие последнего на порядок выше (меньше 1 минуты на совмещение). Для сравнения показано, что применение пирамидального поиска также ускоряет полный перебор, однако время вычислений больше, чем у разработанного алгоритма даже при низкой угловой точности совмещения ( $\delta\alpha = 15$  градусов).

### 3.3.2 Тестирование алгоритма на модельных данных

В настоящем параграфе показано тестирование алгоритма на модельных данных и описан разработанный метод математического моделирования, позволяющий получить большое число искусственных изображений CAD-модели и обработанной поверхности с учётом искажений, возникающих как вследствие ошибок измерения, так и ошибок обработки. Учитываются особенности лазерной микрообработки: распределение интенсивности лазерного излучения в виде Гауссовой функции, дефокусировка, возможность отклонения профиля по глубине от заданного в CAD-модели, образование локальных дефектов. Для упрощения расчётов решено не проводить математическое моделирование температурных полей с использованием уравнения теплопроводности (см. раздел 1.1), т.к. такой расчёт трудоёмок и требует больших временных затрат при получении изображений обработанной

поверхности по CAD-моделям со сложной геометрией (более 1 секунды на 1 лазерный импульс).

В разработанном методе считается, что CAD-модель состоит из ячеек (с размерами  $s_x \times s_y$ ), между центрами которых перемещается лазерный пучок. Если лазерный пучок сфокусирован на поверхность ячейки, то он удаляет объем вещества в кубе с размерами  $s_x \times s_y \times h_{remove}$ . При этом толщина слоя, заданная в модели,  $h_{set}$  может отличаться от толщины слоя удаляемого вещества  $h_{remove}$ , что наблюдается и в реальных экспериментах. Лазерный пучок удаляет вещество послойно и последовательно по ячейкам в соответствие с CAD-моделью. Учитывается дефокусировка лазерного излучения, при которой на ячейку приходится меньше энергии, при этом получаемые карты высот характеризуются различными перепадами и отклонениями от CAD-модели.

Сгенерированы многоуровневые карты высот CAD-модели с количеством точек  $1024 \times 1024$ , состоящие из ячеек с размерами  $32 \times 32$  точек, количество слоёв от 1 до 100. По ним рассчитаны карты высот обработанной поверхности, при этом считается, что разрешение одной точки 0,5 мкм, а  $s_x = s_y$  равно диаметру пятна фокусировки лазерного пучка – 16 мкм. Карты высот обработанной поверхности размещаются в большем поле (до  $2048 \times 2048$  точек,  $1 \times 1$  мм<sup>2</sup>) с различными сдвигами и углами поворота. Считается, что распределение интенсивности лазерного пучка  $I(r, z)$  можно представить в виде гауссовой функции (формула 1.4), а вещество удаляется, только если интенсивность лазерного излучения выше  $I_0/2$ , где  $I_0$  – интенсивность в центре пучка в точке (0,0). Тогда, учитывая, что размер ячейки 16 мкм, принимается, что  $w_0 = 8$  мкм. Соответственно при длине волны лазерного излучения  $\lambda = 1064$  нм  $z_R = 189$  мкм; а максимальное значение радиуса пятна фокусировки, при котором вещество ещё удаляется  $w(z_R) = \sqrt{2} w_0$ .

Считается, что при сфокусированном лазерном пучке энергии лазерного излучения ( $E$ ) достаточно для удаления вещества с объёмом  $V$ :

$$E_0 = tI_0 2\pi \int_0^{w_0} \exp\left(\frac{-(r^2)}{2w_0^2(z)}\right) dr =$$

$$2\sqrt{2}\pi tI_0 w_0 \int_0^{m_0} \exp(-l^2) dl = \sqrt{2}\pi^{1.5} tI_0 w_0 \operatorname{erf}(m_0), \quad (3.9)$$

$$m_0 = \frac{1}{\sqrt{2}}, r = lw_0\sqrt{2},$$

$$V = s_x s_y h_{remove},$$

где  $t$  – время воздействия лазерного излучения на объём вещества в ячейке,  $\operatorname{erf}()$  – функция ошибок. При дефокусировке лазерного излучения большая часть энергии  $E(m)$  расходуется на удаление вещества в элементе, а часть  $E_{sur}(m)$  на удаление вещества в соседних ячейках.

$$E(m) = tI_0 \left(\frac{w_0}{w}\right)^2 2\pi \int_0^{w_0} \exp\left(\frac{-(r^2)}{2w^2(z)}\right) dr =$$

$$2\sqrt{2}\pi tI_0 w \left(\frac{w_0}{w}\right)^2 \int_0^m \exp(-l^2) dl = \sqrt{2}\pi^{1.5} tI_0 w \left(\frac{w_0}{w}\right)^2 \operatorname{erf}(m),$$

$$E_{sur}(m) = \sqrt{2}\pi^{1.5} tI_0 w \left(\frac{w_0}{w}\right)^2 (\operatorname{erf}(m_0) - \operatorname{erf}(m)), \quad (3.10)$$

$$m = \frac{w_0}{w(z)\sqrt{2}},$$

$$s_{center} = h_{remove} \frac{E(m) w_0}{E_0 w} = h_{remove} \frac{\operatorname{erf}(m)\sqrt{2}}{\operatorname{erf}(m_0)} m,$$

$$s_{sur} = h_{remove} \frac{(E_{sur}(m)) w_0}{E_0 w N} = h_{remove} \frac{(\operatorname{erf}(m_0) - \operatorname{erf}(m))\sqrt{2}}{\operatorname{erf}(m_0) q} m,$$

где  $s_{center}$  – толщина вещества, снимаемая для ячейки, с центром которой совпадает центр пятна фокусировки,  $s_{sur}$  – толщина, снимаемая для каждой из  $q$  соседних ячеек (в модели распределяется на 8 соседних ячеек).

К карте высот обработанной поверхности дополнительно случайным образом добавляется величина шероховатости поверхности  $r = \operatorname{random}(-0,5;0,5)$  мкм. Заданные параметры:  $h_{set} = 5$  мкм,  $h_{remove} = h_{set}(1 + \operatorname{random}(-0,2;0,2))$ , т.е. ошибка по глубине для каждого слоя может достигать 20%. Функция

$random(x;y)$  возвращает случайное число, равномерно распределенное в диапазоне значений  $(x;y)$ , что позволяет получать различные варианты отклонений профилограммы обработанной поверхности от CAD-модели и провести статистический анализ корректности работы алгоритма.

Считается, что при получении изображений объектов с помощью оптического метода измерения входное изображение подвергается размытию и зашумлению (формулы 2.11-2.13). Шум имеет гауссово распределение, функция рассеяния точки также имеет гауссов вид. Степень размытия изображения  $p$  варьировалась от 1 до 20, а уровень шума  $\sigma_{noise}$  – от 0,0 до 160,0. В результате при различных  $\sigma_{noise}$  получено по  $N = 100$  изображений, для которых проведено совмещение с CAD-моделью с помощью предложенного алгоритма, при следующих параметрах:  $\delta\alpha = 1$  градус, размер зоны поиска сокращается до области  $20 \times 20$  точек вокруг максимума найденного на предыдущем этапе, после этапа Rafi фильтрация оставляет 50% точек. На Рис. 43 приведены примеры моделируемых изображений. Использовано 3 типа объектов:

- 1) Линии, с шириной, изменяющейся по равномерному распределению. Максимальная ширина и расстояние между линиями меньше размера 10 ячеек, глубина линий определяется по формуле  $random(1, 100)$ ;
- 2) Квадраты  $32 \times 32$  ячейки, глубина ячеек определяется по формуле  $random(1, 100)$ ;
- 3) Круг с ячейками, глубина которых определяется по формуле  $random(1, 100)$ .

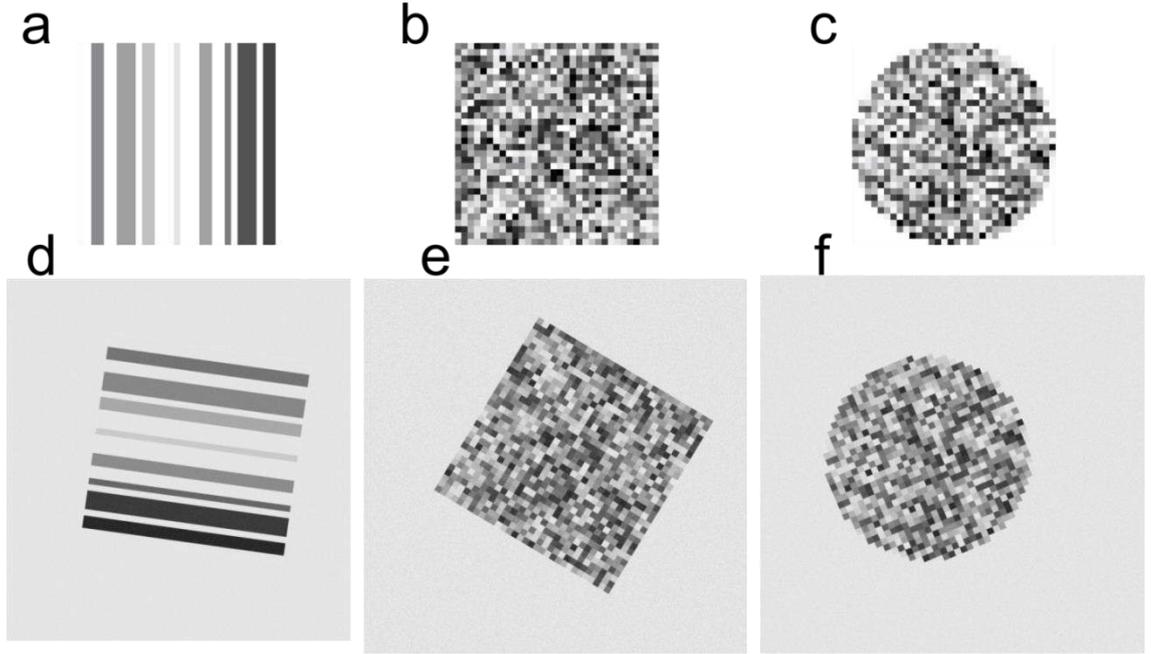


Рис. 43 Тестирование алгоритма совмещения на модельных данных. (a)-(c) – карты высот CAD-модели, (d)-(f) – карты высот поверхности. (d) –  $\sigma_{noise} = 10$ , (e) –  $\sigma_{noise} = 30$ , (f) –  $\sigma_{noise} = 20$ . (d)-(f) – размытие  $p = 1$

По формуле 3.12 вычислены абсолютные и максимальные погрешности определения расположения и угла поворота за  $N$  экспериментов.

$$\Delta pos^i = \sqrt{(x_{model}^i - x_{measured}^i)^2 + (y_{model}^i - y_{measured}^i)^2}, \quad \Delta pos = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta pos^i}{N}, \quad i \in [1; N],$$

$$\Delta angle^i = |angle_{model}^i - angle_{measured}^i|, \quad \Delta angle = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta angle^i}{N}, \quad i \in [1; N], \quad (3.11)$$

$$\max_{\Delta pos} = \max_{i=1;N}(\Delta pos^i), \quad \max_{\Delta angle} = \max_{i=1;N}(\Delta angle^i),$$

Установлено, что для линий и квадратов (типы 1-2) во всём выбранном диапазоне параметров  $\sigma_{noise}$  и  $p$  абсолютная погрешность совмещения не превышает 1 градуса и 1 пиксела. Круг (тип 3) является более сложным объектом для совмещения, вследствие отсутствия выделенного направления и углов, однако даже для него максимальная погрешность совмещения превышает допустимый диапазон только при  $\sigma_{noise}$  больше 80 и  $p$  больше 20. Отметим, что такой высокий уровень шума и размытия превышают

характерные для реальных измерений, а получаемые изображения сложны для совмещения даже для оператора (Рис. 44). Результаты исследования разработанного алгоритма для изображений круга представлены в Таблица 7.

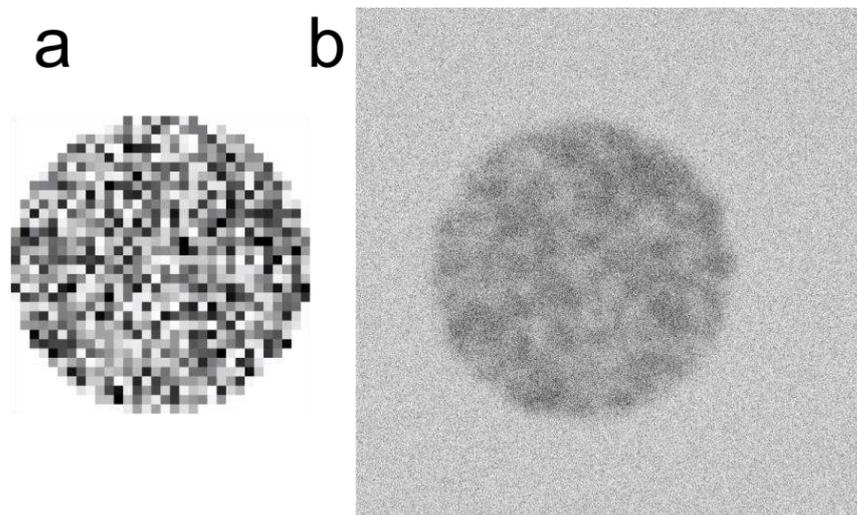


Рис. 44 Тестирование алгоритма совмещения для случая высокого уровня шума. Совмещение затруднено даже для оператора. (а) карта высот CAD-модели, (б) карта высот обработанной поверхности. Смещение: 642, 687, поворот 322 градусов,  $\sigma_{noise} = 20$ , размытие  $p = 20$ .

Таблица 7 Абсолютные погрешности совмещения изображений круга с помощью разработанного алгоритма (при различных  $\sigma_{noise}$  и  $p$ )

$\sigma_{noise}$	SNR	$p$	$\Delta_{pos}$ (пиксел)	$\max_{\Delta_{pos}}$ (пиксел)	$\Delta_{angle}$ (градус)	$\max_{\Delta_{angle}}$ (градус)
20	11	1	0,08	1	0,52	1
40	6,2	1	0,09	1	0,52	1
80	3,3	10	0,11	1	0,41	1
80	3,3	20	0,24	1,4	0,58	1
160	2	1	0,08	1	0,62	1
160	2	10	0,12	1	0,61	1
160	2	20	0,77	2,33	0,51	2

Дополнительно проведена проверка эффективности работы алгоритма при наличии локальных дефектов. Для этого к карте высот поверхности добавлялись области с различной формой, со средними размерами порядка  $100 \text{ мкм}^2$  и высотой, превышающей уровень обработанной поверхности в среднем на  $25 \text{ мкм}$ . Такие области характеризуют образование грата при удалении вещества и неоднородности материала. Искажения задаются в виде эллипсов, граница которых модулирована периодической функцией (формула 3.13).

$$y = \begin{cases} r_y \sqrt{1 - \frac{x^2}{r_x^2}} + A \sin\left(\frac{\pi x n}{r_x}\right), & y \geq 0 \\ -r_y \sqrt{1 - \frac{x^2}{r_x^2}} + C \sin\left(\frac{\pi x k}{r_x}\right), & y < 0 \end{cases}, \quad (3.12)$$

где  $r_x, r_y$  – полуоси эллипса;  $A, C$  – амплитуды периодической функции,  $n, k$  – натуральные числа. Полуоси эллипса задаются с использованием равномерного распределения по формуле  $random(1; s_x)$ , где  $s_x$  – размер ячейки;  $A, C$  определяются как  $random(1; r_y)$ ;  $n$  и  $k$  по формуле  $random(1; 20)$ . Расположение центров эллипсов также задаётся случайным образом, высота соответствующих искажений в  $\text{мкм}$  по формуле  $random(0,1;50)$ ; количество искажений как  $random(1;100)$ . Характерный вид и расположение искажений в плоском поле показано на Рис. 45.

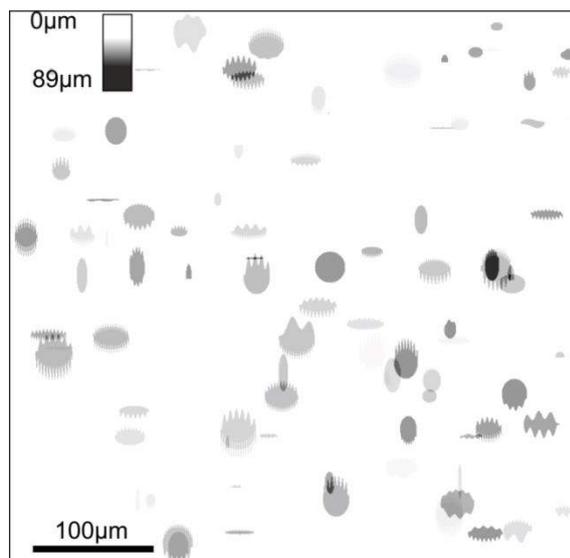


Рис. 45 Вид локальных дефектов, добавляемых к карте высот обработанной поверхности, до 100 искажений, площадь  $< 100 \mu\text{m}^2$ , средняя высота  $\sim 25 \mu\text{m}$ .

Результаты тестирования алгоритма для карт высот объектов третьего типа при различных отношениях сигнал-шум, размытии изображений, количестве и форме локальных дефектов приведены в Таблица 8.

Таблица 8 Абсолютные погрешности совмещения изображений круга при наличии локальных дефектов с помощью разработанного алгоритма (при различных  $\sigma_{noise}$  и  $p$ ).

$\sigma_{noise}$	SNR	$p$	$\Delta_{pos}$ (пиксел)	$\max_{\Delta_{pos}}$ (пиксел)	$\Delta_{angle}$ (градус)	$\max_{\Delta_{angle}}$ (градус)
20	11	1	0,11	1	0,5	1
40	6,2	1	0,11	1	0,49	1
80	3,3	10	0,08	1	0,41	1
80	3,3	20	0,19	2,23	0,5	2
160	2	1	0,1	1	0,47	1
160	2	10	0,11	1	0,49	1
160	2	20	0,74	3,16	0,5	2

Таким образом, в результате анализа большого количества модельных данных установлено, что при отношении сигнал-шум карты высот обработанной поверхности не ниже 3,3, при размытии не более 10, максимальном отклонении высоты слоя  $\pm 20\%$  и при наличии локальных дефектов различной формы, количество которых не превышает 100, а площадь  $100 \mu\text{m}^2$ , разработанный алгоритм обеспечивает совмещение с максимальной погрешностью, не превышающей 1 градус и 1 пиксел. Искусственные изображения имеют схожие характеристики с картами высот обработанной лазерным излучением поверхности, получаемым с помощью методов оптической профилометрии, поэтому мы считаем, что разработанный алгоритм

удовлетворяет требованиям, предъявляемым к современным методам контроля качества лазерной микрообработки.

### 3.3.3 Определение показателей качества объектов

Анализ результатов совмещения позволяет оператору системы определить наличие отклонений по глубине профиля обработанной поверхности от CAD-модели и размеры зон с локальными дефектами лазерной микрообработки. Например, на Рис. 42 видно, что для первых ступенек глубина слоя соответствует заданной в CAD-модели, а начиная с седьмого слоя, глубина меньше заданной и растет нелинейно, кроме того границы между слоями требуют доработки.

Мы реализовали программно-алгоритмические средства для определения зависимости средней глубины ( $h_{meas}$ ) и средней шероховатости обработанной поверхности ( $r_{meas}$ ) от заданной в CAD-модели глубины ( $h_{set}$ ). На диаграмме Рис. 46 приведены гистограммы глубины для точек седьмого (Рис. 46а) и двадцатого слоя (Рис. 46б), полученные по карте высот, приведенной на Рис. 42. Средняя глубина  $h_{meas}$  и средняя шероховатость  $r_{meas}$  слоя определяются соответственно как среднее значение и стандартное отклонение для точек внутри интервала  $\pm 12$  мкм (2 толщины снимаемого слоя), построенном относительно основного пика. Такой подход позволяет исключить из рассмотрения точки в окрестности границ переходов между слоями, что делает определение показателей качества более точными.

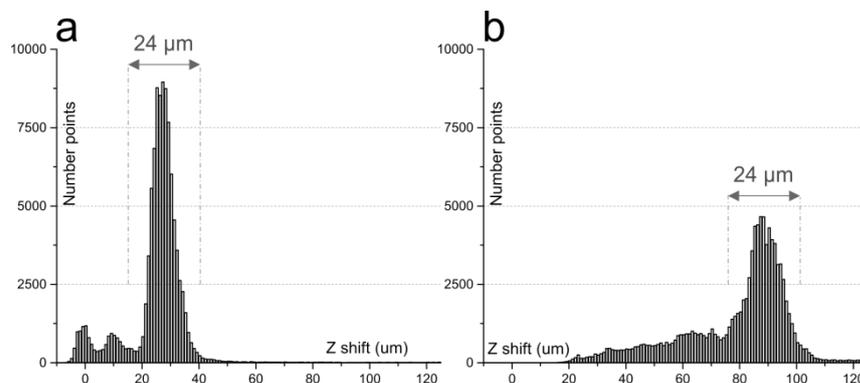


Рис. 46 Гистограммы, показывающие глубину для точек соответственно 7 (а) и 20 слоя (b), полученные по результатам совмещения (Рис. 42). Средняя глубина и шероховатость поверхности вычисляется по точкам внутри выделенного диапазона – 24 мкм.

На Рис. 47 показаны полученные зависимости  $h_{meas}$  и  $r_{meas}$  от  $h_{set}$ . Видно, что средняя шероховатость растёт при увеличении глубины.

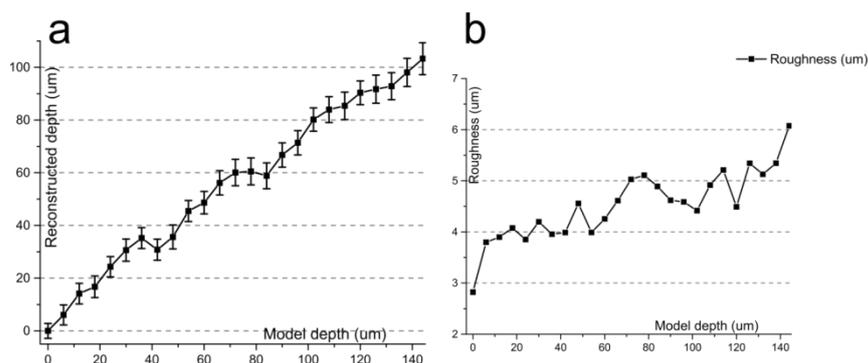


Рис. 47 Зависимость глубины обработанной поверхности от заданной в САД-модели, полученная на основе совмещения (Рис. 42).

На Рис. 48 показаны точки, которые использовались при расчётах статистических параметров (Рис. 48а) и дефекты обработки: области с размерами больше  $50 \text{ мкм}^2$  с отклонением по высоте точек от САД-модели больше 12 мкм, которые также определяются автоматически (Рис. 48b). Дефекты обработки детектируются с помощью быстрого метода поиска контуров [161] по маске (Рис. 48с), в которой белые точки соответствуют областям с отклонением по высоте от САД-модели больше 12 мкм.

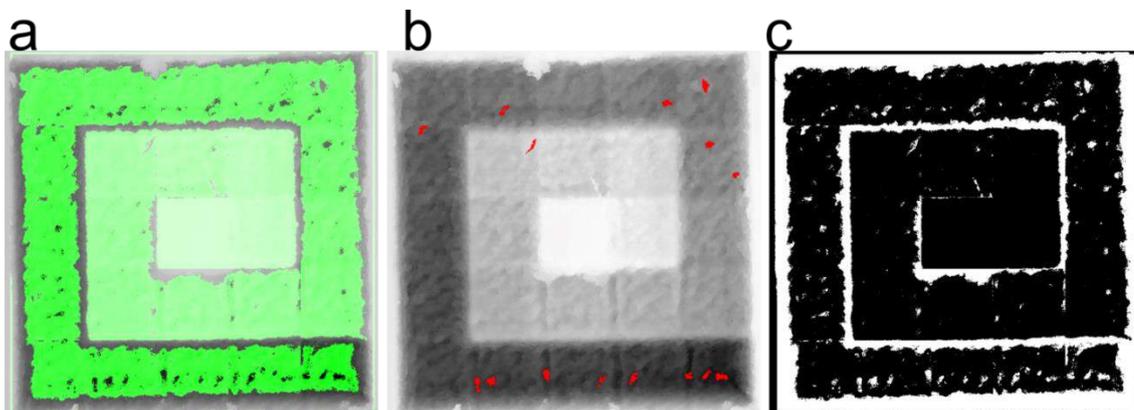


Рис. 48 Контроль качества лазерного микрофрезерования. (а) – зеленым выделены точки на карте высот обработанной поверхности, которые используются при расчёте статистических параметров (Рис. 47); (b) – красным выделены дефекты лазерной микрообработки; (с) маска; белый цвет показывает наличие отклонения по высоте от CAD-модели больше 12 мкм.

### 3.4 Выводы

В настоящей главе исследована проблема контроля качества 3D лазерной микрообработки. Установлено, что для измерения формируемых объектов наиболее подходящим решением являются методы конфокальной микроскопии, т.к. позволяют измерять профиль высококонтрастных объектов с субмикронным разрешением и высоким быстродействием (больше миллиона точек в секунду). Показано, что методы цифровой обработки сигналов, применяемые в схожих задачах, недостаточно эффективны для сопоставления CAD-модели и профилограммы обработанной поверхности, вследствие наличия ошибок измерений, шума и искажений различной природы. Разработан новый алгоритм совмещения на основе алгоритма Ciratefi и итеративного поиска максимума. На экспериментальных и модельных данных получено, что средние погрешности совмещения изображений (карт высот) CAD-модели и обработанной лазерным излучением поверхности сравнимы с погрешностями работы алгоритма полного перебора и не превышают 1 градуса и 1 пиксела, при этом быстродействие более чем на порядок выше. Разработаны программные средства для получения показателей качества изделий (средняя глубина, шероховатость дна, наличие дефектов) по результатам совмещения.

## Глава 4 Создание комплекса программных средств и применение разработанных алгоритмов

В настоящей главе рассмотрено создание комплекса программных средств для автоматизации измерений поверхности, обработанной лазерным излучением, и его применение для контроля качества и оптимизации режимов фемтосекундной лазерной микрообработки.

### 4.1 Программное обеспечение «MarkInspector» и «Profilometer»

Разработанные алгоритмы контроля качества векторной и растровой лазерной микрообработки объединены в программный продукт «MarkInspector». Программа «MarkInspector» имеет пользовательский интерфейс (Рис. 49) и предоставляет возможности обработки изображений и профилограмм.

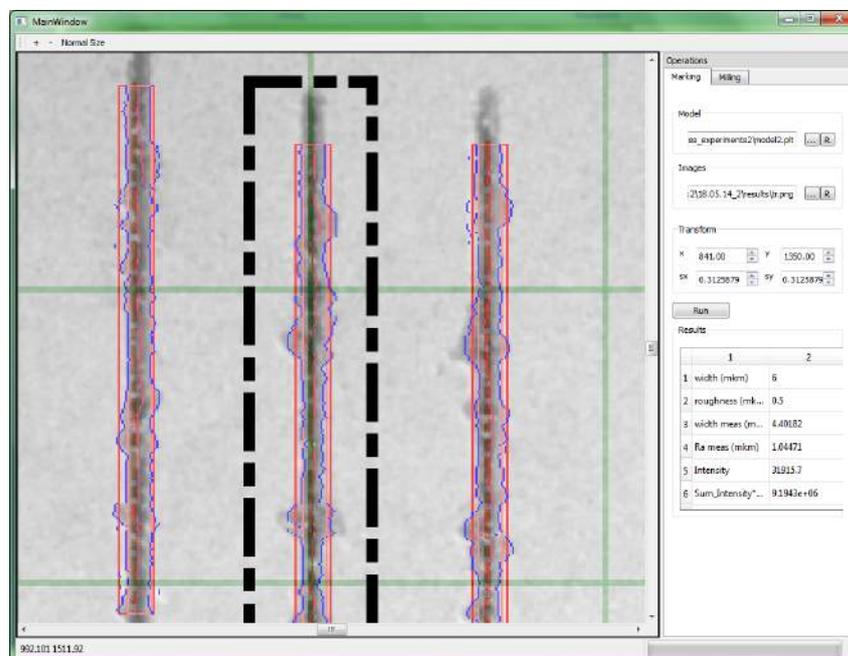


Рис. 49 Графический интерфейс MarkInspector. Показан результат выделения границ микроканалов.

В рамках проекта № 2012-218-03-004 в ИАиЭ СО РАН разработана измерительная система «Сканирующий профилометр на основе хроматических

конфокальных датчиков», управление которой осуществляется созданным при участии автора специальным программным обеспечением (СПО) «Profilometer», которое включает модули контроля качества «MarkInspector». С их помощью автоматизирован процесс изготовления сеток и других изделий на предприятии АО «Швабе-Оборона и Защита» - г. Новосибирск, выполнены заказы по отработке технологии и изготовлению прецизионных сеток для ОАО «Красногорский завод им С.А. Зверева» – г. Красногорск.

UML-диаграмма [162] классов СПО представлена на Рис. 50. СПО состоит из следующих основных программных компонент:

- 1) Модуль визуализации (MainWindow);
- 2) Модуль получения данных с помощью высокоразрешающей системы технического зрения (CameraManager) и профилометрического модуля (ProfilometerManager, StageManager) на основе принципа конфокальной хроматической микроскопии [142];
- 3) Модуль хранения и обработки данных (DataManager);
- 4) Модули MarkInspector: Inspector2D и Inspector3D.

Взаимодействие программных компонент осуществляется через интерфейсы, что реализует принцип программного проектирования ССР (Common closure principal) [163]. Штриховая линия показывает зависимость классов, т.е. отношение, при котором изменение сущности на которую указывает стрелочка, приводит к изменению указывающей сущности. Сплошная линия – ассоциацию классов, т.е. зависимость, при которой сущности влияют друг на друга через вызовы функций. Сплошная линия с ромбиком – композицию, т.е. ситуацию, когда одна сущность содержит объект другой сущности, при этом время жизни сущностей равно.

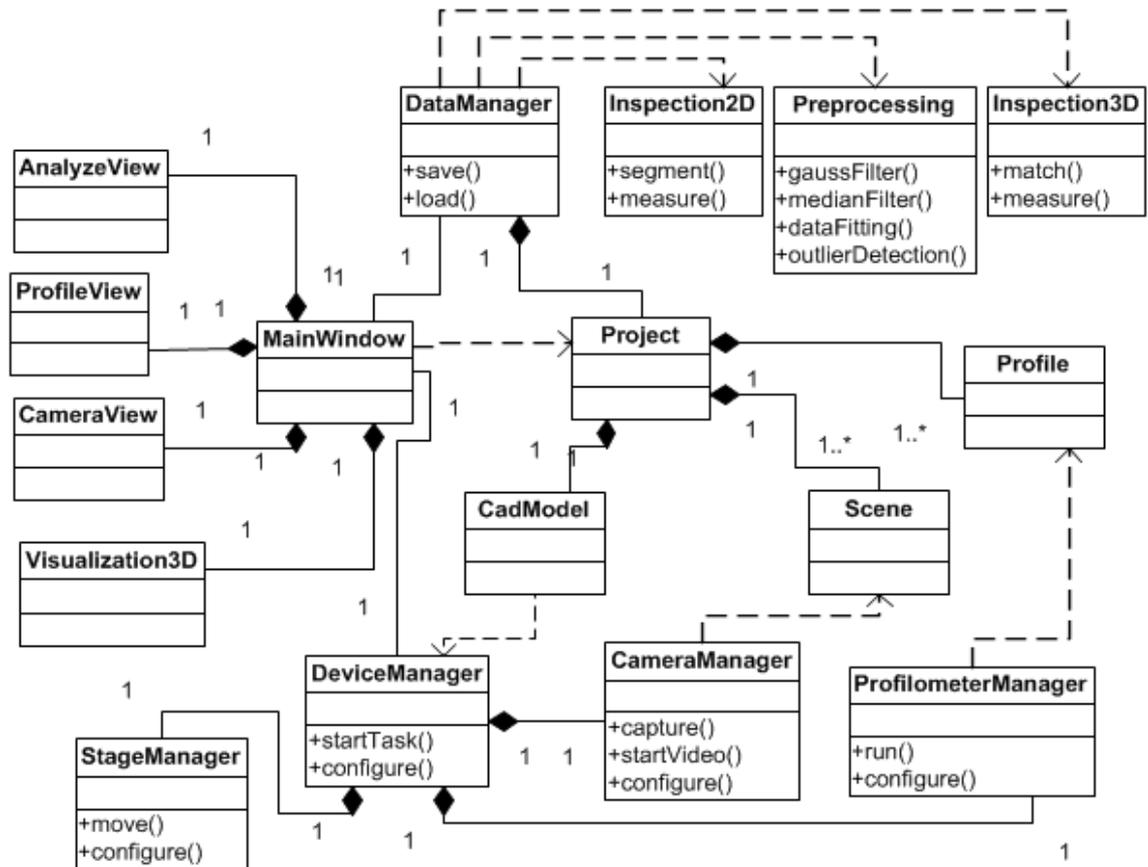


Рис. 50 Диаграмма классов СПО Profilometer. Прямоугольники показывают классы и их основные методы, сплошные линии – ассоциацию классов, сплошные с ромбом на конце – агрегацию, штриховые – зависимость.

## 4.2 Контроль качества прецизионных сеток

Технологии фемтосекундной лазерной записи сеток и микроканалов на стекле применяются при создании элементов микрооптики, микроэлектроники, микромеханики, биочипов, и.т.д. На точность размеров и относительное расположение задаются высокие требования соответственно 0,5-1 мкм и 1-5 мкм в поле 10 мм<sup>2</sup>, при этом объекты должны иметь минимальные сколы и микротрещины на границах, минимальную шероховатость дна и.т.д. При отработке технологий и определении оптимальных режимов для формирования сеток и микроканалов без дефектов с максимальной производительностью необходимым условием является возможность проведения высокоточного контроля качества посредством поэлементного сравнения с CAD-моделью.

Кроме того, даже в серийном производстве иногда требуется обеспечивать контроль всей партии изделий, т.к. образование сколов и микротрещин при лазерной микрообработке является статистическим процессом, поэтому актуальной является задача обеспечения высокого быстродействия используемых средств.

На примере задачи формирования микроканалов на поверхности стекла покажем, как данная задача решается с помощью алгоритмов сопоставления и анализа профилограмм зоны лазерной микрообработки, представленных в главах 2, 3. По векторной САД-модели (Рис. 51а), состоящий из контуров объектов и скелета (средней линии) на поверхности стекла сформированы микроканалы при следующих параметрах обработки:  $\lambda = 1026$  нм,  $\tau = 232$  фс, энергия импульсов  $3,64$   $\mu\text{J}$ , 1 слой, перекрытие импульсов 65%, частота импульсов 50 кГц. Запись микроканалов проводилась в 8 линий (проходов), расстояние между которыми 3 мкм. Заданные размеры: ширина 30 мкм, глубина 5 мкм; требуемые показатели качества: шероховатость дна ( $R_a$ ) менее 0,5 мкм, прямолинейность границ лучше 0,5 мкм. Полученный объект измерен на профилометрической системе (контроллер STIL Optima, сенсор CL1 MG-210) с разрешением 0,9 мкм по XY и 10 нм по Z. Разрешение изображения  $1972 \times 2018$  точек.

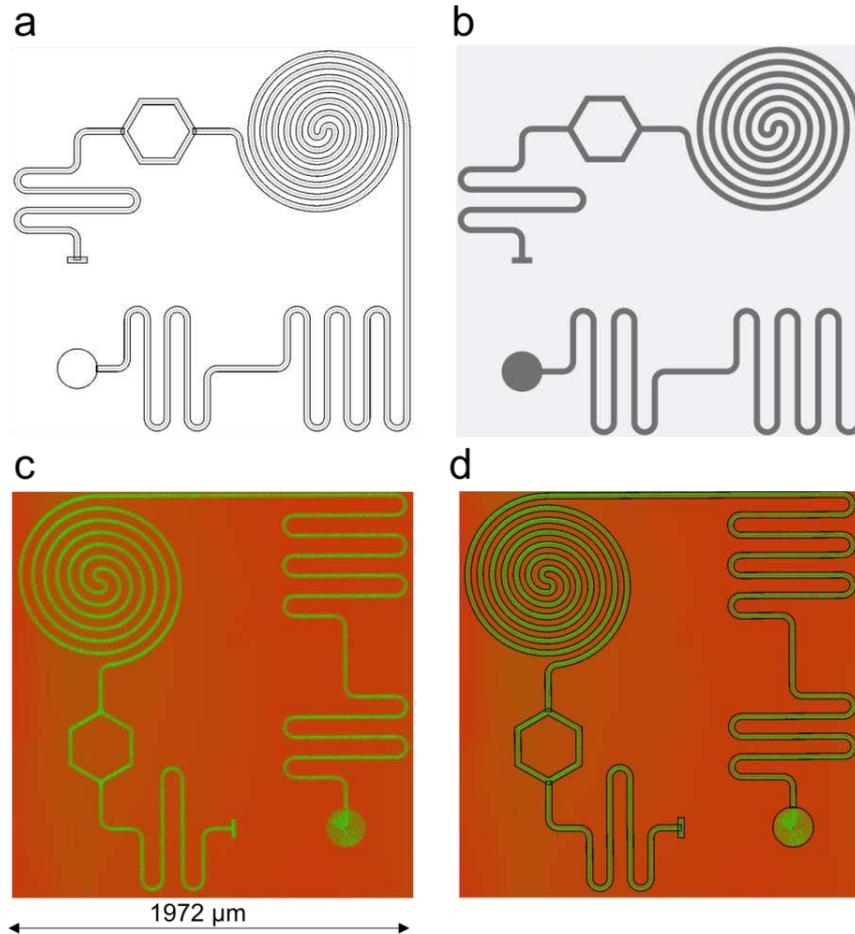


Рис. 51 Контроль качества фс лазерной записи. а) – исходная CAD-модель. б) – изображение, полученное по CAD-модели. в) – карта высот поверхности д) – результат совмещения с помощью разработанного алгоритма (глава 3)

Совмещение проводилось с помощью алгоритма, представленного в главе 3, при этом по векторной CAD-модели (Рис. 51а) формируется изображение модели (Рис. 51б), которое затем совмещается с изображением карты высот обработанной поверхности (Рис. 51в) с помощью разработанного алгоритма совмещения (глава 3). Размер изображения модели  $1994 \times 1935$  точек, количество точек возможного совмещения  $24 \times 36$  точек. Используются три набора параметров алгоритма (Таблица 9), результат совмещения для случая *Precise* представлен на Рис. 51д.

Таблица 9 Значения параметров совмещения для разработанного алгоритма совмещения, встроенного в программное обеспечение MarkInspector

Параметры	(1) Fast	(2) Medium	(3) Precise
$\delta\alpha$	2	1	1
<i>minImageSize</i>	128	128	256
<i>bestAlive</i> (%)	10	30	80
<i>zoneSize</i>	7	15	25
<i>numAlive</i>	300	300	500
<i>expandSize</i>	1	2	3
<i>discretizationStep</i>	0	3	7

Приведенные параметры позволяют регулировать соотношение время\точность совмещения. Этап *Rafi* проводился при угловой дискретизации  $\delta\alpha$ , при этом минимальный размер изображения в пирамиде изображений – *minImageSize*, после этапа *Rafi* остаётся *bestAlive* процентов точек с наибольшим значением взаимной корреляции. Размер зоны поиска при переходе на следующий этап к изображению большего разрешения задаётся квадратом с размерами  $zoneSize \times zoneSize$  точек вокруг максимума найденного на предыдущей итерации алгоритма. На последнем этапе работы алгоритма для случая *Precise* и *Medium* после этапа *Tefi* для *numAlive* точек  $(x,y)$  с максимальным значением взаимной корреляции, полученным после этапа *Tefi*, вычислялось значение взаимной корреляции при углах в диапазоне  $[-\delta\alpha + \alpha(x,y), \delta\alpha + \alpha(x,y)]$  с шагом *discretizationStep*. Такая же процедура проводилась для  $expandSize \times expandSize$  соседей каждой точки  $(x,y)$  из множества *numAlive*.

В Таблица 10 приведены время и результат совмещения при различных значениях параметров, для сравнения показано время работы алгоритма *Ciratefi* и полного перебора. Для алгоритма полного перебора с пирамидой изображений использован *minImageSize* = 128 точек,  $\delta\alpha$  = 1 градус. Тестирование алгоритмов проведено на персональном компьютере с Intel Core i5 CPU 3,2 ГГц. В результате разработанный алгоритм при наборах параметров

(2)(3) обеспечивает лучший результат совмещения, чем алгоритмы (4), (5), (6) при этом время совмещения не превышает одной минуты.

Таблица 10 Время и результат работы алгоритмов совмещения

Алгоритм	Результат совмещения	Корреляция	Время (мин.)
	$\Delta x, \Delta y, \Delta \alpha$		
(1) Fast	2; 33,5; 90	0,817	0,01
(2) Medium	1; 34,5; 91.28	0,823	0,5
(3) Precise	1; 34,5; 91.27	0,824	6
(4) Ciratefi	7; 33,5; 90	0,79	0,5
(5) Полный перебор с пирамидой изображений	0; 34,5; 90	0,817	42
(6) Полный перебор	0; 34,5; 90	0,817	180

После совмещения проводится автоматическое выделение контуров объектов с помощью алгоритма, предложенного в главе 2. Результат работы алгоритма представлен на Рис. 52. Для векторной CAD-модели предварительно производится векторизация дуг и удаление точек скелета из рассмотрения, в окрестности пересечения векторов, что позволяет избежать ошибок, возникающих при поиске точек границ одного структурного элемента в зоне возможного расположения другого. Выделение точек границ проводится последовательно в перпендикулярном направлении к векторам CAD-модели (см. глава 2, схема Рис. 53). Т.к. в отличие от главы 2 производится обработка карт высот, то оказалось, что наиболее подходящим критерием в этом случае является не градиент яркости, а пороговый критерий. Считается, что точка является точкой границы, если её глубина отличается от среднего уровня поверхности стекла более чем на 100 нм, и она максимально удалена от соответствующей точки центральной линии микроканала. Средняя высота

поверхности вычисляется локально вне зоны интереса структурного элемента по  $5 \times 10$  точкам, зона (6) (Рис. 53).

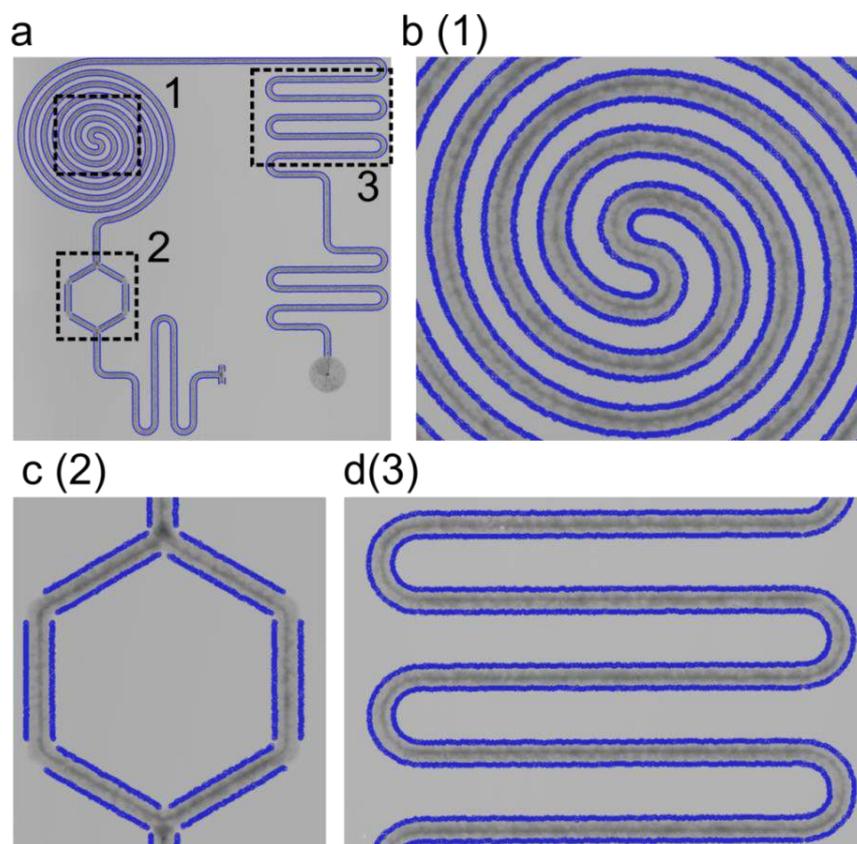


Рис. 52 Выделение границ микроканалов с помощью алгоритма, представленного в главе 2. а) – карта высот. (b-d) – отдельные зоны карты высот (а). На (с) показана обработка случая пересечений линий

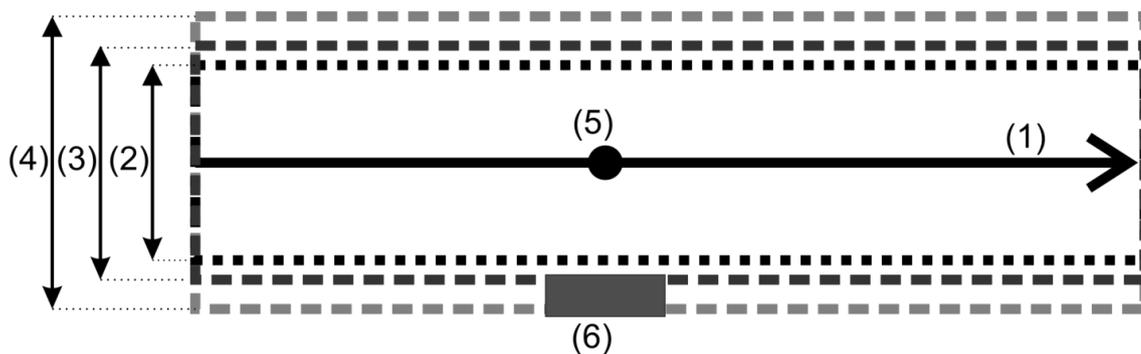


Рис. 53 Схема поиска границ для вектора (1). (2) – ширина, заданная в CAD-модели. (3) – ограничивает зону интереса, т.е. область в которой производится поиск точек границ; (4) – ограничивает зону сбора статистики. Для каждой точки скелета (5) средняя высота поверхности определяется в зоне (6)

В результате для микроканалов автоматически определены показатели качества, что сильно упростило работу оператора и позволило установить, что режим обработки в данном случае не являлся оптимальным, т.к. сколы на границах объекта имеют большие размеры, чем ограничено допусками (Таблица 11).

Таблица 11 Показатели качества микроканалов, полученные автоматически с помощью предложенного в главе 2 алгоритма

Показатель качества	Измеренное значение	Требуемое значение
ширина (мкм)	30,6	30,0
прямолинейность границ (мкм)	1,16	<0,5
шероховатость дна (Ra, мкм)	0,4	<0,5
средняя глубина (мкм)	5,3	5,0
разница в углах наклона стенок (градусы)	1	–
MRR (мм <sup>3</sup> /мин)	0,25	–

На Рис. 54 и в Таблица 12 приведены результаты контроля качества нанесения сеток на поверхность стекла фемтосекундным лазерным излучением. Параметры микрообработки: перекрытие 62%, энергия импульсов 0.91 мкДж, количество слоёв 3: при данном режиме обработки выполняется хорошее соотношение качество/производительность обработки. Суммарное время работы алгоритмов совмещения и выделения границ 30 сек. При разрешении карты высот обработанной поверхности 2803×2104 точек, изображения модели – 2726×2051 точек, размер зоны возможного совмещения – 77×53 точки. Ширина зоны интереса (Рис. 53 (3)) – 18 мкм задана в полтора раза больше ширины микроканала в САД-модели.

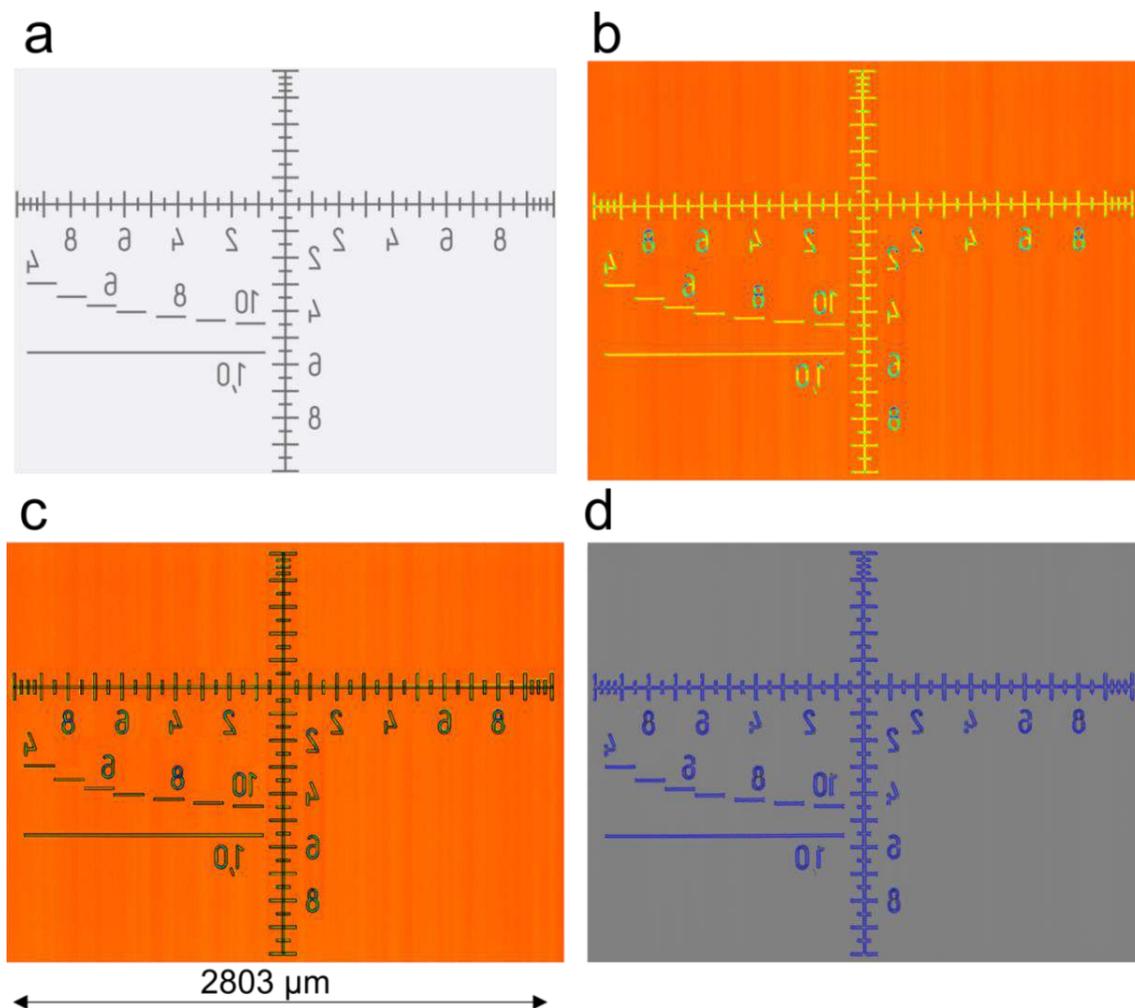


Рис. 54 Контроль качества нанесения сетки на поверхность стекла фемтосекундным лазерным излучением. (а) – изображение САD-модели, (б) – карта высот, полученная в результате измерения поверхности стекла на оптическом профилометре. (с) – результат автоматического совмещения, (д) – выделение границ структурных элементов.

Показатели качества каждого штриха сетки вычисляются независимо, после чего определяется среднее значение и стандартное отклонение. Получено, что для сетки выполняются заданные технологические требования, соответственно режим лазерной обработки – оптимален.

Таблица 12 Показатели качества сетки, полученные с помощью алгоритмов, рассмотренных в главах 2-3

Показатель качества	Измеренное значение	Требуемое значение
ширина (мкм)	12,5±0,7	12±1
прямолинейность границ (мкм)	0,5±0,5	< 1
шероховатость дна (Ra, мкм)	0,3±0,2	<0,5
средняя глубина (мкм)	6,7±0,5	7±1

### 4.3 Определение оптимальных режимов фемтосекундной лазерной микрообработки стекла

#### 4.3.1 Постановка задачи

Разработка технологий микро- структурирования и модификации поверхности стекла с субмикронным разрешением и высоким качеством привела к развитию многих областей науки и техники [164,165]. Одним из наиболее распространенных приложений микрообработки поверхности стекла является формирование сеток микроканалов как для оптических приборов и датчиков, так и для биочипов. В настоящее время существует несколько способов создания микроканалов в стекле, традиционным из которых является метод фотолитографии, который, однако, является многостадийным и трудоемким процессом [166]. Кроме того, создание структур с переменной глубиной достаточно сложная задача для данной технологии. Альтернативным методом является технология фемтосекундной ( $1 \text{ фс} = 10^{-15} \text{ с}$ ) лазерной абляции, при которой удаление материала с поверхности образца происходит под воздействием мощного лазерного излучения [167]. Основные преимущества данной технологии следующие: возможность создания сложных 3D структур с субмикронным разрешением, скорость обработки материала, широкие возможности автоматизации, сокращение этапов изготовления. Данные преимущества стимулировали рост публикаций по формированию микроканалов на стекле, а также кремнии и полимерах фемтосекундным

лазерным излучением, однако, в большинстве работ обработка производилась на низких частотах импульсов (1-5 кГц) при перемещении образца механическими подвижками [168–172]. Кроме того, сформированные каналы подвергались химической постобработке с помощью HF кислоты, что ослабляет преимущества использования лазерных технологий в проведенных экспериментах и осложняет решение задачи получения микроканалов с требуемыми размерами [173].

Применение сканаторных систем со скоростью сканирования  $\sim 1$  м/с и новейших фемтосекундных лазеров, генерирующих излучение с частотой импульсов  $\sim 100$  кГц, позволяет увеличить производительность обработки на несколько порядков, а также получить микроструктуры с высокой воспроизводимостью и в соответствие с заданной CAD-моделью [174,175]. Фемтосекундная лазерная микрообработка позволяет модифицировать поверхность оптически прозрачных диэлектриков с минимальным воздействием на вещество, поскольку зона теплового воздействия, определяемая как  $l = \sqrt{D\tau}$ , где  $\tau$  – длительность импульса,  $D$  – коэффициент температуропроводности, при фемтосекундной длительности мала (для стекла BK7 – 0,3 нм, при  $\tau = 200$  фс), а формируемые структуры имеют лучшие показатели качества, чем при обработке лазерными импульсами большей длительностью [49][176]. Однако, как показывает практика [172,177,178], образование сколов и трещин на поверхности хрупких материалов наблюдается и при обработке фемтосекундными импульсами при использовании неоптимальных режимов записи (Рис. 55). Поэтому задача оптимизации процесса записи поверхностных структур как с точки зрения качества границы, т.е. отсутствия сколов, трещин, так и с точки зрения повышения производительности является актуальной.

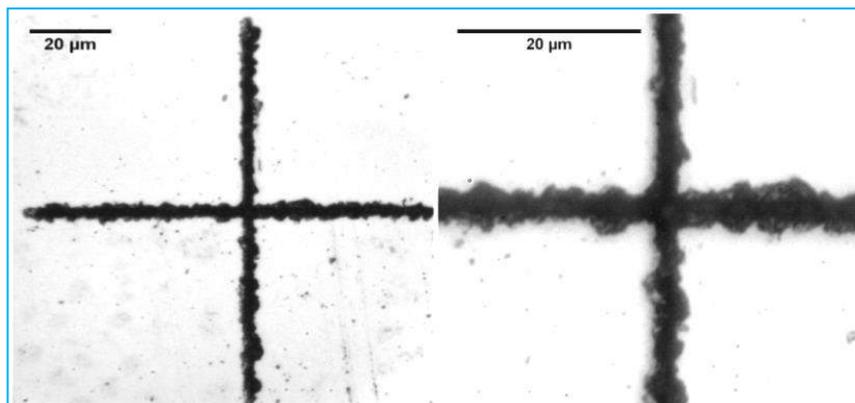


Рис. 55 Тестовый объект ( $100 \times 100$  мкм), размеры сколов до 1 мкм: сформирован фс лазером (1 кГц,  $E = 500$  нДж, перекрытие импульсов 95%), измерения на микроскопе Leica DM IRB, объектив 40х.

Так как в настоящее время отсутствует теоретическое описание процесса возникновения микро-сколов и трещин при фемтосекундной лазерной обработке, то наиболее адекватным методом оптимизации режимов лазерной обработки, с нашей точки зрения, является метод планирования экспериментов, т.е. проведение серии тестовых экспериментов, измерение полученных объектов, извлечение показателей качества изделий, построение математической модели на основе статистических данных (см. раздел 1.4). Данный метод позволил значительно сократить количество экспериментов при исследовании взаимодействия лазерного излучения микросекундной и наносекундной длительности с веществом и показал свою эффективность при получении объектов с заданными размерами, и высокими показателями качества (низкой шероховатости дна ( $R_a$ ), минимальным облоем) при высокой производительности обработки. Однако, согласно нашим данным, он до сих пор не применялся для определения оптимальных режимов высокоскоростной (частота импульсов  $> 10$  кГц) фемтосекундной лазерной микрообработки стекла.

В настоящей работе с помощью статистических методов мы провели исследование влияния энергии импульсов, перекрытия импульсов и количества слоёв на показатели качества и размеры микроканалов, формируемых на

поверхности стекла ВК7 фемтосекундными лазерными импульсами ( $\lambda = 1026$  нм,  $\tau = 232$  фс, размер пятна фокусировки 5 мкм). *Стекло ВК7* – марка боросиликатного стекла высокого качества, широко используемого в оптической промышленности. Полученные в процессе исследования данные использованы для формирования сеток и основ для биочипов с заданными параметрами качества и размерами по САD-модели.

#### 4.3.2 Экспериментальная установка и тестовые эксперименты

Эксперименты проводились на установке прецизионной фемтосекундной лазерной модификации материалов, представленной на Рис. 56. Излучение фемтосекундного иттербиевого лазера (Pharos 6W, Light Conversion LTD) с  $\lambda = 1026$  нм,  $\tau = 232$  фс, частотой импульсов 1-200 кГц, с энергией импульса до 200 мкДж, пройдя систему поворотных зеркал, с помощью гальванометрических сканеров (MPM-20D, Cambridge technology, Inc.) и  $f$ -theta линзы (S4LFT4031/328, Sill Optics GmbH & Co. KG,  $f = 32,8$  мм, поле сканирования  $6 \times 6$  мм<sup>2</sup>) фокусировалось на поверхность стекла ВК7 (толщина 8 мм) в пятно с размером 5 мкм. Механический поворотный стол позволял выставлять плоскостность поверхности образца по всей области записи. С помощью системы технического зрения (видеокамера и система освещения) выполнялось совмещение плоскости фокусировки с поверхностью образца.

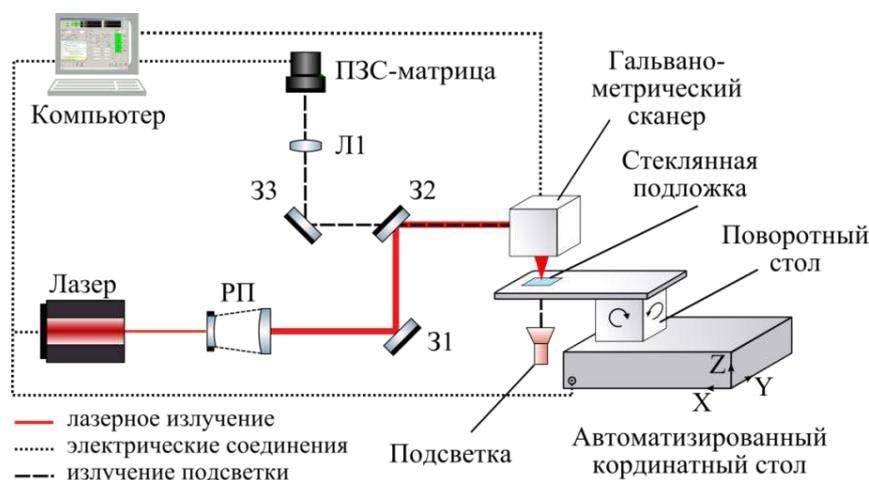


Рис. 56 Схема экспериментальной установки.

В качестве САД-модели тестового объекта был выбрано прямоугольник, т.к. он является типичным элементом сеток и биочипов. Размеры тестового объекта – 1000×60 мкм, формирование проводилось в 20 сканирований (проходов) вдоль длинной стороны микроканала, расстояние между линиями сканирования – 3 мкм (Рис. 57а). При проходе по линии скорость перемещения лазерного пучка постоянна, однако, перекрытие импульсов (Рис. 57b) изменялось между экспериментами. Для получения глубин в широком диапазоне 1-30 мкм обход прямоугольника проводился от одного до четырёх раз, без перефокусировки лазерного излучения.

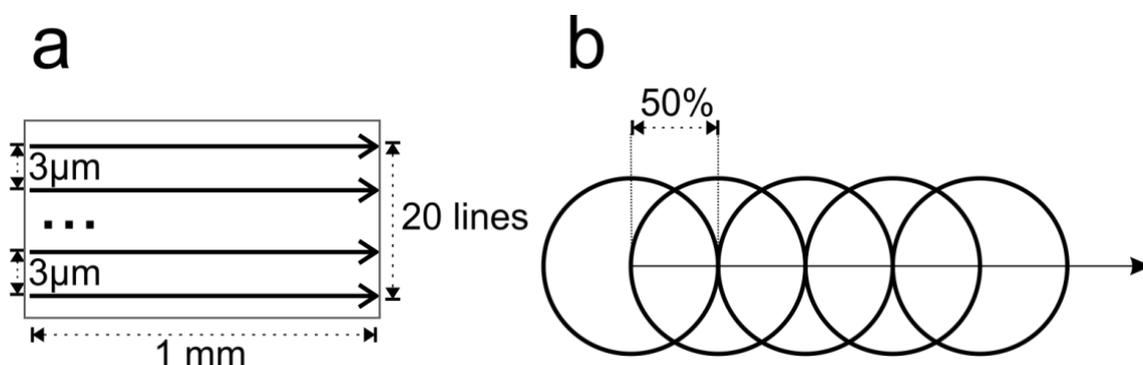


Рис. 57 Схема обработки: (а) Прямоугольник 1000×60 мкм, формируемый в 20 сканирований с изменяющимся перекрытием в направлении движения (b)

Для построения статистической зависимости показателей качества микроканалов от технологических параметров проведен полный факторный эксперимент D1 в широком диапазоне параметров обработки: шаг по перекрытию 3%, по энергии 0,68 мкДж. Факторами являются энергия импульсов (E), перекрытие импульсов (O), количество циклов обходов прямоугольника, в дальнейшем называемых слоями (N). Перекрытие рассчитывалось по следующей формуле:  $O = (1 - \frac{v}{2fR}) \times 100\%$ , где  $f$  - частота импульсов,  $v$  - скорость сканирования и  $R$  - радиус пятна фокусировки [44].

Для верификации статистических зависимостей показателей качества от технологических параметров проведены дополнительно два полных факторных эксперимента D2 (при большем числе слоёв) и D3 (при промежуточных

значениях энергии, шаг по энергии 0,23). Для тестирования воспроизводимости лазерной микрообработки в серии D3 дублировались эксперименты при значениях энергий 1,59 и 2,27 мкДж. Частота импульсов во всех экспериментах равна 50 кГц, при данной частоте стекло не успевает полностью остывать между импульсами, что позволяет получить большую производительность обработки. Факторы и их уровни приведены в Таблица 13.

Таблица 13 Значения факторов в сериях экспериментов D1, D2, D3

	D1	D2	D3
	Значения факторов		
Количество экспериментов	126	48	168+48
Энергия импульсов (E) мкДж	0,23; 0,91; 2,95; 3,64	1,59; 2,27	1,36; 1,59; 1,82; 2,05; 2,27; 2,50
Перекрытие (O) %	50, 53, 56, 59, 62, 65, 68 (%)		
Количество слоёв (N)	1-3	4	1-4

Для построения модели зависимости глубины от перекрытия, энергии импульсов и количества слоёв использован метод полиномиальной регрессии. Данные экспериментов аппроксимировались с помощью двух моделей M1 – стандартной квадратичной модели, используемой во многих исследовательских работах [83][50], и более сложной полиномиальной модели M2, предполагающей квадратичное взаимодействие между всеми факторами.

$$M_1 : \begin{cases} d = a_{00} + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j, \\ i, j \in [0 - 2] \end{cases} \quad (4.1)$$

$$M_2 : \begin{cases} d = \sum b_{ijk} O^i E^j N^k, \\ i, j, k \in [0 - 2] \end{cases}$$

где  $a$ ,  $b$  – коэффициенты регрессии,  $x_i$  – соответственно факторы: перекрытие импульсов ( $O$ ), энергия импульсов ( $E$ ) и количество слоёв ( $N$ ),  $d$  – глубина микроканалов. Для построения полиномиальных моделей использовались данные экспериментов **D1**, в которых глубина микроканалов превышает 1 мкм, а энергия импульсов больше 0,23 мкДж, т.к. в этом случае

микроканал имеет однородную глубину, т.к. плотность энергии превышает пороговую для стекол ( $1 \text{ Дж/см}^2$ ). Верификация проведена по данным экспериментов **D2** и **D3**.

#### *4.3.3 Анализ данных измерений*

Измерение такой большой серии тестовых объектов и определение показателей качества изделий является трудоёмкой и времязатратной задачей. Для ускорения процесса использованы специальные алгоритмы обработки изображений и оптические методы измерения, т.к. они позволяют измерять большие площади  $>10 \times 10 \text{ мм}^2$  с субмикронным разрешением за время порядка 1 часа без повреждения поверхности образца. Измерения проведены на профилометрической системе на основе конфокального хроматического сенсора CL1 MG-210 (оптическое латеральное разрешение – 0,9 мкм, по Z – 10 нм) и на конфокальном микроскопе Sensofar Neox (50x, NA = 0.8) с более высоким латеральным разрешением (86 нм). Данные, полученные с помощью первого измерительного прибора, использовались для определения глубины микроканалов, второго – для определения характеристики границ и шероховатости дна (Ra). Определение геометрических характеристик объектов проводилось автоматически с помощью двух алгоритмов: высокоточного совмещения карты высот измеренных данных с CAD-моделью обработки (см. глава 3) и алгоритма поточечного выделения границ микроканалов, разработанного на основе алгоритма (см. глава 2 и раздел 4.2), что сильно ускорило процесс измерения и уменьшило статистические погрешности, характерные для измерений «вручную» оператором.

На Рис. 58 приведены изображения двух микроканалов со сколами. С помощью описанного во второй главе алгоритма производится поточечное выделение их границ (черные точки) на картах высот, по следующему критерию: точка считается точкой границ, если изменение глубины от уровня поверхности превышает 100 нм, и при этом точка является наиболее удаленной

от соответствующей точки центральной линии микроканала. После выделения границ для микроканала на изображении определяется зона, удаленная от его границ на четверть ширины. На изображении Рис. 58 она выделена серыми штрихпунктирными линиями. В этой зоне поточечно вычисляется средняя глубина и её стандартное отклонение. Первую характеристику мы называем глубиной микроканала, вторую – шероховатостью дна (Ra).

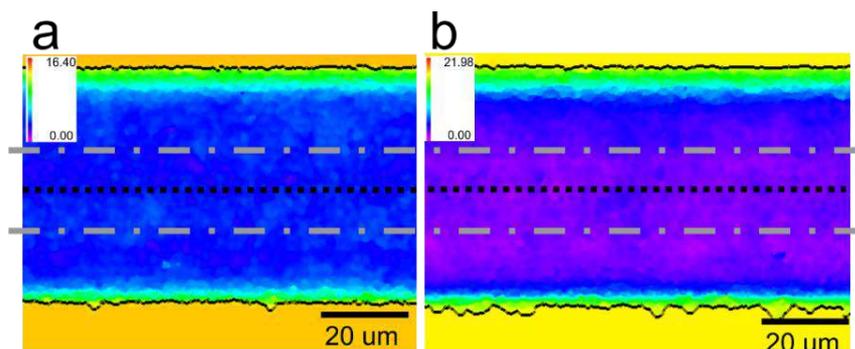


Рис. 58 Карты высот фрагментов микроканалов со сколами, черными точками отмечены границы микроканалов, т.е. точки в которых происходит изменение высоты на 100 нм по сравнению с уровнем поверхности. А) Параметры записи  $N = 4$ ,  $O = 53\%$ ,  $E = 1,59$  мкДж. Глубина канала 9,7 мкм. Размеры сколов: до  $5 \times 3$  мкм<sup>2</sup>, глубина 0,5 мкм. Straightness = 0,7 мкм. В) Параметры записи  $N = 4$ ,  $O = 65\%$ ,  $E = 1,82$  мкДж. Глубина микроканала 16,3 мкм. Размеры сколов: до  $7 \times 5$  мкм<sup>2</sup>, глубина 1 мкм. Straightness = 0,9 мкм. Штрих-пунктирные линии ограничивают зону сбора статистики для Depth и Ra, пунктирная линия – вектор CAD-модели.

Мы ввели количественную характеристику Straightness, которая статистически описывает изменение ширины микроканала и позволяет оценить размеры сколов:

$$w = \frac{\sum_{i=1}^N w_i}{num}, \quad Straightness = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (w_i - w)^2}{num}}, \quad (4.2)$$

где  $num$  – количество точек вектора CAD-модели на изображении, для которых производился поиск границ,  $w_i$  – расстояние между точками с

индексом  $i$ . Производительность обработки  $MRR$  (Material Removal Rate) вычисляется по формуле:

$$MRR = \frac{V}{t} = \frac{V_v}{20 \times lN}, \quad (4.3)$$

где  $V$  – объем удаленного вещества, определяется как объем заключенной между точками границ и вычисляется в процессе обработки изображения,  $t$  – время удаления вещества (зависит от длины зоны поиска границ ( $l$ ), количества слоёв ( $N$ ) и скорости перемещения лазерного пучка ( $v$ ), 20 – количество линий в исходном тест-объекте).

#### 4.3.4 Результаты

##### 4.3.4.1 Глубина и производительность

На Рис. 59 приведены графики зависимости глубины микроканалов от энергии импульсов, перекрытия и количества слоёв. При низких энергиях (0,23 мкДж) значения глубин близки, в центральной части зависимости линейны (0,91-2,95 мкДж), при  $N=2,3$  переход от 2,95 мкДж к 3,64 мкДж сопровождается увеличением угла наклона, что объясняется инкубационным эффектом. Видно, что при количестве слоёв 2 и 3 графики отличаются незначительно.

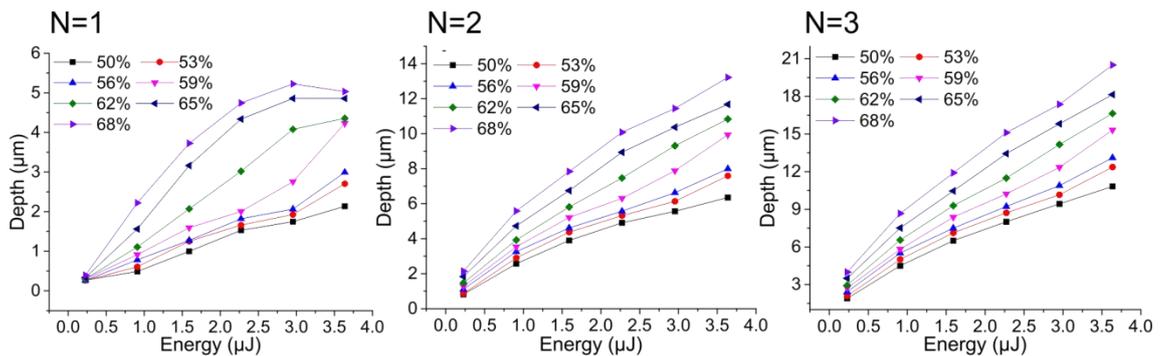


Рис. 59 Зависимость глубины микроканалов от перекрытия, энергии импульсов и количества слоев ( $N$ ). При  $N$  больше двух зависимость глубины от энергии импульсов близка к линейной, тенденции роста схожи для  $N = 2$  и  $N = 3$ .

По данным экспериментов D1 для моделей M1, M2 с помощью метода полиномиальной регрессии определены коэффициенты и проведена оценка

качества аппроксимации данных  $D1, D2, D3$  по характеристикам: коэффициент детерминации ( $R^2$ ), средние погрешности аппроксимации  $D_a(\text{мкм}), D_a(\%)$ , максимальные погрешность аппроксимации  $D_{\max}(\text{мкм}), D_{\max}(\%)$ :

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (m_i - d_i)^2}{\sum_i (m_i - \mu_i)^2},$$

$$D_a(\mu\text{m}) = \sum_{i=1}^K \frac{|m_i - d_i|}{K}, \quad D_a(\%) = \sum_{i=1}^K \frac{|m_i - d_i|}{Km_i} \times 100, \quad (4.4)$$

$$D_{\max}(\mu\text{m}) = \max_{i \in [1;K]} (|m_i - d_i|), \quad D_{\max}(\%) = \max_{i \in [1;K]} \left( \frac{|m_i - d_i|}{m_i} \right) \times 100,$$

где  $d_i$  - вычисленные по модели значения для эксперимента с индексом  $i$ ,  $m_i$  – результат измерений,  $\mu_i$  – усредненное значение  $m_i$  по  $K$  экспериментам. Результат оценки ошибок аппроксимации приведен в Таблица 14.

Таблица 14 Оценка ошибки аппроксимации экспериментальных данных моделями M1 и M2

	D1		D2		D3	
	M1	M2	M1	M2	M1	M2
$R^2$	0,92	0,95	0,89	0,88	0,93	0,95
$D_a(\text{мкм})$	0,25	0,16	0,49	0,48	0,24	0,19
$D_a(\%)$	5,12	3,00	3,54	3,60	5,28	4,14
$D_{\max}(\text{мкм})$	1,54	0,44	1,86	1,80	0,78	1,00
$D_{\max}(\%)$	30,70	19,59	11,45	25,96	81,36	89,66

Модель M2 лучше описывает экспериментальные данные D1, т.к. имеет больше степеней свободы, однако на данных D2 и D3 имеет сравнимые с M1 характеристики. Таким образом, модель M1 является достаточной для описания зависимости глубины микроканалов от технологических режимов микрообработки. На Рис. 60 показаны точки экспериментов и полученные полиномиальные кривые.

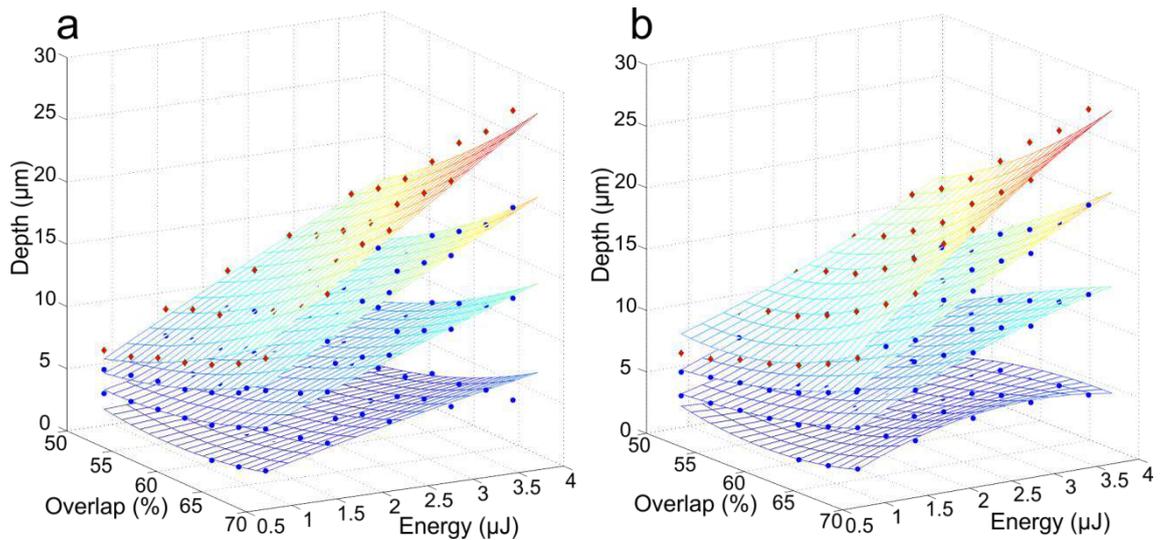


Рис. 60 Точки экспериментов и кривые, полученные с помощью полиномиальной регрессии по данным D1 эксперимента: а) M1 б) M2. Синие круги – эксперименты D1, ромбы – эксперименты D2. Видно, что модели хорошо описывают экспериментальные данные, однако для D2 при большом перекрытии и энергии импульсов наблюдаются отклонения больше 1 мкм.

На Рис. 61 графики показывают эффективность проведения обработки в несколько слоёв с большим перекрытием, при больших частотах импульсов. Увеличение перекрытия с 50% до 68% приводит к увеличению производительности в среднем на 25% (Рис. 61а), что, по-видимому, объясняется тем, что вещество не успевает охладиться в зоне воздействия за время между импульсами. Рис. 61б показывает, что производительность обработки растёт при увеличении количества слоёв, что можно объяснить эффектом последовательного воздействия лазерных импульсов (incubation effect), т.е. уменьшением порога абляции после воздействия первых импульсов уменьшается, вследствие образования локальных дефектов в материале [179,180].

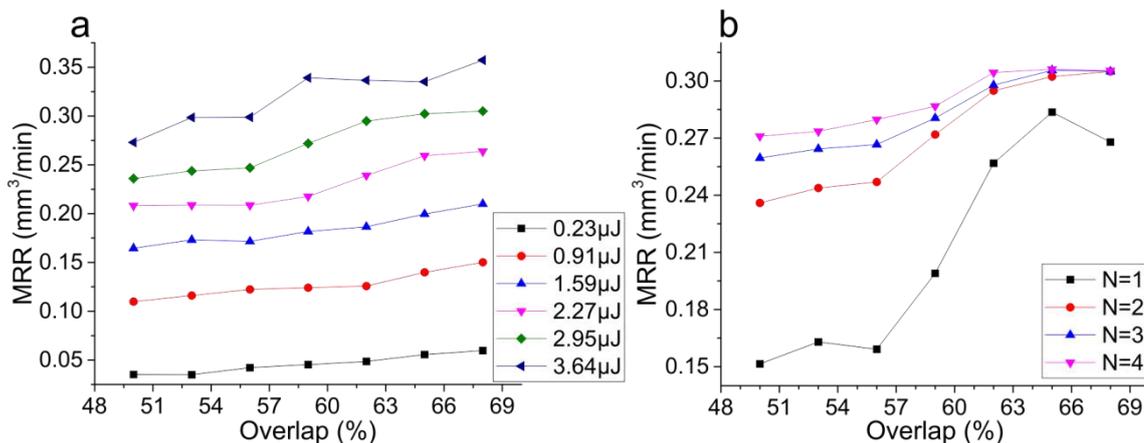


Рис. 61 Зависимость производительности обработки (MRR) от технологических параметров: а) – для  $N = 2$ ; б) – для  $E = 2,95$  мкДж, при различных  $N$ . На а) видно, что производительность обработки растёт при увеличении перекрытия импульсов, (б) показывает, что производительность растёт при увеличении числа слоёв. При перекрытии больше 64% наблюдается выход на режим при количестве слоёв больше трёх.

#### 4.3.4.2 Прямолинейность границ и $Ra$

Экспериментально установлено, что при заданных перекрытиях и энергиях импульсов при малом количестве слоёв ( $N = 1, 2$ ) основным процессом разрушения стекла является образование трещин вдоль микроканалов, а при большем количестве слоёв ( $N > 3$ ) преобладающими локальными дефектами являются сколы. При лазерной обработке хрупких материалов их разрушение происходит в процессе обработки в основном под действием упругих напряжений, когда тепло не успевает отводиться и возникают значительные градиенты температур, однако может произойти и после обработки под действием остаточных напряжений [20]. Наибольшее значение имеет азимутальная составляющая тензора напряжений, что соответствует расположению трещин и сколов в направлении движения лазерного пучка, а не в перпендикулярном направлении (Рис. 62). Сколы также могут образовываться под действием остаточных напряжений, основной причиной возникновения которых являются циклы нагревания-охлаждения

вещества. Анализ данных измерений показывает, что при значении прямолинейности границ Straightness выше 0,5 мкм размеры сколов достигают 10 мкм в направлении микроканала, 3 мкм – в перпендикулярном направлении, глубины в пределах от 0,5 до 1 мкм. При меньшем значении прямолинейности границ могут наблюдаться микро-сколы или единичные сколы, с характерными размерами менее  $3 \times 2$  мкм<sup>2</sup>, однако в большинстве случаев они оказывают незначительный эффект на показатели качества изделия.

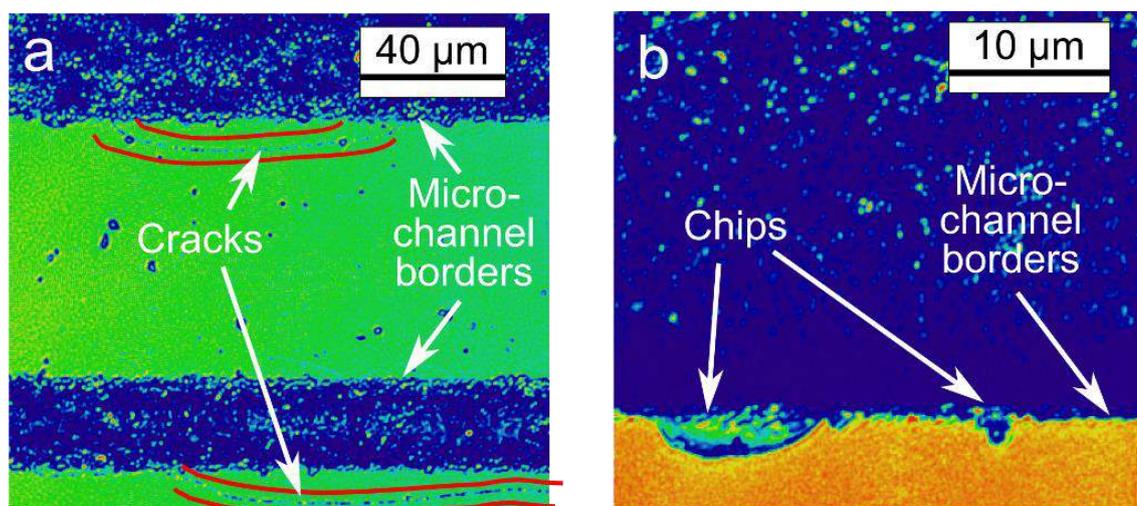


Рис. 62 Образование сколов и трещин на стекле при неоптимальных параметрах обработки при  $E = 2,27$  мкДж,  $O = 65\%$  а)  $N = 2$ , б)  $N = 4$ . На а) – видны трещины, которые выделены дополнительно красным для лучшего восприятия, на б) – сколы. Измерение на Sensofar Neox (150x,  $NA = 0,9$ , разрешение  $XY = 0,086$  мкм), приведены изображения расширенного фокуса.

Средние значения и стандартные отклонения для прямолинейности границ при группировках по различным технологическим параметрам приведено в Таблица 15. Установлено, что вероятность образования сколов выше при увеличении энергии импульсов (Рис. 63), а также при больших перекрытиях (выше 65%), что связано с тем, что вещество не успевает остыть за промежуток времени между импульсами, что и приводит к образованию больших термодинамических напряжений. Таким образом, для получения микроканалов с лучшим качеством границ обработку вещества целесообразно

проводить при средних значениях перекрытий 53-62% и энергиях в диапазоне 0,91-2,27 мкДж.

Таблица 15 Среднее значение и стандартное отклонение ( $\sigma$ ) прямолинейности границ при группировке по различным факторам

Группировка	Значение	Среднее значение (мкм)	$\sigma$ (мкм)
По Overlap	53-62%	0,51	0,1
	50%	0,57	0,14
	65-68%		
По Energy	0,23 мкДж	0,4	0,1
	0,91-2,27 мкДж	0,5	0,1
	2,95-3,64 мкДж	0,6	0,13
По N	все	0,55	0,12

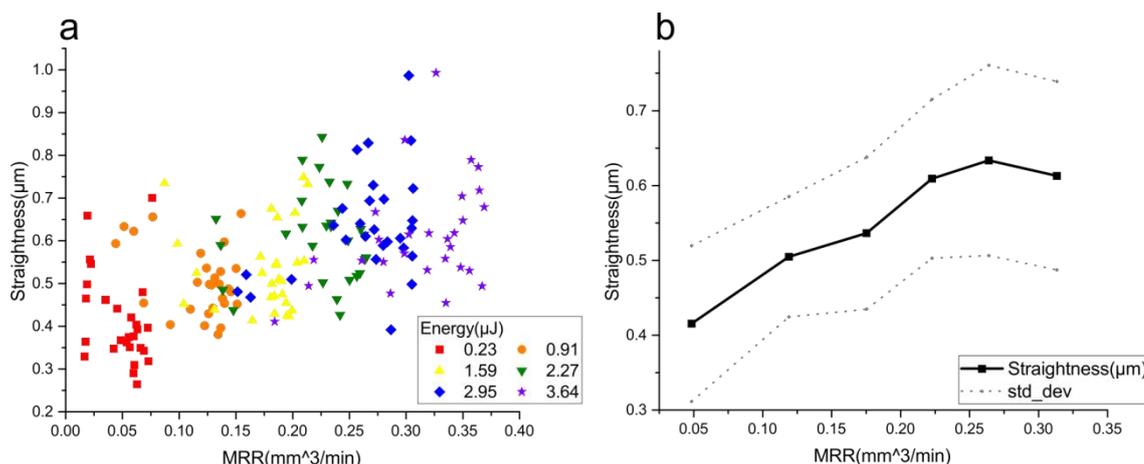


Рис. 63 Зависимость прямолинейности границ от производительности обработки (а) – сгруппированные по энергии, (б) – среднее и стандартное отклонение при группировке по энергии импульсов. Видно, что при увеличении производительности обработки также растёт вероятность образования сколов.

Результат статистического анализа зависимости Ra от технологических параметров представлен в Таблица 16.

Таблица 16 Среднее значение и стандартное отклонение ( $\sigma$ ) шероховатости дна при группировке по различным факторам

Группировка	Значение	Среднее значение (мкм)	$\sigma$ (мкм)
По Overlap	все	0,37	0,1

По Energy	0,23 мкДж	0,21	0,08
	0,91-2,27 мкДж	0,3-0,42	0,07
	2,95 мкДж	0,5	0,09
	3,64 мкДж	0,6	0,15
По N	1	0,43	0,19
	2	0,4	0,09
	3-4	0,37	0,06

Установлено, что  $R_a$ , усредненное при различных значениях количества слоёв и перекрытия, растёт при увеличении энергии импульсов (Рис. 64а) практически линейно, что можно объяснить большей конденсацией осколков вещества (debris) на дне микроканалов, что приводит к неравномерному поглощению лазерного излучения обрабатываемой поверхности. При большем количестве слоёв (3-4) значение шероховатости принимает наименьшее значение, т.е. происходит выход на режим. Как видно из Рис. 64b при близких значениях глубин дно микроканалов получается более гладким при большем количестве слоёв и при средних энергиях импульсов. Видно, что при увеличении глубины,  $R_a$  также растёт, что согласуется и с результатами других работ по формированию микроканалов лазерными методами на стекле [181]. На графике приведены кривые, ограничивающие расположение точек: с одной стороны наблюдается практически линейная зависимость, т.е. шероховатость дна прямо пропорциональна глубине, что происходит при обработке вещества при пороговых плотностях энергии лазерного излучения, с другой – происходит ограничение логарифмической кривой. Микроканалы, получаемые при условиях записи в окрестности второй кривой, имеют лучшие показатели качества обработки. В диапазоне перекрытий (50%-68%) не получено явной зависимости  $R_a$  от параметра перекрытия, для определения зависимости необходимо расширить диапазон значений перекрытий. В литературе для металлов наименьшие  $R_a$  получаются при перекрытии ~50% [44][45], при наносекундной обработке стекла в диапазоне 60%-80% [182], а для

фемтосекундной обработки кремния лучший результат получен при 84% перекрытии [23].

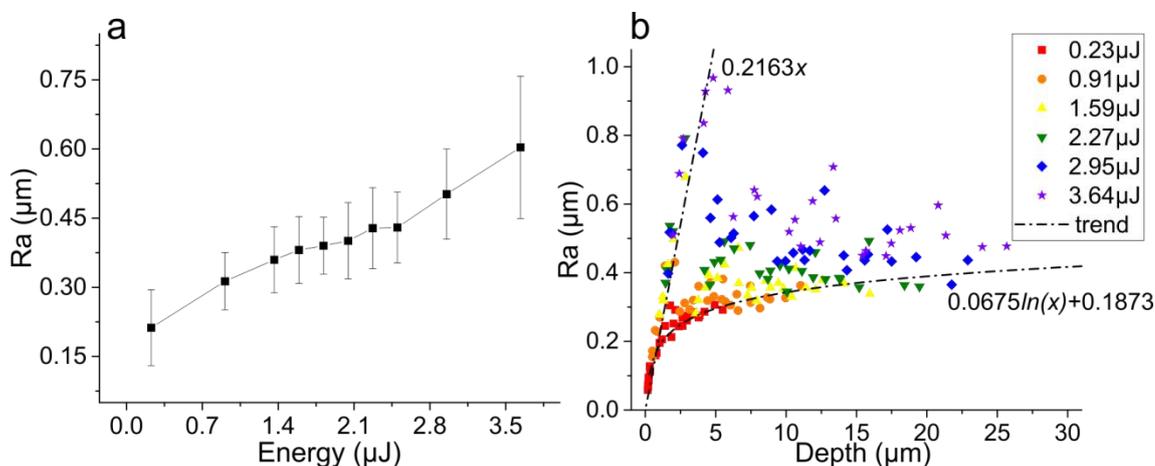


Рис. 64 Шероховатость дна ( $Ra$ ) от технологических параметров обработки. (a) –  $Ra$ , усредненное по экспериментам с различным перекрытием импульсов и  $N$  (эксперименты D1, D2, D3); (b) –  $Ra$  в зависимости от глубины микроканалов (эксперименты D1, D2). Приведены кривые (trend), которые ограничивают область расположения точек.

#### 4.3.4.3 Воспроизводимость

Для параметров глубины, прямолинейности границ, шероховатости дна и производительности проведена оценка воспроизводимости экспериментов по 144 повторяющимся экспериментам. Таблица 17 показывает, что микроканалы имеют незначительные отклонения по глубине,  $Ra$  и  $MRR$ , что подразумевает возможность построения математической модели, в то время как характеристика, описывающая образование сколов на границах имеет среднее стандартное отклонение больше 10%, таким образом, процесс скалывания стекла на границах микроканалов является менее стационарным.

Таблица 17 Оценка воспроизводимости фс лазерной микрообработки стекла с помощью измерения среднего стандартного отклонения для показателей качества в  $72 \times 2$  повторяющихся экспериментах.

Energy (мкДж)	$\sigma$ (Depth) мкм	$\sigma$ (Straightness) мкм	$\sigma$ (Ra) мкм	$\sigma$ (MRR) $\text{mm}^3/\text{min}$
1,59	0,07	0,14	0,014	0,005
2,27	0,15	0,08	0,03	0,002

По всем данным D1, D2, D3, проведен многофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) для глубины, Ra и прямолинейности границ, который показал следующее:

- 1) Для параметра глубины все факторы (O, E, N) и их взаимодействия (OE, ON, EN, OEN) значимы кроме OEN (p-value = 5,6%). Это значит, что графики полиномиальных зависимостей Depth(O, E) при изменении N от 1 до 4 отличаются в основном смещением в направлении оси Depth, что подразумевает возможность построения модели по данным экспериментов при небольшом числе слоёв (D1) и использовать её для аппроксимации данных экспериментов при большем числе слоёв (D2);
- 2) Для шероховатости дна (Ra) все факторы являются значимыми;
- 3) Для прямолинейности границ значимыми являются факторы E (p-value < 0,1%), O (p-value = 0,4%), и взаимодействия ON (p-value = 0,1%), EN (p-value = 1,6%).

#### 4.3.5 Создание биочипов

Проведена серия экспериментов по записи основ для биочипов при перекрытии импульсов 65%, т.к. согласно оценкам в этом случае получается высокая производительность записи, при энергиях импульсов E = 0,91, 1,82, 2,73, 3,64 мкДж и количестве слоёв N = 1,4,8. Микроканалы формировались в 8 линий с расстоянием 3 мкм между линиями. Изображение полученного микроканала, а также результат совмещения с САД-моделью приведены на Рис. 65, видно хорошее соответствие формы микроканалов заданной геометрии. На Рис. 66 приведены 3D модели фрагментов микроканалов.

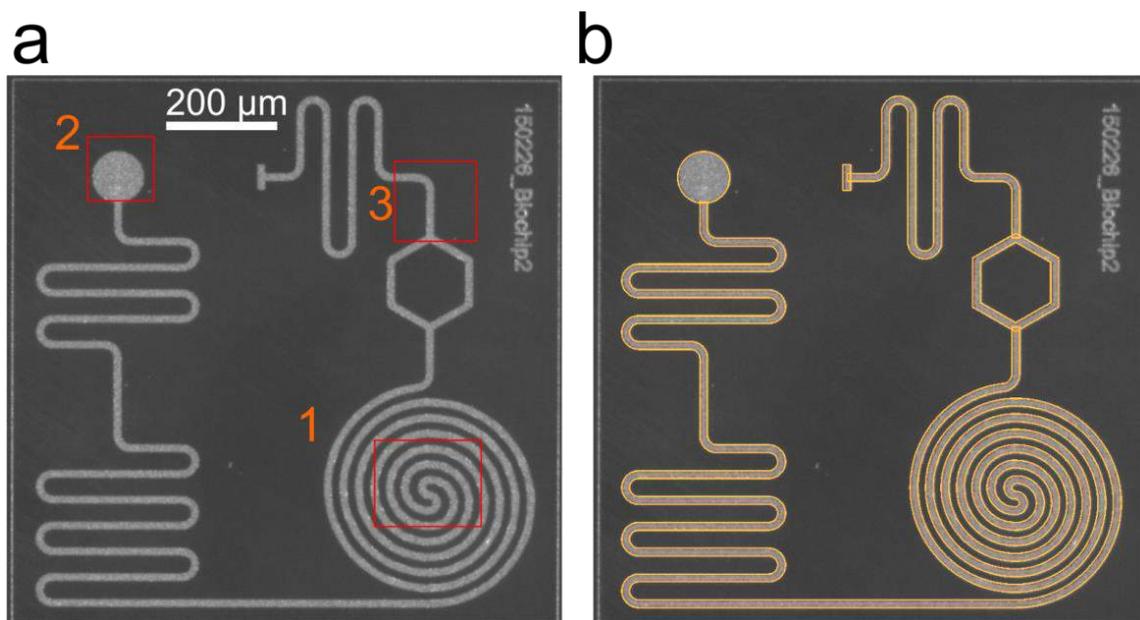


Рис. 65 Биочип на ВК-7 стекле, сформированный фс лазером. (а) – изображение, полученное с помощью видеокамеры IDS 10 МПксл, 3,3 мкм разрешение в плоскости изображения. (b) совмещение с САD-моделью.

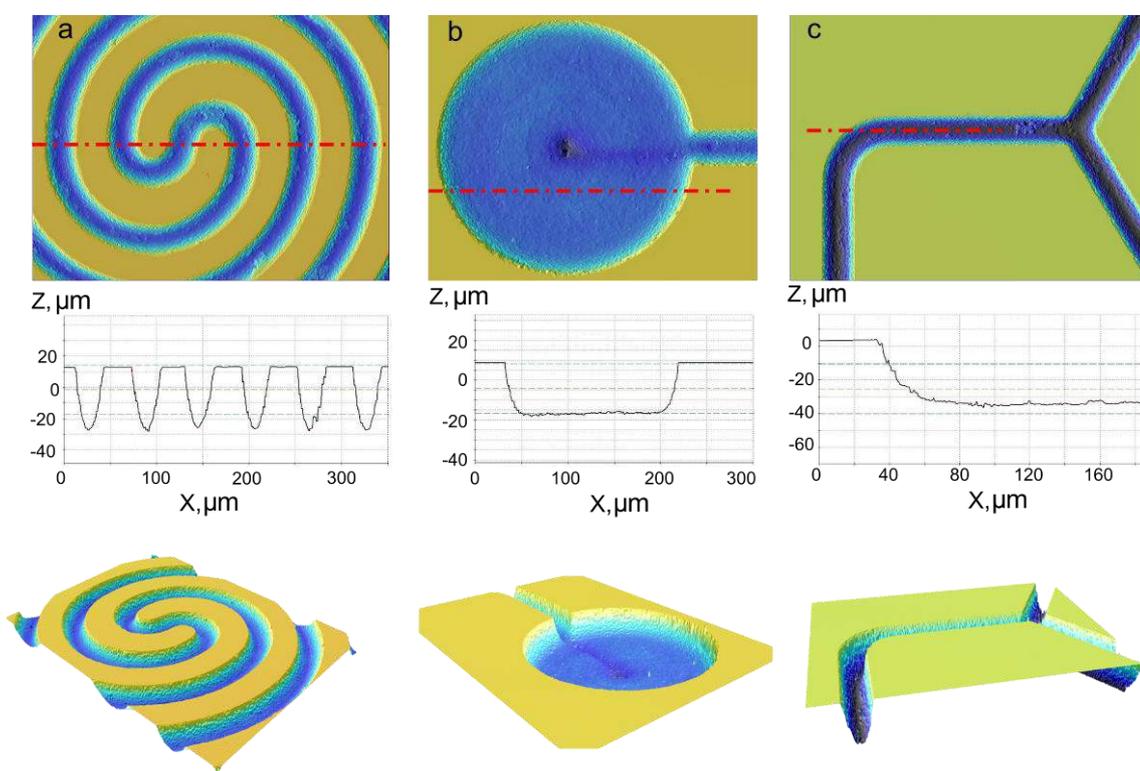


Рис. 66 Профиль биочипа. (1), (3) – параметры:  $O = 65\%$ ,  $E = 3,64 \text{ мкДж}$ ,  $N = 8$  слоёв, ширина линий 30 мкм, глубина 39 мкм. Шероховатость дна ( $R_a$ ) 0,4 мкм.  
(2) –  $O = 65\%$ ,  $E = 1,82 \text{ мкДж}$ ,  $N = 8$  слоёв, глубина 26,8 мкм.

В Таблица 18 приведены статистические данные: средняя глубина и прямолинейность границ, полученные в результате усреднения по 5 фрагментам микроканалов. Видно, что при  $E = 3,64$  мкДж,  $N = 4$  глубина микроканалов меньше, а количество сколов больше, чем при  $E = 1,82$  мкДж,  $N = 8$ , а при  $E = 0,91$  мкДж,  $N = 8$  глубина больше, чем при  $E = 1,82$  мкДж,  $N = 4$  при сравнимой прямолинейности границ, что подтверждает приведенный ранее анализ: микрообработку желательно проводить в диапазоне энергий импульсов менее 2,73 мкДж при большом количестве слоёв.

Таблица 18 Средняя глубина и стандартное отклонение по глубине биочипов, полученных при различных режимах лазерной микрообработки.

O(%)	E(мкДж)	N	Depth(мкм)	Straightness(мкм)	Ra(мкм)
65	0,91	1	1,2±0,07	0,4±0,07	0,2±0,02
65	1,82	1	3,0±0,05	0,47±0,1	0,51±0,02
65	2,73	1	4,9±0,2	0,42±0,03	0,54±0,14
65	3,64	1	6,0±0,2	0,41±0,09	0,61±0,09
65	0,91	4	9,6±0,09	0,42±0,01	0,24±0,01
65	1,82	4	14,9±0,43	0,5±0,05	0,25±0,01
65	6	4	19,5±0,16	1,35±0,14	0,33±0,03
65	3,64	4	23,3±0,12	1,72±0,34	0,35±0,05
65	0,91	8	18,3±0,14	0,46±0,02	0,19±0,01
65	1,82	8	26,8±0,15	0,76±0,15	0,20±0,01
65	2,73	8	33,6±0,28	1,35±0,31	0,23±0,08
65	3,64	8	39±0,35	5,4±0,97	0,44±0,03

Таблица 19 показывает возможность оценки глубины формируемых микроканалов с помощью полученных ранее моделей M1 и M2, при этом сравнивались только данные для микроканалов с глубиной меньше 30 мкм. При больших глубинах наблюдается значительное расхождение с моделью ( $> 1$  мкм), что можно объяснить инкубационным эффектом. Средняя ошибка M1 и M2 не превышает 1 мкм, поэтому обе модели могут быть использованы для оценки глубины микроканалов даже при большом числе слоёв ( $N = 8$ ).

Таблица 19 Оценка точности аппроксимации экспериментальных данных с помощью моделей M1, M2

	M1	M2
$R^2$	0,9008	0,8959
$D_a$ (мкм)	0,8348	0,7383
$D_a$ (%)	9,7694	10,1373
$D_{max}$ (мкм)	2,1739	1,7792
$D_{max}$ (%)	36,6888	34,2719

#### 4.3.6 Выводы

Таким образом, показана возможность проведения оптимизации высокоскоростной (50 кГц) фемтосекундной лазерной микрообработки стекла ВК7 с использованием разработанных алгоритмов и регрессионного анализа данных измерений. Получена регрессионная модель, которая применима для получения микроканалов и сложных сеток с шириной более 30 мкм и глубинами в диапазоне 1-30 мкм при средней погрешности, не превышающей 10%. Установлены режимы лазерной микрообработки для получения микроканалов с шероховатостью дна менее 0,5 мкм и минимальными сколами на границах при производительности обработки выше 0,3 мм<sup>3</sup>/мин.

## Заключение

В рамках проведенной работы разработан комплекс программных средств для получения математических моделей зависимости размеров формируемых изделий от технологических режимов лазерной микрообработки практически в полностью автоматическом режиме с минимальным участием оператора. Показано, что экспериментальный подход и статистические алгоритмы являются наиболее перспективным методом получения модельных зависимостей при исследовании процесса лазерной микрообработки материалов. При этом необходимым условием для построения моделей, хорошо согласующихся с экспериментальными данными, является использование высокоточных методов измерения формируемых объектов. Известно, что современные системы оптических измерений позволяют получать изображения и профилограммы изделий с субмикронным разрешением, высоким отношением сигнал-шум и быстродействием. Установлено, что при измерении объектов, сформированных в процессе лазерной микрообработки, наилучшие характеристики обеспечивает метод конфокальной лазерной сканирующей микроскопии. Однако даже при использовании конфокальных методов получаемые данные характеризуются высоким уровнем шума, наличием искажений, связанных, как с ошибками обработки, так и с ошибками измерения, что затрудняет применение существующих методов цифровой обработки сигналов для получения достоверных данных о размерах и показателях качества объектов. В ходе работы разработан комплекс программ и алгоритмические средства для анализа изображений зоны векторной лазерной микрообработки и профилограмм модифицированной поверхности. Средства позволяют проводить сопоставление данных измерений с САД-моделью, выделять границы объектов, определять их размеры и находить локальные дефекты обработки в полностью автоматическом режиме. С их использованием на примере стекла ВК7 впервые показана возможность получения

математических моделей для оптимизации процесса высокоскоростной фемтосекундной лазерной записи сеток и микроканалов на поверхности хрупких материалов. В настоящее время комплекс программ «Profilometer», разработанный в рамках проекта «Разработка технологии точной лазерной микрообработки стеклянных, кристаллических, полимерных и композитных заготовок изделий оптико-механической промышленности для изготовления методами прямой лазерной записи оптических шкал, лимбов, сеток» (проект Минобрнауки № 2012-218-03-004), успешно используется при технологической подготовке фемтосекундной лазерной микрообработки и контроле качества объектов, формируемых по CAD-моделям, состоящих из нескольких тысяч структурных элементов. С использованием разработанных средств методом прямой лазерной записи производится запись оптических шкал и сеток для оптико-электронных приборов нового поколения.

Ниже сформулированы следующие основные результаты:

1. Разработан метод анализа изображений зоны 2D, 2,5D векторной лазерной микрообработки, позволяющий по завершению лазерной обработки определить и сравнить геометрические параметры объектов с заданными значениями, посредством совмещения с CAD-моделью и выделения контуров объектов в поперечном направлении к каждому вектору CAD-модели. Максимальная погрешность не превышает 10% при ширине объектов менее 50 мкм, разрешении системы технического зрения ~1 мкм и отношении сигнал-шум изображений не менее 5.
2. Создан алгоритм для сопоставления карт высот CAD-модели и профилограммы поверхности, обработанной лазерным излучением, в условиях наличия шума и технологических дефектов микрообработки. Алгоритм основан на алгоритме Ciratefi и итеративном поиске максимума. Установлено, что при отношении сигнал-шум измерений не менее 3,3 погрешности совмещения карт высот не хуже, чем у алгоритма полного перебора, при этом быстродействие на порядок выше. Применение алгоритма позволяет определить показатели качества изделий (отклонения

размеров, шероховатость дна, наличие локальных дефектов), формируемых в процессе 3D лазерной микрообработки.

3. Показана возможность оптимизации режимов высокоскоростной фемтосекундной лазерной микрообработки стекла с помощью разработанных алгоритмов и регрессионного анализа данных. Полученная по тестовым данным регрессионная модель позволила существенно ускорить процесс определения режимов лазерной микрообработки стекла ВК7 для получения микроканалов с глубиной в диапазоне 1-30 мкм и имеет среднюю погрешность, не превышающую 10%. Установлены режимы обработки стекла ВК7, обеспечивающие высокие показатели качества изделий (шероховатость дна менее 0,5 мкм, минимальные сколы) при высокой производительности обработки (более 0,3 мм<sup>3</sup>/мин).
4. Разработанные программно-алгоритмические средства «MarkInspector» и «Profilometer» успешно использованы для контроля качества и определения оптимальных режимов прецизионной фемтосекундной лазерной микромодификации стекла при выполнении работ по заказам АО «Швабе-Оборона и Защита» и ОАО «Красногорского завода им С.А. Зверева».

## Список литературы

1. Вакс Е.Д., Миленский М.Н., Сапрыкин Л.Г. Практика прецизионной лазерной обработки. М.: Техносфера, 2013. 696 с.
2. Orazi L. и др. An automated procedure for material removal rate prediction in laser surface micromanufacturing // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2009. Т. 46, № 1. С. 163–171.
3. Soveja A. и др. Optimization of TA6V alloy surface laser texturing using an experimental design approach // *Opt. Lasers Eng.* 2008. Т. 46, № 9. С. 671–678.
4. Desai C.K., Shaikh A. Prediction of depth of cut for single-pass laser micro-milling process using semi-analytical, ANN and GP approaches // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2011. Т. 60, № 9-12. С. 865–882.
5. Ciurana J., Arias G., Ozel T. Neural Network Modeling and Particle Swarm Optimization (PSO) of Process Parameters in Pulsed Laser Micromachining of Hardened AISI H13 Steel // *Mater. Manuf. Process.* 2009. Т. 24, № 3. С. 358–368.
6. Dhara S.K., Kuar a. S., Mitra S. An artificial neural network approach on parametric optimization of laser micro-machining of die-steel // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2007. Т. 39, № 1-2. С. 39–46.
7. Bessmeltsev V.P., Bulushev E.D., Goloshevsky N. V. Method for Localizing and Measuring Structures Formed under Laser Microprocessing // *Pattern Recognit. Image Anal. Adv. Math. Theory Appl.* 2011. Т. 21, № 3. С. 373–376.
8. Бессмельцев В.П., Булушев Е.Д., Голошевский Н.В. Экспертная система для оптимизации режима лазерной микрообработки // *Известия вузов. Приборостроение.* 2011. Т. 54, № 2. С. 17–22.
9. Бессмельцев В.П., Булушев Е.Д. Быстрый алгоритм совмещения изображений для контроля качества лазерной микрообработки // *Компьютерная оптика.* 2014. Т. 38, № 2. С. 343–350.
10. Бессмельцев, В. П., Булушев Е.Д. Оптимизация режимов лазерной микрообработки // *Автометрия.* 2014. Т. 50, № 6. С. 3–21.
11. Дьюли У. Лазерная технология и анализ материалов. Пер. с англ. М.: Мир, 1986. 504 с.
12. Вейко В.П. и др. Взаимодействие лазерного излучения с веществом / под ред. В.И. Конова. М.: Физматлит, 2008. 312 с.
13. Мачулка Г.А. Лазеры в печати. М.: Машиностроение, 1989. 221 с.
14. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки: Учеб. Пособие для вузов / под ред. Григорьянца А.Г. М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2006. 663 с.

15. Реди Д. Промышленные применения лазеров. Пер. с англ. М.: Мир, 1981. 638 с.
16. Dahotre N., Harimkar S. Laser fabrication and machining of materials. Springer, 2008. 565 с.
17. Gladush G., Smurov I. Physics of laser materials processing / под ред. Hull R. и др. Springer, 2011. 548 с.
18. Steen W., Mazumder J. Laser material processing. 4-е изд. Springer, 2010. 567 с.
19. Dowden J. The theory of laser materials processing / под ред. Hull R. и др. Springer, 2009. 404 с.
20. Ren D., Narayan R.J., Lee Y. Machined Surface Error Analysis for Laser Micromachining of Biocompatible Polymers // Comput. Aided. Des. Appl. 2009. Т. 6, № 6. С. 781–793.
21. Лансберг Г.С. Оптика. 6-е изд. М.: Физматлит, 2010. 848 с.
22. Айхлер Ю., Айхлер Г. Лазеры. Исполнение, управление, применение. М.: Техносфера, 2012. 496 с.
23. Cline H.E., Anthony T.R. Heat treating and melting material with a scanning laser or electron beam // J. Appl. Phys. 1977. Т. 48, № 9. С. 3895.
24. Gross. Transient numerical simulation of laser material processing with focus on laser cutting. PhD dissertation, 2004.
25. Chun M., Rose K. Interaction of High-Intensity Laser Beams with Metals // J. Appl. Phys. 1970. Т. 41, № 2. С. 614.
26. Stournaras A. и др. Theoretical and experimental investigation of pulsed laser grooving process // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2009. Т. 44, № 1-2. С. 114–124.
27. Zhang W., Yao Y.L., Chen K. Modelling and Analysis of UV Laser Micromachining of Copper // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2001. Т. 18, № 5. С. 323–331.
28. Dobrev T., Pham D., Dimovacturing S. A simulation model for crater formation in laser milling // Multi-Material Micro Manufacture. Oxford, 2005. С. 155–159.
29. Бессмельцев, В.П. Голошевский Н.В. Система управления составными двухкоординатными сканаторами // Автометрия. 2007. Т. 43, № 1. С. 116–126.
30. Wang X. и др. Optimized Nanosecond Pulsed Laser Micromachining of Y-TZP Ceramics // J. Am. Ceram. Soc. 2008. Т. 91, № 2. С. 391–397.
31. Harrison P.M., Henry M., Brownell M. Laser processing of polycrystalline diamond, tungsten carbide and related hard materials // J. Laser Appl. 2006. Т. 18, №

2. С. 117–127.

32. Chen T.-C., Darling R.B. Parametric studies on pulsed near ultraviolet frequency tripled Nd:YAG laser micromachining of sapphire and silicon // *J. Mater. Process. Technol.* 2005. Т. 169, № 2. С. 214–218.

33. Samant A.N., Dahotre N.B. An integrated computational approach to single-dimensional laser machining of magnesia // *Opt. Lasers Eng.* 2009. Т. 47, № 5. С. 570–577.

34. Deladurantaye P. и др. Material micromachining using a pulsed fiber laser platform with fine temporal nanosecond pulse shaping capability // *Fiber Lasers VI: Technology, Systems and Applications*. SPIE, 2009. Т. 7195. С. 71951S – 71951S – 12.

35. Dubey A., Yadava V. Laser beam machining-A review // *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2008. Т. 48, № 6. С. 609–628.

36. Dubey A.K., Yadava V. Experimental study of Nd:YAG laser beam machining-An overview // *J. Mater. Process. Technol.* 2008. Т. 195, № 1-3. С. 15–26.

37. Dobrev T., Dimov S.S., Thomas A.J. Laser milling: modelling crater and surface formation // *J. Mech. Eng. Sci.* 2006. Т. 220. С. 1685–1696.

38. Шоев С.А., Булушев Е.Д. Разработка программных средств для моделирования процесса лазерной 3D микрообработки // XV Всероссийская конференция молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям. Тюмень, 2014. С. 56.

39. Гришин М.П., Курбанов Ш.М., Маркелов В.П. Автоматический ввод и обработка фотографических изображений на ЭВМ. М.: Энергия, 1976. 152 с.

40. Li J., Ananthasuresh G. A quality study on the excimer laser micromachining of electro-thermal-compliant micro devices // *J. Micromechanics Microengineering*. 2001. Т. 11, № 1. С. 38–47.

41. Kathuria Y.P. Laser microprocessing of metallic stent for medical therapy // *J. Mater. Process. Technol.* 2005. Т. 170, № 3. С. 545–550.

42. Benardos P.G., Vosniakos G.-C. Predicting surface roughness in machining: a review // *J. Mach. Tools Manuf.* 2003. Т. 43, № 8. С. 833–844.

43. Knowles M. и др. Laser micromilling of Ceramics, Dielectrics and Metals using nanosecond and picosecond lasers // *Multi-Material Micro Manufacture*. 2006. С. 131–134.

44. Kaldos A. и др. Laser machining in die making—a modern rapid tooling process // *J. Mater. Process. Technol.* 2004. Т. 155-156. С. 1815–1820.

45. Cheng J. и др. Effects of laser operating parameters on metals micromachining

with ultrafast lasers // *Appl. Surf. Sci.* 2009. T. 256, № 5. C. 1514–1520.

46. Campanelli S.L., Casalino G., Contuzzi N. Multi-objective optimization of laser milling of 5754 aluminum alloy // *Opt. Laser Technol.* Elsevier, 2013. T. 52. C. 48–56.

47. Hick A. Rapid Surface Heat Treatments-a Review of Laser and Electron Beam Hardening // *Heat Treat. Met.* 1983. T. 10, № 1. C. 3–11.

48. Sheehy M., Winston L., Carey J. Role of the background gas in the morphology and optical properties of laser-microstructured silicon // *Chem. Mater.* 2005. T. 17, № 14. C. 3582–3586.

49. Chichkov B.N. и др. Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids // *Appl. Phys. A.* 1996. T. 63. C. 109–116.

50. Teixidor D. и др. Optimization of process parameters for pulsed laser milling of micro-channels on AISI H13 tool steel // *Robot. Comput. Integr. Manuf.* 2013. T. 29, № 1. C. 209–218.

51. Li Y., Gu P. Free-form surface inspection techniques state of the art review // *Comput. Des.* Elsevier, 2004. T. 36, № 13. C. 1395–1417.

52. Pang L., Peng D., He L. Computational lithography and inspection (CLI) and its applications in mask inspection, metrology, review, and repair // *Photomask Technology.* International Society for Optics and Photonics. SPIE, 2010. C. 78232H – 78232H.

53. Goldstein M., Naulleau P. Actinic microscope for extreme ultraviolet lithography photomask inspection and review. // *Opt. Express.* 2012. T. 20, № 14. C. 15752–15768.

54. Cobb N., Zakhor A., Miloslavsky E. Mathematical and CAD framework for proximity correction // *International Symposium on Microlithography.* SPIE, 1996. C. 208–222.

55. Cobb N.B. Fast Optical and Process Proximity Correction Algorithms for Integrated Circuit Manufacturing. PhD dissertation, 1998.

56. Leach R. *Optical Measurement of Surface Topography.* Springer Berlin Heidelberg, 2011. 318 с.

57. Osten W. *Optical inspection of microsystems.* CRC Press, 2006. 503 с.

58. Hansen H.N. и др. Dimensional Micro and Nano Metrology // *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* 2006. T. 55, № 2. C. 721–743.

59. Artigas R. *Imaging Confocal Microscopy* // *Optical Measurement of Surface Topography* / под ред. Leach R. Springer, 2011. C. 237–286.

60. Tata B., Raj B. *Confocal laser scanning microscopy: Applications in material*

science and technology // Bull. Mater. Sci. 1998. Т. 21, № 4. С. 263–278.

61. Prieto F. и др. An Automated Inspection System // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2002. Т. 19, № 12. С. 917–925.

62. Wolf K., Roller D., Schäfer D. An approach to computer-aided quality control based on 3D coordinate metrology // J. Mater. Process. Technol. Elsevier, 2000. Т. 107, № 1. С. 96–110.

63. Besl P.J., McKay N.D. A method for registration of 3-D shapes // IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. IEEE Computer Society, 1992. Т. 14, № 2. С. 239–256.

64. Rusinkiewicz S., Levoy M. Efficient Variants of the ICP Algorithm // 3-D Digital Imaging and Modeling. IEEE, 2001. С. 145–152.

65. Karnakis D., Mortimer V., Knowles M. Recent Advances in Ultrafast Laser Micromachining Systems for Material Micromanufacturing // Laser Metrology, Machine Tool, CMM & Robotic Performance. Кардиф, 2007. С. 120–130.

66. TeoSys [Электронный ресурс]. URL: <http://www.teosys.com> (дата обращения: 28.10.2015).

67. Malamas E.N. и др. A survey on industrial vision systems, applications and tools // Image Vis. Comput. Elsevier, 2003. Т. 21, № 2. С. 171–188.

68. Wang X., Ananthasuresh G., Ostrowski J. Vision-Based Extraction of Geometry and Forces From Fabricated Micro Devices // Modelling and Simulation of Microsystems. Сан-Диего, 2000. С. 257–260.

69. Шапиро Л., Стокман Д. Компьютерное Зрение / под ред. Соколова М.С. М.: Бинوم. Лаборатория знаний, 2006. 752 с.

70. Rosenfeld A. Axial representations of shape // Comput. Vision, Graph. Image Process. 1986. Т. 33, № 2. С. 156–173.

71. Blum H., others. A transformation for extracting new descriptors of shape // Model. Percept. speech Vis. form. 1967. Т. 19, № 5. С. 362–380.

72. Одиноков С. и др. Корреляционный алгоритм оценки качества мастер-матриц защитных голограмм // Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы. 2012. Т. 5. С. 317–320.

73. Kolyuchkin V. и др. Correlation method for quality control of master matrix used for embossing security holograms // Optics+ Optoelectronics. International Society for Optics and Photonics / под ред. Hrabovský M., Sheridan J.T., Fimia-Gil A. SPIE, 2013. Т. 8776. С. 87760A – 87760A – 6.

74. Kwon H.-J., Park T.-H. Automated optical inspection for holograms with mixed patterns // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2010. Т. 54, № 1-4. С. 215–221.

75. Xie X. A Review of Recent Advances in Surface Defect Detection using

Texture analysis Techniques. 2008. Т. 7, № 3. С. 1–22.

76. Kumar A. Computer-vision-based fabric defect detection: a survey // *Industrial Electronics. IEEE*, 2008. Т. 91, № 1. С. 348–363.

77. Sirvarao S., Anand T., Ammar A. DOE Based Statistical Approaches in Modeling of Laser Processing – Review & Suggestion // *Int. J. Eng. Technol.* 2010. Т. 10, № 4. С. 1–8.

78. Box G., Wilson K. On the Experimental Attainment of Optimum Conditions // *J. R. Stat. Soc. Ser. B.* 1951. Т. 13, № 1. С. 1–45.

79. Czitrom V. One-factor-at-a-time versus designed experiments // *Am. Stat.* 1999. Т. 53, № 2. С. 126–131.

80. Сидняев Н., Вилисова Н. Введение в теорию планирования эксперимента. М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2011. 446 с.

81. Montgomery D. Introduction to statistical quality control. 6-е изд. Wiley, 2007. 754 с.

82. Saklakoglu I.E., Kasman S. Investigation of micro-milling process parameters for surface roughness and milling depth // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2010. Т. 54, № 5-8. С. 567–578.

83. Dhupal D., Doloi B., Bhattacharyya B. Parametric analysis and optimization of Nd:YAG laser micro-grooving of aluminum titanate (Al<sub>2</sub>TiO<sub>5</sub>) ceramics // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2007. Т. 36, № 9-10. С. 883–893.

84. Biswas R. и др. A parametric study of pulsed Nd:YAG laser micro-drilling of gamma-titanium aluminide // *Opt. Laser Technol. Elsevier*, 2010. Т. 42, № 1. С. 23–31.

85. Kibria G., Doloi B., Bhattacharyya B. Predictive model and process parameters optimization of Nd:YAG laser micro-turning of ceramics // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2013. Т. 65, № 1-4. С. 213–229.

86. Anand T.J.S. Stochastic Modeling and Optimization of Laser Machining by Response Surface Methodology // *Int. J. Eng. Technol.* 1995. Т. 10, № 4. С. 13–21.

87. Sivarao T., Ammar S. RSM Based Modeling for Surface Roughness Prediction in Laser Machining // *J. Eng. Technol.* 2010. Т. 10, № 4. С. 32–39.

88. Taguchi G. System of Experimental Design: Engineering Methods to Optimize Quality and Minimize Cost. // UNIPUB, White Plains, NY. White Plains, 1987. 1080 с.

89. Chen Y., Tam S. Application of the Taguchi method in the optimization of laser micro-engraving of photomasks // *Int. J. Mater. Prod. Technol.* 1996. Т. 11, № 3. С. 333–344.

90. Kasman Ş., Saklakoglu I.E. Determination of process parameters in the laser micromilling application using Taguchi method: A case study for AISI H13 tool steel // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2011. Т. 58, № 1-4. С. 201–209.
91. Haykin S. *Neural networks: a comprehensive foundation*. Prentice Hall, 1999. 842 с.
92. Круглов В., Дли М., Голунов Р. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети // *Нечеткая логика и искусственные нейронные сети*. М.: Физматлит, 2001. 221 с.
93. Campanelli S.L. и др. An artificial neural network approach for the control of the laser milling process // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2012. Т. 66, № 9-12. С. 1777–1784.
94. Karazi S.M., Issa a., Brabazon D. Comparison of ANN and DoE for the prediction of laser-machined micro-channel dimensions // *Opt. Lasers Eng.* 2009. Т. 47, № 9. С. 956–964.
95. Mitchell M. *An introduction to genetic algorithms*. Cambridge: MIT Press, 1999. 209 с.
96. Kennedy J., Eberhart R. Particle swarm optimization // *ICNN*. Perth: IEEE, 1995. Т. 4. С. 1942–1948.
97. Liu Y., Wang C. A Modified Genetic Algorithm Based Optimisation of Milling Parameters // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 1999. Т. 15, № 11. С. 796–799.
98. Venkata Rao R., Pawar P.J. Parameter optimization of a multi-pass milling process using non-traditional optimization algorithms // *Appl. Soft Comput.* 2010. Т. 10, № 2. С. 445–456.
99. Vázquez E. и др. Swarm Intelligent Selection and Optimization of Machining System Parameters for Microchannel Fabrication in Medical Devices // *Mater. Manuf. Process.* 2011. Т. 26, № 3. С. 403–414.
100. Джарратано Д., Райли Г. Экспертные системы принципы разработки и программирование. 4-е изд. Пер. с англ. М.: Вильямс, 2007. 1147 с.
101. Майоров В.С., Майоров С.В., Стернин М.Ю. Компьютерные системы поддержки принятия решений для лазерных технологических процессов обработки материалов // *Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок / под ред. Панченко В. М.*: Физматлит, 2009. С. 494–506.
102. Lau H. Combination of a knowledge-based system with a data extraction system for determining optimal machine settings // *Expert Syst. Appl.* 1996. Т. 11, № 3. С. 391–396.
103. Inamasu T., Aoki T. Support system for laser beam machine, and laser beam

machine including the same: пат. 6345205 B1 USA // US Patent 6,345,205. US, 2002. С. 10.

104. Duley W.W., Kinsman G. Method and apparatus for real-time control of laser processing of materials: пат. 5659479 USA // US Patent 5,659,479. US, 1997. С. 11.

105. Fidler S., Urtasun R. Describing the scene as a whole: Joint object detection, scene classification and semantic segmentation // Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. IEEE, 2012. С. 702–709.

106. Arbel P. и др. Semantic Segmentation using Regions and Parts // Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). IEEE, 2012. С. 3378–3385.

107. Canny J. A Computational Approach to Edge Detection // IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 1986. Т. PAMI-8, № 6. С. 679–698.

108. Fua P., Leclerc Y.G. Model driven edge detection // Mach. Vis. Appl. Springer, 1990. Т. 3, № 1. С. 45–56.

109. Pal N.R., Pal S.K. A review on image segmentation techniques // Pattern Recognit. Elsevier, 1993. Т. 26, № 9. С. 1277–1294.

110. Fraz M.M. и др. Blood vessel segmentation methodologies in retinal images--a survey. // Comput. Methods Programs Biomed. Elsevier Ireland Ltd, 2012. Т. 108, № 1. С. 407–433.

111. Zhang B. и др. Retinal vessel extraction by matched filter with first-order derivative of Gaussian. // Comput. Biol. Med. Elsevier, 2010. Т. 40, № 4. С. 438–445.

112. Nevatia R., Babu K.R. Linear feature extraction and description // Comput. Graph. Image Process. 1980. Т. 13, № 3. С. 257–269.

113. Vlachos M., Dermatas E. Multi-scale retinal vessel segmentation using line tracking. // Comput. Med. Imaging Graph. Elsevier Ltd, 2010. Т. 34, № 3. С. 213–227.

114. Chaudhuri S. и др. Detection of blood vessels in retinal images using two-dimensional matched filters. // IEEE Trans. Med. Imaging. 1989. Т. 8, № 3. С. 263–269.

115. Chanwimaluang T., Fan G. An efficient blood vessel detection algorithm for retinal images using local entropy thresholding // Circuits and Systems. IEEE, 2003. Т. 5. С. V – 21.

116. Chutatape O. Retinal blood vessel detection and tracking by matched Gaussian and Kalman filters // Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE, 1998. Т. 20. С. 3144–3149.

117. Vosselman G., de Knecht J. Road tracing by profile matching and Kalman filtering // Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images

- I / под ред. Gruen A., Kuebler O., Agouris P. Springer, 1995. С. 265–275.
118. Laptev I. и др. Automatic extraction of roads from aerial images based on scale space and snakes // *Mach. Vis. Appl.* Springer, 2000. Т. 12, № 1. С. 23–31.
119. Mena J.B. State of the art on automatic road extraction for GIS update: a novel classification // *Pattern Recognit. Lett.* 2003. Т. 24, № 16. С. 3037–3058.
120. Kass M., Witkin A., Terzopoulos D. Snakes: Active contour models // *Int. J. Comput. Vis.* Springer, 1988. Т. 1, № 4. С. 321–331.
121. Mille J., Boné R., Cohen L. Region-based 2D deformable generalized cylinder for narrow structures segmentation // *Comput. Vision–ECCV.* Springer, 2008. Т. 5303. С. 392–404.
122. Fua P. Model-Based Optimization : An Approach to Fast , Accurate , and Consistent Site Modeling from Imagery // *Radius: Image Understanding for Imagery Intelligence.* 1990. 129 с.
123. Butenuth M., Heipke C. Network snakes: graph-based object delineation with active contour models // *Mach. Vis. Appl.* 2010. Т. 23, № 1. С. 91–109.
124. Gonzalez R.C., Woods R.E. *Digital Image Processing* // *Image Processing* / под ред. Dworkin A. Prentice Hall, 2008. Т. 49, № 1. 954 с.
125. Diatenbeck T. и др. Creaseg: A free software for the evaluation of image segmentation algorithms based on level-set // *ICIP. IEEE*, 2010. С. 665–668.
126. Chan T.F., Vese L.A. Active contours without edges // *IEEE Trans. Image Process. IEEE*, 2001. Т. 10, № 2. С. 266–277.
127. Sezgin M. Survey over image thresholding techniques and quantitative performance evaluation // *J. Electron. Imaging.* 2004. Т. 13, № 1. С. 146–165.
128. Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms // *Automatica.* 1975. Т. 11, № 1. С. 285–296.
129. Грудин Б.Н., Плотников В.С. *Обработка и моделирование микроскопических изображений.* Владивосток: Дальнаука, 2010. 350 с.
130. Свиташева С.Н. *Эллипсометрия шероховатых поверхностей.* дис. канд. физ.-м. наук. ИФП СО РАН, 2009. 203 с.
131. Косых В.П. *Цифровая обработка изображений.* Новосибирск: Новосиб. гос. ун-т., 2006. 96 с.
132. Goloshevsky N. и др. Precision laser system based on complementary scanning principle for dielectric materials microprocessing // *Fundamentals of Laser Assisted Micro- and Nanotechnologies.* Edited by Veiko, Vadim P. Proceedings of the SPIE. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2008. С. 69850M.1–69850M.9.

133. Бессмельцев В., Голошевский Н., Смирнов К.. Аппаратно-программные средства динамической коррекции для управления лазерными системами микрообработки на основе комплементарных сканеров // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2009. Т. 3. С. 48.
134. Krotkov E. Focusing // *Int. J. Comput. Vis.* 1988. Т. 1, № 3. С. 223–237.
135. Preibisch S., Saalfeld S., Tomancak P. Globally optimal stitching of tiled 3D microscopic image acquisitions. // *Bioinformatics.* 2009. Т. 25, № 11. С. 1463–1465.
136. Aguet F., Van De Ville D., Unser M. Model-based 2.5-d deconvolution for extended depth of field in brightfield microscopy // *IEEE Trans. Image Process.* IEEE, 2008. Т. 17, № 7. С. 1144–1153.
137. Helml F. Focus Variation Instruments // *Optical Measurement of Surface Topography* / под ред. Leach R. 2011. С. 131–166.
138. Neil M. a, Juskaitis R., Wilson T. Method of obtaining optical sectioning by using structured light in a conventional microscope. // *Opt. Lett.* 1997. Т. 22, № 24. С. 1905–1907.
139. Артюхова О.А., Самородов А.В. Сравнительное исследование характеристик резкости микроскопических изображений медико-биологических препаратов // *Медицинская техника.* 2011. Т. 1. С. 15–22.
140. Leach R. *Fundamental principles of engineering nanometrology.* Elseiver, 2014. 355 с.
141. Groot P. De. Coherence Scanning Interferometry // *Optical Measurement of Surface Topography* / под ред. Leach R. 2011. С. 187–208.
142. Blateyron F. Chromatic Confocal Microscopy // *Optical Measurement of Surface Topography* / под ред. Leach R. 2011. С. 71–106.
143. Kranitzky C., Richter C., Faber C. 3D-microscopy with large depth of field // *DGaO Proceedings.* 2009. С. A12.
144. Zitova B. Image registration methods: a survey // *Image Vis. Comput.* 2003. Т. 21, № 11. С. 977–1000.
145. Castro E. De, Morandi C. Registration of translated and rotated images using finite Fourier transforms // *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 1987. Т. 9, № 5. С. 700–703.
146. Мясников Е.В. Определение параметров геометрических трансформаций для совмещения портретных изображений // *Компьютерная оптика.* 2007. Т. 31, № 3. С. 77–82.
147. Чемерис Д.С., Бурдинский И.Н. Исследование методов определения геометрического рассогласования двух изображений для решения задачи оптического наведения и стыковки подводного робота // *Проектирование*

инженерных и научных приложений в среде MATLAB: труды V международной научной конференции. 2011. С. 465–470.

148. Чочиа П.А. Быстрое корреляционное совмещение квазирегулярных изображений // Информационные процессы. 2009. Т. 9, № 3. С. 117–120.

149. Волегов Д.Б., Юрин Д.В. Предварительное грубое совмещение изображений по найденным на них прямым линиям для построения мозаик, сверхразрешения и восстановления трехмерных сцен // Программирование. 2008. Т. 34, № 5. С. 47–66.

150. Harris C., Stephens M. A Combined Corner and Edge Detector // Proceedings Alvey Vis. Conf. 1988. Alvey Vision Club, 1988. С. 23.1–23.6.

151. Lowe D. Object Recognition from Local Scale-Invariant Features // IEEE International Conference on Computer Vision. 1999. С. 1150–1157.

152. Bay H., Tuytelaars T., Van Gool L. Surf: Speeded up robust features // Lect. notes Comput. Sci. 2006. Т. 3951. С. 14.

153. Rosten E., Drummond T. Machine learning for high-speed corner detection // Lecture Notes in Computer Science. 2006. Т. 3951 LNCS. С. 430–443.

154. Rublee E. и др. ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF // 2011 Int. Conf. Comput. Vis. Ieee, 2011. С. 2564–2571.

155. Fischler M.A., Bolles R.C. Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with applications to image analysis and automated cartography // Comm. ACM. 1981. Т. 24, № 6. С. 381–395.

156. Araújo S.A., Kim H.Y. Grayscale template-matching invariant to rotation, scale, translation, brightness and contrast // Advances in Image and Video Technology. 2007. Т. 4872. С. 100–113.

157. Briechle K. Template matching using fast normalized cross correlation // Aerospace/Defense Sensing, Simulation, and Controls. 2001. Т. 95. С. 95–102.

158. Lewis J.P. Fast Normalized Cross-Correlation // Vis. Interface. 1995. Т. 10, № 1. С. 120–123.

159. Tanimoto S. Template matching in pyramids // Computer Graphics and Image Processing. 1981. С. 356–369.

160. Vanderbrug G.J., Rosenfeld A. Two-Stage Template Matching // Computers, IEEE. 1977. С. 384–393.

161. Suzuki S., Saroshi. Topological structural analysis of digitized binary images by border following // Comput. Vision, Graph. Image Process. 1985. Т. 30, № 1. С. 32–46.

162. Буч Г., Рамбо Д., Джекобсон А. Язык UML руководство пользователя.

Спб.: ДМК Пресс, 2004. 432 с.

163. Martin R.C. Granularity – C++ Report [Электронный ресурс]. 1996. С. 12. URL: <http://www.objectmentor.com/resources/articles/granularity.pdf> (дата обращения: 28.10.2015).

164. Sugioka K., Cheng Y., Midorikawa K. Three-dimensional micromachining of glass using femtosecond laser for lab-on-a-chip device manufacture // *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.* 2005. Т. 81, № 1. С. 1–10.

165. Osellame R., Cerullo G., Ramponi R. *Femtosecond Laser Micromachining: Photonic and Microfluidic Devices in Transparent Materials.* Springer Science & Business Media, 2012. 501 с.

166. Stjernström M., Roeraade J. Method for fabrication of microfluidic systems in glass // *J. Micromechanics Microengineering.* 1998. Т. 8. С. 33–38.

167. Gattass R.R., Mazur E. Femtosecond laser micromachining in transparent materials // *Nat. Photonics.* 2008. Т. 2, № 4. С. 219–225.

168. Giridhar M.S. и др. Femtosecond pulsed laser micromachining of glass substrates with application to microfluidic devices. // *Appl. Opt.* 2004. Т. 43, № 23. С. 4584–4589.

169. Marcinkevičius A., Juodkazis S. Femtosecond laser-assisted three-dimensional microfabrication in silica // *Opt. Lett.* 2001. Т. 26, № 5. С. 277–279.

170. Suriano R. и др. Femtosecond laser ablation of polymeric substrates for the fabrication of microfluidic channels // *Appl. Surf. Sci. Elsevier B.V.*, 2011. Т. 257, № 14. С. 6243–6250.

171. Rodríguez A. и др. Enhanced depth control of ultrafast laser micromachining of microchannels in soda-lime glass // *Microelectron. Eng.* 2012. Т. 98. С. 672–675.

172. Zhao X., Shin Y.C. Femtosecond laser drilling of high-aspect ratio microchannels in glass // *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.* 2011. Т. 104, № 2. С. 713–719.

173. Hnatovsky C. и др. Fabrication of microchannels in glass using focused femtosecond laser radiation and selective chemical etching // *Appl. Phys. A.* 2006. Т. 84, № 1-2. С. 47–61.

174. Darvishi S., Cubaud T., Longtin J.P. Ultrafast laser machining of tapered microchannels in glass and PDMS // *Opt. Lasers Eng. Elsevier*, 2012. Т. 50, № 2. С. 210–214.

175. Zhou W. и др. Laser micro-milling of microchannel on copper sheet as catalyst support used in microreactor for hydrogen production // *Int. J. Hydrogen Energy. Elsevier Ltd*, 2014. Т. 39, № 10. С. 4884–4894.

176. Teixidor D. и др. Nanosecond pulsed laser micromachining of PMMA-based

- microfluidic channels // *J. Manuf. Process. The Society of Manufacturing Engineers*, 2012. Т. 14, № 4. С. 435–442.
177. Ameer-Beg S. и др. Femtosecond laser microstructuring of materials // *Appl. Surf. Sci.* 1998. Т. 127-129. С. 875–880.
178. He F. и др. Direct fabrication of homogeneous microfluidic channels embedded in fused silica using a femtosecond laser. // *Opt. Lett.* 2010. Т. 35, № 3. С. 282–284.
179. Lenzner M. и др. Incubation of laser ablation in fused silica with 5-fs pulses // *Appl. Phys. A.* 1999. Т. 466. С. 465–466.
180. Ashkenasi D. и др. Surface damage threshold and structuring of dielectrics using femtosecond laser pulses: the role of incubation // *Appl. Surf. Sci.* 1999. Т. 150, № 1-4. С. 101–106.
181. Cheng J.-Y. и др. Crack-free direct-writing on glass using a low-power UV laser in the manufacture of a microfluidic chip // *J. Micromechanics Microengineering.* 2005. Т. 15, № 6. С. 1147–1156.
182. Nieto D., Delgado T., Flores-Arias M.T. Fabrication of microchannels on soda-lime glass substrates with a Nd:YVO4 laser // *Opt. Lasers Eng. Elsevier*, 2014. Т. 63. С. 11–18.
183. Kam D.H., Shah L., Mazumder J. Femtosecond laser machining of multi-depth microchannel networks onto silicon // *J. Micromechanics Microengineering.* 2011. Т. 21, № 4. С. 045027.