

ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.7.01; 621.7.075; 519.24

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНОЙ МИКРООБРАБОТКИ (ОБЗОР)*

В. П. Бессмельцев, Е. Д. Булушев

*Институт автоматизации и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1
E-mail: e.d.bulushev@gmail.com*

Тенденция к миниатюризации механических, электронных и оптических компонент повысила требования к технологиям двумерного и трёхмерного формообразования, в том числе и к лазерной микрообработке. Высокая производительность при строгом соблюдении технических условий по точности и качеству обрабатываемой поверхности достигается только при определённых режимах, которые называются оптимальными. Определение таких режимов с помощью методов математического моделирования является сложной задачей, поэтому в настоящее время создаются экспериментальные методы на основе статистических алгоритмов обработки данных. Рассмотрены особенности их применения.

Ключевые слова: лазерная микрообработка, планирование экспериментов, математическое моделирование, контроль качества, искусственные нейронные сети.

Введение. Лазерные технологии двумерного и трёхмерного микроформообразования нашли широкое применение в электронике, медицине, биологии и других областях для создания элементов микрооптики, микромеханики, прототипов печатных плат, биочипов, имплантатов, пресс-форм, при нанесении текстовых и графических изображений. Обработка заготовок осуществляется лазерным пучком, сфокусированным в пятно размером 0,5–10 мкм, по двумерным и трёхмерным САД-моделям. Вычисление по САД-модели 2D-траекторий движения лазерного пучка осуществляется с помощью автоматизированных систем технологической подготовки производства. В настоящее время значительно возросли требования к пространственному разрешению, точности, физико-химическим свойствам поверхности после обработки и производительности лазерного микроформообразования. Высокие показатели качества изделия достигаются только при определённых режимах обработки, называемых оптимальными.

Задание оптимальных режимов (оптимизация) на практике может занимать длительное время (вплоть до нескольких недель) вследствие зависимости показателей качества обработки от большого числа технологических параметров и отсутствия универсальных алгоритмических решений. Методы оптимизации базируются как на математическом моделировании процессов, протекающих при взаимодействии лазерного излучения с веществом [1, 2], так и на построении статистических зависимостей показателей качества изделия от параметров обработки по результатам записи серии тестовых объектов. В представленной работе рассмотрены второй подход и его основные составляющие: проведение тестовых экспериментов, построение статистических зависимостей, измерение показателей качества изделий — и анализ полученных данных.

*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (проект № 2012-218-03-004).

Целью предлагаемого исследования являются анализ методов, используемых при оптимизации режимов двумерной и трёхмерной лазерной микрообработки, определение особенностей и ограничений их применения.

1. Моделирование взаимодействия лазерного излучения с веществом.

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, оказывающие влияние на процесс обработки [3]:

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);

в) 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 расчётов [4–12]. В основном в моделях при расчётах распространения и локализации энергии лазерного излучения в материале применяются закон Бугера — Ламберта — Бера, описывающий поглощение лазерного излучения в веществе, и уравнение теплопроводности, задающее изменение температуры в веществе под воздействием лазерного излучения:

$$\frac{\partial T(r, t)}{\partial t} = \alpha \Delta T(r, t) + \frac{q(r, t)}{\rho c_p}, \quad (1)$$

где $T(r, t)$ — температура; $q(r, t)$ — плотность мощности объёмного 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; ρ — плотность; α — коэффициент температуропроводности; c_p — удельная теплоёмкость. Зная температуру, можно определить зону плавления и испарения вещества, а также форму образовавшегося кратера. Аналитически решить уравнение (1) возможно в редких случаях, например для непрерывного лазерного излучения с гауссовым профилем интенсивности при перемещении лазерного пучка с постоянной скоростью [13]. 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, а для расчётов используются специальные программные средства (например, ANSYS, FLUENT), кластеры и системы распределённых вычислений [14]. Кроме того, при взаимодействии лазерных импульсов с веществом необходимо учитывать, что изменение коэффициента поглощения в зависимости от температуры не всегда известно.

В работе [2] проведено моделирование влияния мощности лазерного излучения на форму микроканалов с помощью уравнения теплопроводности (1) и с учётом нагревания, плав-

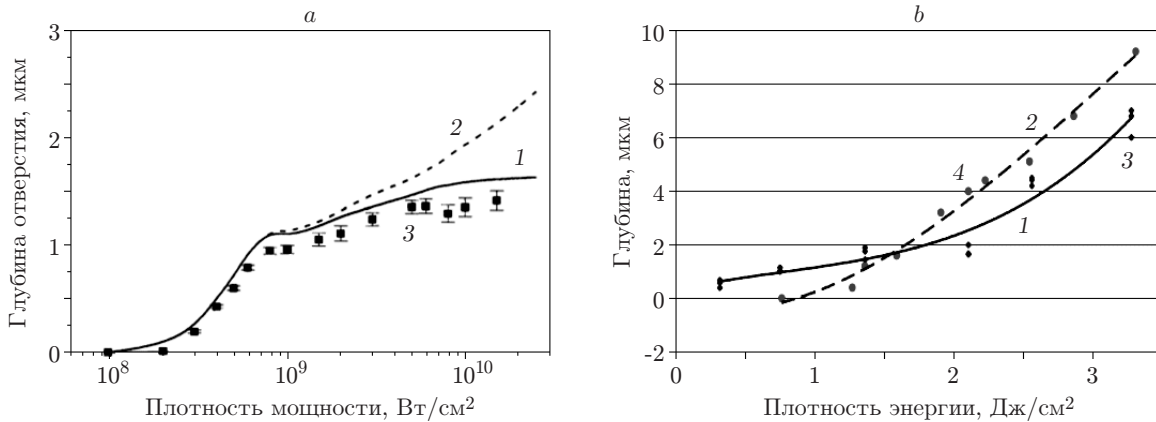


Рис. 1. Моделирование режимов обработки Nd:YAG-лазером: *a* — меди (кривая 1 — с коррекцией, 2 — без коррекции, 3 — экспериментальные результаты) [15]; *b* — нержавеющей стали (кривые 1, 2 — полиномиальные аппроксимации данных эксперимента и моделирования, 3 — глубина кратера, 4 — теоретическая глубина) [16]

ления и охлаждения вещества сопутствующим газом. Экспериментально показано, что модель применима только при средних мощностях лазерного излучения (10^4 – 10^7 Вт/см²), так как при высоких мощностях происходит испарение вещества и образование плазмы, что не рассматривается в модели. В [15] исследовалась обработка металлов лазерными импульсами большой интенсивности (10^7 – 10^{10} Вт/см²). Расчёт плавления, испарения вещества и образования плазмы производился численными методами с помощью уравнения (1). Модель адекватна только в узком диапазоне интенсивностей ($1,06$ – $1,8 \cdot 10^8$ Вт/см²), при значениях выше $5 \cdot 10^9$ Вт/см² происходит образование плазмы и экранирование излучения, что учитывается посредством добавления поправки, однако не указано, как устанавливается её величина (рис. 1, *a*). На основе уравнения (1) в [16] получена модель для расчёта формы кратера, образующегося в веществе под воздействием импульсного лазерного излучения. Рассматриваются следующие процессы: теплопроводность, нагревание, плавление, испарение. Утверждается, что модель применима при плотностях энергий выше $2,5$ Дж/см² (рис. 1, *b*). Однако, на наш взгляд, модель недостаточно описывает экспериментальные данные.

В приведённых работах экспериментальные результаты хорошо согласуются с данными математического моделирования только в узком диапазоне значений параметров. Это объясняется тем, что основные термofизические, термoxимические и фотохимические процессы являются нелинейными и нестационарными, а свойства вещества (коэффициент поглощения, теплопроводность и др.) могут изменяться в процессе обработки, для получения их значений необходимо проводить дополнительные исследования (например, [8, 17]). 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 модели в некоторых случаях объясняется неоптимальным управлением компонентами системы лазерной микрообработки [18] (рис. 2), aberrациями оптической системы и т. д.

Учёт всех приведённых особенностей является сложной задачей. В [19] отмечается, что при обработке керамики Nd:YVO₄-лазером оптимальная производительность достигается не при минимальных, а при средних скоростях перемещения лазерного пучка. В [20] показано, что при обработке материалов большой твёрдости Nd:YAG-лазером (20–200 нс) при высоких частотах импульсов возможна обработка поликристаллического алмаза, но

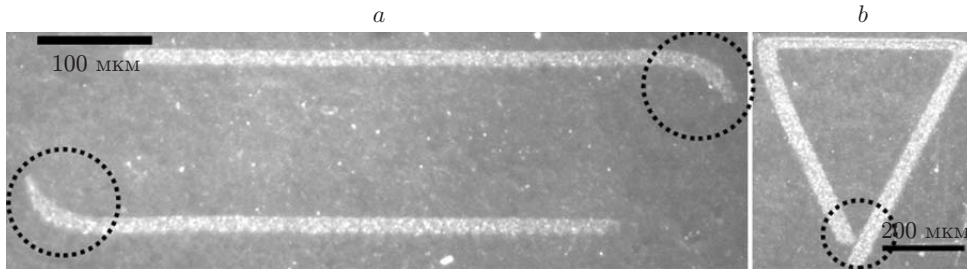


Рис. 2. Дефекты при лазерной микрообработке, связанные с неоптимальным управлением: перемещением лазерного пучка (а) и мощностью лазерного излучения (б)

не карбида вольфрама. В [21] продемонстрировано, что при обработке сапфира Nd:YAG-лазером ($\lambda = 355$ нм) удаление вещества наиболее эффективно происходит при средней плотности энергии излучения (рис. 3, а), а для кремния она в широких пределах не зависит от мощности излучения (рис. 3, б). При моделировании обработки керамики Nd:YAG-лазером [22] установлено, что экспериментальные данные хорошо описываются моделью, только если коэффициент поглощения керамики равен 1, тогда как табличное значение коэффициента составляет 0,1. При обработке алюминия волоконным двухкаскадным лазером ($\lambda = 1064$ нм, длительность импульсов 3–8 нс, пятно фокусировки 11 мкм) отмечается, что с изменением временной формы и длительности импульсов на дне каналов образуются неоднородности и шероховатость уменьшается при сокращении длительности импульсов, в то время как для нержавеющей стали шероховатость и производительность практически не зависят от формы импульса, что объясняется меньшей теплопроводностью стали [23].

Таким образом, несмотря на большой опыт, накопленный за время применения лазерных технологий для обработки материалов [24, 25], математическое моделирование не всегда эффективно и, на наш взгляд, ограничивается получением приблизительного диапазона технологических параметров. Для нахождения оптимальных параметров обработки необходимо провести серию тестовых экспериментов при различных режимах лазерной микрообработки и исследовать сформированные структуры с помощью методов контроля качества. Рассмотрим методы контроля качества лазерной микрообработки, так как их эффективность является определяющей при оптимизации режимов микрообработки.

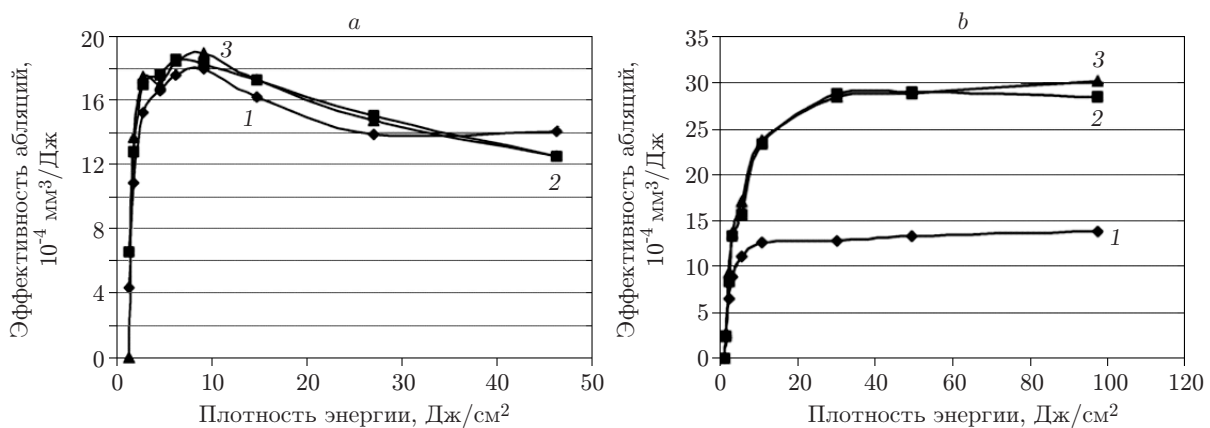


Рис. 3. Экспериментальные зависимости производительности лазерной микрообработки материалов от плотности энергии импульсов Nd:YAG-лазера: а — сапфира (кривая 1 — 5, 2 — 10, 3 — 20 мм/с); б — кремния (кривая 1 — 20, 2 — 50, 3 — 100 мм/с) [21]

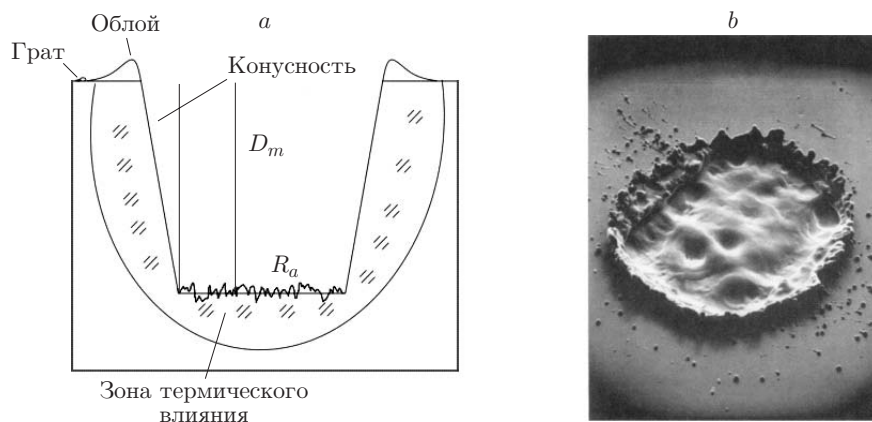


Рис. 4. Показатели качества лазерной микрообработки: *a* — схема профиля микроканала; *b* — кратер на поверхности нержавеющей стали (SEM-изображение, диаметр участка 1,8 мм) [8]

2. Контроль качества обработанной лазером поверхности. 2.1. Показатели качества лазерной микрообработки [3, 26]:

1) геометрические характеристики: соответствие размеров заданным в CAD-модели, разрешение структурных элементов, наклон стенок к оси Z , средняя шероховатость обработанной поверхности (R_a);

2) производительность: скорость удаления материала (MRR — Material Removal Rate) ($\text{мм}^3/\text{с}$) — объём вещества, удаляемый за 1 с; скорость абляции — объём вещества, удаляемый одним лазерным импульсом; эффективность удаления материала — объём вещества, удаляемый лазерным излучением с энергией 1 мДж; толщина слоя материала (D_m), снимаемого при лазерной обработке (рис. 4);

3) характеристики вещества в зоне лазерного воздействия: размеры зоны термического влияния, наличие облоя и грата, их размеры (см. рис. 4), наличие неоднородностей и дефектов. (Облоем называют выпуклости на границе зоны лазерного воздействия, а гратом — тонкую плёнку и капли, которые образуются при затвердевании материала, выбитого давлением паров в расплавленном виде из зоны обработки. Для уменьшения облоя и грата используются, например, химическая постобработка [27] и обработка в инертной атмосфере.)

Оценка шероховатости обработанной поверхности с помощью математического моделирования затруднена даже в задачах механической обработки [28]. Зависимость шероховатости от длительности и временной формы импульсов исследована в [23, 29]. Шероховатость обработанной поверхности также зависит от перекрытия световых пятен как в направлении лазерного сканирования, так и в перпендикулярном (рис. 5). Перекрытие в направлении лазерного сканирования (PO — Pulse Overlap) равно 0 %, если расстояние между центрами соседних световых пятен превышает их диаметр (D), а иначе зависит от частоты импульсов (f) и скорости перемещения лазерного пучка (v):

$$\text{PO} = \left(1 - \frac{v}{fD}\right) \cdot 100 \% \quad (2)$$

Для металлов минимальная шероховатость обычно достигается при перекрытии ~ 50 % [30, 31]. При микрофрезеровании областей большой площади (больше 100×100 мкм) шероховатость обработанной поверхности зависит от стратегии обхода областей, т. е. их покрытия траекториями перемещения лазерного пучка [32]. В отличие от механической обработки (фрезерования) глубина снимаемого лазером слоя может изменяться нелинейно от

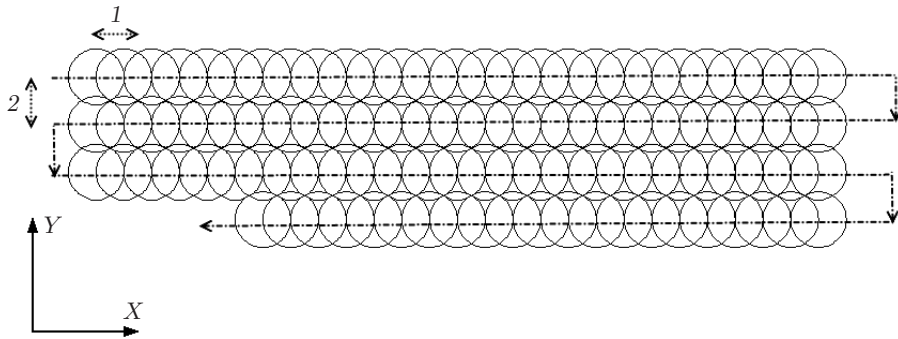


Рис. 5. Схема перекрытия лазерных импульсов: 1 — 50 % в направлении лазерной обработки, 2 — 70 % в перпендикулярном направлении

слоя к слою, поскольку зависит не только от перемещения обрабатывающего инструмента по оси Z относительно заготовки, но и от технологических параметров (длительности импульсов, длины волны, выходной мощности и др.).

Зона термического влияния — объём материала, в котором произошло изменение физико-химических свойств, в том числе структурно-фазовые переходы, перестройка кристаллической решётки [33]. Например, в зоне лазерной обработки коэффициент поглощения может отличаться на 2–3 порядка [34], что объясняется образованием окислов на поверхности и интерференцией, рассеянием и переотражением света на структурах размерами порядка длины волны излучения. Глубину проникновения энергии в вещество в процессе теплопроводности можно оценить из соотношения

$$L_d \approx \sqrt{a\tau}, \quad (3)$$

где a — коэффициент температуропроводности, τ — длительность импульсов. На рис. 6 показаны изображения микроотверстий, сформированных при различных длительностях импульсов, видны облой, грат и зона термического влияния.

Влияние регулируемых параметров лазерной микрообработки на показатели её качества структурировано в [25]. На наш взгляд, установленные зависимости неточны, так как, например, для уменьшения зоны термического влияния обычно снижают длительность импульсов [29, 35], а для уменьшения шероховатости проводят обработку на высоких

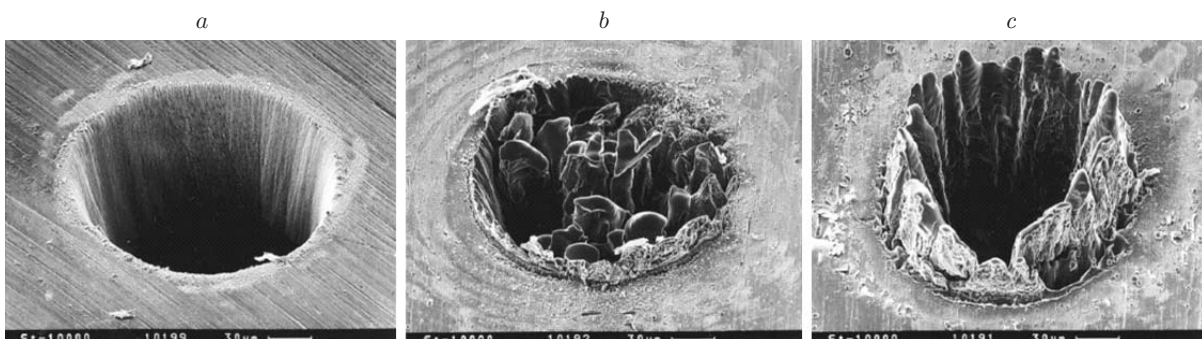


Рис. 6. SEM-изображения лазерного сверления отверстий в фольге из нержавеющей стали (толщина 100 мкм, $\lambda = 780$ нм) при различных длительностях и энергиях импульсов [35]: a — 200 фс, 120 мкДж, 0,5 Дж/см²; b — 80 пс, 900 мкДж, 3,7 Дж/см²; c — 3,3 нс, 1 мДж, 4,2 Дж/см²

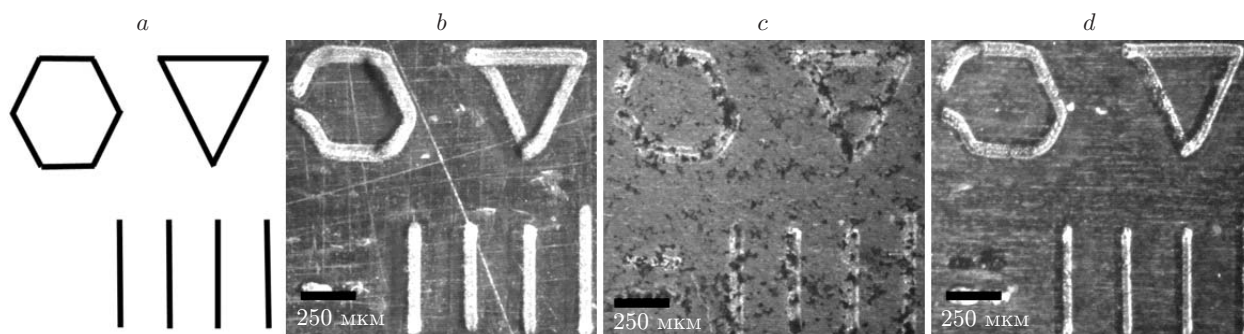


Рис. 7. Лазерная векторная микрообработка: САD-модель (а), структуры на подложках латуни (b), алюминия (c) и стали (d)

скоростях [36, 37]. Оптимизация нескольких показателей качества изделия является сложной задачей, поскольку улучшение одних характеристик может привести к ухудшению других [29, 37]. Далее рассмотрим методы автоматического контроля качества.

2.2. *Контроль качества 2D-формообразования.* Ведущие производители встраивают системы технического зрения (СТЗ) в свои системы лазерной микрообработки [38, 39], что позволяет ускорить определение показателей качества обработки. Системы технического зрения обычно включают высокоразрешающую видеокамеру, систему освещения и программные средства анализа изображений, состоящие из алгоритмов выделения границ, фильтрации и пороговой обработки [40]. В [26] для выделения границ структур на изображениях, полученных на оптическом микроскопе на просвет, использован пороговый алгоритм [41]. Однако такой метод применим только для прозрачных материалов. Для изображений структур, сформированных на металлических подложках и измеренных в режиме отражённого света с помощью СТЗ, в большинстве случаев характерны следующие свойства:

- градиент яркости на границе обработанная поверхность — подложка,
- гладкая внешняя граница структурного элемента,
- сложный фон (различие текстуры, яркости, наличие неоднородностей (рис. 7)),
- внутрикласовая изменчивость структурных элементов (различие по ширине, профилю, соединению элементов и т. д.).

В работах [42, 43] для измерения структур на изображениях зоны лазерной микрообработки предложен алгоритм, состоящий из этапа сегментации изображения и этапа обнаружения, на котором происходит выделение границ структуры с помощью детектора границ и медианной фильтрации. Зона интереса структурных элементов определяется с помощью совмещения с САD-моделью, которое производится по данным предварительной калибровки системы. Результаты выделения границ структур на изображениях приведены на рис. 8.

2.3. *Контроль качества 3D-формообразования* состоит из трёх этапов: измерения и восстановления 3D-модели, совмещения (сопоставления) САD-модели и восстановленной 3D-модели структуры и сравнения показателей качества с заданными в модели [44]. На наш взгляд, наиболее подходящими методами измерения являются оптические, поскольку они обеспечивают субмикронное разрешение и высокое быстродействие [45]. На рис. 9 приведены карты высот САD-модели и структуры, измеренной на конфокальном микроскопе "Carl Zeiss LSM 700". Картами высот мы называем 16-битные изображения в градациях серого, в которых яркость определяет глубину снятия материала лазером. Как показано в разд. 2.1, толщина снимаемого лазером слоя зависит от режима лазерной микрообработки, поэтому при неоптимальном режиме обработки профиль структурных элементов

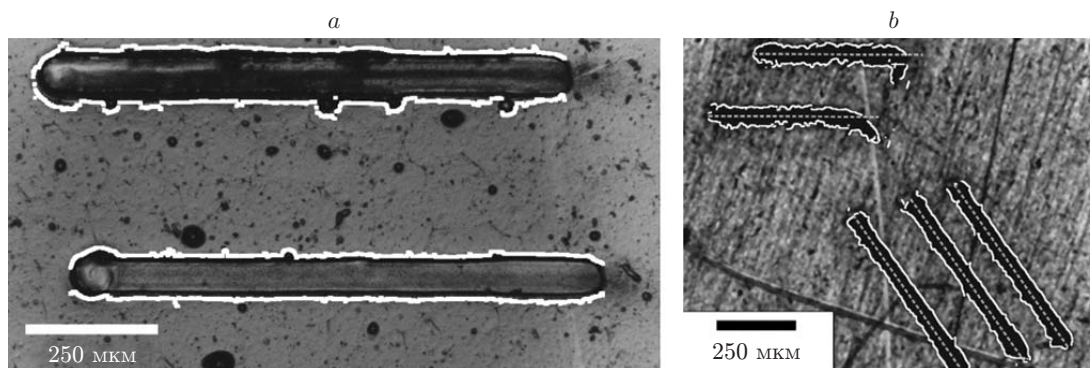


Рис. 8. Контроль качества формирования микроканалов Nd:YAG-лазером на плёнке для лазерной микрообработки: автоматическое выделение расширений (а) и изгибов (b) структур (пунктирные линии — направление векторов САD-модели) [42]

может отличаться от заданного в САD-модели. Профиль структуры может искажаться дефектами обработки, образованием грата, облоя и ошибками измерений, связанными с ограниченным динамическим диапазоном оптического сенсора и рассеянием излучения на элементах структуры. Основную сложность при контроле качества лазерной микрообработки представляет совмещение САD-модели и восстановленной 3D-модели структуры. Для карт высот H_1 и H_2 задача совмещения формулируется следующим образом: требуется найти такое пространственное преобразование g и преобразование яркости f точек (x, y) , чтобы

$$H_1(x, y) = f(H_2(g(x, y))). \quad (4)$$

В [46] разработан алгоритм для быстрого совмещения таких карт высот. В основе лежит комбинация алгоритма Siratefi [47] и итеративного поиска максимума по пирамиде изображений. По результатам совмещения могут быть определены показатели качества изделия. Таким образом, для большинства задач лазерного 2D- и 3D-микроформования показатели качества изделия могут быть получены с помощью высокоточных методов измерения и алгоритмов анализа данных. Рассмотрим статистические методы, в которых

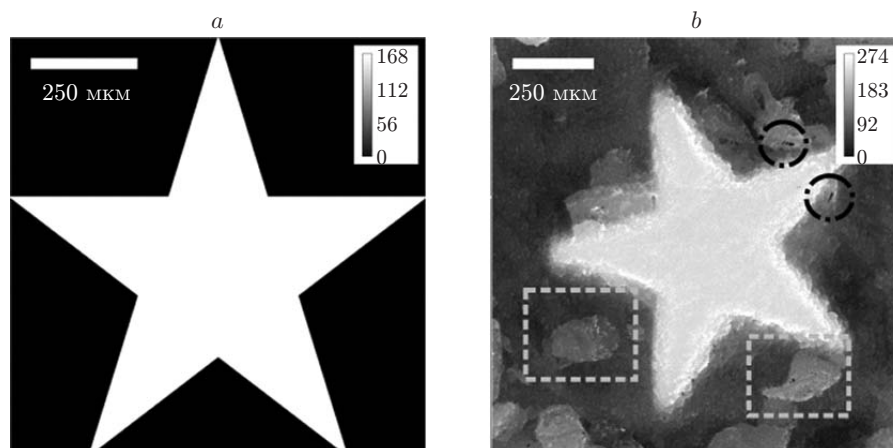


Рис. 9. Контроль качества лазерного микрофрезерования: а — карта высот САD-модели; б — карта высот восстановленной 3D-геометрии (прямоугольниками отмечены дефекты обработки, кругами — зоны с ошибками измерений) [46]

информация о показателях качества тестовых объектов используются для оптимизации режимов обработки.

3. Оптимизация лазерной микрообработки: статистические методы. Стандартным подходом, применяемым при оптимизации лазерной микрообработки, 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, 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). Рассмотрим методы, применяемые для статистической оптимизации лазерной микрообработки. 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.

3.1. *Планирование экспериментов* — это систематизированный подход, который позволяет установить связь между факторами и откликом за минимальное количество экспериментов [48]. Основы теории планирования экспериментов заложены Дж. Боксом и К. Вилсоном и отражены в [49]. 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 [50] отмечены недостатки OFAT по сравнению со стандартными методами планирования экспериментов: полным факторным экспериментом и центральным композиционным планированием.

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

2. Размер области экспериментирования меньше, что осложняет проведение оптимизации.

3. В OFAT обычно не оценивается комбинированное влияние факторов на отклик (например, одновременного увеличения выходной мощности и скорости обработки), что приводит к худшему описанию экспериментальных данных получаемыми моделями.

Тем не менее вследствие своей простоты OFAT до сих пор используется в комбинации с методом проб и ошибок в исследованиях по лазерной обработке материалов [19–21]. Далее рассмотрим применение стандартных методов планирования экспериментов [51, 52]: полного факторного эксперимента (ПФЭ), центрального композиционного планирования (ЦКП) и метода Тагучи.

3.1.1. *Полный факторный эксперимент.* В ПФЭ значения факторов комбинируются во всех возможных сочетаниях. Нормированные значения факторов называются уровнями. Для двухуровневого эксперимента ($p = 2$) нормированные факторы принимают значения

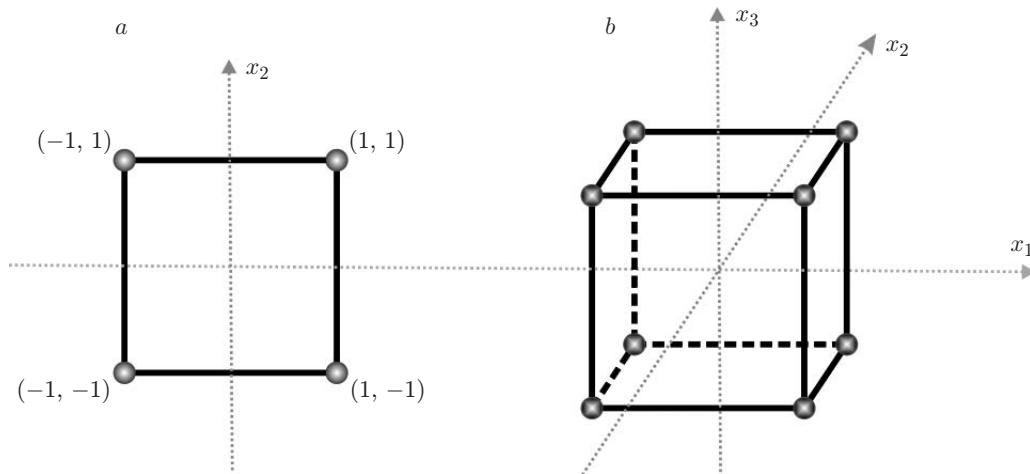


Рис. 10. Полный факторный эксперимент: a — область для $p = 2$ и $n = 2$; b — область для $p = 2$ и $n = 3$. Вершины куба соответствуют точкам экспериментирования (3 фактора и 2 уровня)

-1 и 1 . Если каждый из n факторов имеет p уровней, то осуществляется p^n экспериментов. Для получения более точной статистической модели проводят ПФЭ с числом уровней $p = 3-5$, однако при этом растут временные затраты на выполнение экспериментов. На рис. 10 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 отклик в них значительно отличался от значения в центре плана, однако диапазон не должен быть широким. По результатам тестовых экспериментов для каждого отклика y можно получить функцию отклика f (в частности, с помощью полиномиальной регрессии):

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) + \varepsilon, \quad (5)$$

где x_1, x_2, \dots, x_n — факторы; ε — случайная составляющая функции отклика. Линейная регрессия позволяет определить направление поиска оптимума, квадратичная модель может иметь экстремумы и в этом случае позволяет найти оптимальные значения факторов.

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 процесс оптимизации.

В работе [37] 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 статистическая модель зависимости откликов (ошибки по ширине, высоте, шероховатость) от факторов. По модели проведена многоцелевая оптимизация, которая позволила в пространстве откликов найти точки, оптимальные

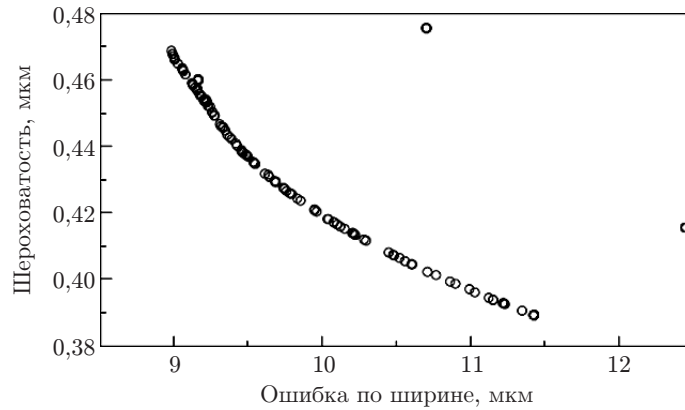


Рис. 11. Оптимальный фронт по Парето для стали при обработке Nd:YAG-лазером [37]. Уменьшение ошибок обработки приводит к повышению шероховатости поверхности

по Парето (рис. 11), т. е. такие, для которых улучшение одного из откликов невозможно без ухудшения других. Показано, что возможно получение каналов 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 находятся на границе области экспериментирования. При анализе и многоцелевой оптимизации микрофрезерования сплава алюминия Nd:YAG-лазером использовался ПФЭ [32]. По данным 24 экспериментов построена статистическая модель зависимости откликов (толщины снимаемого слоя, производительности, шероховатости) от следующих факторов: скорости перемещения лазерного пучка, частоты импульсов, стратегии обработки соответственно 3, 4, 2 уровней. В результате показано, что все факторы являются значимыми. Установлено, что максимальная производительность достигается при средних скоростях перемещения лазерного пучка. Определена область значений факторов, в которой достигается высокая производительность ($>10 \text{ мм}^3/\text{мин}$) при низкой шероховатости ($<4 \text{ мкм}$). Отметим, что в отличие от [37] многоцелевая оптимизация проведена эвристическим методом, при этом и в [32], и в [37] не проведена проверка адекватности полученных моделей путём дополнительных экспериментов. В [53, 54] ПФЭ использован при исследовании микрообработки различных металлов иттербиевым волоконным лазером. Аппроксимацией полиномом второго порядка построены статистические модели, с помощью которых можно определить, как шероховатость, толщина снимаемого слоя и производительность зависят от факторов. В [53] проведена верификация модели (восемь экспериментов), которая показала, что ошибка моделирования не превышает 15 %. В работах не рассматривается сложная задача многоцелевой оптимизации, кроме того, их недостатком является большое число экспериментов (~ 100).

3.1.2. *Центральные композиционные планы* обычно используются при построении функции отклика (y_k) в виде полинома второй степени от факторов (x_i):

$$y_k = a_{00} + \sum a_i x_i + \sum a_{ii} x_i^2 + \sum a_{ij} x_j x_i + \varepsilon_k. \quad (6)$$

Применение ЦКП требует меньшего количества экспериментов, чем ПФЭ, для построения квадратичной модели. Центральные композиционные планы состоят из трёх наборов экспериментов (рис. 12): двухуровневого полного факторного эксперимента (уровни -1 и 1); репликаций в центре области экспериментирования; аксиальных точек для

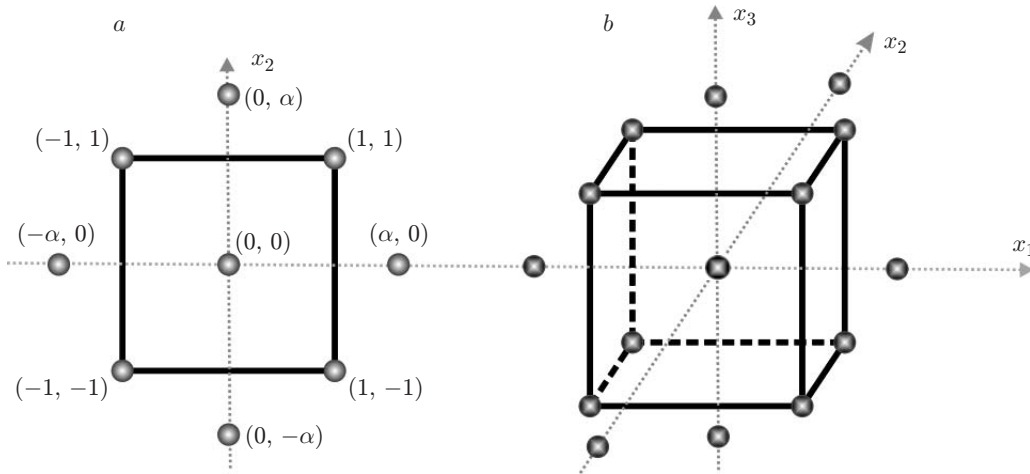


Рис. 12. Центральное композиционное планирование включает точки полного факторного эксперимента (вершины квадрата и куба), аксиальные точки (точки на осях, смещённые на величину α) и репликации в центре области эксперимента:

a — 2 фактора, b — 3 фактора

всех факторов, смещённых относительно центра плана по оси на величину α . 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 α для аксиальных точек равно $F^{0,25}$ (F — количество экспериментов в ПФЭ), то такой дизайн называют рототабельным ЦКП. В [55] с помощью ЦКП проведена оптимизация обработки Nd:YAG-лазером керамики Al_2TiO_5 по пяти факторам. Преимуществом ЦКП перед ПФЭ является наличие у каждого фактора пяти уровней, что позволило построить более точную статистическую модель, при этом количество тестовых экспериментов небольшое (32). Аналогичные преимущества показаны в [56–59]. Установлено, что ЦКП, как и ПФЭ, даёт возможность проводить оптимизацию различных задач лазерной микрообработки, а также он наиболее эффективен в случае, если положение оптимума приблизительно известно.

3.1.3. *Метод Тагучи* предложен в 1987 году и используется для быстрого определения значимых факторов [60], он практически не применяется для построения статистических моделей и оптимизации режимов обработки. Метод подробно описан в [26], устойчив к шумам и неконтролируемым факторам. Значения факторов выбираются так, чтобы присутствовали все возможные парные комбинации факторов (ортогональная матрица). На рис. 13 показано расположение точек ортогональной матрицы для 3 факторов и 3 уровней (по три точки снизу, сверху и на центральном срезе куба), для нахождения значимых факторов достаточно провести 9 экспериментов.

Метод Тагучи использован для определения значимых факторов в задачах создания фотошаблонов Nd:YAG-лазером [61] и микрофрезерования стали иттербиевым волоконным лазером [62]. В обоих случаях требуемое количество экспериментов меньше 20 при 5 и 4 факторах. Посредством последовательного применения двух методов планирования экспериментов [36] проведена оптимизация микрофрезерования ТА6V-сплава Nd:YAG-лазером за небольшое число экспериментов (32) при изначально большом диапазоне значений факторов. Показатели качества: производительность (MRR) и шероховатость (R_a). 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 экс-

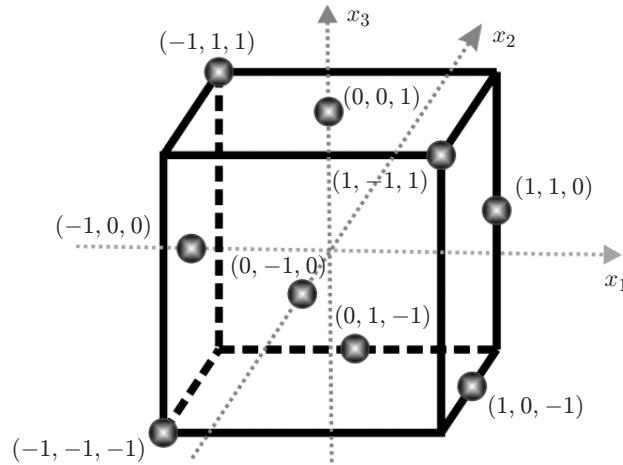


Рис. 13. Планирование экспериментов с помощью метода Тагучи (3 фактора и 3 уровня)

периментов, 2 фактора в узком диапазоне значений), построена статистическая модель и проведена оптимизация функции $s = \text{MRR}/R_a$, что позволило определить значения факторов, при которых производительность максимальна, а шероховатость меньше порога (например, 5 мкм).

3.2. *Искусственные нейронные сети (ИНС)* являются вычислительной системой, состоящей из связанных слоёв, каждый из которых содержит несколько элементарных единиц — искусственных нейронов. Каждый 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 [63, 64].

В работе [65] ИНС применена для построения статистической модели 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 являются углубления с простейшей геометрией, здесь проведена оптимизация по реальной САД-модели. Поставлена задача формирования микроканалов Т-формы размерами $4 \times 12 \times 9$ мм (рис. 14, а) с заданными показателями качества: минимальной шероховатостью, отклонениями размеров A, B, C, D от САД-модели и максимальной производительностью. С помощью ИНС определены значения откликов, оптимальные по Парето. В работе [66] 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 статистическая модель, при этом для обучения использованы результаты 24 экспериментов. На результатах 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. 14, б). С применением ИНС [67] построена модель, позволяющая оценивать толщину слоя сплава алюминия с магнием, снимаемого при микрофрезеровании Nd:YVO₄-лазером ($\lambda = 1064$ нм) с ошибкой менее 5 %. Однако при этом требуется большое число тестовых экспериментов. Выходная мощность, частота и перекрытие импульсов имеют по 2 уровня. Сначала про-

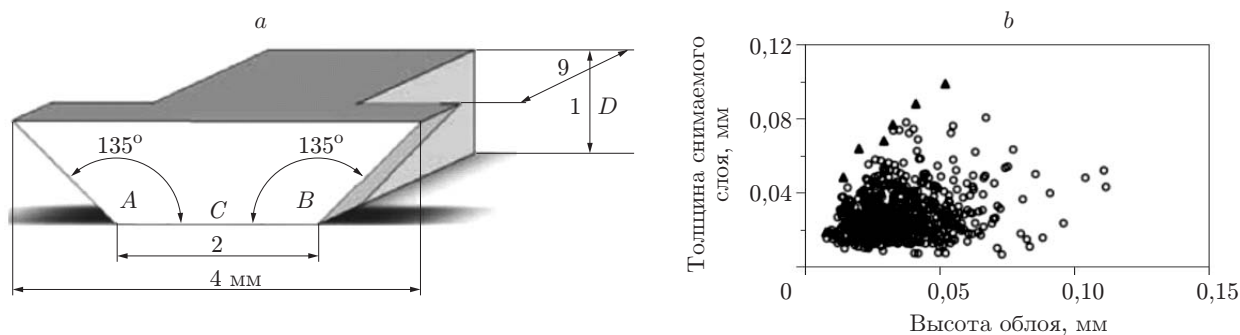


Рис. 14. Микрофрезерование стали Nd:YAG-лазером: *a* — САD-модель формируемого канала Т-формы [65]; *b* — оптимизация толщины снимаемого слоя и высоты облоя с помощью искусственных нейронных сетей [66] (\blacktriangle — оптимальное значение, \circ — неоптимальное значение)

ведён ПФЭ (24 эксперимента) по определению области экспериментирования и значимых факторов. Затем при изменении только двух факторов (частота и перекрытие импульсов) выполнено ещё 70 экспериментов, которые использованы для обучения ИНС.

В работе [68] показано, что модель, построенная с помощью ИНС, точнее, чем полученная с применением полиномиальной регрессии в задаче прецизионного формирования микроканалов на стекле CO_2 -лазером. Три подхода (полуаналитический, на основе генетического программирования и ИНС) для моделирования результатов микрофрезерования пластиков с помощью CO_2 -лазера проанализированы в [69]. Обучение и адаптация ИНС проведены по данным 170 экспериментов. С помощью ИНС построена статистическая модель зависимости толщины снимаемого слоя от выходной мощности, скорости обработки, коэффициента поглощения и удельной теплоты испарения пластика. Все модели хорошо описывают экспериментальные данные (максимальная ошибка для ИНС не превышает 10 %).

3.3. *Эволюционное программирование* состоит из множества методов (например, генетических алгоритмов [70], метода роя частиц [71]), использующих принципы генетики и эволюционного отбора при решении сложных задач. Применение эволюционного программирования для оптимизации лазерной микрообработки является относительно новым, малоизученным подходом, при этом в схожей задаче оптимизации механического фрезерования он используется достаточно эффективно [72–74] (для увеличения производительности или уменьшения стоимости производства при сохранении высокого качества поверхности). Соответственно некоторые решения могут быть адаптированы к оптимизации лазерной микрообработки (в [37, 65] методом роя частиц решаются сложные задачи оптимизации).

3.4. *Экспертные системы (ЭС)* используются для решения трудных, слабоструктурированных задач, не имеющих удовлетворительного алгоритмического решения [75]. 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). Решения ЭС могут быть объяснены пользователю на качественном уровне. Главным 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. Экспертная система и её реализации при задании режима лазерной закалки материалов описаны в [76]. В системе логического вывода используется подход суждения по прецедентам, т. е. поиск ближайшего по характеристикам эксперимента и адаптация факторов под текущую задачу. В работе [77] создана ЭС для контроля качества селективного лазерного спекания: программа написана на язы-

ке CLIPS, разработан набор правил, по которым осуществляется измерение показателей качества изделия. В [78, 79] приведены описания применения ЭС для оптимизации лазерной микрообработки, однако экспериментальные подтверждения их эффективности нам неизвестны. Недостатками ЭС являются сложность структурирования знаний и использование эвристических алгоритмов. Тем не менее, на наш взгляд, ЭС могут обеспечить определение границ области экспериментирования.

Закключение. В данной работе проанализированы методы оптимизации двумерной и трёхмерной лазерной микрообработки поверхности. Показано, что вследствие сложности протекающих процессов применение математического моделирования не всегда эффективно, поэтому в настоящее время большое внимание уделяется статистическим методам: планированию экспериментов, построению моделей с помощью полиномиальной регрессии и искусственных нейронных сетей, экспертным системам и эволюционному программированию. В рассмотренных публикациях оптимизация обычно проводится по простейшим тестовым моделям по 1–2 показателям качества изделия при изменении 3–4 технологических параметров. Однако реальное число параметров и показателей качества обработки в зависимости от задачи и сложности САД-модели превышает несколько десятков. Требуются дополнительные исследования, чтобы установить, применимы ли рассмотренные методы в таких условиях. Проведение исследований затруднено без эффективных средств измерения сформированных структур. Поэтому актуальной является задача разработки специальных методов измерения и алгоритмов анализа данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ren D., Narayan R. J., Lee Y.** Machined surface error analysis for laser micromachining of biocompatible polymers // *Comput. Aided. Des. Appl.* 2009. **6**, N 6. P. 781–793.
2. **Stournaras A., Salonitis K., Stavropoulos P. et al.** Theoretical and experimental investigation of pulsed laser grooving process // *Intern. Journ. Adv. Manuf. Technol.* 2009. **44**, N 1–2. P. 114–124.
3. **Вакс Е. Д., Миленский М. Н., Сапрыкин Л. Г.** Практика прецизионной лазерной обработки. М.: Техносфера, 2013. 696 с.
4. **Дьюли У.** Лазерная технология и анализ материалов: Пер. с англ. М.: Мир, 1986. 504 с.
5. **Вейко В. П., Либенсон М. Н., Червяков Г. Н. и др.** Взаимодействие лазерного излучения с веществом /Под ред. В. И. Конова. М.: Физматлит, 2008. 312 с.
6. **Мачулка Г. А.** Лазеры в печати. М.: Машиностроение, 1989. 221 с.
7. **Григорьянц А. Г., Шиганов И. Н., Мисюров А. И.** Технологические процессы лазерной обработки: Учеб. пособие для вузов /Под ред. А. Г. Григорьянца. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. 663 с.
8. **Реди Д.** Промышленные применения лазеров: Пер. с англ. М.: Мир, 1981. 638 с.
9. **Dahotre N., Harimkar S.** Laser Fabrication and Machining of Materials. Springer, 2008. 565 p.
10. **Gladush G., Smurov I.** Physics of Laser Materials Processing: Theory and Experiment. Springer, 2011. 548 p.
11. **Steen W., Mazumder J.** Laser Material Processing. Springer, 2010. 567 p.
12. **The Theory of Laser Materials Processing** /Ed. J. Dowden. Springer, 2009. 404 p.
13. **Cline H. E., Anthony T. R.** Heat treating and melting material with a scanning laser or electron beam // *Journ. Appl. Phys.* 1977. **48**, N 9. P. 3895–3900.
14. **Gross M. S.** Transient numerical simulation of laser material processing with focus on laser cutting: Ph. D. Thesis. Heriot-Watt University, 2004.

15. **Zhang W., Yao Y. L., Chen K.** Modelling and analysis of UV laser micromachining of copper // Intern. Journ. Adv. Manuf. Technol. 2001. **18**, N 5. P. 323–331.
16. **Dobrev T., Pham D., Dimov S.** A simulation model for crater formation in laser milling // Proc. of the 1st Intern. Conf. on Multi-Material Micro Manufacture (4M 2005). Oxford: Elsevier, 2005. P. 155–159.
17. **Chun M., Rose K.** Interaction of high-intensity laser beams with metals // Journ. Appl. Phys. 1970. **41**, N 2. P. 614–620.
18. **Бессмельцев В. П., Голошевский Н. В.** Система управления составными двухкоординатными сканаторами // Автометрия. 2007. **43**, № 1. С. 116–126.
19. **Wang X., Shephard J. D., Dear F. C. et al.** Optimized nanosecond pulsed laser micromachining of Y-TZP ceramics // Journ. Amer. Ceram. Soc. 2008. **91**, N 2. P. 391–397.
20. **Harrison P. M., Henry M., Brownell M.** Laser processing of polycrystalline diamond, tungsten carbide and related hard materials // Journ. Laser Appl. 2006. **18**, N 2. P. 117–127.
21. **Chen T.-C., Darling R. B.** Parametric studies on pulsed near ultraviolet frequency tripled Nd:YAG laser micromachining of sapphire and silicon // Journ. Mater. Process. Technol. 2005. **169**, N 2. P. 214–218.
22. **Samant A. N., Dahotre N. B.** An integrated computational approach to single-dimensional laser machining of magnesia // Opt. Lasers Eng. 2009. **47**, N 5. P. 570–577.
23. **Deladurantaye P., Gay D., Cournoyer A. et al.** Material micromachining using a pulsed fiber laser platform with fine temporal nanosecond pulse shaping capability // Proc. SPIE. 2009. **7195**. 71951S.
24. **Dubey A., Yadava V.** Laser beam machining — A review // Intern. Journ. Mach. Tools Manuf. 2008. **48**, N 6. P. 609–628.
25. **Dubey A. K., Yadava V.** Experimental study of Nd:YAG laser beam machining — An overview // Journ. Mater. Process. Technol. 2008. **195**, N 1–3. P. 15–26.
26. **Li J., Ananthasuresh G.** A quality study on the excimer laser micromachining of electro-thermal-compliant micro devices // Journ. Micromech. Microeng. 2001. **11**, N 1. P. 38–47.
27. **Kathuria Y. P.** Laser microprocessing of metallic stent for medical therapy // Journ. Mater. Process. Technol. 2005. **170**, N 3. P. 545–550.
28. **Benardos P. G., Vosniakos G.-C.** Predicting surface roughness in machining: A review // Intern. Journ. Mach. Tools Manuf. 2003. **43**, N 8. P. 833–844.
29. **Knowles M., Rutterford G., Karnakis D. et al.** Laser micromilling of ceramics, dielectrics and metals using nanosecond and picosecond lasers // Proc. of the 2nd Intern. Conf. on Multi-Material Micro Manufacture (4M 2006). Oxford: Elsevier, 2006. P. 131–134.
30. **Kaldos A., Pieper H. J., Wolf E. et al.** Laser machining in die making — a modern rapid tooling process // Journ. Mater. Process. Technol. 2004. **155–156**. P. 1815–1820.
31. **Cheng J., Perrie W., Edwardson S. P. et al.** Effects of laser operating parameters on metals micromachining with ultrafast lasers // Appl. Surf. Sci. 2009. **256**, N 5. P. 1514–1520.
32. **Campanelli S. L., Casalino G., Contuzzi N.** Multi-objective optimization of laser milling of 5754 aluminum alloy // Opt. Laser Technol. 2013. **52**. P. 48–56.
33. **Hick A.** Rapid surface heat treatments — A review of laser and electron beam hardening // Heat Treat. Met. 1983. **10**, N 1. P. 3–11.
34. **Sheehy M., Winston L., Carey J.** Role of the background gas in the morphology and optical properties of laser-microstructured silicon // Chem. Mater. 2005. **17**, N 14. P. 3582–3586.
35. **Chichkov B. N., Momma C., Nolte S. et al.** Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids // Appl. Phys. A. 1996. **63**, N 2. P. 109–116.

36. **Soveja A., Cicala E., Grevey D. et al.** Optimization of TA6V alloy surface laser texturing using an experimental design approach // *Opt. Lasers Eng.* 2008. **46**, N 9. P. 671–678.
37. **Teixidor D., Ferrer I., Ciurana J. et al.** Optimization of process parameters for pulsed laser milling of micro-channels on AISI H13 tool steel // *Robot. Comput. Integr. Manuf.* 2013. **29**, N 1. С. 209–218.
38. **Karnakis D., Mortimer V., Knowles M.** Recent advances in ultrafast laser micromachining systems for material micromanufacturing // *Proc. of the 8th Intern. Conference and Exhibition on Laser Metrology, Machine Tool, CMM & Robotic Performance.* Cardif, Wales, 2007. P. 120–130.
39. **TeoSys.** URL: <http://www.teosys.com> (дата обращения: 13.05.2014).
40. **Malamas E. N., Petrakis E. G. M., Zervakis M. et al.** A survey on industrial vision systems, applications and tools // *Image Vision Comput.* 2003. **21**, N 2. P. 171–188.
41. **Wang X., Ananthasuresh G., Ostrowski J.** Vision-based extraction of geometry and forces from fabricated micro devices // *Tech. Proc. of the 2000 Intern. Cong. on Modelling and Simulation of Microsystems.* San Diego, 2000. P. 257–260.
42. **Bessmeltsev V. P., Bulushev E. D., Goloshevsky N. V.** Method for localizing and measuring structures formed under laser microprocessing // *Pattern Recogn. Image Anal. Adv. Math. Theory Appl.* 2011. **21**, N 3. P. 373–376.
43. **Бессмельцев В. П., Булушев Е. Д., Голошевский Н. В.** Экспертная система для оптимизации режима лазерной микрообработки // *Изв. вузов. Приборостроение.* 2011. **54**, № 2. С. 17–22.
44. **Li Y., Gu P.** Free-form surface inspection techniques state of the art review // *Comput. Des.* 2004. **36**, N 13. P. 1395–1417.
45. **Leach R.** *Optical Measurement of Surface Topography.* Berlin — Heidelberg: Springer, 2011. 318 p.
46. **Бессмельцев В. П., Булушев Е. Д.** Быстрый алгоритм совмещения изображений для контроля качества лазерной микрообработки // *Компьютерная оптика.* 2014. **38**, № 2. С. 343–350.
47. **Araújo S. A., Kim H. Y.** Grayscale template-matching invariant to rotation, scale, translation, brightness and contrast // *Proc. of the 2nd Pacific Rim Conf. on Advances in Image and Video Technology.* Berlin — Heidelberg: Springer, 2007. P. 100–113.
48. **Sirvarao S., Anand T., Ammar A.** DOE based statistical approaches in modeling of laser processing — Review & suggestion // *Intern. Journ. Eng. Technol.* 2010. **10**, N 4. P. 1–8.
49. **Box G., Wilson K.** On the experimental attainment of optimum conditions // *Journ. Royal Stat. Soc. Ser. B.* 1951. **13**, N 1. P. 1–45.
50. **Czitrom V.** One-factor-at-a-time versus designed experiments // *Amer. Stat.* 1999. **53**, N 2. P. 126–131.
51. **Сидняев Н., Вилисова Н.** Введение в теорию планирования эксперимента. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. 446 с.
52. **Montgomery D.** *Introduction to Statistical Quality Control.* Wiley, 2007. 734 p.
53. **Saklakoglu I. E., Kasman S.** Investigation of micro-milling process parameters for surface roughness and milling depth // *Intern. Journ. Adv. Manuf. Technol.* 2010. **54**, N 5–8. P. 567–578.
54. **Orazi L., Cuccolini G., Fortunato A. et al.** An automated procedure for material removal rate prediction in laser surface micromanufacturing // *Intern. Journ. Adv. Manuf. Technol.* 2009. **46**, N 1. P. 163–171.
55. **Dhupal D., Doloï B., Bhattacharyya B.** Parametric analysis and optimization of Nd:YAG laser micro-grooving of aluminum titanate (Al_2TiO_5) ceramics // *Intern. Journ. Adv. Manuf. Technol.* 2008. **36**, N 9–10. P. 883–893.

56. **Biswas R., Kuar A. S., Sarkar S., Mitra S.** A parametric study of pulsed Nd:YAG laser micro-drilling of gamma-titanium aluminide // *Opt. Laser Technol.* 2010. **42**, N 1. P. 23–31.
57. **Kibria G., Doloi B., Bhattacharyya B.** Predictive model and process parameters optimization of Nd:YAG laser micro-turning of ceramics // *Intern. Journ. Adv. Manuf. Technol.* 2013. **65**, N 1–4. P. 213–229.
58. **Sivarao T. J. S., Ammar S.** Stochastic modeling and optimization of laser machining by response surface methodology // *Intern. Journ. Eng. Technol.* 2010. **10**, N 4. P. 9–15.
59. **Sivarao T. J. S., Ammar S.** RSM based modeling for surface roughness prediction in laser machining // *Intern. Journ. Eng. Technol.* 2010. **10**, N 4. P. 26–32.
60. **Taguchi G.** *System of Experimental Design: Engineering Methods to Optimize Quality and Minimize Cost.* White Plains, 1987. 1080 p.
61. **Chen Y., Tam S.** Application of the Taguchi method in the optimization of laser micro-engraving of photomasks // *Intern. Journ. Mater. Prod. Technol.* 1996. **11**, N 3. P. 333–344.
62. **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 // *Intern. Journ. Adv. Manuf. Technol.* 2011. **58**, N 1–4. P. 201–209.
63. **Haykin S.** *Neural Networks: A Comprehensive Foundation.* Prentice Hall, 1999. 842 p.
64. **Круглов В., Дли М., Голунов Р.** *Нечеткая логика и искусственные нейронные сети.* М.: Физматлит, 2001. 221 с.
65. **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. **24**, N 3. P. 358–368.
66. **Dhara S. K., Kuar A. S., Mitra S.** An artificial neural network approach on parametric optimization of laser micro-machining of die-steel // *Intern. Journ. Adv. Manuf. Technol.* 2007. **39**, N 1–2. P. 39–46.
67. **Campanelli S. L., Casalino G., Ludovico A. D., Bonserio C.** An artificial neural network approach for the control of the laser milling process // *Intern. Journ. Adv. Manuf. Technol.* 2012. **66**, N 9–12. P. 1777–1784.
68. **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. **47**, N 9. P. 956–964.
69. **Desai C. K., Shaikh A.** Prediction of depth of cut for single-pass laser micro-milling process using semi-analytical, ANN and GP approaches // *Intern. Journ. Adv. Manuf. Technol.* 2011. **60**, N 9–12. P. 865–882.
70. **Mitchell M.** *An Introduction to Genetic Algorithms.* MIT Press, 1999. 209 p.
71. **Kennedy J., Eberhart R.** Particle swarm optimization // *Proc. IEEE Intern. Conf. on Neural Networks.* Perth, USA: IEEE, 1995. Vol. 4. P. 1942–1948.
72. **Liu Y., Wang C.** A modified genetic algorithm based optimisation of milling parameters // *Intern. Journ. Adv. Manuf. Technol.* 1999. **15**, N 11. P. 796–799.
73. **Venkata Rao R., Pawar P. J.** Parameter optimization of a multi-pass milling process using non-traditional optimization algorithms // *Appl. Soft Comput.* 2010. **10**, N 2. P. 445–456.
74. **Vázquez E., Ciurana J., Rodríguez C. A. et al.** Swarm intelligent selection and optimization of machining system parameters for microchannel fabrication in medical devices // *Mater. Manuf. Process.* 2011. **26**, N 3. P. 403–414.
75. **Джарратано Д., Райли Г.** *Экспертные системы принципы разработки и программирование: Пер. с англ.* М.: Вильямс, 2007. 1147 с.

-
76. **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. В. Панченко. М.: Физматлит, 2009. С. 494–506.
 77. **Lau H.** Combination of a knowledge-based system with a data extraction system for determining optimal machine settings // Expert Syst. Appl. 1996. **11**, N 3. P. 391–396.
 78. **Pat. 6,345,205 US.** Support system for laser beam machine, and laser beam machine including the same /T. Inamasu, T. Aoki. Publ. Feb. 5, 2002. 10 p.
 79. **Pat. 5,659,479 US.** Method and apparatus for real-time control of laser processing of materials /W. W. Duley, G. Kinsman. Publ. Aug. 19, 1997. 11 p.

Поступила в редакцию 13 мая 2014 г.
