

УДК 681.944

DOI: 10.22213/2413-1172-2023-2-51-59

## Исследование режимов лазерной обработки неметаллических материалов

А. В. Усольцева, соискатель, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

*При обработке материалов с использованием лазера одной из актуальных проблем является обеспечение определенного уровня шероховатости поверхности изделия. Особенно это важно для материалов природного происхождения (дерево, кожа, пластмассы, кости, камни и др.). Одним из подходов выбора режимов обработки лазером является предварительная апробация режимов на образцах изделий. Это приводит к значительным временным затратам, а также к использованию большого количества образцов (до нескольких десятков). Предлагается использовать обработку результатов исследований образцов изделий с применением вероятностно-статистической обработки данных. Приведен пример использования такого подхода на обработке изделий из дерева. Показаны результаты обработки изделий лазером с оценкой шероховатости поверхности изделия с использованием алгоритмов вероятностной обработки результатов экспериментов. Проведенный эксперимент содержал три этапа. Сначала подготавливается модель образца изделия, представляющая ступенчатый клин с различной шероховатостью, затем модель устанавливается на лазер и происходит ее лазерная обработка. На третьем этапе производятся измерения шероховатости поверхности, и на компьютере выполняется статистическая обработка результатов экспериментов. Применение рассматриваемого подхода позволяет ускорить разработку режимов лазерной обработки изделий из дерева в 3-4 раза в сравнении с известными подходами.*

*В работе приведены основные алгоритмы вероятностно-статистической обработки результатов экспериментов, показаны диаграммы зависимости шероховатости от различных режимов лазерной обработки для различных материалов (дерево, стекло, кожа): глубина абляции, дисперсия неровностей профиля, зависимость дисперсии неровностей от мощности излучения лазера. Для проведения эксперимента использовался лазер TrotecSpeedy 300, микроденситометр, микроинтерферометр МИИ 4, фотоэлектрический блескомер ФБ-2. Для обработки данных была построена регрессионная модель, связывающая режимы лазерной обработки и свойства поверхности различных материалов. Статья будет полезна студентам, специалистам, использующим лазерную обработку материалов природного происхождения.*

**Ключевые слова:** лазерное воздействие, шероховатость, величина микронеровностей, случайная величина.

### Введение

Одним из факторов, благоприятствующих экономическому росту, является качество выпускаемой продукции. Существенное влияние на качество продукции оказывают качество сырья и материалов, прогрессивность применяемых технологий [1, 2]. Важным показателем качества продукции является качество поверхности и поверхностного слоя изделия; в значительной степени от этого зависят эксплуатационные характеристики изделий и значения эстетических свойств продукции. Особое значение имеет качество поверхности в винтажном, коллекционном оружии; сюда же можно отнести новое оружие, созданное для личных целей и на заказ [3–5].

Качество обработанной поверхности характеризуется основными признаками – физико-механическими свойствами поверхностного слоя материала и степенью шероховатости поверхности, иначе – чистотой, или гладкостью поверхности. *Шероховатость поверхности* –

совокупность неровностей с относительно малыми шагами, выделенная с помощью базовой длины [6–9].

Широкое распространение в промышленности при обработке различных поверхностей получили лазеры и лазерные технологии. Уникальные физические свойства лазерного излучения способствуют расширению применения лазерных технологий при изготовлении художественно-промышленных изделий [10–12]. Однако лазерная обработка применяется недостаточно широко; порой разработчикам не удается реализовать замысел, предусмотренный проектом, в связи с недостаточной изученностью возможностей лазерных технологий и отсутствием рекомендаций для их применения [13].

При изготовлении промышленных изделий широко применяются неметаллические материалы. Применение таких материалов во многом определяется высокими эстетическими и акустическими свойствами, биологической совместимостью с человеком и животными,

стойкостью к воздействию химически агрессивных сред, высокой удельной прочностью, относительно малой плотностью, качеством поверхности, четкостью наносимых изображений, чистотой выполнения контуров, эстетичностью наносимых покрытий, отделкой поверхностей и др. [14, 15].

Анализ факторов, влияющих на качество лазерной обработки, показывает, что на шероховатость влияет нестабильность характеристик лазерной системы, вызванных изменением параметров окружающей среды и характеристик физических процессов, сопровождающих генерацию лазерного излучения, – мощность лазера, расходимость лазерного луча, частота излучения. Флуктуации параметров лазера могут достигать десятков процентов, а нестабильность диаграммы направленности может превышать величину дифракционной расходимости. В зависимости от глубины обработки точка контакта лазерного луча с поверхностью материала подвергается быстрому изменению, вследствие чего происходит расфокусирование излучения, что, в свою очередь, влияет на ухудшение качества обработки поверхности [16].

На шероховатость поверхности в результате лазерной обработки влияет отклонение толщины листовых материалов в партии аналогичных изделий, поверхностные повреждения из-за отклонения твердости, появление внутренних напряжений, ведущих к последующему появлению микротрещин, концентрации напряжений, а также локальные отклонения плотности, твердости, теплостойкости, теплопроводности, вязкости, теплоемкости, температуры размягчения, температуры горения.

Таким образом, можно утверждать, что шероховатость поверхности, получаемая в результате лазерной обработки, в каждом конкретном случае становится случайной величиной, из-за чего актуальной задачей является представление эффективных рекомендаций по заданию режимов лазерной обработки материалов, позволяющих получить необходимое качество поверхности изделий.

**Цель** исследования – изучить возможность использования результатов исследования образцов изделий с применением вероятностно-статистической обработки данных для задания режимов лазерной обработки неметаллических материалов.

#### **Предварительный анализ**

В литературе по лазерной технике и лазерным технологиям нет аналитических выражений, позволяющих рассчитать статистические

характеристики микронеровностей в зависимости от режимов работы лазерной установки. Это объясняется необходимостью учета и контроля большого количества влияющих факторов, нелинейности протекающих процессов и изменения параметров в процессе лазерного воздействия. Приводимые в эксплуатационной документации на лазерные установки рекомендации по выбору технологических режимов носят рекомендательный характер, могут не соответствовать действительности.

Существенно упрощается решение возникших технических задач с применением вероятностно-статистического аппарата. Лазерная обработка при изготовлении изделий занимает несравненно меньше времени, чем расчет и задание технологических режимов, проверка качества изготовления. По этой причине предпринята попытка не контролировать значение каждого влияющего фактора, а судить о результатах по сравнительно небольшой части выборки. Статистические методы наиболее перспективно использовать тогда, когда выбор и испытание режима приводит к порче изделий или их гибели.

Большое количество случайных независимых влияющих факторов позволяет предварительно задать режим лазерной обработки с получением необходимой шероховатости поверхности.

#### **Методы исследования**

Количество материалов, применяемых в промышленности, чрезвычайно велико и составляет несколько тысяч наименований, более того, постоянно увеличивается. В соответствии с объемами промышленного применения в качестве материалов для исследования была использована древесина (по итогам 2019 г. производство деловой (промышленной) древесины в целом по стране составило 127,8 млн м<sup>3</sup>), кость (годовая реализация около 15 тыс. т), натуральная кожа (годовой объем производства российской кожевенной отрасли составляет 2,5 млрд дм<sup>2</sup>, или 1,5 % мирового производства кож), органическое стекло (ежегодно в мире выпускается примерно 3 млн т с увеличением до 30 % ежегодно). По данным ассоциации «Народные художественные промыслы России», по итогам 2021 г. ожидается рост объемов производства до 7,1 млрд руб.; изделия из дерева составляют 17 % от всех художественных изделий, из кожи – 2 %, из кости – 3 %, органическое стекло используется для демонстрации ювелирных изделий [17].

Перечисленные материалы и их комбинации широко применяются при создании и реставрации коллекционного оружия. Особо ценятся

охотничьи ружья, кинжалы, украшенные гравировками, ажурной резьбой, оформленные с применением драгоценных материалов, слоновой кости, кожи.

Развитие новых технологий в области обработки указанных материалов на базе достижений физики и химии позволило создавать многослойные и комбинированные материалы с новыми характеристиками (в том числе с барьерными свойствами).

В значительной степени *абляция* (лат. *ablatio* – удаление) зависит от природы материала. Учитывая микроструктуру, химический состав и физико-механические характеристики используемых материалов, для проведения исследований была использована лазерная установка на углекислом газе CO<sub>2</sub> (TrotecSpeedy 300), из материалов – древесина, кость, темная натуральная кожа, органическое стекло. Для определения глубины абляции и величины микронеровностей использовалось воспроизведение ступенчатого клина с 15 ступенями по аналогии с ГОСТ 24930–81 «Клин полутонной для факсимильной аппаратуры». Величина микронеровностей рассчитывалась по Rz-высоте неровностей профиля, снятой в 10 точках, и Ra – среднему арифметическому значению отклонения профиля.

#### *Оборудование для исследования*

- лазерная установка TrotecSpeedy 300, длина волны лазерного излучения 10,6 мкм, максимальная скорость обработки 3,55 м/с, максимальная мощность лазера, 30 Вт;

- микроинтерферометр МИИ 4, диапазон измерения параметров шероховатости  $R_{\max}$  и Rz и толщины пленок 0,1...0,8 мкм, линейное поле зрения в пространстве предмета, 0,3мм;

- оптический длинномер ДВО, цена деления шкалы 1,0 мкм, пределы измерений по шкале 0... 100 мм, пределы допускаемой погрешности на любом участке шкалы в пределах 100 делений (1,4+1/100) мкм, наибольшее измерительное усилие (колебание измерительного усилия) 2,0 Н, вариация показаний 0,4 мкм;

- денситометр ДНС-2, диапазон измерения оптической плотности черно-белых материалов (логарифмический масштаб) 0,00...4,00 Б, предел допускаемой основной погрешности измерений 2 %, разрешающая способность 0,01 Б;

- фотоэлектрический блескомер ФБ-2, диапазон измерений показателя степени блеска, 0...65 %, диапазон измерений показателя степени белизны 0...100 %, основная абсолютная погрешность  $\pm 4$  %.

#### **Выполнение исследования**

Предварительно была создана модель обрабатываемого образца с воспроизведением ступенчатого клина в цифровом формате в графическом редакторе CorelDRAW с использованием растровой графики, построением воспроизведением; при движении луча вправо мощность увеличивается с указанным шагом, влево – уменьшается. Перед импортированием файла в систему лазерной установки аппарат подготавливается к работе, проверяется чистота оптики, материал располагается и закрепляется на поверхности стола, включается оборудование, запускается программа управления лазерной установки, в которую выгружается модель обрабатываемого образца, сохраненная на компьютере, устанавливается точка входа.

Кнопкой позиционирования по оси *z* стол поднимается в рабочую зону. С помощью кнопок позиционирования лазерный луч фокусируется на обрабатываемый материал в исходную точку. Проверяется фокусировка и выставляется высота лазерной головки на нужном уровне. На панели FilePrint задаются необходимые параметры: материал, мощность лазерного излучения, скорость перемещения лазерного луча, разрешающая способность, частота, направление обработки. Кнопкой EstablishConnection на панели EngraverControl установить связь компьютера и лазерной установки. Убедившись в корректной работе системы вентиляции и охлаждения, необходимо нажать кнопку запуска, после чего ожидать окончания выполнения программного цикла.

Измерение глубины абляции производилось оптическим длинномером ДВО. В соответствии с инструкцией по эксплуатации проводилось десять измерений на необработанной поверхности рядом со ступенью и десять измерений на ступени, рассчитывалось среднее значение.

Визуальная оценка и измерение неровностей обработанных поверхностей производилось на микроинтерферометре Линника МИИ 4. Микроинтерферометр в соответствии с инструкцией по эксплуатации фокусировался на исследуемой поверхности, проводилось измерение, на каждой ступени проводилось десять измерений с равномерным шагом.

Измерения оптической плотности проводилось на денситометре ДНС-2, определялась степень ослабления светового излучения при отражении его от точки на каждой из 15 ступеней. Перед началом работы проводилась проверка настройки денситометра. В каждой точке замер

производился 3 раза. За результат принималось среднее арифметическое значение показаний. Измерение производилось 2 раза.

Измерение показателя степени блеска поверхности проводилось на фотоэлектрический блескомере ФБ-2 путем измерения фототока, возникающего под действием пучка света, падающего на поверхность под углом  $45^\circ$  и отраженного от нее. Перед проведением испытаний оптическая головка прибора устанавливалась на необработанную поверхность, показания принимались за 100 %. Затем головка прибора устанавливалась на исследуемую ступень и проводилось измерение показателя степени блеска поверхности.

Эксперименты проводились при изменении мощности лазерного излучения от 0,64 до 9,6 Вт при скорости перемещения лазерного излучения 27,0 см/с, разрешающей способности 500 dpi,

частоте импульсов 1000 Гц, диаметре сфокусированного лазерного луча 0,1 мм, вертикальном направлении лазерного луча на материал.

График средней глубины абляции для различных материалов приведен на рисунке 1.

Учитывая, что величина неровностей профиля имеет дискретное случайное распределение, среднее арифметическое значение отклонения профиля рассчитывалось по известной формуле, а для аппроксимации экспериментальных данных непрерывной функцией использовался метод наименьших квадратов по минимальности суммы квадратов отклонений аппроксимирующей функции от экспериментальных точек (см. Усольцева А. В. Исследование режимов лазерной обработки органического стекла. 2022).

График среднего арифметического значения отклонения профиля представлен на рисунке 2.

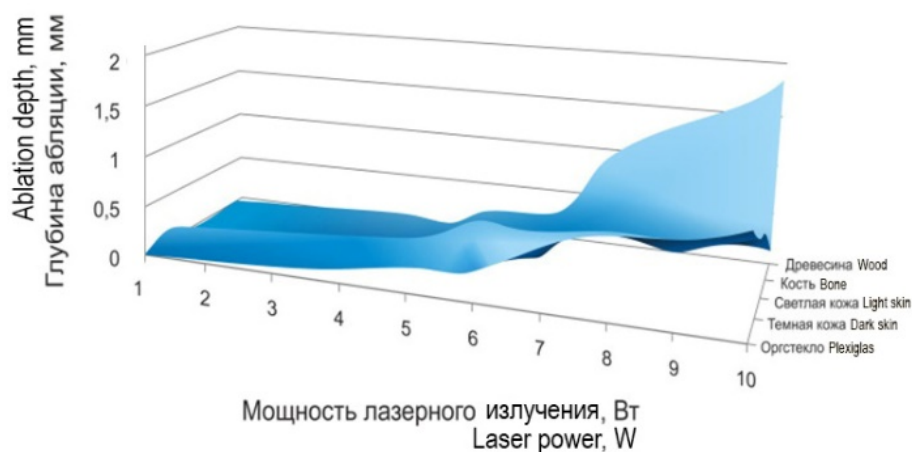


Рис. 1. Средняя глубина абляции

Fig. 1. Average ablation depth

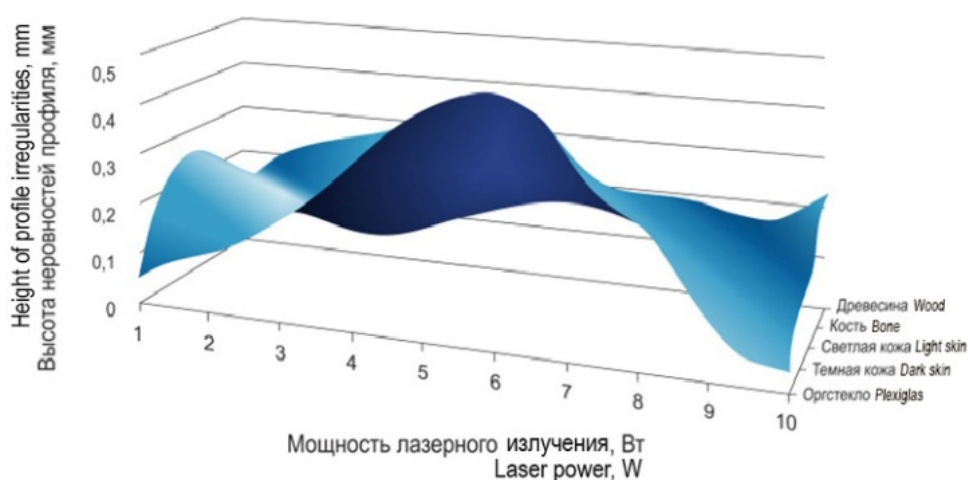


Рис. 2. Среднее арифметическое значение отклонения профиля для различных материалов

Fig. 2. Arithmetic mean of deviation profile for different materials

Для повышения информативности по известной формуле рассчитана дисперсия высоты неровностей профиля для различных материалов. Вид графика величины дисперсии высоты неровностей профиля для органического стекла представлен на рисунке 3, для темной кожи – на рисунке 4, для светлой кожи – на рисунке 5, для дерева – на рисунке 6.

Для составления системы уравнений, необходимой для нахождения неизвестных коэффициентов, находятся частные производные первого порядка по этим переменным. Функция будет минимальной, когда выполняется необходимое условие – равенство нулю первых производных функции по искомым параметрам.

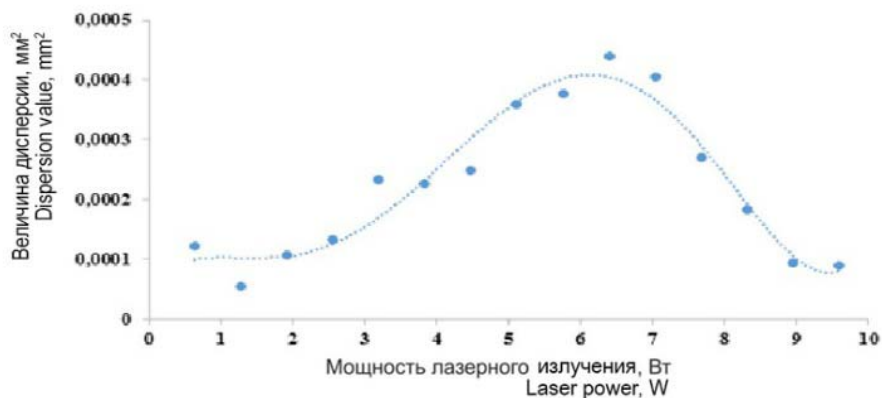


Рис. 3. Дисперсия высоты неровностей профиля оргстекла

Fig. 3. Dispersion of height of Plexiglas profile irregularities

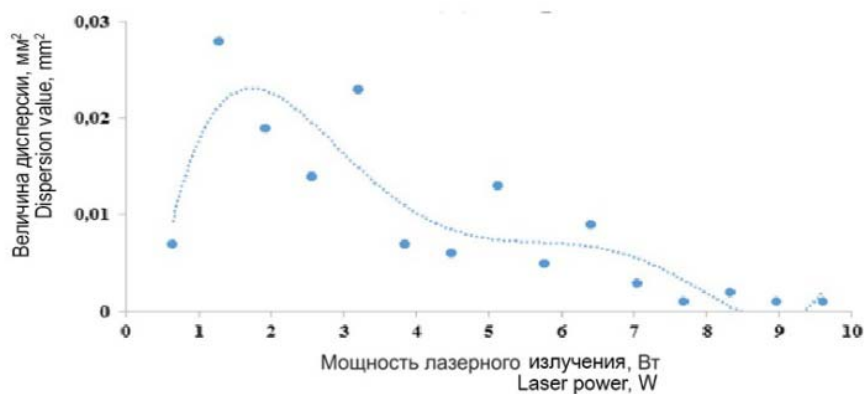


Рис. 4. Дисперсия высоты неровностей профиля темной кожи

Fig. 4. Dispersion of height of dark skin profile irregularities

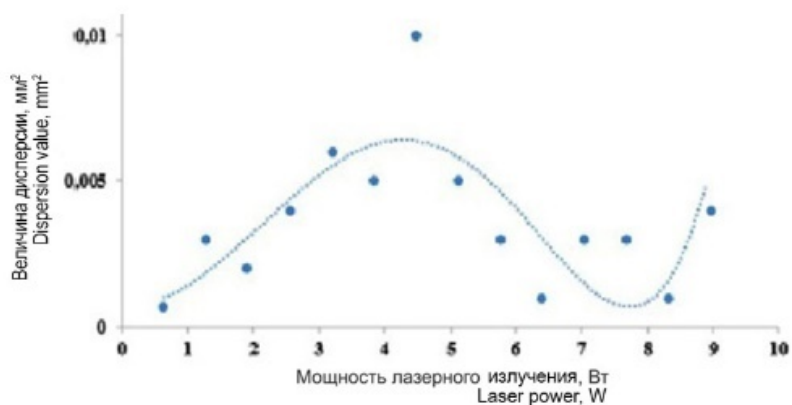


Рис. 5. Дисперсия высоты неровностей профиля светлой кожи

Fig. 5. Dispersion of height of profile light skin irregularities

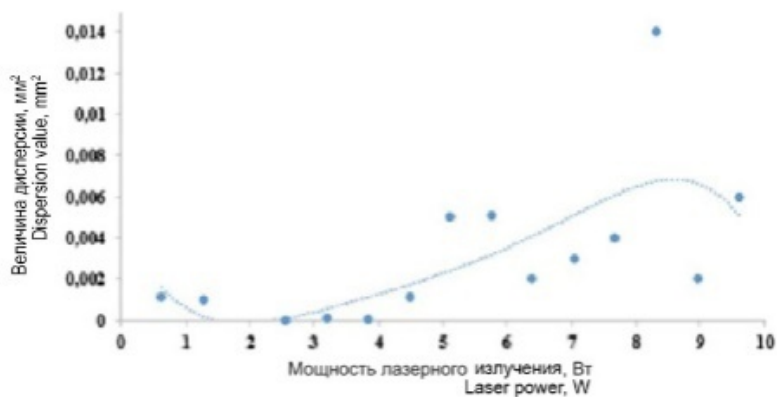


Рис. 6. Дисперсия высоты неровностей профиля кости

Fig. 6. Dispersion of height of bone profile irregularities

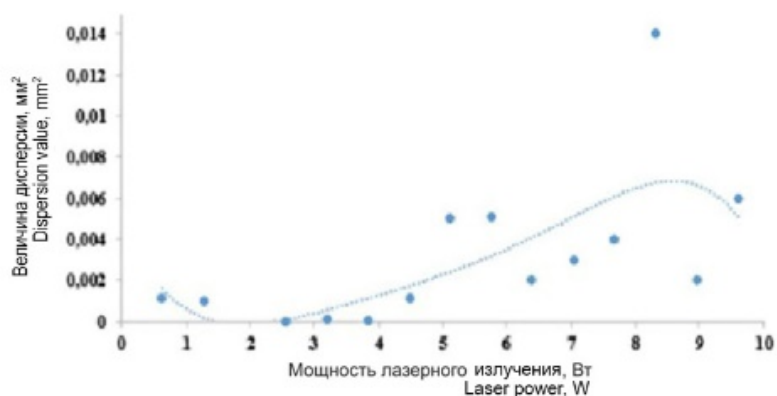


Рис. 7. Дисперсия высоты неровностей профиля дерева

Fig. 7. Dispersion of height of tree profile irregularities

Решение системы производилось с помощью MathCAD. Получены коэффициенты многочлена, которые являются искомыми параметрами аппроксимирующей функции. После осуществления стандартных вычислений можно получить уравнения для описания зависимости дисперсии микронеровностей при изменении мощности лазерного излучения, которые

более наглядно представляют тенденцию изменения параметров.

Для измерения оптической плотности на каждой ступени клина определялась степень ослабления светового излучения. График оптической плотности представлен на рисунке 8, значения блеска поверхности на различных ступенях – на рисунке 9.

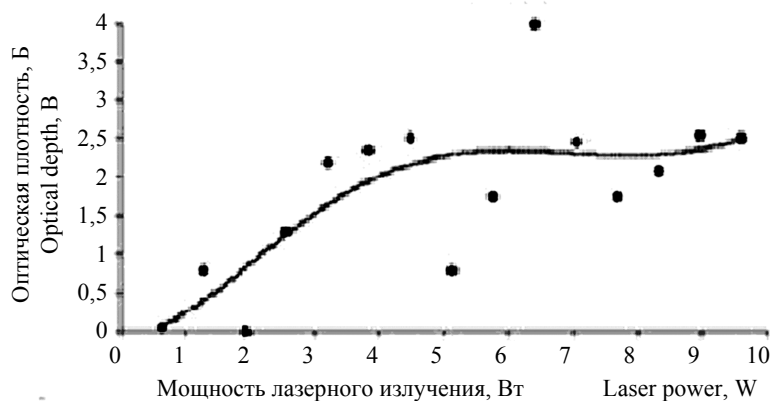


Рис. 8. Оптическая плотность на различных ступенях

Fig. 8. Absorbance at different stages

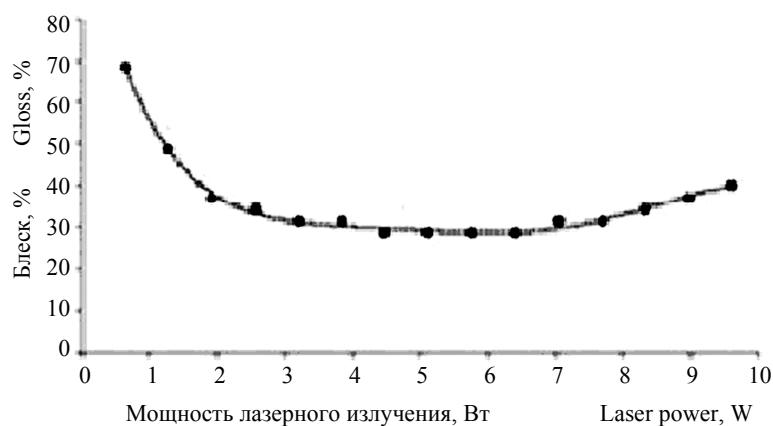


Рис. 9. Значения блеска на различных ступенях

Fig. 9. Gloss values on different steps

### Обсуждение результатов исследования

Как следует из рисунков 1 и 2, среднюю глубину абляции и среднее арифметическое значение отклонения профиля для различных материалов при изменении мощности лазерного излучения можно представить непрерывной плавной возрастающей выпукло-вогнутой поверхностью, что позволяет рассматривать материал как универсальный со случайными отклонениями, соответствующими индивидуальным свойствам конкретного материала.

Рисунки 3–7 показывают, что дисперсия среднего арифметического значения отклонения профиля для различных материалов имеет выраженный максимум при мощности лазерного излучения 3...7 Вт, что сопровождается максимальным значением отклонения профиля для различных материалов при мощности лазерного излучения 6...8 Вт (см. рис. 2). Кроме этого, при общей тенденции роста глубины абляции с увеличением мощности лазерного излучения функция глубины абляции имеет местные перегибы, соответствующие локальным наибольшим и наименьшим значениям (см. рис. 1).

Из рисунков 8 и 9 следует, что при мощности лазерного излучения 3...7 Вт обработанные поверхности по оптической плотности и блеску наиболее пригодны для эксплуатации.

Случайные величины средней глубины абляции и отклонения профиля для различных материалов имеют нормальное распределение, поэтому, выбрав для работы мощность лазерного излучения 7 Вт, по правилу трех сигм получим удовлетворительную для последовательной обработки древесины, темной и светлой натуральной кожи, кости, органического стекла с необходимой средней глубиной абляции и отклонением профиля, при этом отклонения не превысят 1...3 %.

Из приведенных материалов следует, что можно задать режимы, позволяющие проводить лазерную обработку (гравирование, резку за несколько проходов) различных комбинированных материалов без ухудшения качества поверхности, обеспечить необходимую шероховатость поверхности для нанесения покрытий в соответствии с требованиями нормативных документов. Результаты экспериментов и приводимые в литературе экспериментальные данные не противоречат этому утверждению.

В результате математической обработки данных эксперимента получена регрессионная модель, связывающая режимы лазерной обработки и свойства поверхности материала. Влияние мощности лазерного излучения на величину микронеровностей проверено по коэффициентам парной, чистой (частной) и множественной (совокупной) линейной корреляции Пирсона [18, 19].

### Выводы

В результате проведенных исследования образцов изделий с применением вероятностно-статистической обработки данных установлено, что для задания режимов лазерной обработки неметаллических материалов нужно учитывать зависимость глубины абляции, отклонение профиля, дисперсию высоты неровностей профиля от мощности лазерного излучения.

Проведенные исследования показали, что разные неметаллические материалы можно обрабатывать на одних режимах работы лазерного оборудования, в исследуемом случае – при мощности лазерного излучения 7,6 Вт, скорости перемещения лазерного излучения 27,0 см/с, разрешающей способности 500 dpi, частоте импульсов 1000 Гц, диаметре сфокусированного лазерного луча 0,1 мм, вертикальном направлении лазерного луча на материал. На этих режи-

мах получают поверхности с наилучшей адгезией для склеивания, нанесения покрытия, для визуального восприятия.

Таким образом, формализация процесса лазерной обработки потоком случайных событий, применение аппарата теории вероятностей и математической статистики позволяет существенно упростить задание режимов лазерной обработки.

Применение лазерной техники выводит производство на новый высокоинтеллектуальный уровень. Проведенные исследования позволяют повысить эффективность и расширить применения лазерных технологий при создании художественно-промышленных изделий.

### Библиографические ссылки

1. *Tsibidis G., Museur L., Kanaev A.* The Role of Crystalline Orientation in the Formation of Surface Patterns on Solids Irradiated with Femtosecond Laser Double Pulses: Physics, Materials Science, Applied Sciences, 2020, pp. 493-514.

2. Improving the efficiency of identification using laser technology. Scientific research in SCO countries: English report by participants of the International Conference on Synergy and Integration December 11, Beijing China, 2019.

3. *Lorenz P., Zagoranskiy I., Ehrhardt M., Zimmer K.* Laser-induced large area sub- $\mu\text{m}$  and nanostructuring of dielectric surfaces and thin metal layer // Materials Science, Physics, LASE, 2019, pp. 106-110.

4. *Faezeh Kazemi, Arnold T., Lorenz P., Ehrhardt M., Zimmer K.* Residual Layer Removal of Technical Glass Resulting from Reactive Atmospheric Plasma Jet Etching by Pulsed Laser Irradiation: Materials Science. Plasma Chemistry and Plasma Proc., 2020, pp. 1242-1251.

5. *Ehrhardt M., Lorenz P., Zimmer K.* Dry Etching of Germanium with Laser Induced Reactive Micro Plasma. Physics, Materials Science: Lasers in Manufacturing and Materials Proc., 2021, pp. 1323-1367.

6. *Siuzdak K., Łukasz Haryński, Wawrzyniak J., Grochowska K.* Review on robust laser light interaction with titania - Patterning, crystallisation and ablation processes: Materials Science, 2020, pp. 8-14.

7. *Siddharth S., Song-Ling Tsai, Yu-Bin Chen, Ming-Tsang Lee.* Opto-thermo-fluidic transport phenomena involving thermocapillary flow during laser microfabrication: Materials Science, 2020, pp. 277-282.

8. *Bonse J., Kirner S., Griepentrog M., Spaltmann D., Krüger J.* Femtosecond Laser Texturing of Surfaces for Tribological Applications: Materials Science, Materials, 2018, pp. 4435-4441.

9. *Acosta-Zepeda C., Saavedra P., Bonse J., Haro-Poniatowski E.* Modeling of silicon surface topographies induced by single nanosecond laser pulse induced melt-flows. Physics, Materials Science: Journal of Applied Physics, 2019, pp. 68-74.

10. *Shugaev M., He M., Zhigilei L.* Laser-Induced Thermal Processes: Heat Transfer, Generation of

Stresses, Melting and Solidification, Vaporization, and Phase Explosion: Materials Science. Handbook of Laser Micro- and Nano-Engineering, 2020, pp. 1-81.

11. *Heitz J.* Laser ablation: fundamentals and applications in micropatterning and thin film formation: Materials Science, 2018, pp. 103-108.

12. *Murzin S.* Improvement of Thermochemical Processes of Laser-Matter Interaction and Optical Systems for Wavefront Shaping: Materials Science, Physics, Applied Sciences, 2022, pp. 954-962.

13. *Armbruster O., Naghilou A., Kautek W.* The Role of Defects in Pulsed Laser Matter Interaction. Materials Science, 2018, pp. 39-61.

14. *Вейко В. П., Петров А. А., Самохвалов А. А.* Введение в лазерные технологии. СПб., 2018. 161 с. // International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, vol. 127, pp. 1095-1100.

15. *Minok Park, Balkey M., Mao X., Jonsson J., Grigoropoulos C., Vassilia Zorba.* Mechanisms of graphite ablation by sub-millisecond ytterbium fiber laser pulses. Physics, Materials Science, Applied Physics Letters, 2022, pp. 1-181.

16. *Усольцева А. В.* Исследование режимов лазерной обработки органического стекла // Дизайн. Материалы. Технология. 2022. № 4(68). С. 113–119.

17. *Савельев И. В.* Курс общей физики. СПб. : Лань, 2016. 468 с.

18. *Круглов В. М.* Случайные процессы. М. : Academia, 2018. 318 с.

19. *Котликов Е. Н., Новикова Ю. А., Тронин А. Н.* Проектирование и изготовление интерференционных покрытий : монография. СПб. : ГУАП, 2016. 288 с.

### References

1. *Tsibidis G., Museur L., Kanaev A.* (2020) The Role of Crystalline Orientation in the Formation of Surface Patterns on Solids Irradiated with Femtosecond Laser Double Pulses, Physics: Materials Science. Applied Sciences, 2020, pp. 493-514.

2. Improving the efficiency of identification using laser technology. Scientific research in SCO countries: English report by participants of the International Conference on Synergy and Integration December 11, Beijing China, 2019.

3. *Lorenz P., Zagoranskiy I., Ehrhardt M., Zimmer K.* (2019) Laser-induced large area sub- $\mu\text{m}$  and nanostructuring of dielectric surfaces and thin metal layer: Materials Science, Physics, LASE, 2019, pp. 106-110.

4. *Faezeh Kazemi, Arnold T., Lorenz P., Ehrhardt M., Zimmer K.* (2020) Residual Layer Removal of Technical Glass Resulting from Reactive Atmospheric Plasma Jet Etching by Pulsed Laser Irradiation: Materials Science. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2020, pp. 1242-1251.

5. *Ehrhardt M., Lorenz P., Zimmer K.* (2021) Dry Etching of Germanium with Laser Induced Reactive Micro Plasma: Physics, Materials Science, Lasers in Manufacturing and Materials Processing, 2021, pp. 1323-1367.

6. *Siuzdak K., Łukasz Haryński, Wawrzyniak J., Grochowska K.* (2020) Review on robust laser light in-



teraction with titania - Patterning, crystallisation and ablation processes: Materials Science, 2020, pp. 8-14.

7. Siddharth S., Song-Ling Tsai, Yu-Bin Chen, Ming-Tsang Lee (2020) Opto-thermo-fluidic transport phenomena involving thermocapillary flow during laser microfabrication: Materials Science, 2020, pp. 277-282.

8. Bonse J., Kirner S., Griepentrog M., Spaltmann D., Krüger J. (2018) Femtosecond Laser Texturing of Surfaces for Tribological Applications: Materials Science, 2018, pp. 4435-4441.

9. Acosta-Zepeda C., Saavedra P., Bonse J. (2019) Haro-Poniatowski E. Modeling of silicon surface topographies induced by single nanosecond laser pulse induced melt-flows. Journal of Applied Physics, 2019, pp. 68-74.

10. Shugaev M., He M., Zhigilei L. (2020) Laser-Induced Thermal Processes: Heat Transfer, Generation of Stresses, Melting and Solidification, Vaporization, and Phase Explosion: Materials Science, Handbook of Laser Micro- and Nano-Engineering, 2020, p. 1-81.

11. Heitz J. (2018) Laser ablation: fundamentals and applications in micropatterning and thin film formation: Materials Science, 2018, pp. 103-108.

12. Murzin S. (2022) Improvement of Thermochemical Processes of Laser-Matter Interaction and Optical

Systems for Wavefront Shaping: Materials Science, Physics, Applied Sciences, 2022, pp. 954-962.

13. Armbruster O., Naghilou A., Kautek W. (2018) The Role of Defects in Pulsed Laser Matter Interaction: Materials Science, 2018, pp. 39-61.

14. Vejko V.P., Petrov A.A., Samoxvalov A.A. (2018) Vvedenie v lazerny`etexnologii. SPb., 2018, 161 p. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, vol. 127, pp. 1095-1100 (in Russ.).

15. Minok Park, Balkey M., Mao X., Jonsson J., Grigoropoulos C., Vassilia Zorba (2022) Mechanisms of graphite ablation by sub-millisecond ytterbium fiber laser pulses: Physics, Materials Science. Applied Physics Letters, 2022, pp. 1-181.

16. Usoltseva A.V. (2022) [Investigation of the regimes of laser processing of organic glass]. *Dizajn. Materialy. Tekhnologiya*, 2022, no. 4(68), pp. 113-119 (in Russ.).

17. Savel'ev I.V. (2018) Kurs obshhej fiziki [General physics course]. SPb., Lan` Publ., 2016, 468 p. (in Russ.).

18. Kruglov V.M. (2018) Sluchajny`e processy` / V.M. Kruglov. – Moscow, Academia Publ., 2018, 318 p. (in Russ.).

19. Kotlikov E.N., Novikova Yu.A., Tropin A.N. (2016) Proektirovanie i izgotovlenie interferencionny`h pokry`tij. SPb., GUAP, 2016, 288 p. (in Russ.).

## Investigation of Non-Metallic Material Laser Processing Modes

A.V. Usoltseva, PhD Candidate, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

*One of the relevant problems when processing materials using laser is to provide a certain level of surface roughness of the product. This is especially important for materials of natural origin (wood, leather, plastics, bones, stones, and etc.). One approach to select laser processing modes is to pre-test modes on product samples. This leads to significant time costs, as well as the use of a large number of samples (up to several dozen). The article proposes to process the product sample study results using probabilistic and statistical data processing. The example of using this approach in the wood product processing is given. The results of the products laser treatment with surface roughness assessment of the product using probabilistic processing algorithms of the experimental results are shown. The experiment contained three stages. First, a product sample model is prepared, representing a stepped wedge with different roughness, then the model is installed on a laser and laser processing of the model takes place. At the third stage, surface roughness is measured and statistical processing of experimental results is performed on the computer. The use of this approach accelerates the development of laser processing modes for wood products by 3-4 times in comparison with known approaches. The main algorithms of probabilistic and statistical experiment result processing are presented in the work, diagrams of roughness with respect to various laser processing modes for different materials (wood, glass, and leather) are shown: ablation depth, dispersion of profile irregularities, and relation of dispersion of irregularities on laser radiation power. For the experiment, a Trotec Speedy 300 laser, a microdensitometer, an MII 4 microinterferometer, and a photoelectric glare meter FB-2 were used. For data processing, a regression model was built linking laser processing modes and surface properties of various materials. The article will be useful for students applying laser processing of materials of natural origin.*

**Keywords:** laser exposure, roughness, microroughness value, random value.

Получено 30.03.2023

### Образец цитирования

Усольцева А. В. Исследование режимов лазерной обработки неметаллических материалов // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2023. Т. 26, № 2. С. 51–59. DOI: 10.22213/2413-1172-2023-2-51-59.

### For Citation

Usoltseva A.V. (2023) [Investigation of Non-Metallic Material Laser Processing Modes]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2023, vol. 26, no. 2, pp. 51-59 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2023-2-51-59.