

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-2-131-141

Оценка шероховатости поверхности неметаллических материалов при лазерной обработке

В.А. Алексеев¹, А.В. Усольцева¹, В.П. Усольцев¹, С.И. Юран²

¹Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова,
ул. Студенческая, 7, г. Ижевск 426069, Россия

²Удмуртский государственный аграрный университет,
ул. Студенческая, 11, г. Ижевск 426069, Россия

Поступила 15.04.2024

Принята к печати 10.06.2024

Проведены экспериментальные исследования поверхности неметаллических материалов с определением параметров шероховатости таких материалов, как кожа, кость, дерево, пластмасса после обработки поверхности материалов лазерным лучом. Для оценки качества поверхностного слоя материалов использованы глубина проникновения лазерного излучения в материал, среднее значение микронеровностей, среднее квадратическое отклонение микронеровностей. Для описания изменений величин микронеровностей использованы графики корреляции параметров микронеровностей и модуля упругости поверхности различных неметаллических материалов. Для описания зависимостей корреляции с представлением в компьютере используются аппроксимирующие полиномы. Предложена регрессионная модель, связывающая свойства материала с величиной микронеровностей. Приведены данные по глубине абляции для древесины, кости, кожи, оргстекла, графики корреляции между величиной микронеровности поверхности и плотностью материалов, между величиной микронеровности поверхности и модулем упругости материалов, коэффициент корреляции между величиной микронеровности поверхности и температурой воспламенения органических материалов. Полученные модели позволяют реализовать предложенный принцип лазерной обработки неметаллических материалов, заключающийся в измерении модуля упругости поверхности материала и на основании полученных измерений управлять режимами лазерной обработки изделий. Предложена установка лазерной обработки поверхности неметаллических материалов с реализацией принципа управления режимами обработки в зависимости от измеренных значений величины модуля упругости поверхности материала. Для измерения модуля упругости материала используется специальный датчик с вдавливанием индентора и компьютерной оценкой полученных измерений с формированием решений по управлению режимами лазерной обработки поверхности материала. Полученные экспериментальные результаты позволили изготовить ряд изделий с обеспечением заданного качества поверхности неметаллических материалов (письменный прибор, изделие-подарок молодоженам). Проведение экспериментов с изменением мощности лазерного излучения по результатам измерения модуля упругости поверхности неметаллических материалов показало эффективность оперативного задания режимов работы лазера с обеспечением качества поверхности неметаллических материалов.

Ключевые слова: качество поверхности, корреляция, лазерная обработка, микронеровность, модуль упругости

Адрес для переписки:

Юран С.И.
Удмуртский государственный аграрный университет,
ул. Студенческая, 11, г. Ижевск 426069, Россия,
e-mail: yuran-49@yandex.ru

Address for correspondence:

Yuran S.I.
Udmurt State Agrarian University,
Studencheskaya str., 11, Izhevsk 426069, Russia
e-mail: yuran-49@yandex.ru

Для цитирования:

В.А. Алексеев, А.В. Усольцева, В.П. Усольцев, С.И. Юран.
Оценка шероховатости поверхности неметаллических
материалов при лазерной обработке.
Приборы и методы измерений.
2024. Т. 15. № 2. С. 131–141. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-2-131-141

For citation:

Alekseev VA, Usoltseva AV, Usoltsev VP, Yuran SI.
Assessment of Surface Roughness of Non-Metallic Materials during
Laser Processing.
Devices and Methods of Measurements.
2024;15(2):131–141. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-2-131-141

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-2-131-141

Assessment of Surface Roughness of Non-Metallic Materials during Laser Processing

V.A. Alekseev¹, A.V. Usoltseva¹, V.P. Usoltsev¹, S.I. Yuran²

¹Kalashnikov Izhevsk State Technical University,
Studencheskaya str., 7, Izhevsk 426069, Russia

²Udmurt State Agrarian University,
Studencheskaya str., 11, Izhevsk 426069, Russia

Received 15.04.2024

Accepted for publication 10.06.2024

Abstract

Experimental studies of the surface of non-metallic materials have been carried out to determine the roughness parameters of materials such as leather, bone, wood, plastic after processing the surface of materials with a laser beam. To assess the quality of the surface layer of materials, the depth of penetration of laser radiation into the material, the average value of the micro unevenness, and the mean square deviation of the micro unevenness were used. To describe the changes in the values of the micro unevenness, graphs of the correlation of the parameters of the micro unevenness and the modulus of elasticity of the surface of various non-metallic materials were used. Approximating polynomials are used to describe the correlations with the representation in a computer. A regression model is proposed that relates the properties of the material to the magnitude of the micro unevenness. Data on the depth of ablation for wood, bone, leather, plexiglass are presented, graphs of the correlation between the amount of surface micro unevenness and the density of materials, between the amount of surface micro-roughness and the modulus of elasticity of materials, the correlation coefficient between the amount of surface micro unevenness and the ignition temperature of organic materials. The obtained models make it possible to implement the proposed principle of laser processing of non-metallic materials, which consists in measuring the modulus of elasticity of the surface of the material and, based on the measurements obtained, control the modes of laser processing of products. The installation of laser surface treatment of non-metallic materials with the implementation of the principle of control of processing modes depending on the measured values of the modulus of elasticity of the surface of the material is proposed. To measure the elastic modulus of a material, a special sensor is used with indentation of the indenter and computer evaluation of the measurements obtained with the formation of solutions for controlling the modes of laser surface treatment of the material. The experimental results obtained made it possible to manufacture a number of products to ensure a given surface quality of non-metallic materials (a writing device, a gift for the newlyweds). Conducting experiments with changes in the power of laser radiation based on the results of measuring the modulus of elasticity of the surface of non-metallic materials has shown the effectiveness of operational setting of laser operating modes to ensure the quality of the surface of non-metallic materials.

Keywords: surface quality, correlation, laser treatment, micro unevenness, modulus of elasticity

Адрес для переписки:

Юран С.И.
Удмуртский государственный аграрный университет,
ул. Студенческая, 11, г. Ижевск 426069, Россия,
e-mail: yuran-49@yandex.ru

Address for correspondence:

Yuran S.I.
Udmurt State Agrarian University,
Studencheskaya str., 11, Izhevsk 426069, Russia
e-mail: yuran-49@yandex.ru

Для цитирования:

В.А. Алексеев, А.В. Усольцева, В.П. Усольцев, С.И. Юран.
Оценка шероховатости поверхности неметаллических
материалов при лазерной обработке.
Приборы и методы измерений.
2024. Т. 15. № 2. С. 131–141. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-2-131-141

For citation:

Alekseev VA, Usoltseva AV, Usoltsev VP, Yuran SI.
Assessment of Surface Roughness of Non-Metallic Materials during
Laser Processing.
Devices and Methods of Measurements.
2024;15(2):131–141. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-2-131-141

Введение

Лазеры широко используются в различных областях техники, в том числе при изготовлении художественно-промышленных изделий. По сравнению с традиционными методами обработка материалов с помощью лазера обладает рядом неоспоримых преимуществ [1, 2]. Основной проблемой применения лазерной обработки в промышленности и декоративно-прикладном искусстве является отсутствие научно обоснованной информации о режимах обработки различных материалов. Часто при использовании одинаковых режимов для обработки различных материалов происходит снижение качества продукции, увеличение времени обработки и расхода энергии [3, 4].

Лазерная технология позволяет имитировать резьбу, наносить долговечные рельефные изображения, но до сих пор режимы обработки недостаточно отработаны, поэтому встречаются изделия, выполненные при неподходящем для данного материала режиме. Они имеют низкие эстетические показатели; причиной тому могут быть либо низкая мощность излучения, либо слишком высокая скорость обработки. В результате применения не соответствующих породе материала режимов обработки снижается качество обработанной поверхности, обработка лазером происходит не полностью, рисунок может оказаться нечётким, требуется повторение операции лазерного воздействия или, напротив, происходит сильный ожог, обугливание и даже возгорание кромок реза из-за высокой мощности излучения.

Экономическая эффективность лазерного резания повышается при выборе правильных режимов за счёт улучшения качества обрабатываемой поверхности и минимального расхода энергии. Немаловажное значение имеет время, затрачиваемое на лазерную обработку. Часто при задании режимов лазерной обработки возникают трудности, связанные с присутствием сопутствующих и мешающих воздействий, не предусмотренных в стандартных методиках.

В настоящее время в большинстве случаев конструкторы и технологи вынуждены совершенствовать дизайн, качество поверхности, разрабатывать технологию лазерной обработки на основании накопленного опыта [1, 5, 6]. Часто разработчикам не удаётся реализовать

замысел, предусмотренный проектом, в связи с недостаточной изученностью возможностей технологий и отсутствием рекомендаций для их применения [7, 8].

В связи с этим актуальной задачей является разработка методики по заданию режимов лазерной обработки материалов, позволяющих получить необходимое качество поверхности изделий из различных материалов, например, древесины, кожи, кости, органического стекла и др.

Рассматривая поверхность материала как границу между материалом и окружающей средой, состояние поверхности можно представить моделью поверхности, содержащей множество параметров (шероховатость, волнистость, пористость, фактура, рельеф, твёрдость и др.), связанных с природой материала и условиями образования поверхности, полученной после обработки [7–10]. Проведённые исследования показали возможность получения необходимой шероховатости поверхности неметаллических материалов за счёт предварительно заданных обоснованных режимов лазерной обработки [11–14].

Методика эксперимента

Исследование выполнили с использованием оборудования:

– лазерная установка Trotec Speedy 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 R_z и толщины плёнок 0,1–0,8 мкм, линейное поле зрения в пространстве предмета 0,3 мм;

– денситометр ДНС-2, диапазон измерения оптической плотности чёрно-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 ± 4 %.

Исследование проводили при изменении мощности лазерного излучения от 0,64 Вт до 9,6 Вт, при постоянной скорости перемещения лазерного излучения 0,27 м/с, разрешающей способности 500 dpi, частоте импульсов 1000 Гц,

диаметре сфокусированного лазерного луча 0,1 мм, вертикальном направлении лазерного луча на материал.

Для задания режимов лазерного излучения проведено воспроизведение ступенчатого клина с изменением мощности лазерного излучения. В каждой из 15 ступеней производились 10 точечных измерений. Изображения поверхности после лазерной обработки,

полученные на микроинтерферометре «МИИ-4» (режим микроскопа) в каждой из 15 ступеней полутонного клина, приведены на рисунке 1.

В общем случае параметры поверхности определяются режимами лазерной обработки и физико-механическими свойствами материала. Физико-механические свойства материалов приведены в таблице 1.

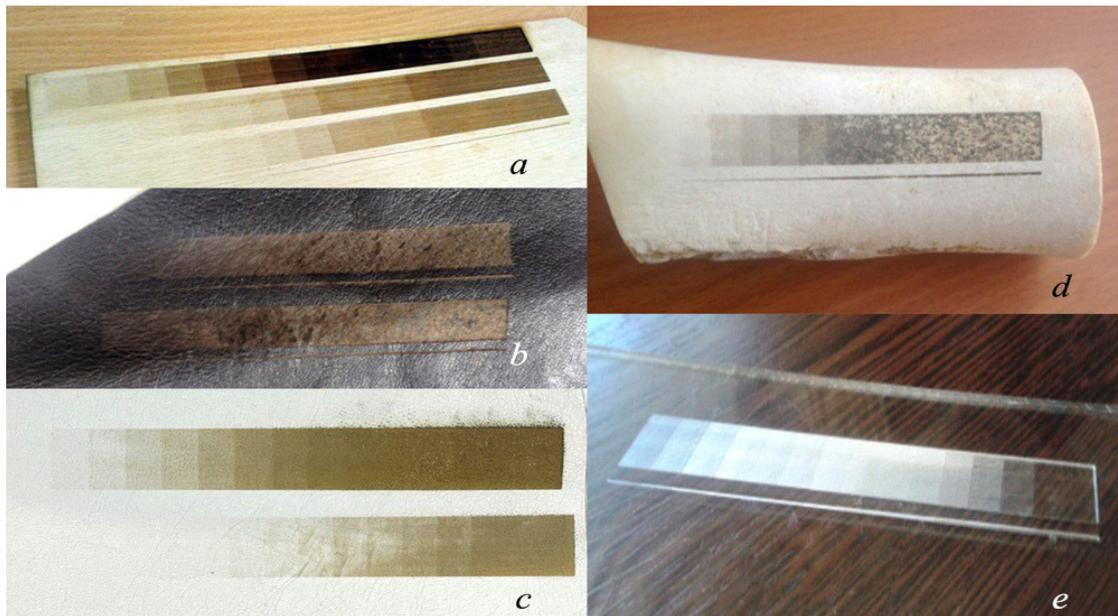


Рисунок 1 – Полученные образцы ступенчатого клина на древесине (a), тёмной (b) и светлой (c) коже, кости (d), оргстекле (e)

Figure 1 – The obtained samples of a stepped wedge on wood (a), dark (b) and light (c) skin, bone (d), plexiglass (e)

Таблица 1/ Table 1

Физико-механические свойства материалов

Physical and mechanical properties of materials

Наименование показателей Name of indicators	Оргстекло Plexiglass	Тёмная кожа Dark skin	Светлая кожа Light skin	Кость Bone	Древесина Wood
Плотность, кг/м ³ Density, kg/m ³	1190	800–850 250–1250	800–850 250–1250	2060–2470	380–1110
Твёрдость, МПа Hardness, MPa	70–120			33–247	40–80
Модуль упругости, ГПа Modulus of elasticity, GPa	2000–2900	2500–6500 (условный) conditional	2500–6500 (условный) conditional	13.5–31.3	12–16
Температура размягчения, °C Softening temperature, °C	90–105				
Температура обугливания, °C Charring temperature, °C					120–150
Температура воспламенения, °C Ignition temperature, °C	460–635	130	130	800	250–300

Физико-механические свойства материалов, приводимые в литературе, основаны на области их применения, а поскольку области применения у приведённых материалов разные, подбор параметров для сравнения представляет определённые трудности.

Среднюю глубину абляции и среднюю высоту неровностей профиля поверхности прозрачного бесцветного органического стекла, натуральной тёмной и светлой кожи, кости и

древесины при изменении мощности лазерного излучения можно представить непрерывными плавными возрастающими выпукло-вогнутыми поверхностями (рисунки 2 и 3). Средняя глубина абляции изменяется от 0,01 до 2,97 мм. Средняя высота неровностей профиля поверхности изменяется от 0,05 до 0,5 мм. Наличие изменений соизмеримого масштаба свидетельствует об общности характеристик материалов.

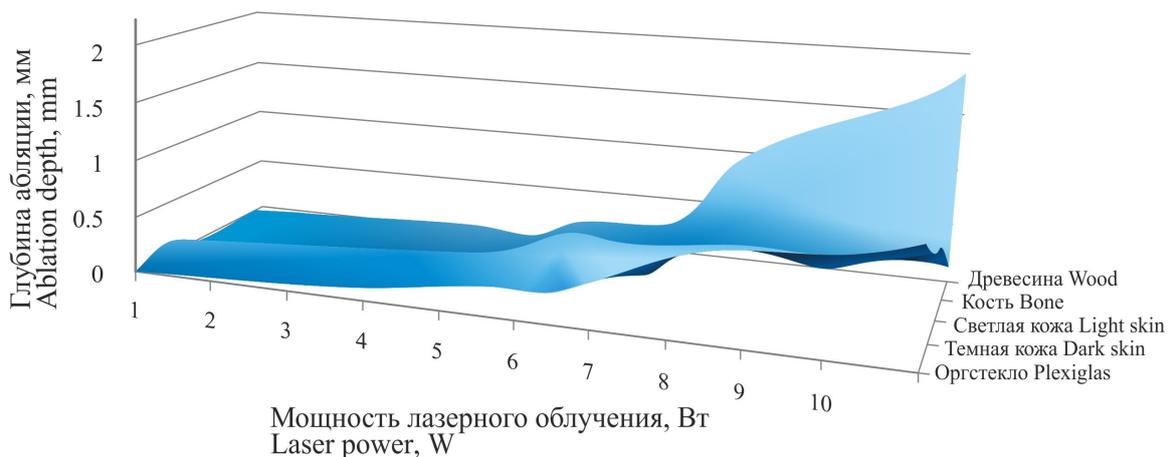


Рисунок 2 – Средняя глубина абляции для различных материалов в зависимости от мощности лазерного излучения: 1 – прозрачное бесцветное органическое стекло; 2 – натуральная тёмная и 3 – светлая кожа; 4 – кость; 5 – древесина

Figure 2 – Average ablation depth for various materials depending on the laser radiation power: 1 – transparent colorless organic glass; 2 – natural dark and 3 – light leather; 4 – bone; 5 – wood

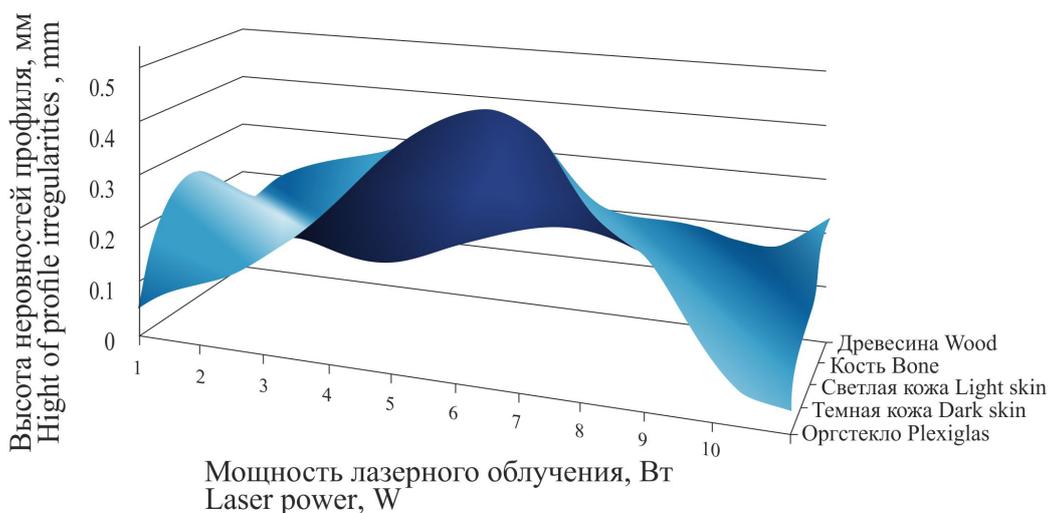


Рисунок 3 – Среднее арифметическое значение отклонения профиля для различных материалов

Figure 3 – The arithmetic mean of the profile deviation for various materials

Известно, что коэффициент корреляции вычисляется по следующей формуле:

$$r = \frac{\sum_{l=1}^n ((x_l - \bar{x})(y_m - \bar{y}))}{\sqrt{\sum_{l=1}^n (x_l - \bar{x})^2 \sum_{l=1}^n (y_m - \bar{y})^2}}, \quad (1)$$

где x_l , y_m – элементы массивов данных l и m ступеней клина соответственно; \bar{x} , \bar{y} – средние значения массивов данных l и m ступеней клина, соответственно; n – количество ступеней клина.

Для выявления степени влияния факторов рассчитаны коэффициенты корреляции между величиной микронеровностей и модулем упругости, плотностью, температурой воспламенения (рисунки 4–6). Коэффициенты корреляции рассчитаны на каждой из 15 ступеней ступенчатого клина, полученного со ступенчатым изменением мощности лазерного излучения от 0,64 до 9,6 Вт с шагом 0,64 Вт.

Микронеровности характеризуют шероховатость поверхности. Величина микронеровностей определялась по параметрам шероховатости, по ГОСТ 2789-73 «Шероховатость поверхности. Параметры, характеристики и обозначения». Величина микронеровностей рассчитывалась по R_z – высоте неровностей профиля, снятой в 10 точках, R_a – среднему арифметическому значению отклонения профиля.

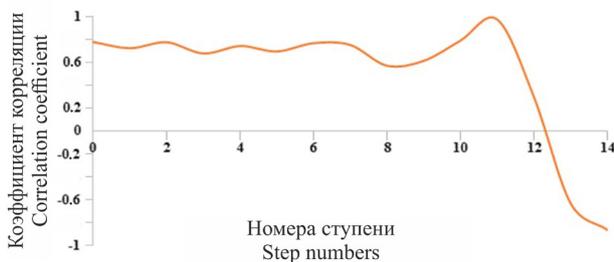


Рисунок 4 – Коэффициент корреляции между величиной микронеровностей поверхности и модулем упругости материала в каждой из 15 ступеней ступенчатого клина, полученного с изменением мощности лазерного излучения от 0,64 до 9,6 Вт

Figure 4 – The correlation coefficient between the magnitude of the surface micro-dimensions and the modulus of elasticity of the material in each of the 15 stages of the stepped wedge obtained with a change in laser radiation power from 0.64 to 9.6 W

Коэффициент корреляции между величиной микронеровностей на соседних ступенях на поверхности изделий из кожи, кости, дерева и оргстекла, имеющий случайный нелинейный волнообразный характер, и свидетельствует

о том, что корреляционная связь между величиной микронеровностей на соседних ступенях практически отсутствует. Коэффициент корреляции ниже порогового уровня изменяет знак, либо положительный, либо отрицательный, даже при незначительном увеличении мощности лазерного излучения, поэтому трудно предположить, какая величина микронеровностей будет получена.

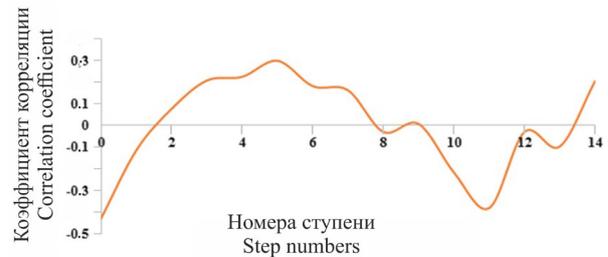


Рисунок 5 – Коэффициент корреляции между величиной микронеровностей поверхности и плотностью материала в каждой из 15 ступеней ступенчатого клина, полученного с изменением мощности лазерного излучения от 0,64 до 9,6 Вт

Figure 5 – Correlation coefficient between the size of the surface micro-dimensions and the density of the material in each of the 15 stages of the stepped wedge obtained with a change in laser radiation power from 0.64 to 9.6 W

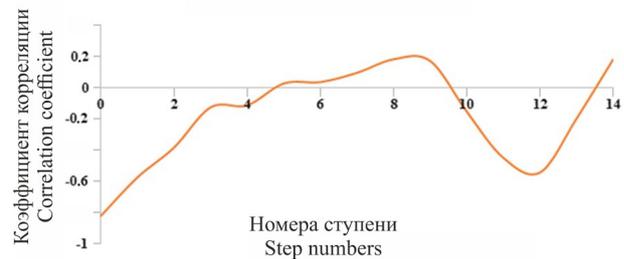


Рисунок 6 – Коэффициент корреляции между величиной микронеровностей поверхности и температурой воспламенения материала в каждой из 15 ступеней ступенчатого клина, полученного с изменением мощности лазерного излучения от 0,64 до 9,6 Вт

Figure 6 – Correlation coefficient between the size of the surface micro-dimensions and the ignition temperature of the material in each of the 15 stages of the step wedge obtained with a change in laser radiation power from 0.64 to 9.6 W

Для определения аналитических выражений полиномов аппроксимирующих функций применён метод интерполяции с использованием аппроксимации по методу наименьших квадратов с выполнением условия:

$$F = \sum_{i=1}^n (y_i - \beta(x_i))^2 \rightarrow \min, \quad (2)$$

где F – минимизируемая функция; y_i – эмпирические точки статистической зависимости; (β, x_i) – аналитическая функциональная зависимость.

С помощью специализированного программного средства MathCAD по выражению (2) получена аппроксимирующая функция коэффициента корреляции между величиной микронеровностей поверхности и модулем упругости материала: $R = -0,0034x^3 + 0,0538x^2 - 0,2195x + 0,8864$ (рисунок 4).

Аналогично получены аппроксимирующие функции коэффициента корреляции между величиной микронеровностей поверхности и плотностью материала: $R = 0,003x^3 - 0,0675x^2 + 0,4052x - 0,4569$ (рисунок 5).

Аналогично получены аппроксимирующие функции коэффициента корреляции между величиной микронеровностей поверхности и температурой воспламенения материала: $R = 0,0027x^3 - 0,0645x^2 + 0,4411x - 0,8921$ (рисунок 6).

Наибольшее влияние на величину микронеровностей из физико-механических свойств материалов оказывает упругость материала. Для учёта влияния величины отклонений указанных переменных рассчитаем коэффициенты парной, чистой (частной) и множественной (совокупной) линейной корреляции Пирсона. Согласно методу прямого счёта по несгруппированным данным, коэффициент парной корреляции Пирсона имеет вид:

$$r_{xy} = r_{yx} = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{[n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2] \times [n \sum_{i=1}^n y_i^2 - (\sum_{i=1}^n y_i)^2]}}. \quad (3)$$

Этот коэффициент также изменяется от -1 до $+1$. При наличии нескольких переменных рассчитывается коэффициент множественной (совокупной) линейной корреляции Пирсона. Для трёх переменных x, y, z он имеет вид:

$$R_{y/xz} = \sqrt{\frac{r_{yx}^2 + r_{yz}^2 - 2r_{yx} \times r_{yz} \times r_{xz}}{1 - r_{xz}^2}}. \quad (4)$$

Этот коэффициент изменяется от 0 до 1. Если элиминировать (совсем исключить или зафиксировать на постоянном уровне) влияние z на x и y , то их "общая" связь превратится в "чистую", образуя чистый (частный) коэффициент линейной корреляции Пирсона:

$$r_{xy.z} = r_{yx.z} = \frac{r_{xy} - r_{xz} \times r_{yz}}{\sqrt{(1 - r_{xz}^2) \times (1 - r_{yz}^2)}}. \quad (5)$$

Этот коэффициент изменяется от -1 до $+1$. Квадраты коэффициентов корреляции (7)–(8) называются коэффициентами (индексами) детерминации – соответственно парной, чистой (частной), множественной (совокупной):

$$d_{xy} = r_{xy}^2 = r_{yx}^2 = d_{yx}; \quad (6)$$

$$d_{xy.z} = r_{xy.z}^2 = r_{yx.z}^2 = d_{yx.z}; \quad (7)$$

$$D_{y/xz} = R_{y/xz}^2. \quad (8)$$

Каждый из коэффициентов детерминации изменяется от 0 до 1 и оценивает степень вариационной определённости в линейной взаимосвязи переменных, показывая долю вариации одной переменной (y), обусловленную вариацией x и z . Для расчёта, приняв x – плотность материала, y – величину микронеровностей, z – модуль упругости, проведя расчёты по выражениям (3)–(8), получим:

$$r_{xy} = 0,0192, r_{xz} = -0,8437, r_{yz} = 0,3999, R_{y/xz} = 0,4541, r_{xy.z} = 0,7246, d_{xy} = 0,000369, d_{xy.z} = 0,5250, D_{y/xz} = 0,2062.$$

Взаимосвязь переменных x и y является положительной, но не тесной, составляя по их парному коэффициенту корреляции величину $r_{xy} = 0,0192$ и по чистому – величину $r_{xy.z} = 0,7246$. Она оценивалась по шкале Чеддока и получилась соответственно, как "слабая" и "высокая". Коэффициенты детерминации $d_{xy} = 0,000369$ и $d_{xy.z} = 0,5250$ свидетельствуют о том, что вариация y (величина микронеровностей) обусловлена линейной вариацией x (плотности материала) только на 0,0369 % в их общей взаимосвязи и в чистой взаимосвязи – на 52,5 %. Такое положение обусловлено значительным влиянием на x и y третьей переменной z – модуля упругости. Теснота этой взаимосвязи составляет соответственно $r_{xz} = -0,8437$ и $r_{yz} = 0,3999$.

Коэффициент множественной (совокупной) корреляции трёх переменных показывает, что теснота линейной взаимосвязи x и z с y составляет величину $R_{y/xz} = 0,4541$, и оценивалась по шкале Чеддока как "умеренная". Коэффициент множественной детерминации составляет величину $D_{y/xz} = 0,2062$ и свидетельствует о том, что 20,62 % всей вариации y (величина микронеровностей) обусловлена совокупным воздействием на неё переменных x и z .

Остальные 79,38 % обусловлены воздействием на y других факторов или же криволинейной связью переменных y, x, z .

Используя приведенные в [11, 12] выражения для связи между качеством поверхности и режимами лазерной обработки, в общем случае, представим линейную двухфакторную регрессионную модель:

$$y = a_1 + a_2x + a_3z. \quad (9)$$

Коэффициенты модели a_1, a_2, a_3 определены методом наименьших квадратов по формулам из корреляционно-регрессионного анализа.

В результате математической обработки данных эксперимента получена регрессионная модель, связывающая величины микронеровностей и физико-механические свойства материала, при этом выражение (9) преобразуется к частному виду:

$$y = -0,3287 - 0,00051x - 0,000039z, \quad (10)$$

где x – плотность материала; y – величина микронеровностей; z – модуль упругости.

Выражение (10) используется для получения заданной величины микронеровностей с учётом влияния плотности материала и модуля упругости.

Коэффициент корреляции между глубиной абляции и плотностью приведён на рисунке 7.

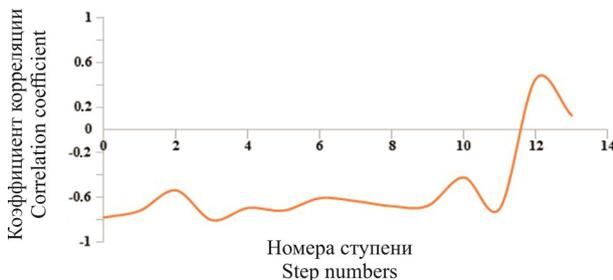


Рисунок 7 – Коэффициент корреляции между глубиной абляции и плотностью материала в каждой из 15 ступеней ступенчатого клина, полученного с изменением мощности лазерного излучения от 0,64 до 9,6 Вт

Figure 7 – Correlation coefficient between the depth of ablation and the density of the material in each of the 15 stages of the stepped wedge obtained with a change in laser radiation power from 0.64 to 9.6 W

Аналогично (рисунок 7) получены аппроксимирующие функции связи величины микронеровностей с плотностью $R = 0,0007x^3 - 0,0092x^2 + 0,0619x - 0,6494$.

Наибольшее влияние на величину микронеровностей из физико-механических свойств материалов оказывает упругость материала, а на глубину абляции материала – его плотность. Снижение коэффициента корреляции при повышенной мощности излучения лазера вызвано нелинейностью процессов пиролиза и высоким уровнем обугливания обрабатываемых материалов.

Таким образом, полученные аппроксимирующие полиномы для различных видов графиков, отражающих влияние различных мешающих факторов на микронеровности, могут быть использованы для описания микронеровностей различных неметаллических материалов.

В настоящей работе авторы исходили из предположения, что лазерная обработка сопровождается изменением шероховатости поверхности, и, как следствие, изменением высоты неровностей профиля, среднего арифметического значения отклонения профиля, дисперсии, оптической плотности, блеска, что влияет на оценку потребителей и определяет потребительские свойства, декоративные характеристики и индивидуальные особенности художественно-промышленных изделий.

В результате проведённого анализа можно сделать вывод, что, изменяя мощность лазерной обработки, варьируя в низком, среднем, или высоком диапазоне, а также изменяя количество проходов лазерным лучом, можно получить наиболее качественное и чёткое изображение, отвечающее требованиям потребителей и соответствующим стандартам.

Аналогичную методику можно использовать при задании скорости лазерного гравирования, разрешающей способности, частоты импульсов, диаметра сфокусированного лазерного луча на материале, угла падения лазерного луча и др.

Для управления качеством поверхности при лазерной обработке художественно-промышленных изделий путём изменения режимов лазерной обработки на основе измерения основных влияющих факторов физико-механических характеристик материалов в условиях действия помех и неоднозначности существующих моделей динамики механических воздействий, проведено исследование показателей точности, повторяемости, воспроизводимости результатов экспериментального исследования качества поверхности при лазер-

ной обработке изделий художественных промыслов из кожи, кости, дерева и оргстекла.

Как было указано выше, наибольшее влияние на величину микронеровностей, определяющих качество поверхности обработанного материала, оказывает упругость материала. Для снижения влияния изменения модуля упругости материала на качество поверхности в процессе лазерной обработки разработана функциональная схема установки для лазерной обработки поверхности неметаллических материалов (рисунок 8) [15].

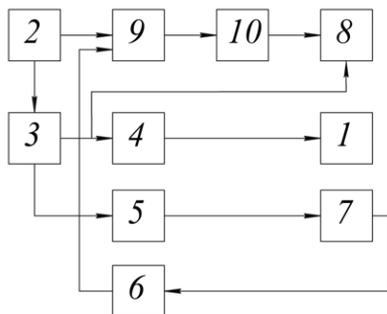


Рисунок 8 – Функциональная схема лазерной установки: 1 – рабочий стол; 2 – устройство ввода программ; 3 – устройство обработки программ; 4 – устройство управления рабочим столом; 5 – устройство управления датчиком; 6 – устройство обратной связи; 7 – датчик измерения модуля упругости твёрдых материалов; 8 – оптическая лазерная головка; 9 – устройство задания режимов лазерной обработки; 10 – лазер

Figure 8 – Functional diagram of the laser installation: 1 – desktop; 2 – program input device; 3 – program processing device; 4 – desktop control device; 5 – sensor control device; 6 – feedback device; 7 – sensor for measuring the modulus of elasticity of solid materials; 8 – optical laser head; 9 – device for setting laser processing modes; 10 – laser

Основной принцип работы установки заключается в непрерывном измерении модуля упругости поверхности материала и через обратную связь происходит регулировка режимов лазерной обработки материала.

Установка содержит рабочий стол 1, на который устанавливается объект лазерной обработки, устройство ввода программ 2, в которое вводится управляющая программа лазерной обработки (вид лазерной обработки, резка или гравирование, координаты обработки), устройство обработки программ 3, устройство управления рабочим столом 4, устройство управления датчиком 5, устройство обратной связи 6, датчик измерения модуля упругости

твёрдых материалов 7, установленный перед лазером (оптической лазерной головкой 8), устройство задания режимов лазерной обработки 9 и лазер 10.

По команде с устройства ввода программ 2 координаты обработки поступают в устройство обработки программ 3, обрабатываются и поступают в устройство управления рабочим столом 4 или оптической лазерной головкой 8, по команде с которого рабочий стол 1 перемещает объект лазерной обработки в рабочую зону лазерного излучения и расположения датчика измерения модуля упругости материалов 7. По команде с устройства обработки программ 3 устройство управления 5 датчиком активизирует датчик измерения модуля упругости материалов 7. Значения модуля упругости обрабатываемого материала через устройство обратной связи 6 подаются в устройство задания режимов лазерной обработки 9. Устройство задания режимов лазерной обработки 9 по командам, поступившим с устройства ввода программ 2 и устройства обратной связи 6, задаёт вид лазерной обработки, координаты обработки, мощность лазерного излучения, скорость перемещения лазерного луча и др., которые поступают в лазер 10.

В качестве датчика 7 измерения модуля упругости твёрдых материалов использовано устройство на основе патента РФ [16], реализующее способ определения модуля упругости Юнга материала микро- и наночастиц путём совместного использования экспериментального вдавливания индентора и компьютерного моделирования вдавливания индентора методом конечных элементов.

Технологические режимы лазерной резки и лазерного гравирования органического стекла, дерева, кости, кожи, металла, выбранные в результате эксперимента, использованы при изготовлении настольного письменного прибора (патент РФ на промышленный образец 109645) и подарка молодоженам (лазерное гравирование хрустала, кости, кожи, металла).

Заключение

Проведение натуральных экспериментов с изменением мощности лазерного излучения и использованием универсальной измерительной аппаратуры позволяет имитировать любой из распространённых технологических режимов

лазерной обработки, выделить и учесть влияние факторов, оказывающих наибольшее влияние на качество поверхности, объективно обосновать выбор идентификационных признаков восприятия качества лазерной обработки и параметров задания режимов работы лазера, обеспечить повышение воспроизводимости полученных результатов.

Экспериментальное исследование глубины абляции для различных неметаллических материалов показало зависимость шероховатости поверхности при лазерной обработке от мощности лазерного излучения. При этом шероховатость различных натуральных материалов (кожа, кость, дерево) меняется от образца к образцу изделия.

Для оценки различных поверхностей образцов изделий рассчитаны коэффициенты корреляции между величинами микронеровностей и модулем упругости поверхности материала. Для полученных зависимостей корреляции параметров использованы аппроксимирующие функции (полиномы) для представления полученных зависимостей в компьютерной модели.

Алгоритмическое описание микронеровностей поверхности различных неметаллических материалов с корреляционными зависимостями позволяет обеспечить оперативную регулировку режимов лазерной обработки для управления степенью шероховатости поверхности различных материалов.

Предложена лазерная установка обработки поверхности неметаллических материалов с управлением режимами обработки по результатам измерения модуля упругости поверхности обрабатываемого материала. Для реализации предложенного принципа в установке расположен специальный датчик измерения модуля упругости поверхности материала, содержащий индентор с вдавливанием в материал.

Таким образом, теория и практика лазерной обработки с рекомендациями по заданию режимов обработки материалов подтверждает огромные возможности лазерных технологических процессов, которые позволяют эффективно решать крупные производственные и художественные задачи. При этом применение лазерной техники выводит производство на новый высокоинтеллектуальный уровень.

Проведённые исследования позволяют повысить эффективность применения лазерных технологий при создании художественно-промышленных изделий.

Список использованных источников

1. *Obilor A.F.* Micro texturing of polymer surfaces using lasers: a review / A.F. Obilor [et al.] // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2022. – Vol. 120. – Pp. 103–135.

DOI: 10.1007/s00170-022-08731-1

2. *Liu X.* Laser Ablation and Micromachining with Ultrashort Laser Pulses / X. Liu, D. Du, G. Mourou // *IEEE J. of Quantum Electronics*. – 1997. – Vol. 33. – № 10. – Pp. 1706–1716. **DOI:**10.1109/3.631270

3. *Приборостроение – XX век / сост. М.С. Шкабардя.* – М.: Совершенно секретно, 2004. – 768 с.

4. *Соколова М.Л.* Материалы в дизайне / М.Л. Соколова. – М.: Издательство МИСИС, 2003. – 168 с.

5. *Богомолов В.Г.* Исследование влияния лазерной обработки на нивелирование пороков кожевенного сырья / В.Г. Богомолов [и др.] // *Кожевенно-обувная промышленность*. – 2013. – № 2. – С. 34–37.

6. *Pfleging W.* Laser Micro and Nano Processing of Metals, Ceramics and Polymers / W. Pfleging, R. Kohler, I. Südmeyer, M. Rohde. – *Laser-Assisted Fabrication of Materials*, Springer, 2013. – Pp. 319–374.

DOI: 10.1007/978-3-642-28359-8_8

7. *Губанова Л.А.* Фотоника поверхности и её основные свойства / Л.А. Губанова. – СПб: Университет ИТМО, 2022. – 68 с.

8. *Гибадуллин И.Н.* Изображение профиля поверхности как графический критерий оценки шероховатости / И.Н. Гибадуллин, В.А. Валетов // *Изв. вузов. Приборостроение*. – 2019. – Т. 91. – № 1. – С. 86–92. **DOI:** 10.17586/0021-3454-2019-62-1-86-92

9. *Mulko L.* Structuring and functionalization of non-metallic materials using direct laser interference patterning: a review / L. Mulko, M. Soldera, A.F. Fabián Lasagni // *Nano-photonics*. – 2022. – № 11(2). – Pp. 203–240.

DOI: 10.1515/nanoph-2021-0591

10. *Chang Chih-Wei.* Evaluation of surface roughness in laser-assisted machining of aluminum oxide ceramics with Taguchi method / Chih-Wei Chang, Chun-Pao Kuo // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2007. – Vol. 47. – Iss. 1. – Pp. 141–147.

DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2006.02.009

11. *Григорьянц А.Г.* Технические процессы лазерной обработки / А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, А.И. Мисюров. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 664 с.

12. Вейко В.П. Технологические лазеры и лазерное излучение / В.П. Вейко. – СПб: Университет ИТМО, 2007. – 52 с.

13. Шахно Е.А. Математические методы описания лазерных технологий / Е.А. Шахно. – СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2019. – 77 с.

14. Харанжевский Е.В. Физика лазеров, лазерные технологии и методы математического моделирования лазерного воздействия на вещество / Е.В. Харанжевский, М.Д. Кривилев. – Ижевск: Издательство Удмуртский университет, 2011. – 187 с.

15. Патент № 2801913 РФ. МПК В23К 26/40. Способ лазерной обработки поверхности материалов / В.А. Алексеев, В.П. Усольцев, А.В. Усольцева, С.И. Юран // Заявитель Удмуртский ГАУ. Заявка № 2022113027 от 13.05.2022. Опубл. 18.08.2023. Бюл. № 23.

16. Патент 2494038 РФ. МПК В82У 35/00, G01N 3/40. Способ определения модуля упругости Юнга материала микро- и наночастиц / А.В. Вахрушев, А.А. Шушков, С.Н. Зыков // Заявитель Институт механики УрО РАН. Заявка: № 2012110560 от 20.03.2012. Опубл.: 27.09.2013. Бюл. № 27.

References

1. Obilor AF, Pacella M, Wilson A, Silberschmidt VV. Micro texturing of polymer surfaces using lasers: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022;120:103–135.

DOI: 10.1007/s00170-022-08731-1

2. Liu X, Du D, Mourou G. Laser Ablation and Micromachining with Ultrashort Laser Pulses. *IEEE J. of Quantum Electronics*. 1997;33(10):1706–1716.

DOI: 10.1109/3.631270

3. Shkabardnya MS. Instrument engineering – the twentieth century. Moscow: Top Secret Publ. 2004, 768 p.

4. Sokolova ML. Materials in the design. Moscow: MISIS Publ. 2003;168 p.

5. Bogomolov VG, Nekrasova NI, Bykovskaya NN, Danilin DV, Shiganov IN, Bogdanov AV. Investigation of the effect of laser processing on leveling the pores of leath-

er raw materials. *Leather and shoe industry*. 2013;(2):34–37. (In Russ.).

6. Pflöging W, Kohler R, Südmeyer I, Rohde M. Laser Micro and Nano Processing of Metals, Ceramics and Polymers. *Laser-Assisted Fabrication of Materials*. Springer Publ. 2013;319–374.

DOI: 10.1007/978-3-642-28359-8_8

7. Gubanova LA. Photonics of the surface and its basic properties. St. Petersburg: ITMO University Publ. 2022;68 p.

8. Gibadullin IN, Valetov VA. Surface profile image as a graphical criterion for roughness assessment. *Izvestiya Vuzov. Instrumentation*. 2019;91(1):86–92. (In Russ.).

DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-1-86-92

9. Mulko L, Soldera M, Fabián Lasagni AF. Structuring and functionalization of non-metallic materials using direct laser interference patterning: a review. *Nanophotonics*. 2022;11(2):203–240.

DOI: 10.1515/nanoph-2021-0591

10. Chang Chih-Wei, Kuo Chun-Pao. Evaluation of surface roughness in laser-assisted machining of aluminum oxide ceramics with Taguchi method. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2007;47(1):141–147. **DOI:** 10.1016/j.ijmachtools.2006.02.009

11. Grigoryants AG, Shiganov IN, Misyurov AI. Technical processes of laser processing. Moscow: Bauman Moscow State Technical University Publ. 2006;664 p.

12. Veiko V.P. Technological lasers and laser radiation. St. Petersburg: ITMO University Publ. 2007;52 p.

13. Shakhno EA. Mathematical methods for describing laser technologies. St. Petersburg: SPbGITMO Publ. 2019;77 p.

14. Kharanzhevsky EV, Krivilev MD. Laser physics, laser technologies and methods of mathematical modeling of laser action on matter. Izhevsk: Udmurt University Publ. 2011;187 p.

15. Alekseev VA, Usoltsev VP, Usoltseva AV, Yuran SI. Method of laser surface treatment of materials. Patent RF, no. 2801913, 2023. (in Russian)

16. Vakhrushev AV, Shushkov AA, Zykov SN. Method for determining the Young's modulus of elasticity of a material of micro- and nanoparticles. Patent RF no. 2494038, 2013. (in Russian)