

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-353-32>

УДК 621.865

ГАРБАР ЄВГЕНІЙ

<https://orcid.org/0000-0001-6952-4855>

e-mail: garbarzhenia@gmail.com

ПОЛІЩУК ОЛЕГ

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-9764-8561>

e-mail: opolishchuk71@gmail.com

ПОЛІЩУК АНДРІЙ

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0001-7887-7169>

e-mail: andrepol215@gmail.com

ДУКА ОЛЕКСАНДР

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0009-0001-8231-856X>

e-mail: s4n1220@gmail.com

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЛАЗЕРНОГО РІЗАННЯ МАТЕРІАЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ РОБОТА-МАНІПУЛЯТОРА

У статті представлено результати експериментального дослідження впливу швидкості переміщення лазерної головки на глибину різки для різних матеріалів. Актуальність дослідження обумовлена необхідністю оптимізації параметрів лазерної обробки для забезпечення високої якості кінцевої продукції та підвищення ефективності виробничих процесів. Дослідження проводилося із застосуванням роботизованої установки, що включає 6-осьовий маніпулятор з інтегрованою лазерною головкою. Така конфігурація дозволила забезпечити стабільні умови обробки та виключити вплив людського фактора на результат. Експериментальна частина охоплювала роботу з трьома типами матеріалів: фетром, фанерою та спіненим етиленвінілацетатом. Для кожного матеріалу було проведено серію різів із різною швидкістю переміщення лазерного інструмента. Отримані результати підтвердили правильність математичної моделі, яка описує залежність глибини різки від швидкості обробки та фізичних властивостей матеріалу. Було встановлено, що зі зменшенням швидкості руху лазера глибина різки зростає, а також виявлено відмінності в характері взаємодії лазерного променя з кожним із досліджуваних матеріалів, зумовлені їхньою щільністю, теплопровідністю та структурою. Практична значимість дослідження полягає в доведенні доцільності застосування роботизованих лазерних систем для серійного виробництва: автоматизація процесу забезпечує безперервну роботу без втручання оператора, стабільність умов обробки та можливість швидкої переналаштування параметрів в залежності від конкретних властивостей матеріалу. Отримані емпіричні моделі глибини різки можуть бути використані як основа для розробки програмного забезпечення систем автоматичного керування лазерними установками, що сприятиме подальшій оптимізації технологічних операцій, зниженню відходів матеріалів та підвищенню продуктивності виробництва.

Ключові слова: RoboDK, лазерне гравіювання, роботизована система, моделювання, симуляція, робот-маніпулятор, роботизована рука.

HARBAR YEVEN, POLISHCHUK OLEH, POLISHCHUK ANDRII, DUKA OLEKSANDR
Khmelnyskiy National University

EXPERIMENTAL STUDY OF THE PROCESS OF LASER CUTTING OF MATERIALS USING A MANIPULATOR

The article presents the results of an experimental study of the effect of the laser head movement speed on the depth of cut for different materials. The relevance of the study is due to the need to optimize the parameters of laser processing to ensure high quality of the final product and increase the efficiency of production processes. The study was conducted using a robotic system that includes a 6-axis manipulator with an integrated laser head. This configuration ensured stable processing conditions and eliminated the influence of the human factor on the result. The experimental part included work with three types of materials: felt, plywood, and foamed ethylene vinyl acetate. For each material, a series of cuts were made at different laser tool traverse speeds. The results confirmed the correctness of the mathematical model describing the dependence of the depth of cut on the processing speed and physical properties of the material. It was found that the depth of cut increases with decreasing laser travel speed, and differences in the nature of the interaction of the laser beam with each of the materials under study due to their density, thermal conductivity, and structure were revealed. The practical significance of the study lies in proving the feasibility of using robotic laser systems for mass production: process automation ensures continuous operation without operator intervention, stability of processing conditions, and the ability to quickly reconfigure parameters depending on specific material properties. The obtained empirical models of the depth of cut can be used as a basis for the development of software for automatic control systems for laser installations, which will further optimize technological operations, reduce material waste and increase production productivity.

Keywords: RoboDK, laser engraving, robotic system, modeling, simulation, robot manipulator, robotic arm.

Стаття надійшла до редакції / Received 14.04.2025

Прийнята до друку / Accepted 30.04.2025

Вступ

Моделювання та розрахунок процесів лазерного гравіювання й різання є актуальним напрямом досліджень, оскільки вони відіграють ключову роль в оптимізації виробничих процесів у легкій промисловості та суміжних галузях. Застосування чисельного моделювання дозволяє попередньо аналізувати й налаштовувати параметри лазерної обробки без необхідності проведення численних експериментів, що суттєво скорочує витрати часу й ресурсів на етапі підготовки виробництва. [1]

Основними параметрами, що враховуються при моделюванні, є потужність лазерного випромінювання, швидкість переміщення фокусної точки, а також фізико-механічні властивості оброблюваного матеріалу. Оптимізація цих параметрів забезпечує підвищення якості кінцевого продукту, зменшення відходів та часу налаштування обладнання, що у підсумку сприяє підвищенню продуктивності та зниженню енергоспоживання. Завдяки можливості точного аналізу теплових і механічних процесів, що відбуваються у зоні лазерного впливу, моделювання дозволяє передбачити можливі дефекти та вчасно їх усунути ще на етапі проектування.

Окрему актуальність має моделювання автоматизованої установки з шестикоординатним роботом-маніпулятором, на якому закріплено лазерну головку. Така конфігурація дозволяє реалізувати високоточне гравіювання та різання у тривимірному просторі, що є особливо важливим при обробці поверхонь складної геометрії. Аналітичне дослідження та симуляція роботи системи дозволяють налаштувати параметри переміщення маніпулятора, положення лазерного променя та режими випромінювання, забезпечуючи точність, стабільність і продуктивність процесу.

Автоматизація процесів лазерної обробки за допомогою роботизованих систем дозволяє значно підвищити ефективність виробництва за рахунок безперервної роботи, мінімізації впливу людського фактора та скорочення тривалості технологічних операцій. Це особливо важливо у серійному та масовому виробництві, де критичними є швидкість, повторюваність і стабільна якість. [5]

Крім того, застосування роботів-маніпуляторів сприяє підвищенню рівня безпеки на виробництві. Вони дозволяють уникнути прямого контакту оператора з джерелами лазерного випромінювання та шкідливими парами, які утворюються під час обробки деяких матеріалів. Інтеграція систем моделювання та керування забезпечує прогнозованість результатів, зменшуючи ймовірність браку.

Таким чином, використання роботизованих комплексів із лазерними модулями не лише покращує техніко-економічні показники виробництва, а й створює умови для впровадження інноваційних підходів до обробки нових матеріалів, складних форм та високоточної персоналізованої продукції. [2]

Об'єкт та методи дослідження

Об'єктом дослідження є процеси лазерного гравіювання та різання в тривимірному просторі, що реалізуються за допомогою робота-маніпулятора, оснащеного лазерною головкою, під час обробки різних матеріалів.

Для досягнення поставленої мети застосовано метод системного аналізу, що дозволяє комплексно оцінити взаємозв'язок між параметрами обробки, властивостями матеріалу та технічними характеристиками обладнання.

Експериментальні дослідження ґрунтуються на принципах наукового методу й передбачають теоретичний аналіз, вивчення фізико-механічних властивостей матеріалів, а також дослідження робочих характеристик лазерного комплексу. Це сприяє оптимізації параметрів технологічного процесу та підвищенню ефективності лазерного гравіювання й різання.

Постановка завдання

Метою дослідження є теоретичне та експериментальне обґрунтування впливу швидкості обробки та фізико-механічних властивостей матеріалу на глибину лазерного різання із застосуванням роботизованої системи.

Для реалізації поставленої мети розроблено та створено експериментальну установку на базі робота-маніпулятора зі встановленою на ньому лазерною головкою. Проведено комп'ютерне моделювання процесу лазерної обробки у відповідному програмному середовищі, а також експериментальні дослідження, спрямовані на підвищення точності, стабільності та ефективності виконання технологічних операцій.

Результати та їх обговорення

Для розуміння закономірностей взаємодії лазерного випромінювання з об'єктом обробки доцільно розглянути енергетичну модель, яка описує просторово-енергетичний розподіл потужності лазерного пучка під час його контакту з матеріалом. Така модель дозволяє визначити величину та розподіл щільності енергії у зоні впливу, що є ключовим для прогнозування результатів обробки - зокрема глибини прорізу, ширини теплової зони впливу та швидкості плавлення або випаровування матеріалу.

На рис. 1 представлено схематичне зображення процесу проникнення сфокусованого лазерного променя в поверхню матеріалу. У результаті інтенсивного поглинання енергії випромінювання у зоні фокусування утворюється локалізована область високої температури, яка призводить до розплавлення та/або випаровування речовини. При цьому в центральній частині прорізу формується канал з плазмовим факелом, що супроводжується викидом продуктів термічного розкладу матеріалу.

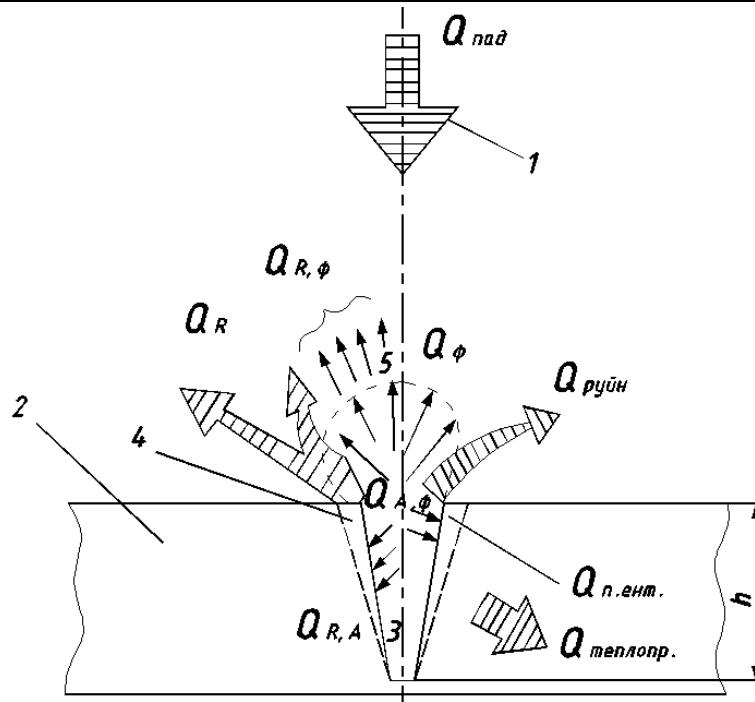


Рис.1 Схема взаємодії пучка променів лазера із матеріалом:
 1 – сфокусований промінь лазера; 2 – об’єкт оброблення; 3 – проріз (канал);
 4 – обвуглена поверхня тіла; 5 – плазмовий факел

Зазначені фактори входять до рівнянь теплопровідності, що використовуються для побудови математичної моделі теплового поля під час лазерної обробки. Це дозволяє визначити геометричні параметри зони впливу, зокрема глибину прорізу, кут розкриття каналу, наявність підпаленої або оксидованої зони по краях.

Таким чином, енергетична модель виступає основою для розрахунку ефективності процесу різання та дозволяє оптимізувати параметри лазера і траєкторію руху робота-маніпулятора з урахуванням фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу [3].

Потужність лазерного випромінювання визначається за формулою:

$$P = \frac{h\pi r r_f \rho V_p (cT_v + L_e)}{2} \tag{1}$$

- де h - потужність випромінювання, м;
 r_f - радіус фокусування, мм;
 V_p - швидкість різання, мм/с;
 ρ - густина речовини, кг/м³;
 c - теплоємність, Дж/К;
 T_v - температура випаровування матеріалу, °С;
 L_e - питома енергія випаровування, кДж/кг.

Визначимо із формули глибину різання матеріалу:

$$h = \frac{2P}{\pi r r_f \rho V_p (cT_v + L_e)} \tag{2}$$

Запропонована формула є математичною моделлю, що відображає взаємозв'язок між параметрами роботи пристрою для лазерного різання та фізико-механічними властивостями оброблюваного матеріалу. Вхідними величинами для розрахунків виступають потужність лазерного випромінювання, яка визначається за паспортними даними лазерного модуля, та теплофізичні характеристики матеріалу (коефіцієнт теплопровідності, теплоємність, температура плавлення тощо), що можуть бути отримані з довідкових джерел.

Для перевірки достовірності моделі були виконані розрахунки глибини прорізу при різних швидкостях переміщення лазерної головки та для різних матеріалів. Результати теоретичного аналізу надалі було зіставлено з експериментальними даними, що дозволило оцінити точність математичної моделі та межі її застосування.

З метою експериментального дослідження впливу швидкості переміщення лазерної головки на глибину різання було використано спеціалізовану роботизовану установку, побудовану на базі шестиосового робота-маніпулятора, оснащеного лазерним модулем NEJE N40630 з номінальною потужністю 5 Вт [4]. Вибір цього обладнання зумовлений високою точністю позиціонування, наявністю інтерфейсу для програмного керування та можливістю інтеграції з програмним середовищем RoboDK, що забезпечило надійне моделювання, візуалізацію та управління траєкторією руху лазерної

головки.

Застосування такої платформи дозволило створити стабільні та контрольовані умови для проведення серії різів з фіксованими параметрами, що є критично важливим для верифікації аналітичної моделі та визначення оптимальних режимів лазерної обробки.

На рис.2 наведено процес різання матеріалу з використанням робота-маніпулятора з встановленою лазерною головою.

Експериментальні дослідження було проведено для трьох різнорідних матеріалів: спіненого етиленвінілацетату (EVA), фетру та фанери, що застосовуються в галузевому машинобудуванні та легкій промисловості. Для кожного матеріалу було виконано серію різів із різними швидкостями переміщення лазерної головки: 0.005 м/с (1% від максимальної швидкості), 0.015 м/с (3%), 0.025 м/с (5%), 0.05 м/с (10%), 0.1 м/с (20%), 0.15 м/с (30%), 0.25 м/с (50%) та 0.5 м/с (100%).

Потужність лазерного випромінювання у всіх дослідах залишалася сталою на рівні 5 Вт, що дозволило дослідити вплив виключно швидкості обробки на глибину прорізу.

Кожен експеримент повторювався тричі з метою усереднення результатів і підвищення достовірності отриманих даних. Після кожної серії вимірювалися середні значення глибини різів, які використовувались для побудови аналітичних залежностей.

Усі операції з налаштування траєкторії переміщення, контролю швидкості та активації лазера здійснювались за допомогою програмного забезпечення RoboDK, що дозволяло забезпечити високу точність позиціонування та синхронізацію роботи лазерної головки з рухом маніпулятора.

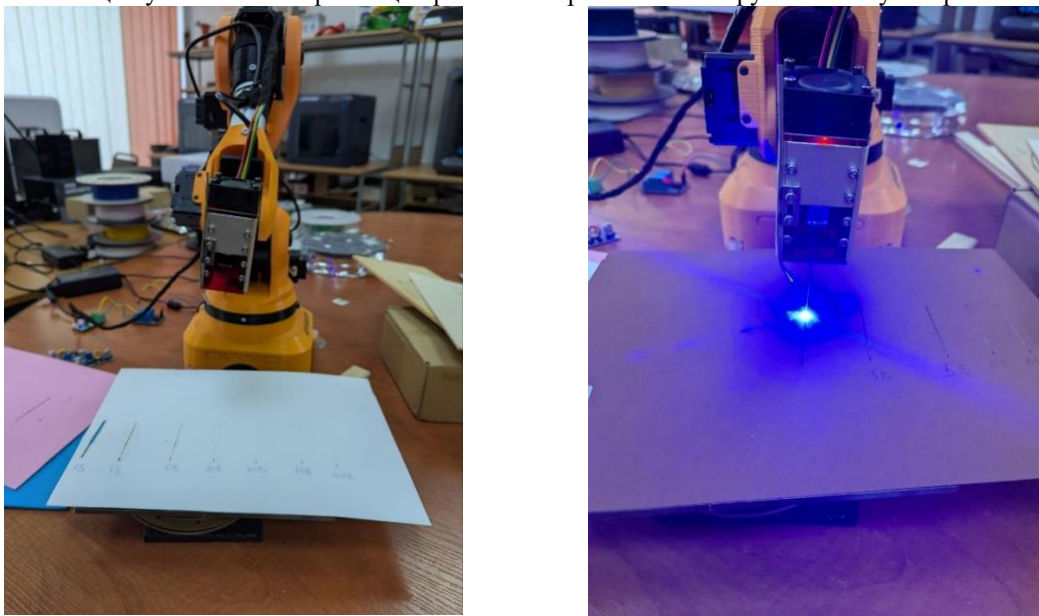


Рис.2. Процес різання матеріалу з використанням робота-маніпулятора з встановленою лазерною головою

Результати дослідження подано у вигляді графіків, що демонструють залежність глибини різів від швидкості переміщення лазерної головки для кожного з досліджуваних матеріалів (рис.3). Такі залежності є основою для перевірки адекватності математичної моделі та подальшої оптимізації режимів лазерної обробки в умовах автоматизованих систем.

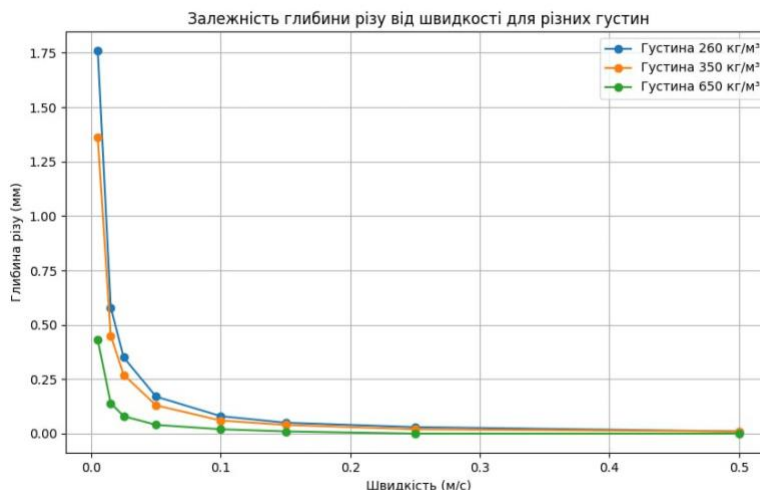


Рис.3. Залежність глибини різання від швидкості переміщення лазерної головки для матеріалів, що мають різну густину: спінений етиленвінілацетат (260 кг/м³); фетр (350 кг/м³) та фанера (650 кг/м³)

На рис.4 показано графік залежності глибини різання від густини матеріалів при різних швидкостях.

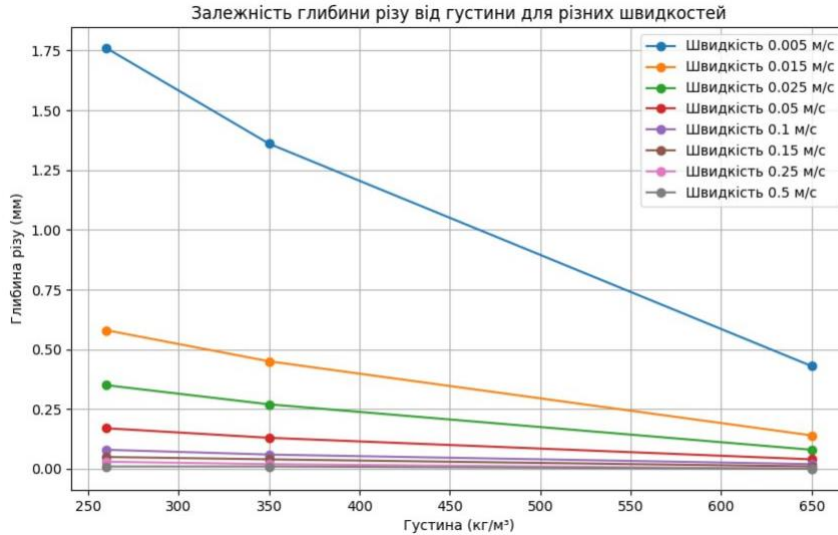


Рис.4. Графік залежності глибини різання від густини матеріалів при різних швидкостях переміщення лазерної головки

На рис.5 наведено графік залежності глибини різання від швидкості переміщення лазерної головки та густини матеріалу.

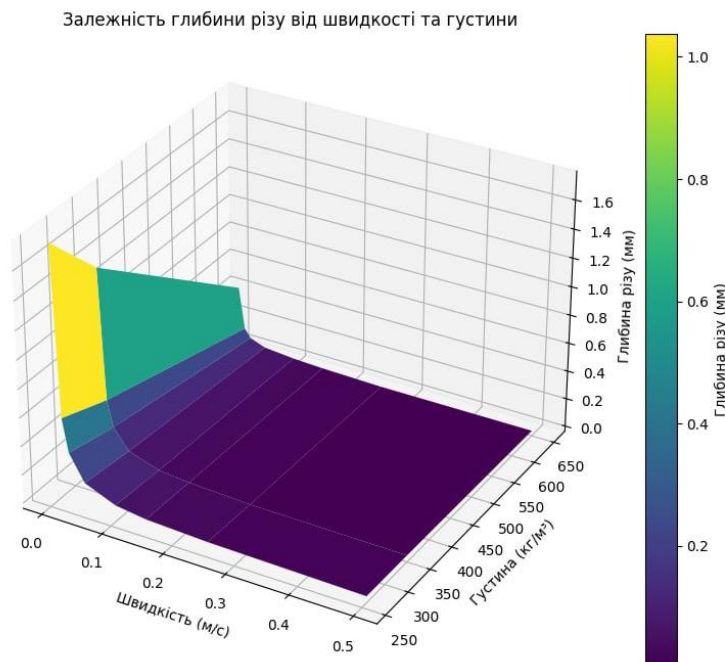


Рис.5. Графік залежності глибини різання від швидкості переміщення лазерної головки та густини матеріалу

На основі отриманих експериментальних залежностей можна прогнозувати оптимальну швидкість переміщення лазерної головки для ефективної обробки різних матеріалів. Аналіз результатів показав, що глибина різання різко зменшується зі збільшенням швидкості різання незалежно від типу матеріалу. Це явище пояснюється зменшенням часу взаємодії лазерного випромінювання з матеріалом при підвищеній швидкості, що, у свою чергу, знижує ефективність теплової передачі і призводить до менш інтенсивного нагрівання, плавлення та випаровування речовини.

Так, для спіненого етиленвінілацетату (EVA) глибина різання зменшилася з 1,76 мм при 0,005 м/с до 0.01 мм при 0.5 м/с, тобто в 176 разів. Подібна тенденція простежується й для фетру та фанери, хоча в останньої абсолютні значення глибини різання є істотно меншими. Це зумовлено різницею у фізико-механічних та теплофізичних властивостях матеріалів, зокрема густиною, питомою теплоємністю, теплопровідністю та теплотою фазового переходу.

Отримані результати підтверджують, що взаємодія між швидкістю обробки та властивостями матеріалу є критичною для формування якісного різання. Зі збільшенням швидкості переміщення глибина різання зменшується в усіх випадках, однак ступінь цього зменшення варіюється залежно від типу

матеріалу. Наприклад, EVA зберігає відносно більшу глибину прорізу при високих швидкостях, порівняно з фанерою, що вказує на його нижчий тепловий опір та кращу здатність до локального випаровування під дією фокусованого лазерного пучка.

Таким чином, розроблена експериментальна методика та аналітичні залежності можуть бути використані для розрахунку режимів лазерного різання та гравіювання в умовах автоматизованого виробництва з урахуванням типу матеріалу, необхідної глибини обробки та технологічної швидкості.

Висновки

У результаті проведених експериментальних досліджень встановлено, що застосування робототехнічної системи на базі шестиосового маніпулятора у поєднанні з лазерним модулем NEJE N40630 забезпечує високу точність, повторюваність та якість виконання операцій лазерного різання для матеріалів, які застосовуються в галузевому машинобудуванні та легкій промисловості. Завдяки високій точності позиціонування та можливості керування рухом інструменту у тривимірному просторі, така система дозволяє обробляти як плоскі, так і просторово криволінійні поверхні з мінімальними відхиленнями.

Проведене порівняння результатів моделювання з експериментальними даними засвідчило високий рівень достовірності моделі. Максимальне відхилення між теоретичними та фактичними значеннями не перевищувало 5%, що свідчить про її адекватність та придатність для практичного застосування в умовах промислового виробництва.

Отримані результати підтверджують надійність і ефективність розробленої аналітичної моделі, яка може бути використана для прогнозування параметрів лазерного різання, оптимізації режимів обробки та попереднього налаштування обладнання без необхідності багаторазових експериментів. Це дозволяє значно скоротити час і витрати на підготовчо-налагоджувальні операції у виробничих умовах.

Застосування роботизованої системи з інтегрованим лазерним модулем є перспективним напрямом у розвитку автоматизованих технологічних комплексів, що дає змогу підвищити продуктивність, стабільність якості, безпеку праці та ефективність використання ресурсів. Такий підхід відкриває нові можливості для гнучкої автоматизації виробничих процесів у галузевому машинобудуванні, легкій промисловості, дизайні та прототипуванні складних виробів.

Література

1. Guillaume Savriama. Numerical Simulation of Laser Processing Materials: An Engineering Approach – InTech, 2015.
2. Gyasi, E., Antila, A., Owusu-Ansah, P., Kah, P. and Salminen, A. (2022). Prospects of Robot Laser Cutting in the Era of Industry 4.0. *World Journal of Engineering and Technology*, 10, 639-655. doi: [10.4236/wjet.2022.103042](https://doi.org/10.4236/wjet.2022.103042).
3. William M. Steen Jyotirmoy Mazumder. Laser Material Processing Fourth Edition – Springer, 2010.
4. NEJE Documentation. <https://neje.shop/>.
5. Thomas, R., Kurfess, P. Robotics and automation handbook – CRC PRESS, 2005.

References

1. Guillaume Savriama. Numerical Simulation of Laser Processing Materials: An Engineering Approach – InTech, 2015.
2. Gyasi, E., Antila, A., Owusu-Ansah, P., Kah, P. and Salminen, A. (2022). Prospects of Robot Laser Cutting in the Era of Industry 4.0. *World Journal of Engineering and Technology*, 10, 639-655. doi: [10.4236/wjet.2022.103042](https://doi.org/10.4236/wjet.2022.103042).
3. William M. Steen Jyotirmoy Mazumder. Laser Material Processing Fourth Edition – Springer, 2010.
4. NEJE Documentation. <https://neje.shop/>.
5. Thomas, R. Kurfess, P. Robotics and automation handbook – CRC PRESS, 2005.