

Хмельницький національний університет
Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

Розробка установки для лазерного різання матеріалів в легкій промисловості

Назва теми

Галузь знань 13. «Механічна інженерія»

Шифр, назва

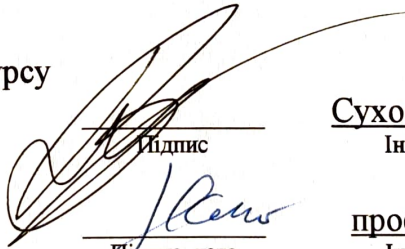
Спеціальність 133 «Галузеве машинобудування»

Шифр, назва

Освітня програма «Машини і апарати легкої промисловості»

Шифр МРМА 24.00.00.000 ПЗ

Виконав студент 2 курсу
група МБм-23-1



Підпис

Сухоставський В.М.

Ініціали, прізвище

Керівник



Підпис, дата

проф. Скиба М.Є.

Ініціали, прізвище

Нормоконтролер

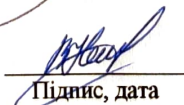


Підпис, дата

доц. Тимошук О.Г.

Ініціали, прізвище

До захисту допускаю.



Підпис, дата

доц. Неймак В.С.

Ініціали, прізвище

Зав. кафедри МАЕЕС

17 " 12 2024 р.

Хмельницький 2024


ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту і архітектури
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем
Освітній рівень магістр
Галузь знань 13 «Механічна інженерія»
Шифр і назва
Спеціальність 133 «Галузеве машинобудування»
Шифр і назва
Освітня програма «Машини і апарати легкої промисловості»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МАЕЕС

к.т.н., доц. Неймак В.С.

 12 .2024р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Сухоставський Вадим Михайлович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи Розробка установки для лазерного різання матеріалів в легкій промисловості

керівник роботи д.т.н., проф. Скиба М.Є.

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом ректора університету від 26 08 2024 р. № 60

2. Строк подання студентом роботи на кафедру _____

3. Вихідні дані до роботи Технічні характеристики обладнання аналогів та полімерних матеріалів

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ. 1. Огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики магістерської роботи. 2. Аналітичне дослідження процесу лазерного різання полімерних матеріалів. 3. Розробка та конструювання установки для лазерного різання матеріалів. 4. Дослідження лазерного різання полімерних матеріалів. Висновки. Перелік джерел посилання.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень) Аркуш 1. Схеми установок для різання матеріалів. Документ оглядовий (A1). Аркуш 2. Фізична модель процесу різання матеріалу променем лазера. Документ ілюстраційний (A1). Аркуш 3. Математична модель процесу різання матеріалу променем лазера. Розрахунки (A1). Аркуш 4. Лазер. Схеми електрична (A2)+Лазерна головка. Документ ілюстраційний (A2). Аркуш 5. Установка для лазерної різки. Габаритне креслення (A1). Аркуш 6. Установка для лазерної різки (вузли). Документ ілюстраційний (A1). Аркуш 7. Установка для лазерного різання матеріалів. Документ ілюстраційний (A1). Аркуш 8. Лицьова панель програми. Документ

ілюстраційний (A2)+Методика проведення експерименту. Документ ілюстраційний (A2). Аркуш 9. Планування експерименту. Результати розрахунків (A1). Аркуш 10. Графічні залежності. Результати розрахунків (A1)

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1. Огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики магістерської роботи	до 30.10.24р.	
2. Аналітичне дослідження процесу лазерного різання полімерних матеріалів	до 05.11.24р.	
3. Розробка та конструювання установки для лазерного різання матеріалів	До 20.11.24р.	
4. Дослідження лазерного різання полімерних матеріалів	до 28.11.24р.	
5. Оформлення пояснювальної записки та графічного матеріалу	до 12.12.24р.	

Студент


Підпис

В.М. Сухоставський
Ініціали, прізвище

Керівник роботи


Підпис

М.Є. Скиба
Ініціали, прізвище

АНОТАЦІЯ

до магістерської роботи студента
спеціальності 133 «Галузеве машинобудування».

1. Прізвище, ім'я та по батькові Сухоставський Вадим Михайлович

2. Тема магістерської роботи Розробка установки для лазерного різання матеріалів в легкій промисловості

3. Прізвище, ініціали, вчена ступінь та звання опонента _____

4. Об'єм магістерської роботи: креслень 10 арк., сторінок записки 84

5. Лазерне різання є технологічно вигідним методом, який забезпечує мінімальний вплив на матеріал, не потребує додаткової обробки деталей і дозволяє економити матеріал. Програмне забезпечення лазерного обладнання допомагає конструкторам максимально ефективно використовувати матеріал, зменшуючи відходи. Ця технологія знаходить застосування не тільки у легкій промисловості, а й у машинобудуванні, будівництві та дизайні, дозволяючи створювати декоративні та складні деталі. Розробка обладнання для лазерного різання є актуальним завданням, що сприяє впровадженню інновацій та покращенню якості виробництва у різних сферах.

Створено установку для лазерного різання матеріалів з метою покращення якості виготовлення виробів та зниження трудомісткості цього процесу. В першому розділі проведено огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики магістерської роботи. В другому здійснено аналітичне дослідження процесу лазерного різання полімерних матеріалів. В третьому розділі проводиться розробка та конструювання установки для лазерного різання матеріалів. В четвертому здійснюється дослідження лазерного різання полімерних матеріалів.

Підпис студента _____

" 17 " 12 20 24 р.

РІШЕННЯ ЕК:

Протокол 2 від " 24 " 12 20 24 р.

Оцінка проекту ЕК Вигинишолт
Рекомендації ЕК _____

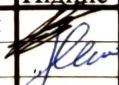


Особливі відмітки _____

Технічний секретар _____

" 24 " 12 20 24 р.

ЗМІСТ

	стор.
Вступ	6
1 Огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики магістерської роботи	9
1.1 Способи розкроювання матеріалів у швейній промисловості: традиційні та сучасні	9
1.2 Фізико-хімічні методи обробки матеріалів у промислових галузях	16
1.3 Основні види лазерів, їх характеристики та сфера застосування	26
1.4 Особливості застосування лазерного різання для полімерних матеріалів	32
1.5 Переваги технології лазерного різання для полімерів та виробів із них	34
1.6 Висновки до першого розділу	35
2 Аналітичне дослідження процесу лазерного різання полімерних матеріалів	36
2.1 Розробка фізичної моделі процесу різання полімерів лазерним випромінюванням	36
2.2 Розробка математичної моделі процесу різання полімеру лазерним променем	37
2.3 Висновки до другого розділу	43
3 Розробка та конструювання установки для лазерного різання матеріалів	44
3.1 Обґрунтування вибору програмного середовища для розробки установки	44

МРМА 24.00.00.000 ПЗ									
	Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата	Розробка установки для лазерного різання матеріалів в легкій промисловості. Пояснювальна записка	Літера	Аркуш	Аркушів
	Виконав	Сухоставський					М	4	84
	Перевір.	Скиба							
	Н контр.	Неймак					ХНУ гр.МБм-23-1		
	Затвер.								

3.2	Конструювання механічної складової установки для лазерного різання	45
3.3	Підбір ключових компонентів для установки лазерного різання	46
3.4	Технічні характеристики та загальний вигляд установки для лазерного різання матеріалів	56
3.5	Вибір засобів захисту для роботи з лазерним обладнанням	58
3.6	Підбір системи керування для роботи пристрою лазерного різання	60
3.7	Підбір програмного забезпечення для керування операцією лазерного різання матеріалів	62
3.8	Висновки до третього розділу	63
4	Дослідження лазерного різання полімерних матеріалів	64
4.1	Обґрунтування вибору устаткування та матеріалів для експерименту	64
4.2	Розробка методики дослідження процесу лазерного різання полімерів	71
4.3	Розробка плану досліджень лазерного різання матеріалів	72
4.4	Отримані результати дослідження процесу лазерного різання полімерів	77
4.5	Висновки до четвертого розділу	78
	Висновки	79
	Перелік джерел посилання	81
	Додаток А	

вплинути на розвиток енергетики, зв'язку та хімії.

Лазерне різання є технологічно вигідним методом, який забезпечує мінімальний вплив на матеріал, не потребує додаткової обробки деталей і дозволяє економити матеріал [4]. Програмне забезпечення лазерного обладнання допомагає конструкторам максимально ефективно використовувати матеріал, зменшуючи відходи.

Ця технологія знаходить застосування не тільки у легкій промисловості, а й у машинобудуванні, будівництві та дизайні, дозволяючи створювати декоративні та складні деталі.

Розробка обладнання для лазерного різання є актуальним завданням, що сприяє впровадженню інновацій та покращенню якості виробництва у різних сферах.

Мета і завдання дослідження.

Метою роботи є створення установки для лазерного різання матеріалів з метою покращення якості виготовлення виробів та зниження трудомісткості цього процесу.

Для досягнення мети були поставлені та вирішені такі завдання:

- виконано аналіз технології лазерного різання матеріалів і відповідного обладнання;
- проведено аналітичне дослідження процесу лазерного різання матеріалів;
- розроблено установку для лазерного різання матеріалів, придатну для використання в легкій промисловості та галузевому машинобудуванні;
- проведено експериментальні дослідження з різання матеріалів, що знайшли застосування у легкій промисловості та галузевому машинобудуванні, із формуванням регресійної моделі.

Об'єкт дослідження: процес різання полімерних матеріалів на лазерній установці.

Предмет дослідження: установка лазерного різання матеріалів.

Наукова новизна отриманих результатів:

						МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк 7
Зм.	Арк	№ док-м.	Підпи	Дата			

1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ТА ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ З ТЕМАТИКИ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ

1.1 Способи розкроювання матеріалів у швейній промисловості: традиційні та сучасні

Розкрій матеріалів є одним із ключових початкових етапів у процесі створення одягу, який передбачає виготовлення текстильних деталей [5]. Цей етап є надзвичайно важливим, оскільки від його правильного виконання значною мірою залежить якість кінцевого виробу.

На сьогодні існує близько десяти різних методів розкроювання матеріалів. Всі відомі способи розкрою можна класифікувати за типом ріжучого інструменту, який використовується. Систематизоване представлення таких методів наведено на рис.1.1 (аркуш [МРМА24.00.00.000ДО]).

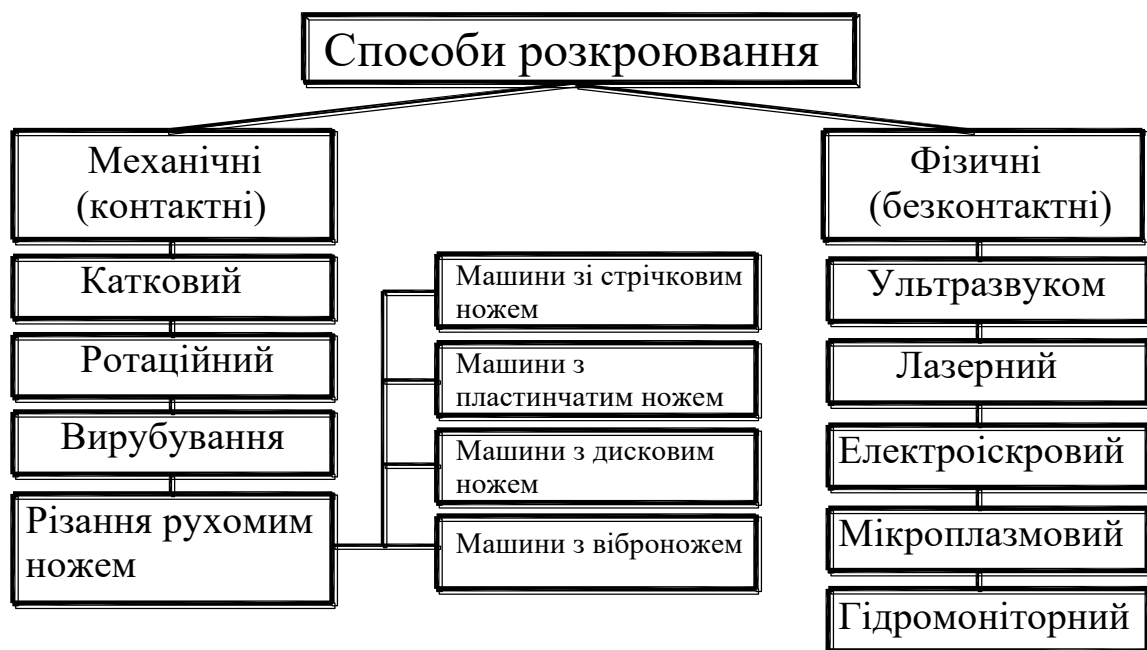


Рисунок 1.1 - Класифікація способів розкроювання матеріалів

Способи розкроювання швейних матеріалів поділяються на дві основні групи: механічні (контактні) та фізичні (безконтактні).

Механічні способи [6, 7].

Механічні способи розкроювання включають: катковий, ротаційний, вирубування, різання рухомим ножем.

Ці методи базуються на зануренні ріжучого інструменту в матеріал і використовуються для розсікання настилу та точного розкроювання деталей у пачки.

Безконтактні способи [6, 7].

Безконтактні методи засновані на фізичних ефектах, що дозволяють виконувати розкрій поточним методом у кілька шарів або одне полотно за допомогою автоматизованих інструментів. Види безконтактних способів: ультразвуковий, лазерний, мікроплазмовий, гідромоніторний, електроіскровий.

Коротко розглянемо деякі механічні способи.

Катковий спосіб [6, 7].

Робочим інструментом є катки, які вирізають деталі, прокатуючись по різакам, що встановлені на матеріалі (рис.1.2).

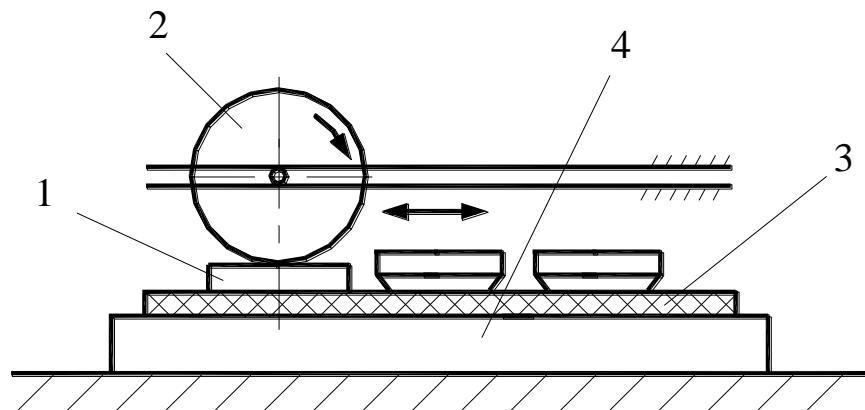


Рисунок 1.2 - Схема установки для каткового способу розкроювання матеріалів

Переваги: безперервність процесу, висока продуктивність, подача матеріалу прямо з рулону.

Недоліки: значні відходи, неточність крою, неможливість обліку дефектів рулону.

Ротаційний спосіб [6, 7].

Тканина пропускається між обертовими ножовим і притискним валами, на яких закріплені різачки (рис.1.3).

Переваги: механізація подачі тканини, безперервність процесу, можливість автоматизації.

Недоліки: висока вартість і складність виготовлення ріжучого інструменту, значні втрати матеріалу.

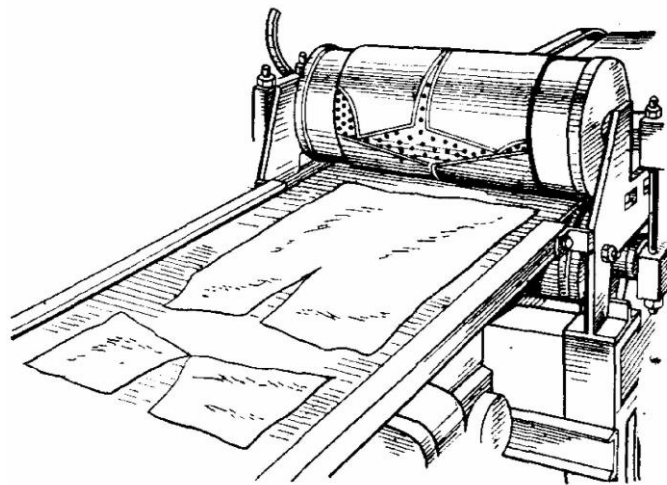


Рисунок 1.2 - Схема установки для ротаційного способу розкроювання матеріалів

Ультразвуковий метод різання матеріалів [6, 7].

У США створено установку для ультразвукового різання синтетичних тканин одним шаром (рис.1.3). Він працює на звукових або ультразвукових частотах (до 20 кГц) і складається з вібруючого інструменту 1, який розрізає тканину, взаємодіючи з опорою 3. Тканина подається за допомогою рухомої стрічки 2, що проштовхує її в зазор між інструментом і опорою, яка виконує функцію ножа.

Розрізання здійснюється повторюваними імпульсами. Висока частота вібрації дозволяє звуковій енергії зварювати або оплавляти кінці волокон під час

різання, що запобігає осипанню тканини.

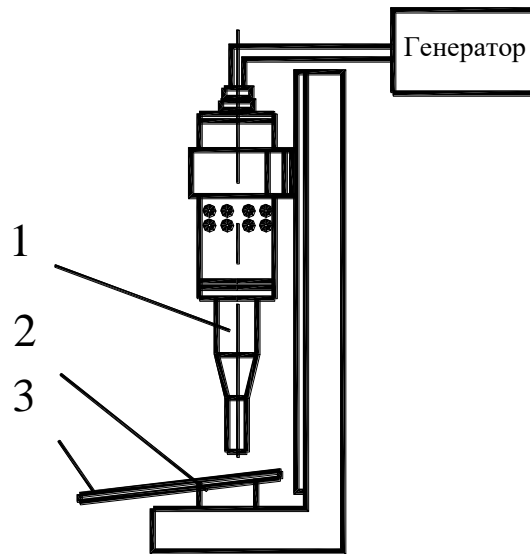


Рисунок 1.3 - Схема установки для ультразвукового способу розкроювання матеріалів

Переваги ультразвукового методу розкроювання матеріалів: висока точність різання; мінімізація втрат тканини.

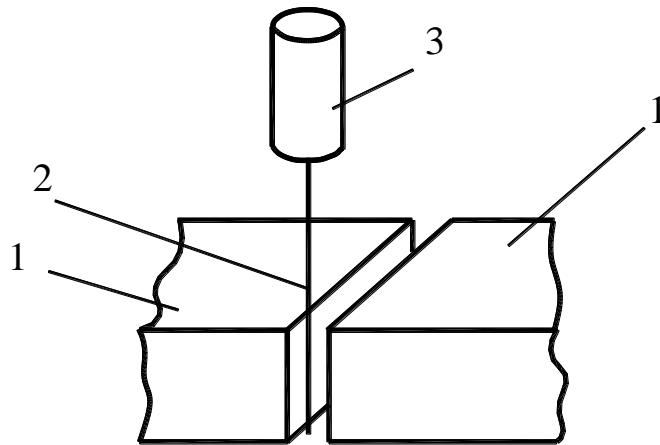
Недоліки ультразвукового методу розкроювання матеріалів: швидке зношування ріжучої крайки.

Лазерний метод розкроювання матеріалів [6, 7].

Лазерний розкрій базується на здатності полімерних матеріалів поглинати теплову енергію від лазерного променя, що спричиняє термічне руйнування матеріалу в зоні різання. Для синтетичних тканин найкраще підходить лазер потужністю 600–800 Вт із фокусуванням у пучок діаметром до 0,6 мм (рис.1.4). Швидкість різання може сягати 0,4 м/с.

Переваги лазерного методу: висока точність викроювання; автоматизація процесу; мінімізація втрат матеріалу.

Недоліки лазерного методу: ризик спікання шарів матеріалу; низька якість країв зрізу; непридатність для товстих настилів.

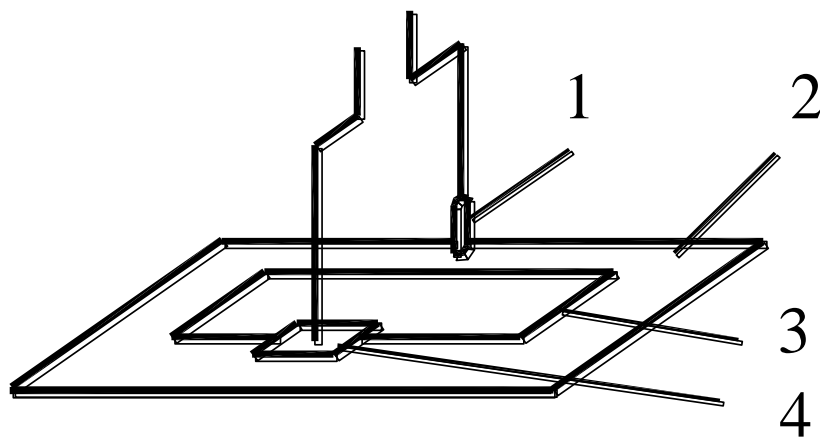


1 - матеріал, 2-лазерний промінь, 3-квантовий генератор

Рисунок 1.4 - Схема установки для лазерного способу розкроювання матеріалів:

Електроіскровий метод розкроювання матеріалів [6, 7].

Електроіскровий метод використовується для розкроювання неелектропровідних текстильних матеріалів. Він передбачає створення графітного електрода 3, який повторює контури деталей (рис.1.5).



1-електрод, 2-верхнє полотно, 3-графітна лінія, 4-електрод
Рисунок 1.5 - Схема пристрою для електроіскрового способу розкроювання матеріалів:

Другий електрод 1 розміщується на мінімальній відстані від матеріалу.

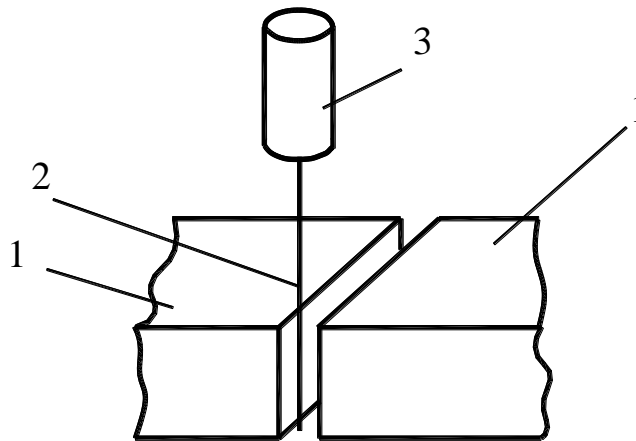
При подачі струму високої напруги ($I = 150 \text{ мА}$, $U = 35 \text{ кВ}$) виникають електричні розряди, що спричиняють руйнування матеріалу. У синтетичних тканинах краї зрізу оплавлюються. Швидкість різання становить 1–3 см/с для матеріалів товщиною до 0,5 мм.

Переваги: мінімізація втрат матеріалу.

Недоліки: низька точність та якість різу; забруднення кромки виробу.

Мікроплазмовий спосіб розкроювання матеріалів [6, 7].

Мікроплазмовий розкрій базується на використанні іонізованого газу, нагрітого електричним полем, при низьких струмах і температурах. Цей метод застосовує мікроплазмовий струмінь під тиском 0,3 МПа (рис.1.6), що нагріває та руйнує матеріал.



1-матеріал, 2-мікроплазмовий струмінь, 3-плазмотрон

Рисунок 1.6 - Схема установки для мікроплазмового способу розкроювання матеріалів:

Робочими газами є аргон або азотно-аргонова суміш. Метод підходить лише для одношарового різання зі швидкістю до 0,3 м/с, оскільки синтетичні матеріали схильні до оплавлення та спікання країв.

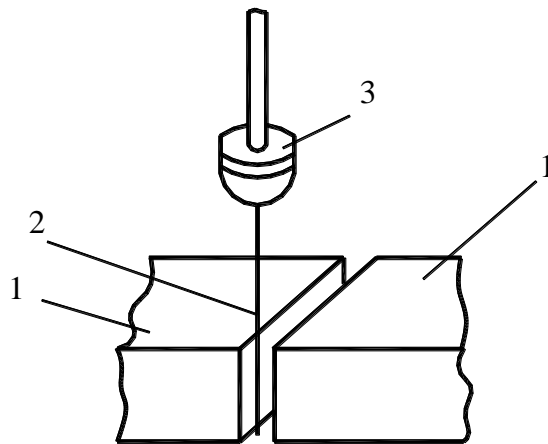
Переваги: висока якість лінії різу; зменшення втрат тканини; можливість автоматизації.

Недоліки: обмеження на різання багатшарових настилів; ризик

оплавлення зрізу в синтетичних тканинах.

Мікроплазмовий спосіб розкроювання матеріалів [6, 7].

Мікроплазмовий розкрій базується на використанні іонізованого газу, нагрітого електричним полем, при низьких струмах і температурах. Цей метод застосовує мікроплазмовий струмінь під тиском 0,3 МПа (рис.1.6), що нагріває та руйнує матеріал. Робочими газами є аргон або азотно-аргонова суміш.



1-матеріал, 2-струмінь води, 3-сопло

Рисунок 1.7 - Схема установки для гідромоніторного способу розкроювання матеріалів:

Метод підходить лише для одношарового різання зі швидкістю до 0,3 м/с, оскільки синтетичні матеріали схильні до оплавлення та спікання країв.

Переваги: висока якість лінії різання; зменшення втрат тканини; можливість автоматизації.

Недоліки: обмеження на різання багатошарових настилів; ризик оплавлення зрізу в синтетичних тканинах.

Більшість розглянутих способів розкроювання не отримали широкого промислового впровадження і використовуються переважно для експериментальних досліджень. Найбільш поширені на сьогодні методи: гідромоніторний; лазерний [6, 7].

На основі лазерного способу розроблено автоматизовані розкрійні

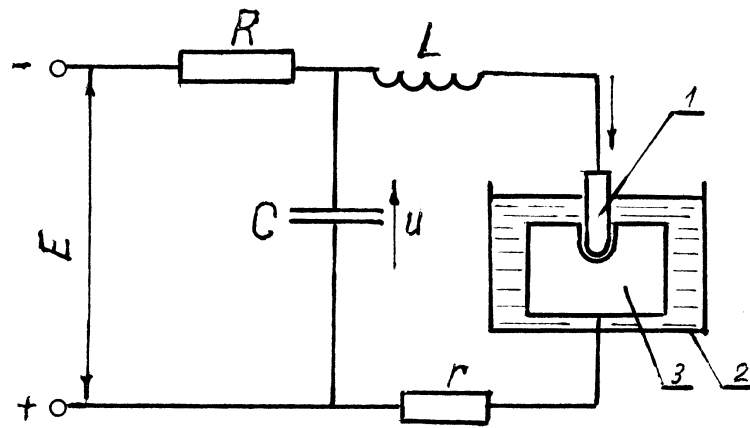


Рисунок 1.8 – Схема електроерозійного методу обробки матеріалів

Високочастотні режими електроіскрової обробки[9, 10].

Застосовують імпульсні генератори з частотою 100–150 кГц, що забезпечує високу точність і якість поверхні. Розряд відбувається через замикання первинного кола трансформатора перебивачем (тиратроном або вакуумною лампою). Схема наведена на рис. 1.9.

Електроімпульсні режими обробки [9, 10].

Імпульси тривалістю 0,5–10 с створюють дуговий розряд, що інтенсивно руйнує катод. Заготовка, під'єднана до катода, демонструє вищу продуктивність (у 8–10 разів) і менше зношення інструменту, проте точність обробки нижча. Цей режим використовується для попередньої обробки (рис. 1.10).

Обробка непрофільованим електродом.

Метод використовує дрід діаметром 0,05–0,3 мм, який рухається по двох координатах (рис. 1.10). Короткі імпульси малої енергії дозволяють вирізати складні контури з високою точністю. Дрід 3 переміщується роликівим механізмом 1-2-6, а заготовка отримує поздовжній, поперечний або криволінійний рух.

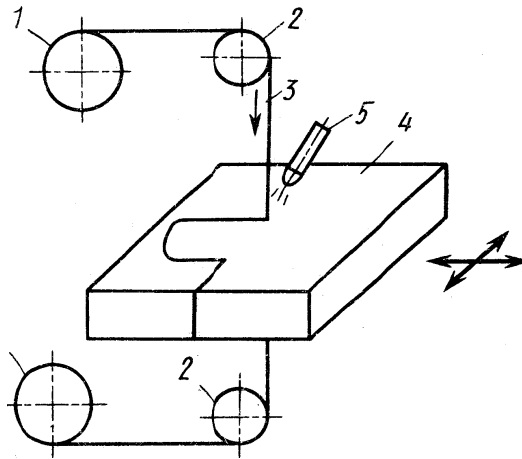


Рисунок 1.9 - Принципова схема електро імпульсної обробки

Рідина подається через трубку 5. Технологія ЕЕО розвивається у двох напрямках: обробка великогабаритних деталей (до 50 т, наприклад, штампів); виготовлення точних невеликих деталей.

За останні 10–15 років точність ЕЕО зросла втричі й досягає кількох мікронів при обробці нескладних деталей. Верстати з непрофільованим інструментом оснащені системами програмного керування для оптимізації параметрів обробки. У Японії та США понад 50% штампів виготовляють електроерозійними методами [9, 10].

1.2.3 Електрохімічні методи обробки [11]

Електрохімічна обробка (ЕХО) базується на електролітичному поліруванні, що використовує явище електролізу - хімічне перетворення на поверхні електродів у середовищі електроліту. Основою процесу є анодне розчинення металу заготовки. В електроліті молекули розпадаються на заряджені іони, які в електричному полі рухаються до відповідних електродів .

При підключенні заготовки (анод) та інструмента (катод) до джерела постійного струму ($U = 6-12$ В), позитивні іони (катіони) спрямовуються до

катода, а електрони до анода. Біля катода виділяються катіони, а на аноді відбувається розчинення металу [11].

Електрополірування, виконуване при низькій щільності струму та нерухомому електроліті, вирівнює поверхню деталі. Заготовка (+) поміщається у розчин, а катодом (-) служить пластина, що не реагує з електролітом. При проходженні струму інтенсивніше розчиняються виступи нерівностей, що забезпечує полірувальний ефект. Електрополірування часто застосовується перед нанесенням гальванічних покриттів. Схема установки наведена на рис. 1.10 [11].

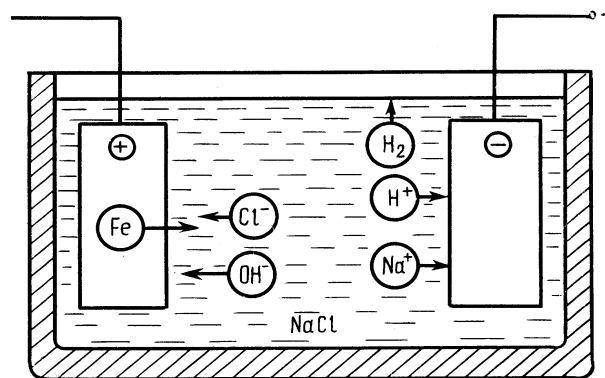


Рисунок 1.10 - Схема установки для електролітичного полірування [11]

1.2.4 Ультразвукові методи механічної обробки [12]

Ультразвукові методи.

Види ультразвукової обробки [12]:

- обробка незакріпленим абразивом – для зняття дрібних задирок (<0,1 мм) та шліфування деталей масою 10–20 г (рис. 1.11, а);
- розмірна обробка абразивною суспензією – для твердих крихких матеріалів (рис. 1.11, б);
- очищення та змащування шліфувального круга – під час чистового шліфування в'язких матеріалів;
- ультразвукові коливання малої амплітуди – для інтенсифікації різання

складних матеріалів.

На схемі розмірної обробки (рис. 1.11, б) інструмент 1 генерує коливання з амплітудою 0,02–0,05 мм, діючи на заготовку 3 зі статичною силою $P=30 - 200$ Н [12].

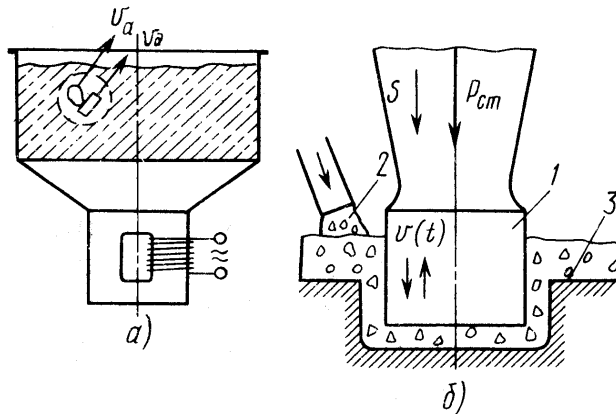


Рисунок 1.11 - Ультразвуковий спосіб механічної обробки [12]

У робочу зону подається суспензія з абразивних зерен (водний розчин карбіду бору).

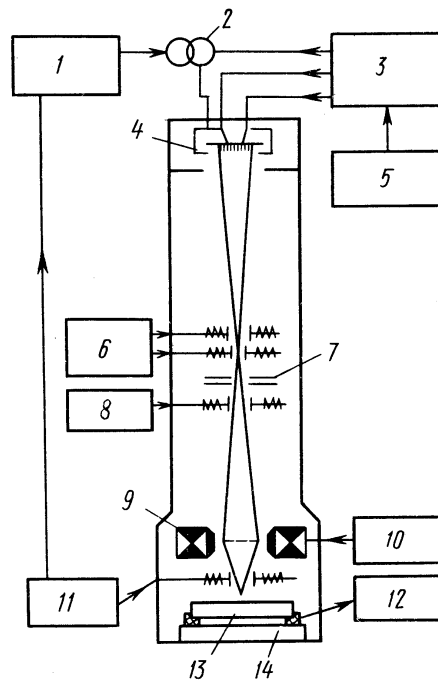
Процеси в робочій зоні:

- ударне вдавлювання абразивних зерен, що спричиняє виколування частинок матеріалу;
- циркуляція абразиву для видалення виколотих частинок і подачі нового абразиву.

Перспективним напрямом є поєднання електрохімічного та ультразвукового методів обробки, що дозволяє суттєво підвищити продуктивність процесу та покращити якість оброблюваної поверхні. Це також сприяє зменшенню зношування інструменту у 5–6 разів і скороченню енерговитрат процесу в 3–5 разів [12].

1.2.5 Променеві методи розмірної обробки [13]

Променеві методи обробки включають видалення металу плавленням і



1-генератор імпульсів; 2- трансформатор імпульсний; 3- джерело напруги збудження та розжарювання; 4-катод; 5-джерело високої напруги; 6- електромагнітне юстування; 7-діафрагма; 8-коректор зображення; 9- лінза магнітна; 10-джерело живлення лінзи; 11-контрольний контур; 12- осцилограф катодний; 13- деталь, що обробляється; 14 – робочий стіл

Рисунок 1.12 - Схема електронно- променевого пристрою [13]:

Залежно від q , механізм видалення матеріалу може бути: термічним, пароструменевим, крапельним, вибуховим.

Вибуховий – ефективний спосіб ($q > 10^6 \text{вт/см}^2$), при якому відбуваються короткі теплові вибухи. Швидкість тепловиділення перевищує швидкість його відведення, створюючи ударну хвилю, що генерує потік дислокацій у матеріалі та завдяки його видаленню.

Переваги ЄПО: висока продуктивність, наявність хімічних реакцій, можливість обробки складнодоступних місць, малих отворів та канавок.

Недоліки ЄПО: висока вартість обладнання, необхідний захист персоналу від рентгенівського випромінювання.

1.2.6 Світло-променева (лазерна) обробка (СПО) [14]

Лазерний (оптичний квантовий генератор, ОКГ) – пристрій, що генерує когерентні електромагнітні хвилі за рахунок вимушеного випромінювання або розсіювання світла активним середовищем в оптичному резонаторі. Схема ОКГ показано на рис. 1.13 [14].

Короткі спалахи газорозрядної лампи збуджують атоми хрому в рубіновому стержні 1, переводячи їх у збуджений стан. Передача енергії між атомами створює хвилю, яка багаторазово відбивається від плоских торців стержня. Потужний імпульс червоного світла виходить через напівпрозорий торець, проходячи через діафрагму 2, фокусну систему 3 та захисне скло 4, досягаючи поверхні деталей 5.

Енергія випромінювання ОКГ становить 10–100 Дж із коефіцієнтом корисної дії 0,1–1%. Температура в точці дії змїни досягає 5500–9000 К, що достатньо для плавлення матеріалу [14].

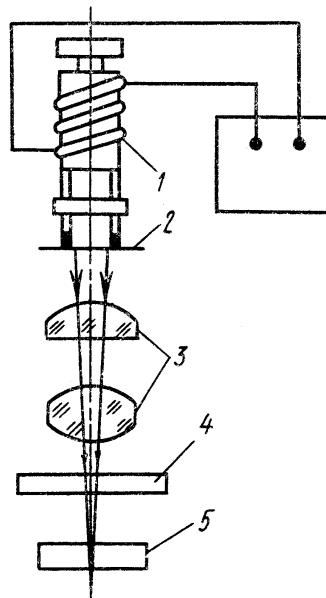


Рисунок 1.13 - Схема роботи твердотілого лазера [14]

Під час багатоімпульсної обробки отвори формуються пошарово, кожен імпульс випаровує частину матеріалу. Скорочення тривалості імпульсу та

Майман, червень 1960 р.) (рис. 1.14) і який досі застосовується. Рубін, що є різновидом кристалу Al_2O_3 (корунд), містить іони Cr^{3+} , які заміщують іони Al^{3+} . Активні середовища для лазерів виготовляють шляхом вирощування кристалів із розплаву Al_2O_3 і 0,05% Cr_2O_3 . Додавання Cr_2O_3 надає кристалу рожевого відтінку завдяки зеленим і фіолетовим смугам поглинання іонів Cr^{3+} . У природних дорогоцінних каменях концентрація Cr^{3+} значно вища, що забезпечує насичене червоне забарвлення.

Неодимові лазери [19].

Неодимові лазери є одними із самих популярних з твердотільних лазерів. В них активним середовищем як правило є кристал $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$, що скорочено називається YAG (yttrium aluminum garnet, ітрійалюмінієвий гранат).

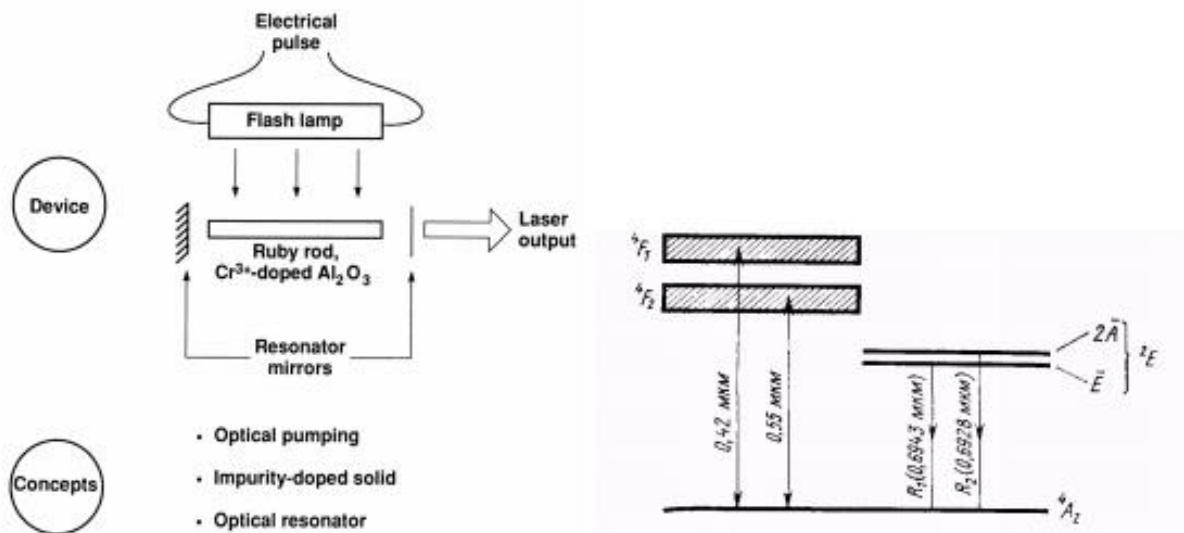


Рисунок 1.14 - Схема рубінового лазера і енергетичних рівнів рубіна

На рис. 1.15 показана спрощена схема енергетичних рівнів Nd: YAG.

1.3.2 Оптиволоконні лазери

Лазери (оптичні генератори) є системами зворотного зв'язку, що

забезпечують стабільні коливання за двох умов: підсилення під час дворазового проходу активного середовища дорівнює одиниці, а зсув фази становить 2π радіан [18].

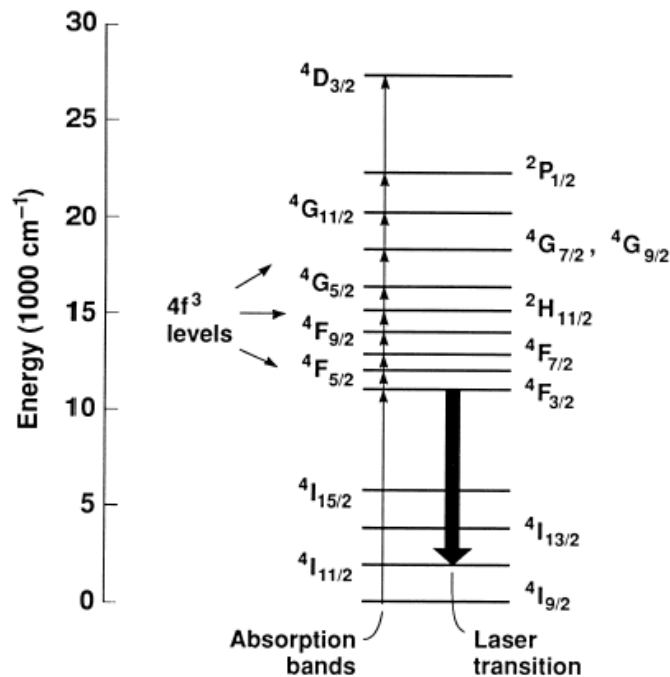


Рисунок 1.15 - Схема енергетичних рівнів кристалу Nd:YAG

Основні елементи оптоволоконного лазера: активне середовище для оптичного підсилення та оптичний зворотний зв'язок. Волоконні лазери визначаються як пристрої, у яких обидва елементи інтегровані в оптоволокно. Для забезпечення зворотного зв'язку або контролю спектральних і часових характеристик можуть додаватися додаткові компоненти.

Схема оптоволоконного лазера наведена на рис. 1.16. Лазер накачування постачає енергію до активного середовища, яке має забезпечувати достатнє підсилення для подолання втрат і досягнення порогу генерації когерентного випромінювання [18].

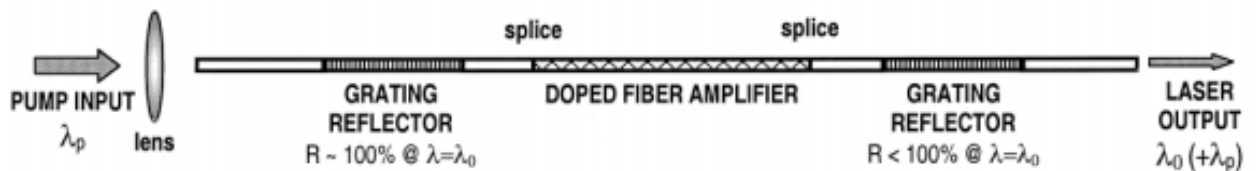


Рисунок 1.16 – Проста схема волоконного лазера

1.3.3 Напівпровідникові лазери [18]

Напівпровідникові лазери мають високу ефективність серед оптичних квантових генераторів. Їх розміри зазвичай не перевищують кілька сотень мікрон, а активне середовище виготовляється з напівпровідникових матеріалів. Накачування відбувається безпосередньо електричним струмом.

Пороговий струм для запуску генерації становить кілька міліампер, а ефективність перетворення електронів у фотони перевищує 90%. Конструкція лазерів передбачає кілька шарів напівпровідникового матеріалу.

Перші лазери цього типу створювали з арсеніду галію (рис. 1.17). У кристалі формувався р-п-перехід, через який подавався струм. Гладкі торці слугували дзеркалами для оптичного зворотного зв'язку, тоді як бічні сторони залишалися шорсткими, щоб уникнути небажаної генерації в інших напрямках [18].

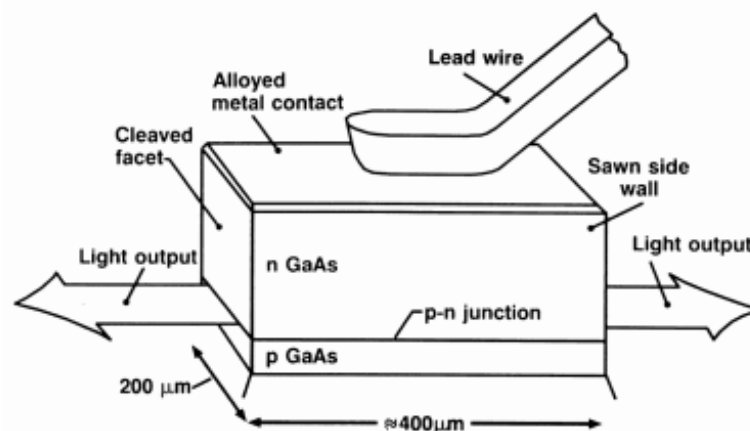


Рисунок 1.17 – Схема напівпровідникового лазера

1.3.4 Газові лазери [18]

Спектральні лінії в газах мають низьку ширину (кілька ГГц і менше) через слабкі механізми розширення порівняно з твердими тілами. У газах при низькому тиску (кілька мм рт. ст.) зіткнень мало, тому ширина ліній здебільшого визначається доплерівським розширенням. Через це газові лазери не використовують оптичне накачування лампами, оскільки їхній спектр безперервний, тоді як у газовому середовищі поглинання вузькосмугове [18].

Газові лазери, зокрема CO₂-лазери, накачуються електрично (постійним, високочастотним або імпульсним струмом). У CO₂-лазері використовується суміш газів CO₂ і He. Генерація відбувається на переході між коливальними рівнями молекули CO₂ і He, що в свою чергу підвищує ККД. CO₂-лазери забезпечують високі вихідні потужності (до 80 кВт для газодинамічних) і диференційний ККД 15–20 %, поступаючись лише напівпровідниковим і СО-лазерам [18].

На рис. 1.18 представлено схеми енергетичних рівнів молекул CO₂ і N₂.

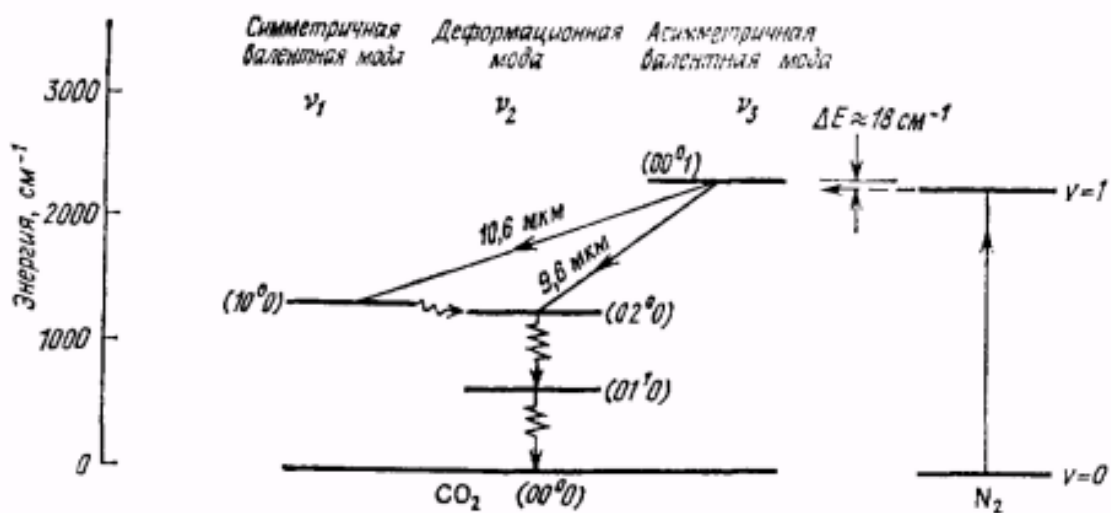


Рисунок 1.18 - Нижні коливальні рівні основного електронного стану молекул N₂ і CO₂ [18]

На сьогоднішній день CO₂-лазери є ключовим інструментом для лазерної обробки матеріалів, таких як різання, створення отворів, термообробка, спікання порошків тощо. Схема хвильоводного CO₂-лазера з поздовжнім прокачуванням газу представлена на рис. 1.19.

1.3.5 Хімічні лазери [20]

У 1960 році J.C. Polanyi вперше запропонував конструкцію хімічного лазера, засновану на перетворенні енергії хімічних реакцій у коливальні ступені свободи. Перший хімічний лазер був створений у 1965 році Каспером і Піментелем. До 1967 року з'явилися лазери, що використовували реакцію атомарного фтору з молекулярним воднем. У 1984 році був розроблений HF-лазер потужністю понад 1 МВт, який працює в інфрачервоному діапазоні з довжиною хвилі 2,7 мкм. Хімічні лазери знаходять застосування у військовій техніці та сферах, де потрібна висока потужність випромінювання [20].

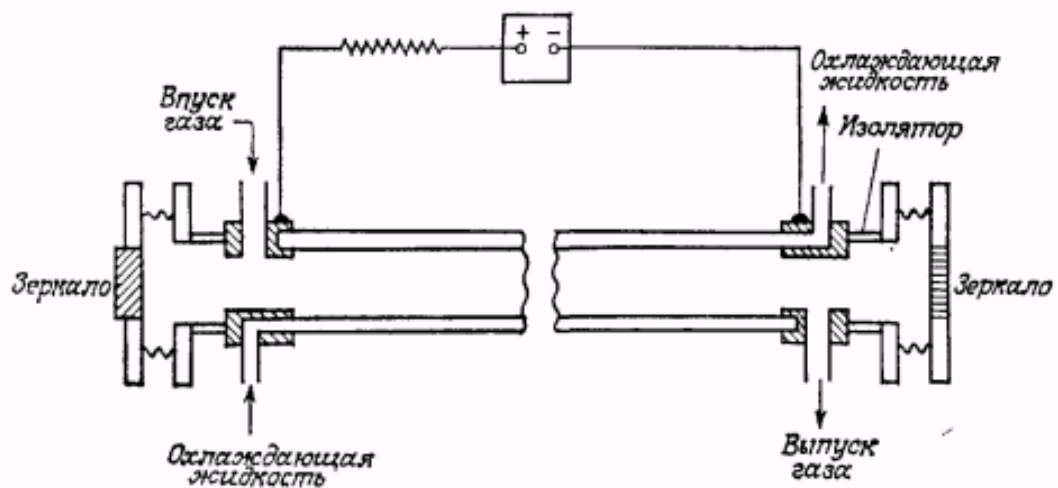


Рисунок 1.19. Схематичне уявлення хвильоводного CO₂-лазера з поздовжнім прокачуванням газу

1.3.6 Лазери на вільних електронах

Лазери на вільних електронах, розроблені майже 50 років тому, генерують перенастроюване випромінювання в діапазоні від мікрохвиль до ультрафіолету. Вони використовують вільні електрони високої енергії, отримані в прискорювачах частинок, для випромінювання когерентного світла. На відміну від зв'язаних електронів в атомах і молекулах, довжина хвилі випромінювання вільних електронів не обмежена енергетичними рівнями. Генерація випромінювання описується класичною електромагнітною теорією [18, 20].

Випромінювання виникає завдяки взаємодії трьох елементів: пучка електронів, електромагнітної хвилі, що біжить у тому ж напрямку, і періодичного магнітного поля, створеного ондулятором (системою магнітів). Схеми цієї системи наведені на рис. 1.20 [18, 20].

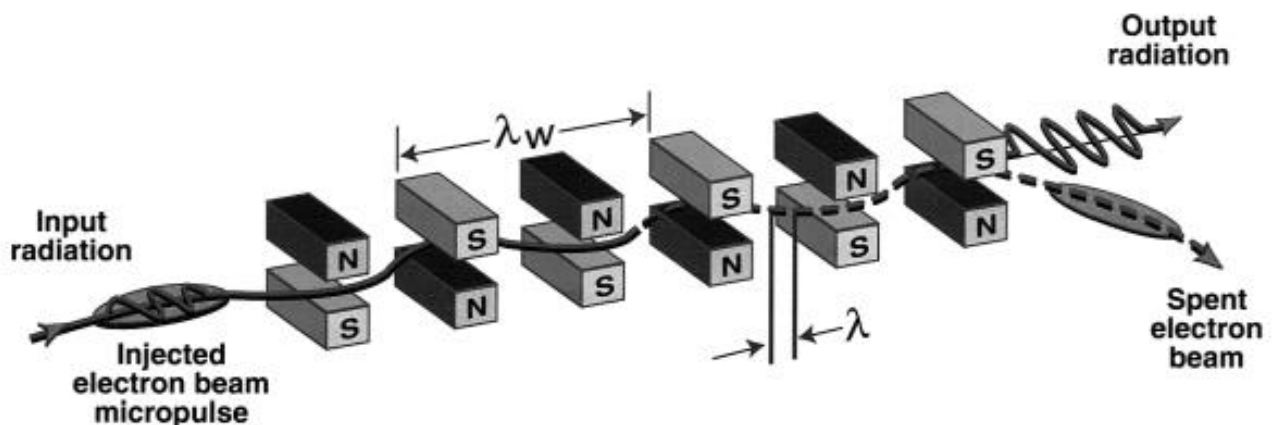


Рисунок 1.20 - Схематичне зображення взаємодії між електронним пучком і електромагнітним полем, що формується плоским ондулятором [18, 20]

1.4 Особливості застосування лазерного різання для полімерних матеріалів

Лазерне різання полімерних і композиційних матеріалів є важливим

Залишений лазером край гладкий і не вимагає додаткової обробки, тоді як після фрези залишаються матові краї та облой.

Лазер виконує обробку на повну глибину матеріалу за один прохід, що знижує енерговитрати і час різання. Він не потребує заміни інструменту, як це відбувається при фрезеруванні, де фрези зношуються або вимагають зміни калібру.

Лазер більш економний щодо матеріалів, адже не потребує технологічних полів для закріплення, як це необхідно для фрез. Якість різу значно зменшує кількість відходів. Лазерний процес менш енергоємний і не створює великої кількості відходів чи шуму, характерних для фрезерної обробки, що підвищує комфортність роботи.

Лазерне різання перевершує фрезерування за більшістю показників. Однак раціональним рішенням може бути комбіноване використання обох методів залежно від конкретних виробничих завдань [22-24].

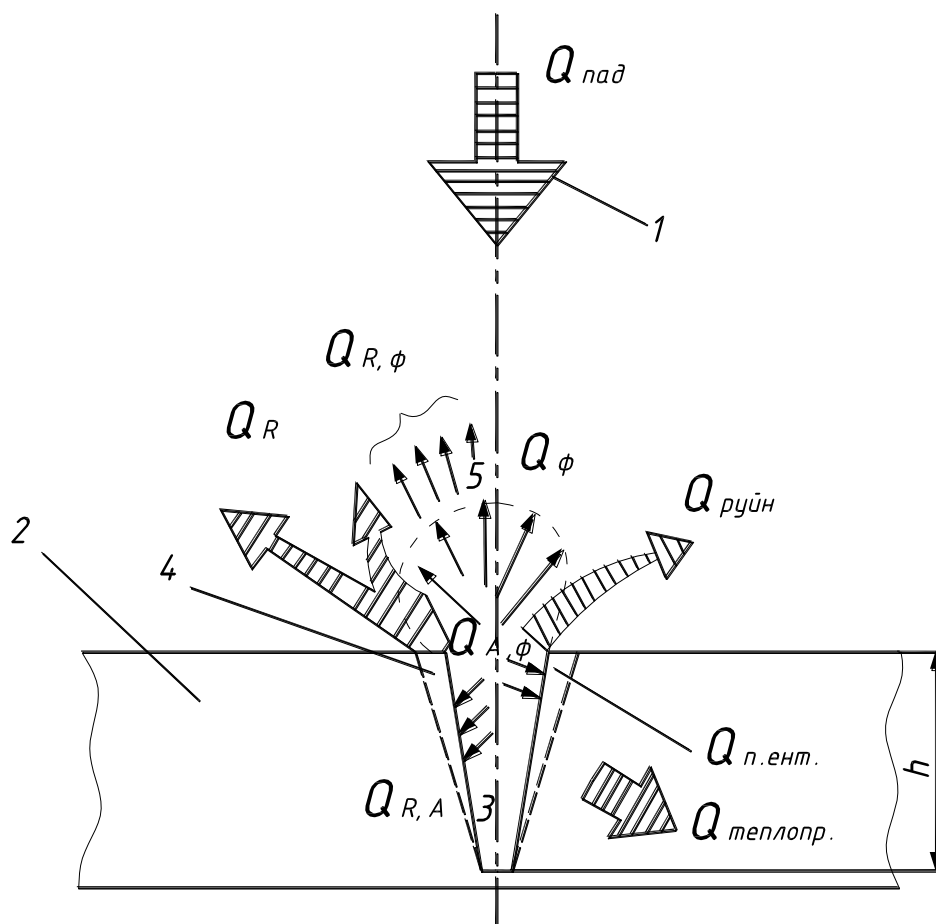
1.6 Висновки до першого розділу

Здійснено огляд і аналіз технологій лазерного різання матеріалів та обладнання, що застосовується. Наведено класифікацію методів розкрою матеріалів у швейній промисловості. Розглянуто фізико-хімічні методи обробки матеріалів у різних галузях промисловості, а також типи лазерів. Проаналізовано особливості лазерного різання полімерних матеріалів, акцентовано увагу на його перевагах у порівнянні з іншими методами обробки деталей.

2 АНАЛІТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЛАЗЕРНОГО РІЗАННЯ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ

2.1 Розробка фізичної моделі процесу різання полімерів лазерним випромінюванням

Дослідимо фізичні закономірності взаємодії лазерного випромінювання, яке потрапляє на поверхню об'єкта, з матеріалом. Для цього умовно проаналізуємо схему взаємодії випромінювання з матеріалом (рис. 2.1) (лист [МРМА24.00.00.000ДІ1]) [25].



1 – сфокусований промінь лазера; 2 – об'єкт обробки; 3 – проріз (канал);
4 – обвуглена поверхня тіла; 5 – факел плазмовий

Рисунок 2.1 - Схема взаємодії пучка променів лазера із матеріалом:

Як випливає з наведених вище формул, ефективність використання енергії лазерного випромінювання залежить від співвідношення відбитого R_λ та поглиненого A_λ випромінювання [25].

Взаємозв'язок цих частинок буде знаходитися за формулами теплового балансу:

$$R_\lambda = 1 - A_\lambda, \quad (2.4)$$

$$A_\lambda = \varepsilon = 1 - R_{\lambda,0}, \quad (2.5)$$

де ε – ступінь чорноти тіла;

R_λ – коефіцієнт відбиття при нормальному падінні променя.

Значення R_λ і ε можна знайти за значеннями оптичних параметрів (показника заломлення n , коефіцієнта затухання δ).

Відповідно:

$$R_{\lambda,0} = \frac{(n-1)^2 + n^2 \delta^2}{(n+1)^2 + n^2 \delta^2} \quad (2.6)$$

$$\varepsilon = \frac{4n}{(n+1)^2 + n^2 \delta^2} \quad (2.7)$$

Згідно з дослідженнями, величина коефіцієнта відбивання залежить від довжини хвилі випромінювання, типу деревини, властивостей поверхневого шару та інших чинників. Щодо поглиненої енергії, вона витрачається на нагрівання, обуглення та часткове випаровування вологи з матеріалу [25].

Для зручності аналізу теплофізичних процесів у зоні впливу випромінювання на матеріал можна виділити такі основні стадії: поглинання та передача енергії матеріалу; нагрівання й обуглення; випаровування та видалення вологи (лазерна ерозія); охолодження матеріалу.

$$(\rho c) \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) + A_{\lambda}(x, y, z, \tau) \quad (2.9)$$

Як впливає з рівняння (2.9), характер його розв'язання визначатиметься функцією розподілу джерел $A_{\lambda}(x, y, z, \tau)$ та граничними (крайовими) умовами для конкретної задачі, а амплітуда розв'язання знаходитиметься величиною коефіцієнтів теплопровідності λ та питомою ізобарною теплоємністю c [25].

Питома теплоємність c проявлятиме себе у здатності матеріалу нагромаджувати тепло, що надходить від зовнішнього джерела, доки не досягне стану рівноваги. Таким чином, акумульовану і накопичену енергію, в матеріалі масою M , при прирості температури Δt можна знайти наступним чином:

$$\Delta E = cM \Delta t \quad (2.10)$$

Зробивши інтегрування останнього рівняння по всьому об'ємі матеріалу, можна визначити кількість надлишкового тепла, що акумулювалась в тілі.

Відомо, що коефіцієнти c та λ визначають швидкість встановлення теплової рівноваги при миттєвому увімкненні теплового генератора, то коефіцієнт температуропровідності ($a = \lambda/(\rho \cdot c)$, ρ – густина матеріалу фактична) визначає теплові інерційні властивості досліджуваного матеріалу. Тоді, віддаль x , на яку проникає хвиля інфрачервоного випромінювання всередині тіла за час τ , може орієнтовно бути оціненою як:

$$x = \sqrt{a\tau} . \quad (2.11)$$

Після появи джерела теплової енергії, коли $x=0$, $\tau=0$ тепло поступає в матеріал із тепловою хвилею, що проходить відстань x за час τ . При цьому в зоні матеріалу $0 < x < x(\tau)$ наростає температура його і в ньому з'являється тепла енергія, що має величину питомої теплоємності. Але в цей час товщина

шару матеріалу, що знаходиться як $x=x(\tau)$ та $x=S_1$ ($x=S_1$ – товщина матеріалу), поки ще залишається не нагрітою. По мірі надходження тепла від генератора випромінювання (лазера), коли $x=0$, теплова хвиля досягає величини $x=S_1$, і тепло починає виходити із матеріалу через поверхню протилежну. В цьому випадку, температура (при $x=S_1$) наростає до значення, що відповідає рівнянню теплопровідності [25]:

$$\frac{\partial Q}{\partial \tau} = \lambda A_\lambda \frac{t_0 - t_1}{S_1} \quad (2.12)$$

де t_0 – температура на стороні опромінення поверхні тіла;

t_1 – температура поверхні тіла протилежної.

Саме в цей момент виникає рівновага, тобто:

$$\left(\frac{\partial Q}{\partial \tau} \right)_{x=0} = \left(\frac{\partial Q}{\partial \tau} \right)_{x=S_1} \quad (2.13)$$

Зазначимо, що подібний процес характерний для всіх матеріалів за наявності точкового або розподіленого джерела змінної енергії. Проте отримання точного аналітичного розв'язку для t ускладнено через складність граничних умов, що враховують його тепловий потік всередині матеріалу та на поверхні.

У випадку Гаусового розподілу питома густина енергії, що поглинута $q_A(x)$ визначається за формулою:

$$q_A(x) = \frac{Q_{\text{погл}}}{F\tau} = q_0 \exp\left(\frac{-x^2}{r^2}\right), \quad (2.14)$$

то розв'язок наведеного рівняння теплопровідності (2.9) має наступний

ВИГЛЯД:

$$t(x, y, \tau) = \frac{q_{\max} r^2}{\lambda} \left(\frac{a}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \int_0^{\tau} \frac{P(\tau - \tau') \partial \tau'}{\sqrt{\tau'} (4a\tau' + r^2)} \exp \left[\frac{z^2}{4a\tau} - \frac{x^2}{4a\tau'} \right] , \quad (2.15)$$

де q_0 – густина потужності випромінювання лазера у центрі плями фокусування;

r – радіус Гаусового пучка променів;

q_{\max} – максимальна густина випромінювання у центрі плями (пучка);

$P(\tau)$ – потужність лазерного випромінювання ($P = q / q_{\max}$) за час τ ;

t – температура як функція глибини z , що вираховується від поверхні, радіальної віддалі x від центру теплового джерела і часу τ з моменту початкової дії теплового імпульсу лазера;

$h_\lambda (h_\lambda = \sqrt{4a\tau})$ – глибина входження променів в товщину матеріалу, м.

При дії лазерного випромінювання матеріал з дерева глибина різання залежить від наступних параметрів:

- потужності самого лазерного випромінювача,
- часу дії на матеріал.

З іншої сторони потужність лазерного випромінювання можна визначити наступною формулою [25]:

$$P = \frac{h \pi r r_f \rho V_p (cT_g + L_g)}{2} , \quad (2.16)$$

де h - потужність випромінювання, м;

V_p - швидкість різання, мм/с;

r_f - радіус фокусування, мм;

ρ - густина речовини, кг/м³;

T_g - температура випаровування матеріалу, що розкроюється, °С;

3 РОЗРОБКА ТА КОНСТРУЮВАННЯ УСТАНОВКИ ДЛЯ ЛАЗЕРНОГО РІЗАННЯ МАТЕРІАЛІВ

3.1 Обґрунтування вибору програмного середовища для розробки установки

Сучасні технології висувають вимогу до модернізації та оптимізації технологічних машин і комплексів. Вирішення цієї задачі значно спрощують сучасні потужні CAD/CAE/CAM програми, які дозволяють комплексно розв'язувати складні науково-інженерні завдання, зокрема структурно-параметричний синтез, оптимізацію, статичний та динамічний аналіз [26]. Основною перевагою таких програм є можливість проведення комп'ютерних експериментів і моделювання реальних умов експлуатації технологічних машин, механізмів та деталей. CAD/CAE/CAM системи значно спрощують науково-технічні розрахунки, які виконуються на початкових етапах проектування за допомогою спеціалізованих модулів. Наприклад, такі програми, як Ansys та Cosmos, інтегрують метод скінченних елементів для виконання складних статичних і динамічних розрахунків, дозволяючи вносити оптимізаційні зміни в конструкцію механічних систем [26].

До появи CAD/CAE/CAM програм процес створення 3D-моделей, ізометричного зображення деталей та механізмів був трудомістким і складним. Сучасні програми значно полегшують ці завдання, але також ставлять нові виклики, зокрема точність моделювання реальних умов роботи об'єкта. У процесі аналізу великих обсягів даних, отриманих під час проектування, застосовуються інтегральні критерії для оцінки технічних рішень. Широта розв'язуваних питань залежить від об'єкта моделювання: чи то ціла технологічна машина, її модуль, чи окрема деталь.

Однією з відомих CAD/CAE/CAM програм є SolidWorks, розроблена компанією SolidWorks Corporation (нині дочірня компанія Dassault Systèmes).

SolidWorks є центральним компонентом інтегрованого комплексу автоматизації технологічного підприємства, підтримуючи концепцію CALS-технологій на всіх етапах життєвого циклу виробу. Програма, створена у 1993 році, стала конкурентом таких продуктів, як Solid Edge, AutoCAD, Autodesk Mechanical Desktop, SDRC I-DEAS і Pro/ENGINEER [26].

3.2 Конструювання механічної складової пристрою для лазерного різання

З використанням програми SolidWorks було спроектовано всі вузли установки для лазерного різання полімерних матеріалів. Створену конструкцію рами та деяких основних вузлів наведено на рис.3.1 – 3.3 (аркуш [МРМА24.00.00.000ДІ6]).

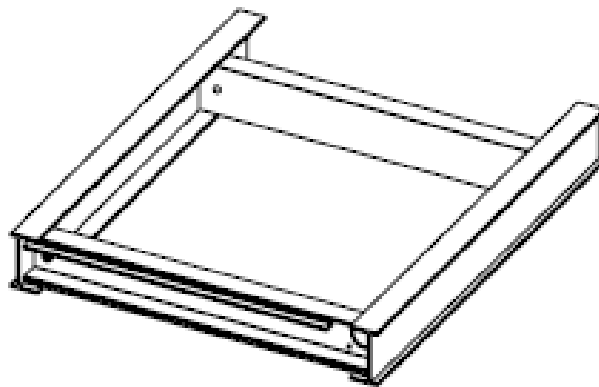


Рисунок 3.1 – Рама установки для лазерного різання матеріалів

Раму установки було виготовлено із алюмінієвого профілю.

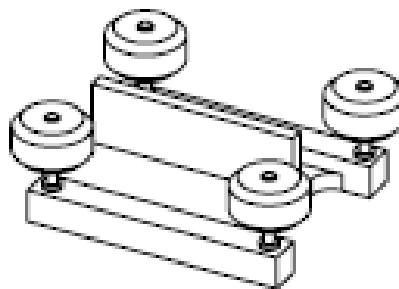


Рисунок 3.2 – Вузол напрямних роликів

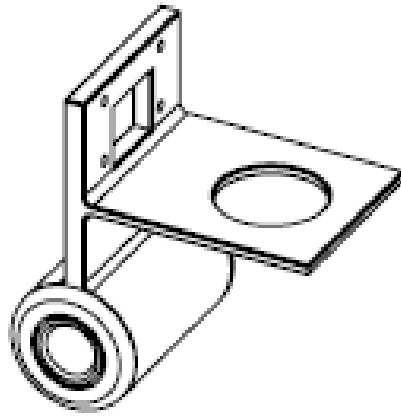
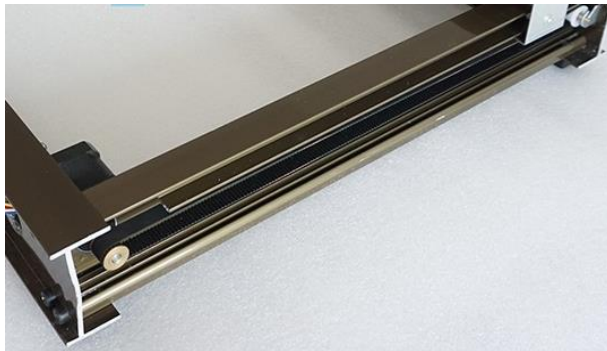
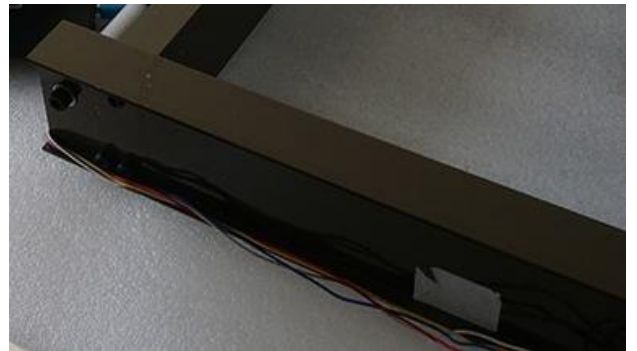


Рисунок 3.3 – Вузол кріплення крокового електродвигуна

Виготовлена конструкція рами та деяких вузлів пристрою представлена на рис.3.4.



а



б

а – сполучення алюмінієвого профілю; б – профіль алюмінієвий

Рисунок 3.4 – Конструкція рами та деяких вузлів установки:

3.3 Підбір ключових компонентів для пристрою лазерного різання

3.3.1 Вибір лазерної головки

3.3.1.1 Загальні відомості

Лазер (англ. Laser, акронім від light amplification by stimulated emission of

3.3.1.2 Технічні характеристики лазерної головки

В якості різучого елементу в установці, що розробляється вибрано лазерну головку зі слідуючими технічними характеристиками [27].

Технічні характеристики лазерної головки: довжина хвилі 450 нм; частота модуляції до 25 кГц; вихідна потужність 24,7 Вт; робоча напруга DC=12 В; напруга живлення постійна; робочий струм I=3А; робоча температура від -10 до 40 °С; час прогрівання відсутній; габаритні розміри ширина 33 мм, довжина 53 мм, висота 33 мм.

Загальний вигляд лазерної головки представлено на рис.3.5 (лист [МРМА24.00.00.000ДІ2]).

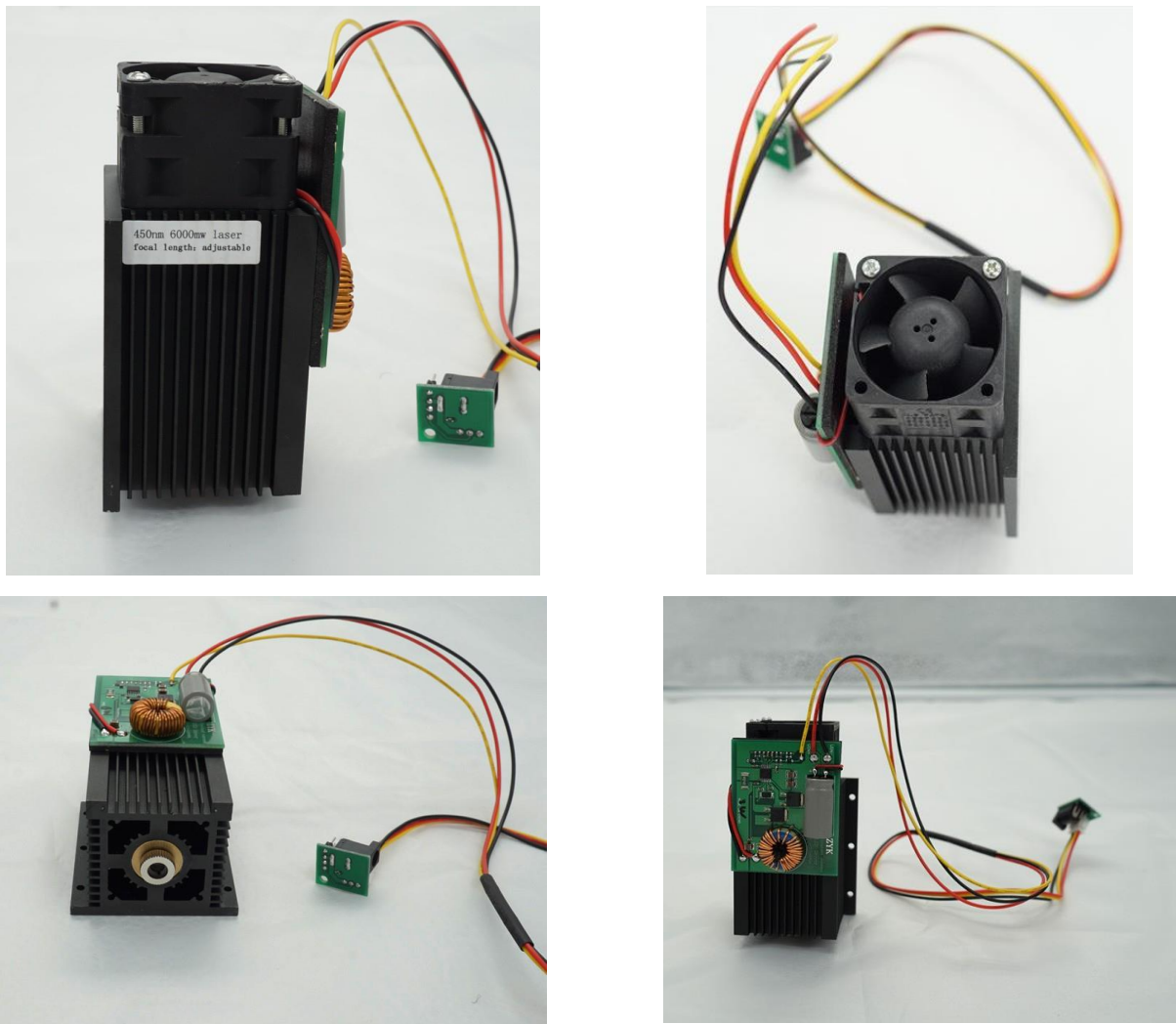


Рисунок 3.5 – Загальний вигляд лазерної головки [27]

3.3.1.3 Схема підключення лазерної головки

На рис.3.6 (аркуш [МРМА24.00.00.000Е2]) показано схему під'єднання блоку живлення до зазначеної головки.

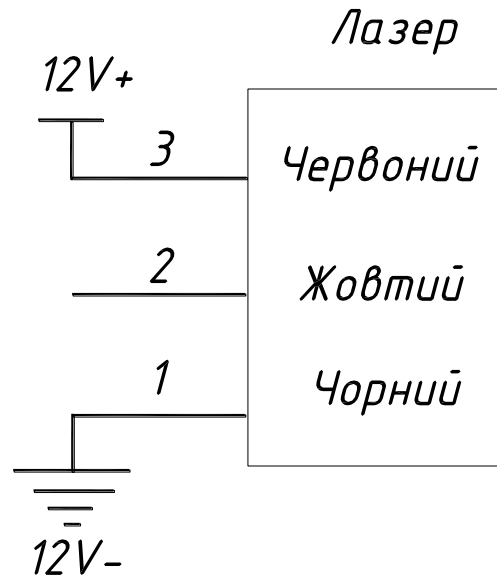


Рисунок 3.6 – Схема під'єднання блоку живлення до вибраної лазерної головки

На рис.3.7 наведено електричну схему під'єднання лазерної головки до мікроконтролера.

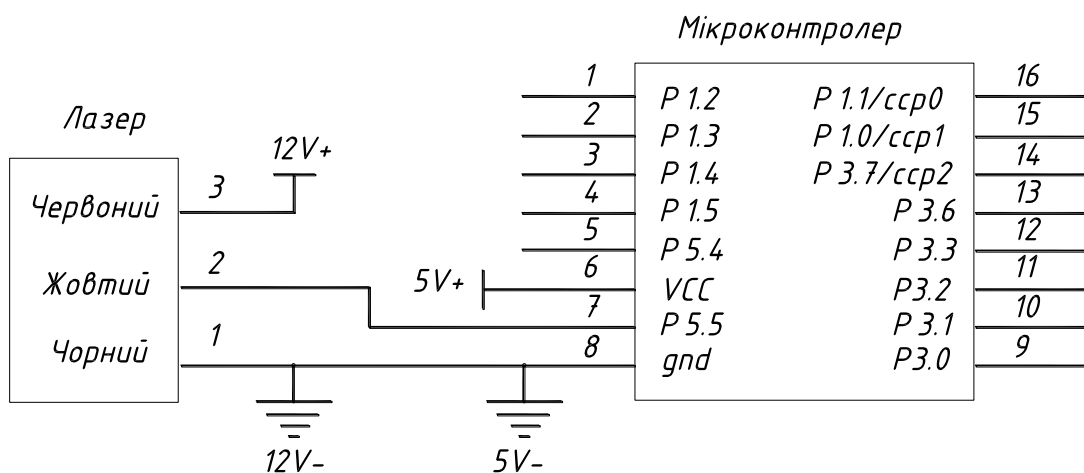


Рисунок 3.7 – Електрична схема під'єднання лазерної головки до мікроконтролера

3.3.2 Вибір крокових електродвигунів приводу

3.3.2.1 Загальні відомості про крокові електродвигуни

Кроковий двигун (КД) - це електромеханічний пристрій, що перетворює електроімпульси в дискретні механічні переміщення [28, 29]. Його використовують в промисловому обладнанні, офісній техніці (принтерах, факсах, дисководах) та інших сферах. КД забезпечує точне позиціонування без зворотного зв'язку, швидкий запуск, зупинку та реверсування. Точність руху досягає 3-4% величини кроку без накопичення похибки.

Переваги КД [28, 29]:

- надійність через вибір графітних щиток;
- можливість роботи без зворотного зв'язку;
- швидке реверсування та зупинка;
- прецизійна повторюваність і точність руху.

Недоліки КД [28, 29]:

- резонансні явища;
- втрата контролю положення;
- низька продуктивність на високих швидкостях;
- високе енергоспоживання навіть без навантаження;
- складність ремонту через складну схему управління.

Принципи роботи [28, 29].

Системи управління з розімкненим ланцюгом забезпечують керування частотою обертання без використання складного контуру зворотного зв'язку. Однак це викликає нестабільність повороту ротора та коливання, що зменшує точність руху.

Конфігурація системи.

КД працює через поетапне поєднання обмоток. У кожен момент часу активна лише одна з фаз (А, В, С). Управління здійснюється через логічний

ланцюг і транзисторний інвертор, який регулює струм для відновлення фази.

Крок і інкремент [28, 29].

Крок - це мінімальне переміщення ротора за один імпульс. Інкремент - кілька кроків, що дозволяє забезпечити плавніший рух і зменшити вібрації. Для зменшення кількості використовуються додаткові електронні пристрої.

Управління КД.

Дані з пам'яті передаються до контролера, що генерує імпульси для руху.

Особливості використання:

- маленький кут кроку. Чим менший кут, тим більша частота обертання та точність руху;

- крокове число. Визначає кількість обертів на один крок, важливе для проектування.

Крокові двигуни широко застосовуються в промислових і побутових пристроях завдяки їх надійності, точності та простоті управління, хоча їх ефективність знижується на високих швидкостях.

3.3.2.2 Вибір крокового електродвигуна для пристрою

Для двох координатного переміщення лазерної головки в установці використано 2 крокові електродвигуни моделі 17HW3448N-21AD [30]. Загальний вигляд цього електродвигуна показано на рис.3.8.



Рисунок 3.8 - Загальний вигляд крокового електродвигуна

Зм.	Арк	№ док.ум.	Підпи	Дата

Технічні характеристики крокового електричного двигуна марки 17HW3448N-21AD представлено в табл.3.1 [30].

Таблиця 3.1 - Технічні характеристики крокового електричного двигуна марки 17HW3448N-21AD

№ п/п	Технічна характеристика	Розмірність	Величина
1	Кут кроку	град.	0,9
2	Довжина електродвигуна	мм	34
3	Номінальний струм	А	0,48
4	Фазовий опір	Ом	20
5	Фазова індуктивність	мГн	25
6	Момент крутний	Н см макс	0,8
7	Момент утримуючий	Н см мін	25
8	Маса	гр.	450

3.3.3 Вибір плати керування основними елементами установки

Вибір плати керування є ключовим етапом розробки установки для різання матеріалів. Після аналізу літературних джерел було обрано плату Arduino як основу для керування виконавчими механізмами.

Arduino - це компактний електронний пристрій на базі друкованої плати, який може керувати датчиками, електродвигунами, освітленням та обмінюватися даними [31]. Arduino є цілим сімейством пристроїв різних розмірів і функцій, а також включає численні клони й сумісні пристрої.

Основою Arduino є мікроконтролер сімейства Atmega (рис. 3.9), що поєднує мікропроцесор, пам'ять та периферійні пристрої на одній мікросхемі. Це однокристальний мікрокомп'ютер, здатний виконувати прості завдання.

Наприклад, Arduino UNO та Arduino Nano оснащені однаковими мікроконтролерами, але різняться за розмірами.



Рисунок 3.9 – Мікроконтролер сімейства Atmega 328

Електричні виводи Arduino, розташовані по периметру плати, виконують функцію «рук» пристрою. Їх кількість залежить від моделі: Arduino Mega має понад 70 виводів, тоді як Arduino Pro Mini — лише 22 (рис. 3.10) [31].

Arduino забезпечує широкий спектр можливостей для керування виконавчими механізмами, завдяки чому є популярним вибором для багатьох інженерних проектів.

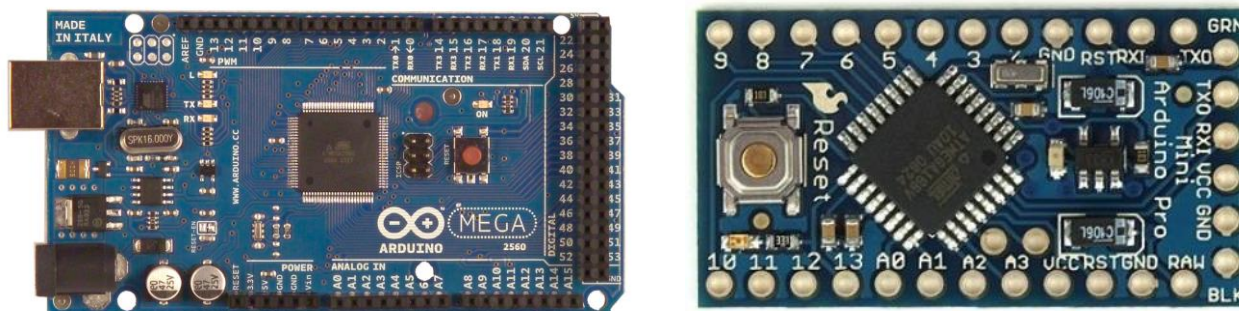


Рисунок 3.10 – Загальний вигляд Arduino Mega (а) і Arduino Pro Mini (б)

Цифрові та аналогові виводи [31].

Виводи Arduino поділяються на цифрові та аналогові. Основна різниця між ними полягає у значеннях сигналу: цифрові виводи мають два стани - логічна «1» (TRUE, 3–5 В) або логічний «0» (FALSE, 0–1,5 В), тоді як аналогові дозволяють отримувати проміжні значення між 1 і 0.

Для прикладу, підключивши світлодіод до цифрового виводу і подавши «1», він засяє на максимальній яскравості, а при подачі «0» - згасне. Аналогові

виводи дозволяють плавно регулювати яскравість світлодіода, а також працювати з аналоговими датчиками.

Можливості Arduino [31].

Arduino має достатньо «рук», щоб керувати різноманітними периферійними пристроями, включаючи кнопки, світлодіоди, мікрофони, динаміки, електродвигуни, сервоприводи, дисплеї, RFID і NFC зчитувачі, Bluetooth, WiFi модулі та інше. Також можна підключати датчики освітленості, магнітного поля, температури, вологості, гіроскопи тощо.

Це робить Arduino універсальним ядром для створення інноваційних рішень - від годівниць для домашніх тварин до автоматизованого управління освітленням чи вікнами.

Спілкування з Arduino [31].

Щоб налаштувати Arduino, використовують спеціальну мову програмування, адаптовану для роботи з цим мікроконтролером. Завдяки простоті цієї мови, навіть новачок може швидко навчитися писати програми. Для полегшення роботи створено програмне середовище Arduino IDE, яке містить десятки готових прикладів програм.

Вибір плати керування

На основі аналізу існуючих схем обрано Arduino Pro Mini для керування пристроєм (рис. 3.10, б).

3.3.4 Вибір драйвера крокового двигуна

Двигун крокового типу.

Кроковий двигун - це електромеханічний пристрій, який перетворює електричні імпульси на дискретні механічні кутові переміщення (кроки) ротора [30]. Для певних режимів роботи двигун потребує спеціального драйвера, який встановлює режими, задає кути повороту і напрям руху.

Драйвер A4988 [32].

Для керування двигуном у даній установці використаний драйвер A4988 (рис. 3.11).

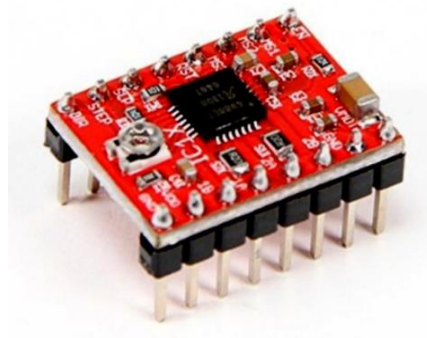


Рисунок 3.11 – Загальний вигляд драйвера A4988 для крокових двигунів

Переваги драйвера A4988 [32]:

- простота управління;
- можливість регулювання струму для використання двигунів з більш високою напругою (налаштування через потенціометр).

Підключення:

- виводи GND і VDD драйвера з'єднують із контактами мікроконтролера для логічного живлення;
- контакти DIR і STEP задають напрямок руху і крок відповідно;
- виводи 1A, 2A, 1B і 2B підключаються до ніжок двигуна;
- виводи GND і VMOT використовуються для живлення двигуна.

Характеристики драйвера A4988:

- модель A4988;
- напруга живлення 8–35 В;
- крок: максимальний – 1, мінімальний – 1/16;
- напруга логіки 3–5,5 В;
- захист від перегрівання;
- максимальний струм фази: 1 А (без радіатора), 2 А (з радіатором);
- габарити: плата – 2 × 1,5 см; драйвер – 2 × 1,5 × 1 см; радіатор – 9 × 5 × 9

мм;

- вага: з радіатором – 3 г, без радіатора – 2 г.

3.3.5 Виготовлення плати керування пристроєм

Використавши вибраний мікроконтролер Arduino Pro Mini, драйвери крокових двигунів, підібраний транзистор для включення/виключення лазера, роз'єми для підключення комп'ютера, блок живлення, двигуни та лазер, було змонтовано плату керування елементами установки, що розробляється. Ця плата показана на рис.3.12.

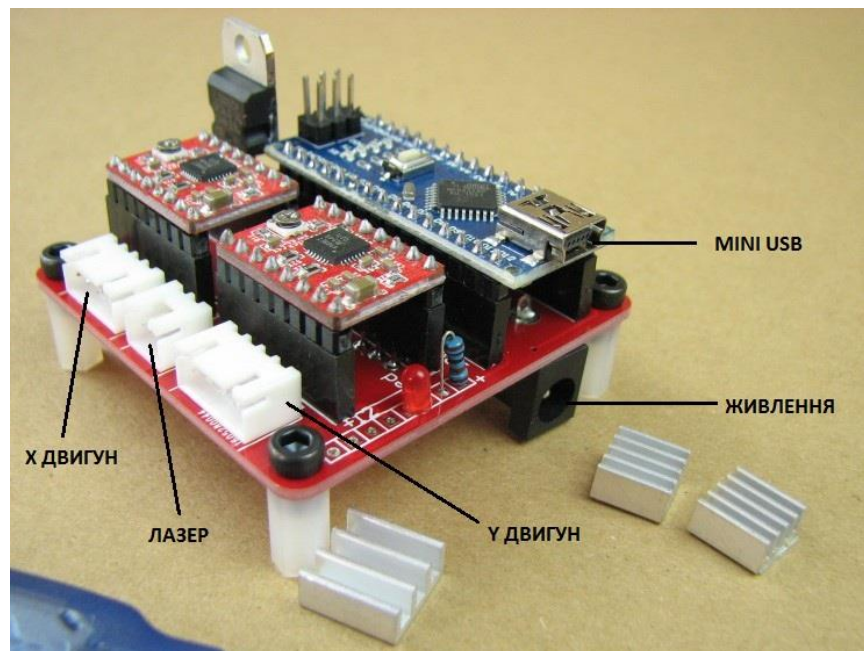


Рисунок 3.12 – Загальний вигляд плати керування установкою для різання матеріалів

3.4 Технічні характеристики та загальний вигляд установки для лазерного різання матеріалів

Спроектowana установка для лазерного різання полімерних матеріалів наведена на рис.3.13 (аркуш [МРМА24.00.00.000ГК]). Вона складається із рами,

яка виготовлена із алюмінієвого, механізму приводу лазерної головки за осями X і Y координаті, лазерної головки.

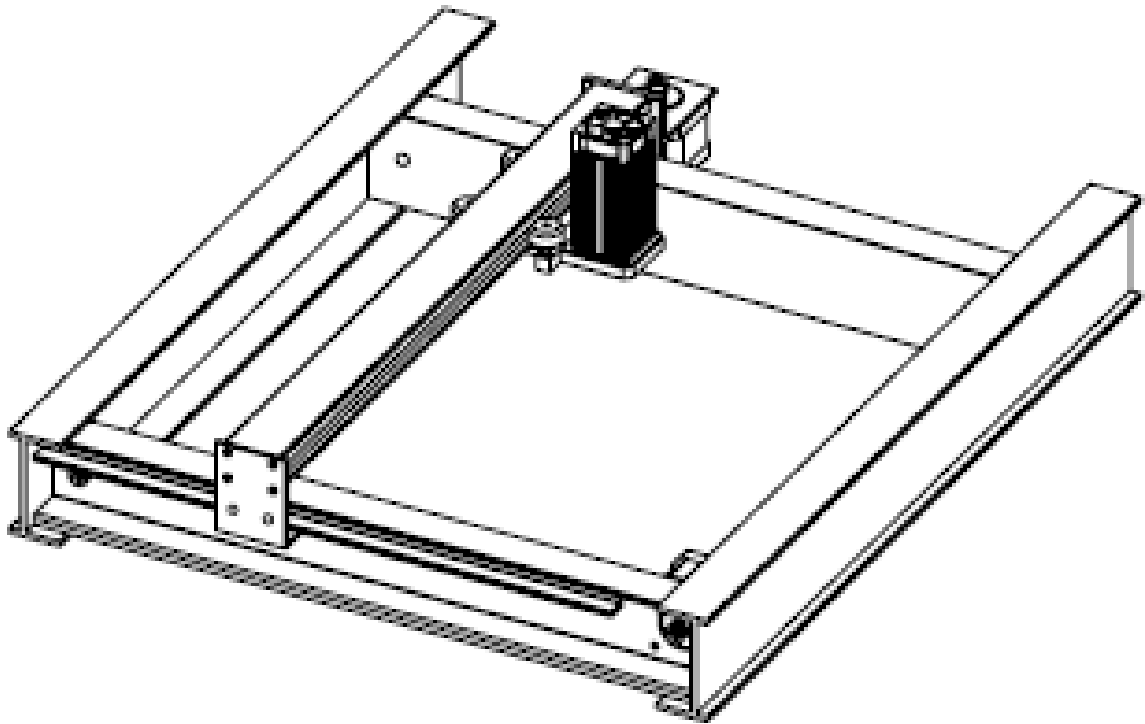


Рисунок 3.13 – Загальний вигляд установки для лазерної різки матеріалів

На рис.3.14 (аркуш [МРМА24.00.00.000ДІ3]) показано фото спроектованої установки для лазерного різання полімерних матеріалів із встановленою системою управління.

Технічні характеристики установки для лазерного різання полімерного матеріалу:

- діапазон оброблення 300x230мм;
- габаритні розміри 460x380x110мм;
- блок живлення з напругою 220V/12V;
- потужність лазера 24,7Вт;
- вага 4кг.

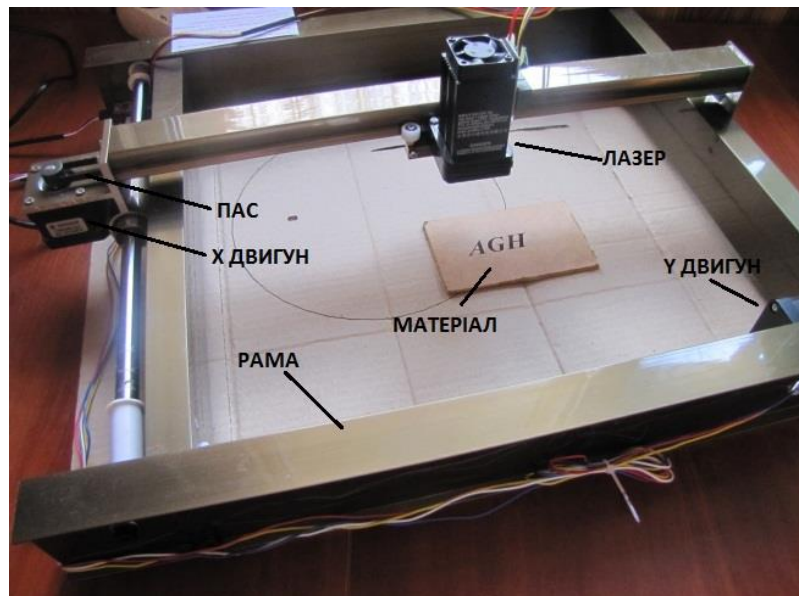


Рисунок 3.15 – Фото установки для лазерного різання полімерних матеріалів

3.5 Вибір засобів захисту для роботи з лазерним обладнанням

Для захисту очей від лазерного випромінювання застосовуються спеціальні захисні окуляри, які підбираються відповідно до типу лазера. Окуляри оснащені світлофільтром, що блокує випромінювання на довжині хвилі лазера, але пропускає максимальну кількість видимого світла. Зручність користування такими окулярами визначається параметром VLT (visible light transmission) [33].

Неправильний вибір окулярів, які не блокують випромінювання лазера, є однією з основних причин пошкодження очей. Ризик втрати зору залежить від оптичних властивостей людського ока. Світло в діапазоні 370–1400 нм може проникати в око, тоді як ультрафіолетове випромінювання (<350 нм) поглинається рогівкою, що може спричинити її руйнування або катаракту.

Сітківка ока сприймає світло в діапазоні 380–780 нм. Природні захисні механізми, як-от рефлекс моргання, ефективні при щільності випромінювання до 1 мВт. Якщо потужність перевищує цей поріг, енергія поглинається

сітківкою до того, як людина встигає моргнути, що може спричинити серйозні пошкодження.

На рис. 3.15 показано глибину проникнення електромагнітного випромінювання в людське око [33].

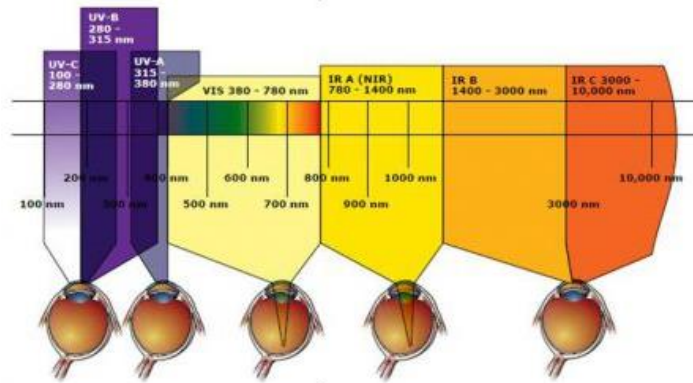


Рисунок 3.15 - Глибина проникнення електромагнітного випромінювання в око людини

Близький інфрачервоний діапазон (780–1400 нм) є найбільш небезпечним для людського ока, оскільки природного захисту від нього немає. Сітківка починає відчувати вплив лише після того, як шкоду вже завдано.

Інфрачервоне випромінювання в діапазоні 1400–11000 нм поглинається поверхнею ока, не досягаючи сітківки, але може призводити до перегрівання тканин і пошкодження рогівки при значно вищих потужностях, ніж ті, що небезпечні для сітківки.

Світлопропускання у видимому діапазоні визначається коефіцієнтом VLT (видима світлопроникність), який оцінюється за спектральною чутливістю ока до денного світла. Якщо VLT становить менше 20%, необхідно забезпечити додаткове освітлення на робочому місці. Інакше може виникнути нічне бачення, що обмежує кольорове сприйняття і зсуває чутливість очей до коротших хвиль.

Для захисту очей від лазерного випромінювання під час роботи були підібрані захисні окуляри з відповідними характеристиками (рис. 3.16).



Рисунок 3.16 – Захисні окуляри

Характеристики захисних окулярів: антилазерний колір – блакитний; колір лінз – зелений [33].

Функції та параметри - діапазон захисту по довжині хвилі - 200–450 нм / 800–2000 нм; особливості захисту – поглинання; коефіцієнт пропускання видимого світла - > 55%; оптична щільність - > 5,0.

3.6 Підбір системи керування для роботи пристрою лазерного різання

Для керування пристроєм лазерного різання матеріалів обрано ноутбук (рис. 3.17).



Рисунок 3.17 – Загальний вигляд ноутбука

Ноутбук (англ. Notebook або Laptop) - портативний персональний

тепловідводом із процесором. Через це ноутбук слід використовувати лише на твердій поверхні.

Процесор ноутбука зовнішньо схожий на звичайний, але має технології, що знижують енергоспоживання й тепловиділення, наприклад, Centrino.

Жорсткий диск ноутбука (2,5 дюйма) за обсягом не поступається стаціонарним, використовуючи інтерфейс SATA, а в старих моделях — IDE. Останнім часом поширюються твердотілі накопичувачі (SSD) на основі flash-пам'яті [35].

3.7 Підбір програмного забезпечення для керування операцією лазерного різання матеріалів

Для управління операцією лазерного різання полімерних матеріалів було застосовано програмне середовище gcode cut. Лицьова панель програми наведена на рис.3.18 (аркуш [МРМА24.00.00.000ДІ4]).

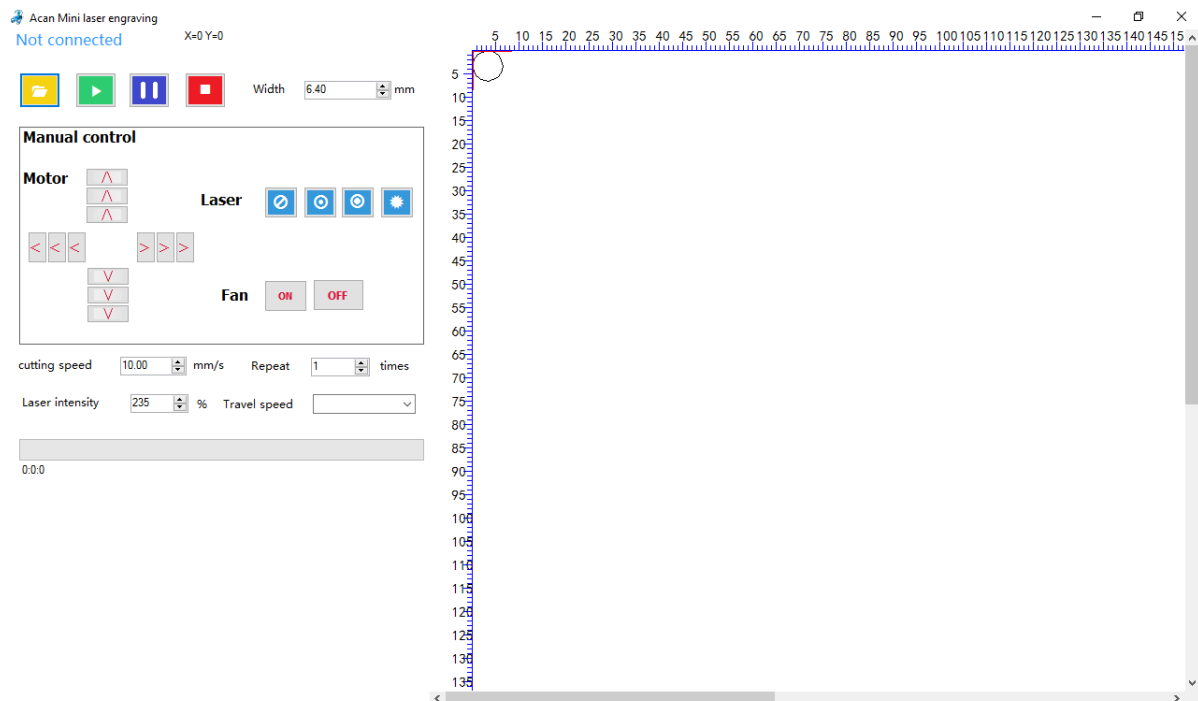


Рисунок 3.18 – Лицьова панель програми gcode cut

4 ДОСЛІДЖЕННЯ ЛАЗЕРНОГО РІЗАННЯ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ

4.1 Обґрунтування вибору устаткування та матеріалів для експерименту

4.1.1 Склад експериментальної установки

Експериментальна установка включає в себе: лазерний пристрій, комп'ютер з програмним забезпеченням (рис.4.1) (аркуш [МРМА24.00.00.000ДІЗ]), електронний штангенциркуль ЦІ 0-150 (ціна поділки 0,01 мм) (рис.4.2) [35], набір щупів, поверхневий вологомір Hydro CONTROL (рис.4.3), ваги САРТО ГОСМ СЕ623-С (рис.4.4).

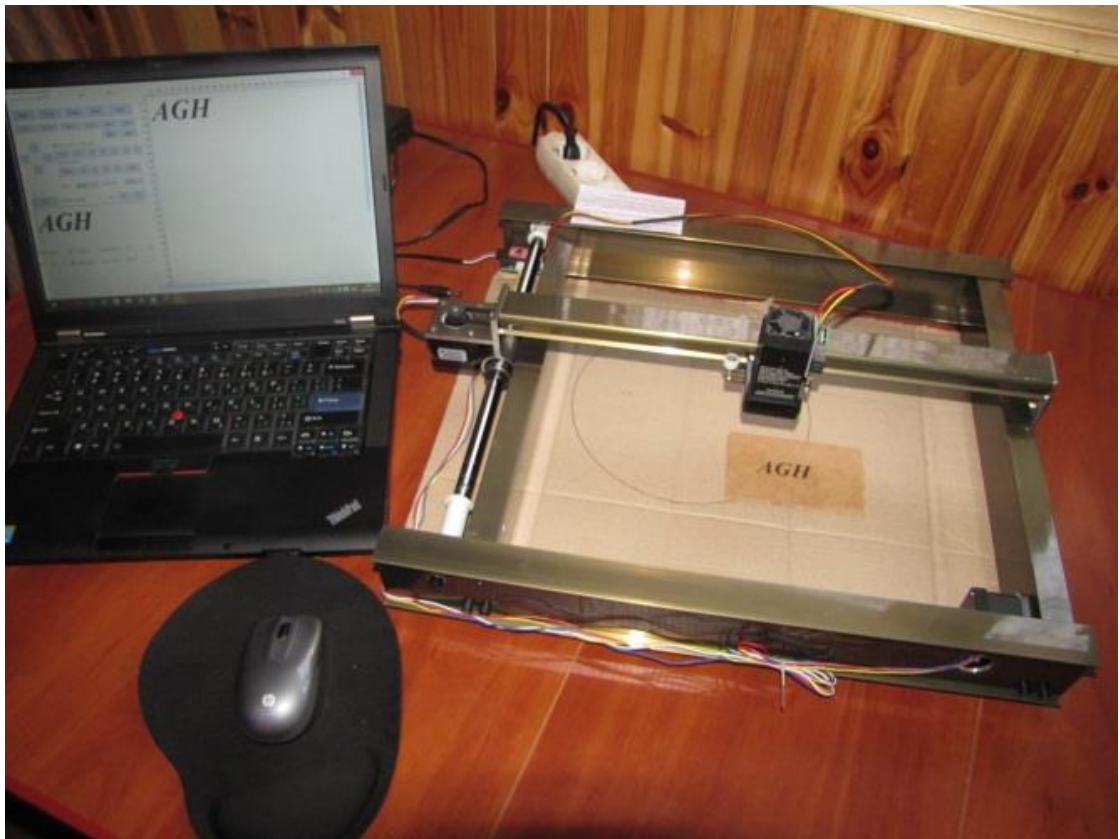


Рисунок 4.1 – Комп'ютер з програмним забезпеченням підключений до пристрою для лазерного різання



Рисунок 4.2 - Штангенциркуль ЦІ 0-150мм/0,01мм Енкор 10740

Товщина заготовки полімерного матеріалу визначалася електронним штангенциркулем ЦІ 0-150 мм з ціною поділки 0,01 та цифровим індикатором «Енкор». Швидкість руху лазерної головки визначалася і контролювалася за допомогою запропонованого програмного забезпечення, глибина різку вимірювалася за допомогою набору щупів і штангенциркуля ЦІ 0-150 мм.



Рисунок 4.3 - Вологомір HYDRO CONDROL

Електронний штангенциркуль ЦІ 0-150.

Штангенциркуль ЦІ 0-150мм/0,01мм Енкор 10740 - це вимірювальний ручний інструмент з електронним дисплеєм для зчитування показів. Виріб має просте керування за допомогою кнопок і регулювальних гвинтів. Штангенциркуль має два типи губок для вимірювання зовнішніх і внутрішніх розмірів деталей та заготовок.

Зм.	Арк	№ док.ум.	Підпи	Дата

МРМА 24.00.00.000 ПЗ

Арк
65

Ваги серії СЕ надійні і прості в експлуатації, оснащені широким набором прикладних програм і незамінні: в лабораторіях, контролюючих організаціях, в фармацевтиці; в навчальних та дослідницьких проектах; у виробничому процесі.



Рисунок 4.4 - Ваги САРТО ГОСМ СЕ623-С

Ваги серії СЕ - надійні та прості в користуванні, підходять для лабораторій, фармацевтики, навчальних проєктів і виробництва.

Переваги:

- відповідають міжнародним стандартам якості;
- текстове меню українською мовою;
- інтерфейс RS-232C для підключення до ПК чи принтера;
- надійний захист від перевантажень;
- вбудована система контролю перевантаження при перевищенні НПВ на

9e.

Технічні характеристики [37]:

- НГЗ - 620 г;
- дискретність - 0,0001 г;
- внутрішнє калібрування (гиря не потрібна);
- розмір платформи - 115 мм;
- клас точності - II (високий).

Зм.	Арк	№ док.ум.	Підпи	Дата

МРМА 24.00.00.000 ПЗ

Арк
67

4.1.2 Підготовка зразків матеріалу для досліджень

4.1.2.1 Загальні відомості про полімерні матеріали та полімерні композити

Полімерні матеріали та композити завдяки різноманітним властивостям займають важливе місце в техніці, з постійним зростанням обсягів споживання. Армовані полімери (ПКМ) поєднують високу міцність волокон із низькою густиною, перевершуючи металеві матеріали. Їх властивості залежать від орієнтації волокон у матриці, що визначає анізотропію механічних характеристик [38].

Головним елементом ПКМ є односпрямований шар із волокон, стрічок чи порожнин. Види ПКМ включають вуглепластик, склопластик і органопластик. Основні галузі застосування - аерокосмічна, автомобільна промисловості, товари масового споживання.

Неармовані полімери - це високомолекулярні речовини з природним (целюлоза, каучук) чи штучним (поліетилен, поліаміди) походженням. Додатки (наприклад, барвники, стабілізатори) надають матеріалам потрібні властивості.

Фізико-механічні характеристики, такі як теплостійкість і міцність, залежать від молекулярної будови, взаємодії макромолекул і їхньої хімічної структури. Введення певних груп підвищує міцність і теплостійкість за рахунок кулонівських сил.

Полімери поділяються на карбо- і гетероланцюгові, залежно від складу основного ланцюга. Вони також класифікуються на кристалічні, з упорядкованою структурою, та аморфні, де порядок зберігається на малих відстанях.

При нагріванні полімери поділяються на термопластичні (зберігають властивості при нагріванні й охолодженні) та термореактивні (втрачають здатність плавитися через утворення просторової структури). Поширені матеріали: поліолефіни (поліетилен), хлоровмісні полімери (ПВХ), акрилові

						МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк 68
Зм.	Арк	№ доквм.	Підпи	Дата			

пластики (ПММА), поліаміди (капрон), поліефіри (ПЕТ), фторопласти (Ф-4).

4.1.2.2 Полімерні матеріали в легкій промисловості

Використання полімерів у легкій промисловості є доцільним насамперед через можливість зниження вартості продукції. Одночасно покращуються ключові техніко-економічні показники обладнання: зменшується маса, підвищується довговічність, надійність та інші характеристики.

З полімерних матеріалів виготовляють широкий спектр деталей і вузлів машин, а також технологічне оснащення різного призначення, зокрема: зубчасті й черв'ячні колеса, шківи, маховики, рукоятки, кнопки, підшипники ковзання, труби, корпуси, кришки тощо.

4.1.2.3 Полімерні матеріали для виготовлення одягу та взуття [39]

Хімічні волокна для матеріалів одягу та взуття включають.

Штучні волокна:

- віскозні (з целюлози),
- мідно-аміачні (з мідно-аміачного розчину),
- полінозні (модифіковані віскозні),
- ацетатні (з ацетилцелюлози),
- триацетатні (з триацетилцелюлози).

Синтетичні волокна:

- поліамідні (капрон, анід, енант),
- поліефірні (лавсан),
- поліакрилонітрильні (нітрон),
- полівінілхлоридні (хлорін),
- поліуретанові (спандекс).

На основі цих волокон створюють швейні та взуттєві матеріали з різними

площини було налаштоване на верхню поверхню (рис.4.6) і на протязі проведення експерименту не змінювалося. Всі різні були зроблені поперек волокон полімеру при одному напрямі руху лазерної головки.

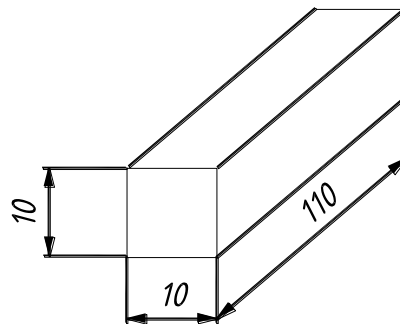
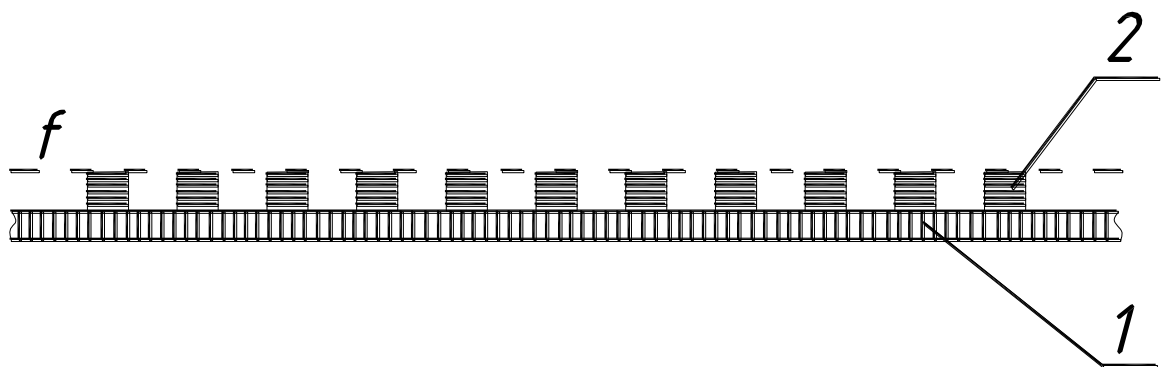


Рисунок 4.5 – Розміри зразка



1-пористий стіл лазерного пристрою, 2 - зразки поліуретану

Рисунок 4.6 - Положення на фокальній площині

4.2 Розробка методики дослідження процесу лазерного різання полімерів

Було виконано 750 різів з різними швидкісно - потужністними режимами. Кожен режим був реалізований 30 разів. В ході виконання експерименту швидкість поступово змінювалася і становила: 10, 12, 18, 41, 90 мм/с. Потужність лазерного джерела в ході здійснення експерименту змінювалася поступово і відповідала: 55, 63, 79, 92, 100 % від потужності максимальної пристрою, що становить 24,7 Вт.

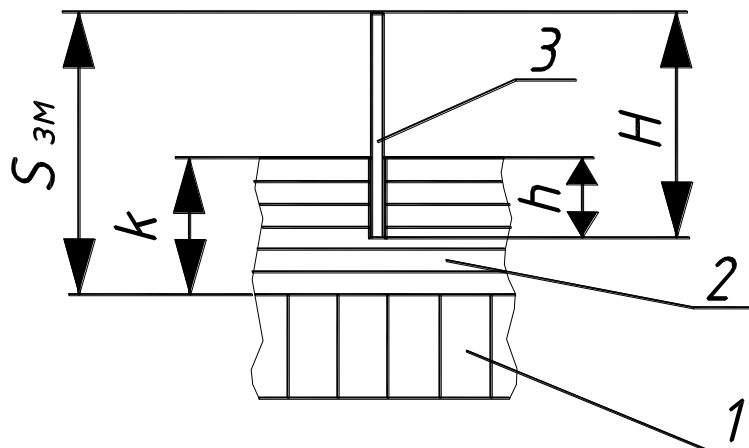
Обґрунтування зазначеного діапазону потужностей показано в технічній

літературі [40]. Кожному із п'яти значень потужності лазерного джерела відповідали п'ять значень швидкості.

Вимірювання глибини різку зразків проводилося з використанням щупа і штангенциркуля. В отриманому різі, глибиною h , розміщався щуп висотою H як наведено на рис.4.7 (аркуш [МРМА24.00.000ДІ5]) і штангенциркулем вимірювалася відстань $S_{зм}$ від верхньої поверхні зразків поліуретану до верхньої поверхні щупа, а також висота зразків даного матеріалу.

Обчислення глибини різку зразків проводилося за наступною формулою:

$$h = (k + H) - S_{зм} . \quad (4.1)$$



1-пористий стіл лазерного пристрою; 2-матеріал; 3-щуп

Рисунок 4.7 – Схема вимірювання глибини різку матеріалу:

4.3 Розробка плану досліджень лазерного різання матеріалів [41]

Виходячи з того, що глибина різання залежить обернено пропорційно від швидкості різання, що є незручним для побудови регресійної моделі, було вирішено використовувати іншу величину - час впливу лазерного променя на полімерний матеріал, який безпосередньо залежить від самої швидкості (аркуш [МРМА24.00.00.000РР2]).

Постійними факторами є: вологість зразка матеріалу поліуретан 3-5%, маса і густина зразків (аркуш [МРМА24.00.000РР2]).

Змінними факторами є:

- час впливу лазерного променя на полімерний матеріал, який варіюється від $2,2 \leq t \leq 20$ мс;

- потужність лазерного випромінювання, яке варіюється від $54 \leq P \leq 100\%$.

Вхідними факторами є:

- час впливу лазерного променя на полімерний матеріал;

- потужність лазерного випромінювання.

Вихідним чинником є глибина різання.

Оціночним показником є глибина різу. Пропонована величина зміни лежить в діапазоні від $0 \leq y \leq 5$ мм.

Визначення верхнього, нижнього і основного рівнів факторів в натуральних і нормалізованих позначеннях і інтервали їх варіювання показані в табл. 4.1 і 4.2.

Таблиця 4.1 – Рівні і інтервали варіювання змінних факторів

Фактори	Крок варіювання	Рівні варіювання факторів		
		Нижній	Основний	Верхній
Потужність лазерного випромінювання (X1), %	23	54	77	100
	1	-1	0	+1
Час дії лазерного променя (X2), %	8,888	2,222	11,111	20
	1	-1	0	+1

За результатами проведених експериментальних досліджень глибини різання залежно від потужності і часу впливу лазерного випромінювання на зразок було складено таблицю 4.3.

Таблиця 4.2 – Робоча матриця планування ПФЕ 2^k (по плану Коно)

Номер досліджу	Натуральні значення факторів		Кодовані значення факторів		Значення вихідної величини
	P=X1, Вт	t=X2, мс	X1	X2	
1	24,7	20	1	1	Y ₁
2	13,65	20	-1	1	Y ₂
3	24,7	2,(2)	1	-1	Y ₃
4	13,65	2,(2)	-1	-1	Y ₄
5	24,7	11,(1)	1	0	Y ₅
6	13,65	11,(1)	-1	0	Y ₆
7	19,5	20	0	1	Y ₇
8	19,5	2,(2)	0	-1	Y ₈
9	19,5	11,(1)	0	0	Y ₉

Таблиця 4.3 - Результати експериментальних досліджень глибини різання залежно від потужності і часу впливу лазерного випромінювання

Номер досліджу	Натуральні значення факторів		Кодовані значення факторів		Значення вихідної величини
	P=X1, Вт	t=X2, мс	X1	X2	
1	2	3	4	5	6

Продовження табл.4.3.

1	2	3	4	5	6
1	24,7	20	1	1	1,66676
2	13,65	20	-1	1	0,45235
3	24,7	2,(2)	1	-1	0,29176
4	13,65	2,(2)	-1	-1	0,04735
5	24,7	11,(1)	1	0	1,15029
6	13,65	11,(1)	-1	0	0,20971
7	19,5	20	0	1	1,35735
8	19,5	2,(2)	0	-1	0,23324
9	19,5	11,(1)	0	0	0,95293

Для отримання рівняння регресії (побудови математичної моделі) глибини лазерного різання поліуретану залежно від потужності і часу впливу лазерного випромінювання було визначено коефіцієнти b_0 , b_1 , b_2 , b_{11} , b_{22} , b_{12} . Відповідно вони склали: $b_0 = 0,912$; $b_1 = 0,4$; $b_2 = 0,484$; $b_{11} = -0,211$; $b_{22} = -0,96$; $b_{12} = 0,243$.

Методом підстановки було отримано експериментальним шляхом рівняння регресії за розрахунком глибини лазерного різання заготовки з поліуретану на лазерній установці і представлено у вигляді математичної моделі в кодованому вигляді [42]:

$$y = 0,912 + 0,4x_1 + 0,484x_2 - 0,211x_1^2 - 0,96x_2^2 + 0,243x_1x_2 \quad (4.2)$$

Як видно з рівняння (4.2) найбільший вплив на вихідну величину (глибину) оказує час впливу лазерного випромінювання на полімерний матеріал (фактор x_2), що має найбільше значення коефіцієнта. Це можливо пов'язано з тим, що при збільшенні часу посилюються екзотермічні реакції окислення

матеріалу. При збільшенні потужності лазерного випромінювання (x_1) значення глибини зростає, що і очікувалося. Відповідно:

$$y = 0,912 + 0,4 \frac{\tilde{x}_1 - 19,5}{5,2} + 0,484 \frac{\tilde{x}_2 - 11,(1)}{8,(8)} - 0,211 \left(\frac{\tilde{x}_1 - 19,5}{5,2} \right)^2 - 0,96 \left(\frac{\tilde{x}_1 - 11,(1)}{8,(8)} \right)^2 + 0,243 \frac{\tilde{x}_1 - 19,5}{5,2} \frac{\tilde{x}_2 - 11,(1)}{8,(8)} \quad (4.3)$$

Співвідношення часу впливу (мс) до швидкості переміщення лазерного променя було знайдено за формулою:

$$t = \frac{-0,2 \times 1000}{V} \quad (4.4)$$

де 0,2 мм - діаметр лазерної плями на матеріалі;

V - швидкість переміщення лазерного променя;

1000 - перевідний коефіцієнт, що переводить в мс.

В результаті методом спрощення математична модель приймає наступний вигляд:

$$H = -3,171 + 0,323P - \frac{4,213}{V} - 0,0078P^2 - \frac{48,6}{V^2} + \frac{1,051}{V}, \quad (4.5)$$

де H - глибина різку, мм;

P - потужність лазерного випромінювача, Вт;

V - швидкість переміщення лазерного променя, мм/с.

Отримана експериментальна формула 4.5 є справедливою для знаходження глибини лазерного різання зразка з поліуретану для розробленої

установки лазерного різання всередині інтервалу варіювання змінних факторів, що наведені в таблиці 4.1.

4.4 Отримані результати дослідження процесу лазерного різання полімерів

Використовуючи математичну модель (4.5) було побудовано залежності глибини різу H від швидкості переміщення лазерного променя V . Отримані залежності представлені на рис.4.8 (аркуш [МРМА24.00.00.000РР3]).

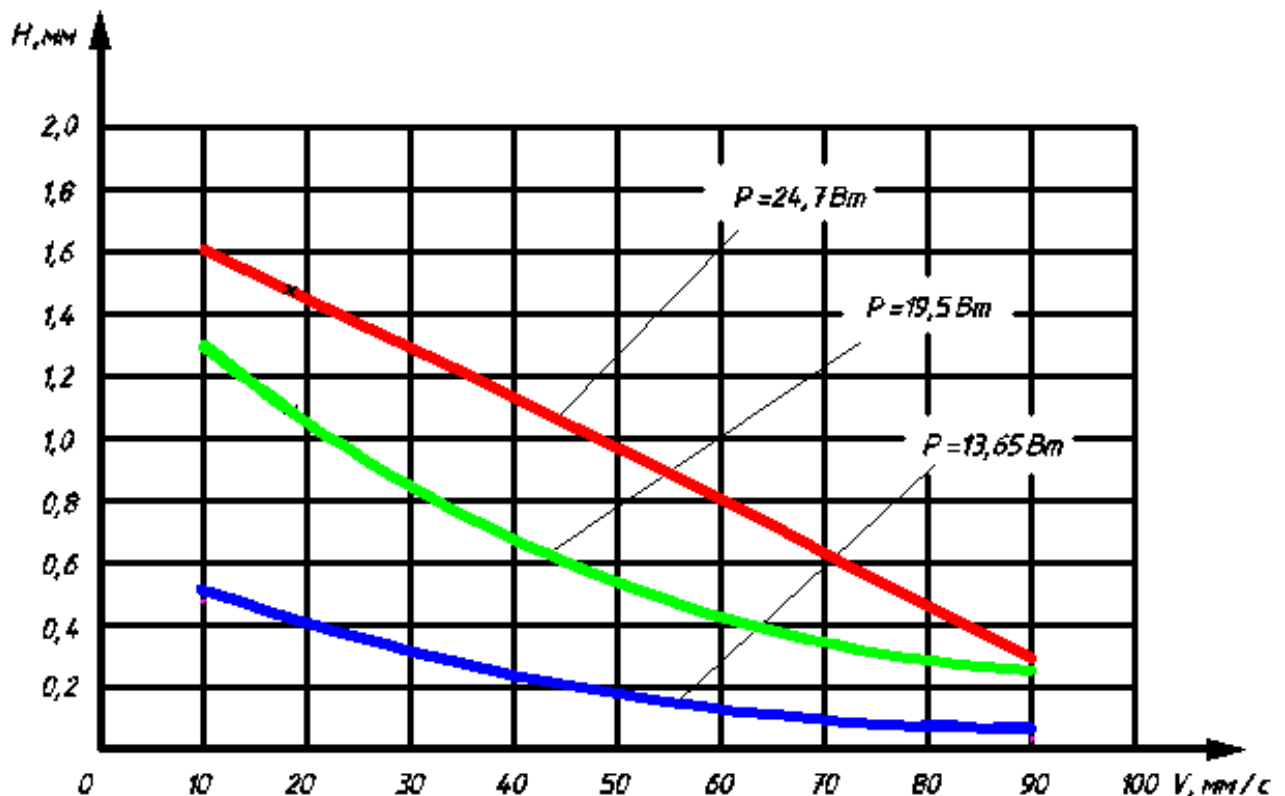


Рисунок 4.8 – Залежність глибини різу матеріалу H від швидкості переміщення лазерного променя V при різних значеннях потужності лазера P

Здійснений аналіз отриманих графіків показує, що при збільшенні потужності лазерного випромінювача та зменшенні швидкості переміщення лазерного променя глибина різу матеріалу збільшується.

ВИСНОВКИ

У першому розділі магістерської роботи проведено огляд і аналіз технологій лазерного різання матеріалів та відповідного обладнання. Представлено класифікацію способів розкрою в швейній промисловості, розглянуто фізико-хімічні методи обробки матеріалів у різних галузях, а також типи лазерів. Проаналізовано особливості лазерного різання полімерних матеріалів, зокрема їх переваги порівняно з іншими способами обробки. Обґрунтовано доцільність застосування твердотільного лазера для розроблюваної установки.

Другий розділ присвячено аналітичному дослідженню процесу лазерного різання матеріалів. На основі цього дослідження створено фізичну модель, що враховує енергетичний баланс у процесі різання. З цієї моделі виведено математичну залежність, яка пов'язує параметри лазерного пристрою з характеристиками матеріалу.

За допомогою програмного забезпечення SolidWorks було спроектовано основні вузли установки для лазерного різання і виготовлено його експериментальний зразок. Розроблено електричну схему, програмне забезпечення та схему керування установкою для виконання операцій лазерного різання.

Для проведення експериментальних досліджень було обрано необхідне обладнання, матеріали та розроблено методику виконання дослідів. Планування експерименту базувалося на регресійній моделі, де: постійні фактори - вологість, маса та густина зразка; змінні фактори - потужність лазерного випромінювання і час впливу; вихідний чинник - глибина різання.

У результаті експериментів отримано математичну модель, яка описує залежність глибини різання від потужності лазера та швидкості переміщення променя.

Згідно з отриманими даними, математична модель є справедливою для

прогнозування глибини різання поліуретану в межах заданих інтервалів параметрів роботи установки. Аналіз залежностей показав, що збільшення потужності лазерного випромінювання та зменшення швидкості переміщення променя сприяють збільшенню глибини різання полімерного матеріалу.

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк
Зм.	Арк	№ докум.	Підпи	Дата		80

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Смутко С.В., Мица В.В., Лісевич С.П., Неймак В.С. Удосконалення розкрійного устаткування швейних підприємств. Вісник Хмельницького національного університету, №4, 2018 (263). С. 121-123.

2. Як працює лазер: основні принципи та застосування [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.fizyka.ua/post/yak-pratsyuue-lazer-osnovni-pryntsyru-ta-zastosuvannya>.

3. Лазерні джерела випромінювання та їх застосування в мікроелектроніці. Навчальний посібник // О.К. Шуаїбов, І.І. Опачко, І.Е. Качер, М.П. Чучман, - Ужгород. Ужгородський національний університет, фізичний та інженерно-фізичний факультети. 2009. – 238 С.

4. Афанасьєва О.В., Лалазарова Н.О., Федоренко Є.П. Лазерна поверхнева обробка матеріалів / Афанасьєва О.В., Лалазарова Н.О., Федоренко Є.П. - Харків : ФОП Панов А.М., 2020. 100 с.

5. Березненко С.М. Основи технологій експериментального та підготовчо-розкрійного виробництва: навч. посіб. / С. М. Березненко, О. І. Водзінська, Л. Б. Білоцька та ін. - К. : КНУТД, 2017. - 171 с.

6. Капустенський П.Г., Манзюк Е.А., Поліщук О.С., Лісевич С.П. Механічна технологія та устаткування швейних виробництв. Лабораторний практикум для студ. Спец. «ОЛП». Частина 3. ХНУ, 2009. – 104 с.

7. Орловський Б.В. Технологічне обладнання галузі (швейне виробництво): навчальний посібник / Б.В. Орловський, Н.С. Абрінова. – К: КНУТД, 2013. – 285 с.

8. Фізико-хімічні методи обробки [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://stud.com.ua/36368/tovarovnavstvo/fiziko_himichni_metodi_obrobki#google_vignette.

9. Електромеханічні й електроерозійні методи обробки [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://vseosvita.ua/library/embed/0100fic6-7b85.docx.html>.

						МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк 81
Зм.	Арк	№ док.ум.	Підпи	Дата			

10. Електророзрядна обробка [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://buklib.net/books/36357/>.

11. Електрохімічні методи обробки [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://studfile.net/preview/8562676/page:2/>.

12. Ультразвукові методи механічної обробки [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://studfile.net/preview/8562676/page:2/>.

13. Променеві методи розмірної обробки [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://studfile.net/preview/8562676/page:3/>.

14. Світлопроменева (лазерна) обробка (спо) [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://studfile.net/preview/8562676/page:3/>.

15. Гідроструменева обробка матеріалів [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://studfile.net/preview/8562676/page:4/>.

16. Плазмова обробка матеріалів [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://studfile.net/preview/8562676/page:4/>.

17. Твердотільний лазер [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B2%D0%B5%D1%80%D0%B4%D0%BE%D1%82%D1%96%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%B8%D0%B9_%D0%B%D0%B0%D0%B7%D0%B5%D1%80.

18. Лазерні прилади та системи (конспект лекцій) [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://archer.chnu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/4004/konspekt_syst.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

19. Неодимові лазери [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://primelaser.com.ua/uk/products-category/neodimovi-lazeri/?srsltid=AfmBOorLboiV80_fEhSxt6_zFp7OjNyLRvwD28W-A-qO_vKbjHWcEuO-

20. Що таке лазер? [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://seltokphotonics.com/info/articles/shcho_take_lazer/?srsltid=AfmBOoqFshJbD2iPxdV_8AwcaolRYHkBYхо-cVR66b8KNeWPndzFYUic.

21. Лазерна різка та гравірування матеріалів [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://promdesign.ua/polnotsvetnaja-pechat/lazerna-rizka-ta-graviruvannya-materialiv?srsltid=AfmBOoqEFYqwcfV48aY79yVXnqmIqoveJhAAkiU7Vp0CguKwsxC6HVUQ>.

22. Лазерне різання полімерів. Реферат [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://i.twirpx.link/file/994564/>.

23. Плюси та мінуси лазерного різання [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://thegard.city/articles/352517/plyusi-ta-minusi-lazernogo-rizannya-metalu>.

24. Лазерна порізка [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.riznoriz.ua/services/lazerna-porizka-pinoplastu-estrudiyovanogo-pinopolistirolu-steroduru>.

25. Тимчик Г.С., Богатирьова Г.В., Мамута М.С. Лазерні технології. Практикум. Навчальний посібник. - К: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 124 с.

26. Лазер [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9B%D0%B0%D0%B7%D0%B5%D1%80>.

27. Лазерна головка для гравера [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://beegreen.com.ua/lazerna-golovka-55w-dlya-gravera-komplekt-19026>.

28. Способи управління покроковими двигунами [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://studfile.net/preview/7722569/>.

29. Регульований привід у механізмах пакувальних машин [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.svaltera.ua/solutions/typical/packing_equipment/6493.php.

30. K40-S Motors [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://donsthings.blogspot.com/2016/06/k40-s-motors.html>.

31. Сімейство Arduino Nano [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://evo.net.ua/simeistvo-arduino-nano/?srsltid=AfmBOopISeUAg-t-w4Cz788dOJXg9uLJW7UdVtbw4pQ3fLW7EfWZviLG>.

32. Драйвер крокового двигуна A4988 [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.rcscomponents.kiev.ua/product/draiver-krokovoho-dvyhuna>

ДОДАТОК А

					МРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпи	Дата		85