

Вінницький національний технічний університет
Факультет комп'ютерних систем управління і автоматики
Кафедра лазерної та оптикоелектронної техніки

Пояснювальна записка

до магістерської кваліфікаційної роботи
за освітньо-кваліфікаційним рівнем «магістр»

на тему:

МЕТОД І ЗАСІБ ЛАЗЕРНОЇ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ

Виконав: студент 2-го курсу, групи ЛТО-18м
ОКР підготовки магістр
спеціальності 152 – метрологія та інформаційно-
вимірювальна техніка
За освітньою програмою «Лазерна техніка та
оптоінформатика»
Габрук В. Г. _____

Керівник: к.т.н., проф. каф. ЛОТ
Тужанський С.Є. _____

«___» _____ 2019 р.

Рецензент: к.т.н., доцент каф. МПА
Маньковська В.С. _____

«___» _____ 2019 р.

ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет комп'ютерних систем і автоматики
Кафедра лазерної та оптикоелектронної техніки
Освітньо-кваліфікаційний рівень: магістр
Спеціальність 152 «Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка»
Освітня програма «Лазерна техніка та оптоінформатика»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ЛОТ
к.т.н., проф. Заболотна Н.І.
«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Габруку Василю Григоровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема магістерської кваліфікаційної роботи: Метод і засіб лазерної обробки металів

керівник проекту (роботи) Тужанський Станіслав Євгенович, к.т.н., доцент,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ВНТУ від «__» _____ року.

2. Строк подання студентом магістерської дипломної роботи: _____

3. Вихідні дані до магістерської дипломної роботи: _____

Розширити функціональні можливості технологічного лазера

Тип лазера – газовий, CO₂;

Накачування - електричний розряд;

Робоча довжина хвилі - 5,09 мкм, 5.4175 мкм або 6,541 мкм;

Резонатор - сферичний, багатшаровий діелектрик;

Потужність лазера - 50 Вт;

Функціональне призначення – різання металевих листів;

Система доставки випромінювання – фокуруюча лінза, координатний стіл

Товщина зразка – 5 мм.

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

1) Аналітичний огляд методів та засобів лазерної обробки, провести аналіз основних типів газових лазерів для обробки металів, зробити порівняння характеристик лазерних технологічних установок на основі CO₂ лазерів

2) Розробка методу лазерної обробки та оптичної схеми випромінюваного каналу

3) Розробка структурної схеми технологічного лазера та складального креслення випромінювача

4) Економічна частина

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

1. Схема структурна загальна

2. Структурно-електрична схема блоку керування
3. Структурно-електрична схема блоку відображення і формування
4. Схема методу лазерної обробки
5. Схема оптична випромінюваного каналу пристрою
6. Комп'ютерна модель, схема алгоритму

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Спеціальна частина	Заболотна Н. І. к.т.н., проф. каф. ЛОТ		
Економічна частина	Ратушняк О. Г. к.т.н. доц. каф. ЕПВМ		

7. Дата видачі завдання «__» _____ 2019 р

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Формування та затвердження ТЗ		
2	Виконання спеціальної частини МКР. Перший рубіжний контроль виконання МКР		
3	Виконання спеціальної частини МКР. Другий рубіжний контроль МКР		
4	Виконання «Економічної частини»		
5	Попередній захист МКР		
6	Нормконтроль МКР		
7	Рецензування МКР		
8	Захист МКР		

Студент

(підпис)

Габрук В. Г.

Керівник роботи

(підпис)

Тужанський С. Є.

РЕФЕРАТ

Магістерська кваліфікаційна робота призначена проектуванню і розробці методу і засобу лазерної обробки металів. Зроблено аналітичний огляд відомих лазерних технологій і операцій для обробки матеріалів. Здійснено розрахунок параметрів лазера і оптичної системи для фокусування, розроблено схеми лазерної технологічної установки.

REFERAT

Master's qualification work is designed to design and develop a method and tool for laser metalworking. An analytical review of known laser technologies and operations for material processing is made. The parameters of the laser and the optical system for focusing were calculated, and the schemes of the laser technological installation were developed.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛАЗЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ УСТАНОВОК ДЛЯ РІЗАННЯ МЕТАЛУ	10
1.1 Технологічні процеси лазерного різання.....	10
1.2 Вплив параметрів лазера, режимів обробки, параметрів заготовок і механічних властивостей	12
1.3 Процеси обробки матеріалів	21
1.4 Порівняння основних характеристик ЛТУ	22
2 МЕТОДИ І МОДЕЛІ ЛАЗЕРНОЇ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ	25
2.1 Удосконалення методу лазерної обробки металів.....	25
2.2 Модель утворення кратера у сталі для CO ₂ лазера.....	29
2.3 Модельний розрахунок параметрів лазерного випромінювача	33
2.4 Розрахунок фокусувальної оптичної системи.....	41
3 РОЗРОБКА ЛАЗЕРНОЇ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ РІЗАННЯ МЕТАЛІВ	44
4 БЕЗПЕКА ПРИ РОБОТІ З ТЕХНОЛОГІЧНИМ ЛАЗЕРОМ	51
4.1 Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів у виробничому приміщенні.....	51
4.2 Карта умов праці	56
4.3 Рекомендації щодо умов праці	58
4.4 Розрахунок безпечної відстані від лазерного випромінювання	59
5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	61
5.1 Оцінювання комерційного потенціалу розробки	61
5.2 Прогнозування витрат на виконання науково-дослідної роботи.....	65
5.3 Прогнозування комерційних ефектів від реалізації результатів розробки....	72
5.4 Розрахунок ефективності вкладених інвестицій та періоду їх окупності	74
ВИСНОВКИ.....	77
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	78
Додатки	

ВСТУП

Різання металу за допомогою обладнання для лазерного різання металу - це одна з передових технологій, яка використовується нарівні з використанням газу і плазми при обробці металів. Ці принципи обробки відносяться до немеханічних способів і ґрунтуються на впливі температур на поверхню металу.

Лазерне різання є одним з методів термічної обробки листового металу. Лазерний промінь формується у джерелі лазерного випромінювання (резонаторі) та спрямовується через провідне волокно або дзеркало в ріжучу головку установки, де за допомогою лінзи він фокусується: при цьому значно зменшується діаметр променя та збільшується його потужність. Сфокусований лазерний промінь потрапляє на листовий метал та розплавляє його. Використовується два типи джерела лазерного випромінювання: волоконний лазер та CO₂-лазер.

Актуальність теми. Розвиток сучасного виробництва важко уявити без технологій лазерної обробки металів. Технологічні комплекси на основі лазерів дозволяють виконувати значну кількість операцій обробки – від термозміцнення поверхонь до різання металевих деталей значної товщини. Якість і точність обробки сучасними лазерними технологічними установками зростає за рахунок удосконалення технологій та програмного забезпечення для автоматизованого керування.

Мета й завдання дослідження

Мета роботи – розширення функціональних можливостей технологічного CO₂ лазера, а також підвищення ефективності лазерної обробки металів при різанні.

Для виконання поставленої мети потрібно вирішити такі задачі:

1. Аналітичний огляд методів та засобів лазерної обробки, провести аналіз основних типів газових лазерів для обробки металів, зробити порівняння характеристик лазерних технологічних установок на основі CO₂ лазерів

2. Розробка методу лазерної обробки та оптичної схеми випромінюваного каналу

3. На основі фундаментальних законів квантової та оптичної електроніки розрахувати основні характеристики резонатора лазера, енергетичні характеристики лазерного випромінювача та параметри оптичної системи для фокусування випромінювання.

4. Розробка структурної схеми технологічного лазера та оптичну схему випромінювача і системи фокусування

5. Провести економічні розрахунки та здійснити аналіз заходів щодо безпеки при роботі з технологічним лазером.

Об'єкт дослідження

Процес взаємодії лазерного випромінювання із металами

Предмет дослідження

Методи, моделі і засоби лазерної обробки металів

Наукова новизна роботи

Удосконалено метод лазерної обробки металів, у якому на відміну від існуючих на оброблювану поверхню металу спрямовують лінійно поляризований сфокусований лазерний пучок випромінювання з радіальним напрямком поляризації, при якому площина коливань електричного вектора поля E за допомогою спеціального пристрою автоматично змінюється залежно від кута нахилу пучка (для співпадіння із площиною обробки), що дозволяє підвищити ефективність використання лазерного випромінювання та, як наслідок процесу лазерної обробки.

Практична значимість роботи

Практичне значення роботи полягає у розширенні функціональних можливостей технологічного лазера, а також розробленні схеми та виконанні інженерних розрахунків компонентів пристрою.

Апробація результатів дисертації

Результати досліджень отримані в даній магістерській дисертації були оприлюднені на:

- XLVIII Науково-технічна конференція факультету комп'ютерних систем і автоматики, 12-13 березня, Вінниця.

Публікації

1. <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fksa/all-fksa-2019/paper/view/7573/6250>

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛАЗЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ УСТАНОВОК ДЛЯ РІЗАННЯ МЕТАЛУ

Лазерне різання - це процес термічного поділу матеріалу. Інструментом в даному процесі є лазерний промінь, потужність якого в фокус після проходження через лінзу фокусуємого об'єктива становить від декількох десятків до декількох сотень ват (в залежності від потужності джерела випромінювання). В процесі обробки фокус лазерного променя може розташовуватися над поверхнею заготовки, на поверхні або під нею, в залежності від товщини і властивостей матеріалу. Завдяки високій питомій потужності лазерний промінь нагріває, плавить і / або випаровує матеріал. У процесі різання разом із променем з сопла під тиском виходить струмінь газу, який видаляє матеріал з утвореної при різанні прорізі.

1.1 Технологічні процеси лазерного різання

Виділяють три технологічних процеси лазерного різання: сублімаційний, різання плавленням і газокисневе різання.

Для сублімаційного різання характерне випаровування матеріалу в зоні різку під дією лазерного випромінювання. Для забезпечення мінімальної ширини прорізу, потужність випромінювання повинна бути високою, щоб знизити втрати на теплопровідність. При цьому процесі застосовуються інертні або хімічно пасивні гази, наприклад, азот (N_2), гелій (He), аргон (Ar). Результатом сублімації різання є: гладкі кромки різку, мінімальний термічний вплив на матеріал, відсутність окислення різку. До недоліків слід віднести невисоку швидкість різання і обмеження по товщині матеріалу до 1 мм. Описаний процес застосовуємо як для обробки металу, так і для матеріалів, які плавляться незначно або зовсім не мають розплавленого стану, наприклад, деревина, папір, кераміка і пластмаса.

Лазерне різання плавленням застосовується для обробки високолегованих сталей і кольорових металів. Вона характеризується переходом металу в розплавлений стан в області утвореної прорізі, після чого розплав видаляється

струменем інертного газу (аргон, азот). Цей спосіб дозволяє застосовувати більш високі швидкості різання, так як не потрібне випаровування матеріалу. Вибором застосовуваного газу можна запобігти окисленню кромки різки. Лазерне різання плавленням з подачею газу під тиском понад 6 бар дозволяє збільшити швидкість видалення розплавленого матеріалу з прорізи, що запобігає утворенню задирок і прилипанню шлаків до країв різки. В якості газу використовується азот, що запобігає окисленню країв. Лазерне різання плавленням з високим тиском газу використовується в основному для нержавіючої сталі і сплавів алюмінію.

Газокисневе різання відрізняється від різання плавленням тим, що розплавлений матеріал видаляється з зони різання струменем кисню. В результаті взаємодії кисню з розплавленим і частково випаруваним металом в кілька разів збільшується підведення енергії до зони взаємодії лазерного променя і заготовки. До переваг газокисневого різання можна віднести можливість розділення листів металу з великою товщиною, високу швидкість обробки. Є й недоліки цього методу - кромка різки має суттєві нерівності і окислюється, що створює необхідність подальшої обробки. Цей процес використовується для поділу лише металів.

1.2 Вплив параметрів лазера, режимів обробки, параметрів заготовок і механічних властивостей

На досягнення бажаних результатів при обробці матеріалу лазерною різкою впливають параметри лазера, режими обробки, параметри заготовки та машинні параметри. До параметрів лазера відносяться: потужність лазера, частота проходження імпульсів, розподіл питомої потужності, сталість потужності, поперечний переріз променя, розбіжність, поляризація. Режими обробки включають в себе: швидкість різання, вид газу, тиск газу, положення фокуса. До параметрів заготовки можна віднести товщину заготовки, матеріал, геометрію заготовки, поверхню заготовки. Машинні параметри визначаються дзеркалом для виведення енергії лазерного агрегату, положенням променя, астигматизмом, відхиляючим дзеркалом, фокусуючою лінзою, регулюванням лазерного променя щодо сопла, отвором сопла [1].

Далі коротко розглянути деякі перераховані вище параметри.

Обрана потужність лазера залежить від оброблюваного матеріалу, товщини заготовки, необхідних результатів обробки. Так для досягнення високої точності при складній геометрії заготовки або в разі наявності тонких перемичок необхідно зменшити потужність лазера переходом на імпульсний режим. За рівної кількості конструкційної сталі з товщиною заготовки більше 8 мм потрібна потужність лазера понад 1000 Вт. Важливе значення має і сталість потужності лазера протягом всього часу обробки заготовки. Цей параметр впливає на стабільність результату різання.

На рис. 1.1 представлений графік випромінюваної потужності при включенні лазера LMC1200-0.7 з максимальною випромінюваною потужністю 700Вт.

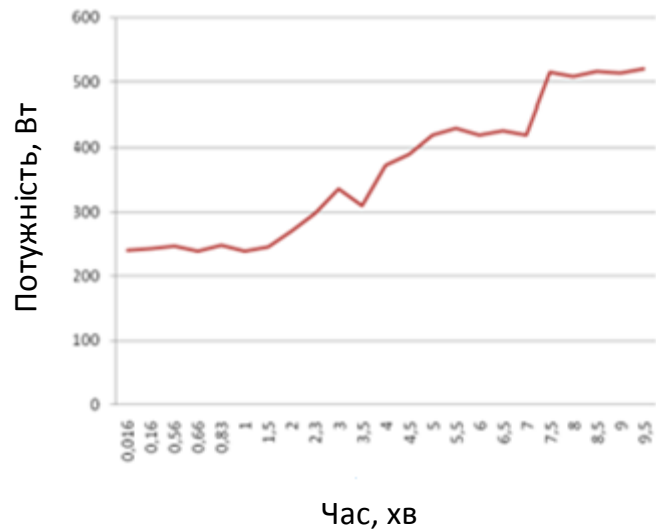


Рис. 1.1 Графік випромінюваної потужності при включенні лазера

З графіка видно, що постійна потужність встановлюється через 7-9 хвилин після включення лазера.

Частота проходження імпульсів залежить від завдань обробки. При різанні невеликих контурів або при врізанні в режимі ступінчастою потужності рекомендується невелика частота проходження імпульсів.

Чим більше діаметр лазерного променя, тим менше отримується фокальний діаметр і, отже, менша ширина різку (рис. 1.2).

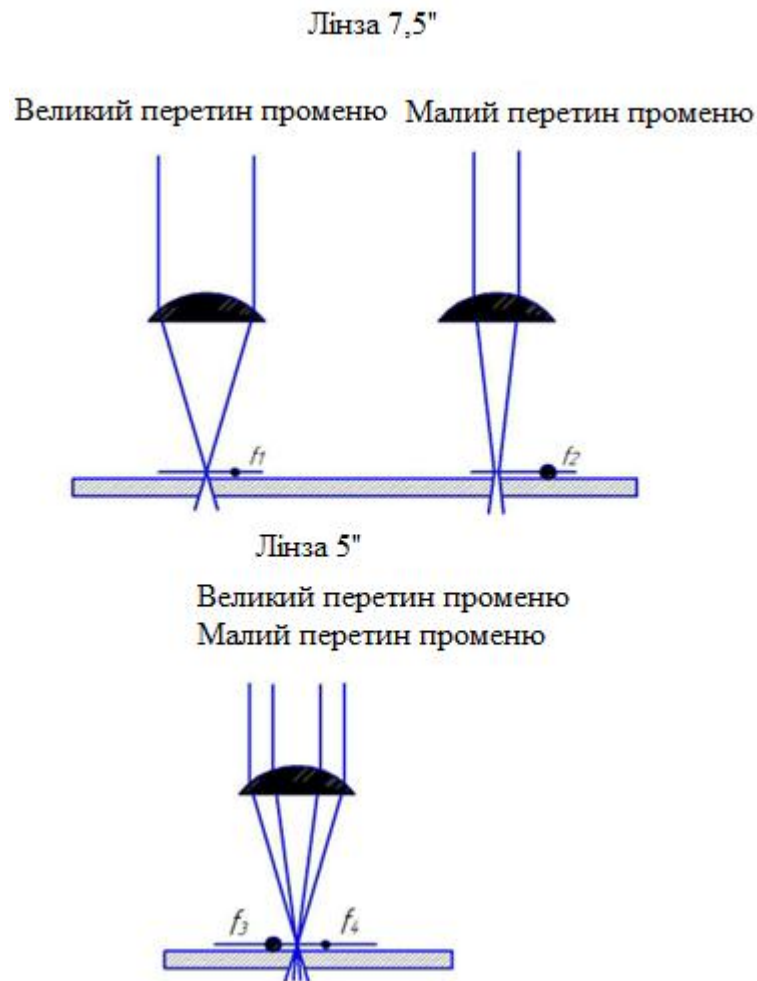


Рис. 1.2 Ширина різку в залежності від діаметра лазерного променя

Фокальний діаметр залежить від фокусної відстані застосовуваної фокусувальної лінзи.

При співпадінні площини поляризації променя з площиною різання показники швидкості і якості різання підвищуються. У цьому випадку на передній поверхні різку відбувається найбільш високе поглинання випромінювання. Якщо площина поляризації перпендикулярна площині різку, то відбувається поглинання випромінювання бічними поверхнями різку. Швидкість і якість різання можуть значно відрізнитися в залежності від зміни напрямку переміщення оптичного різачка при нарізці фігурних деталей. Для забезпечення максимальної ефективності різання доцільно площину поляризації променя за допомогою спеціального пристрою автоматично повертати при зміні напрямку різання, щоб вона збігалася з площиною різання. Хороші результати можуть бути досягнуті в результаті

перетворення лінійно поляризованого випромінювання в випромінювання з круговою поляризацією із застосуванням фазообертового дзеркала, яке встановлюють перед входом в оптичний різак [2].

Швидкість різання залежить від матеріалу і товщини заготовки (рис. 1.3).

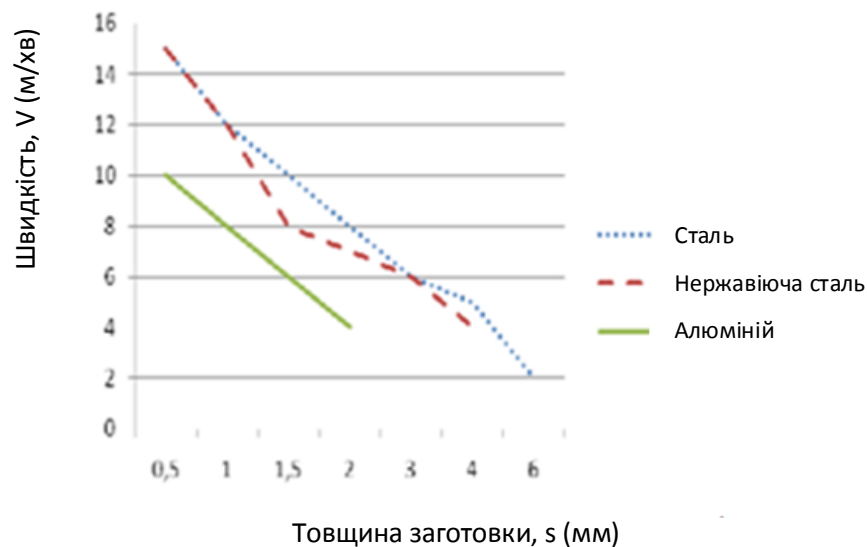


Рис. 1.3 Графік залежності швидкості різання від товщини заготовки

Сильно завищена або занижена швидкість різання може призвести до підвищеної шорсткості, утворення задирок, проплавлення. Чим товща заготовка, тим менше повинна бути швидкість переміщення лазерного променя.

У разі обробки матеріалів з використанням газу необхідний результат різання визначає вид застосовуваного газу. Для металу не можна застосовувати кисень через окислення кромки різку.

Велике значення має якість застосовуваного газу. Через наявність в кисні води і азоту на крайках різку можуть утворюватися задирки.

Тиск газу залежить від товщини заготовки матеріалу. При газовому різанні тонкі заготовки з металу поділяються краще під великим тиском, ніж товсті заготовки. Це компенсує недолік кисню при великих швидкостях різання. При різанні високим тиском товсті заготовки використовують великий тиск газу, щоб видалити розплавлений матеріал з прорізу. При кисневому різанні тиск газу зменшується зі збільшенням товщини заготовки.

Результат різання залежить і від положення фокуса (рис.1.4).

При газовому різанні конструкційної сталі товщиною до 6 мм фокус повинен розташовуватися на поверхні листа, при товщині 8 мм і вище - над поверхнею аркуша. При різанні високим тиском положення фокуса переміщається в лист.

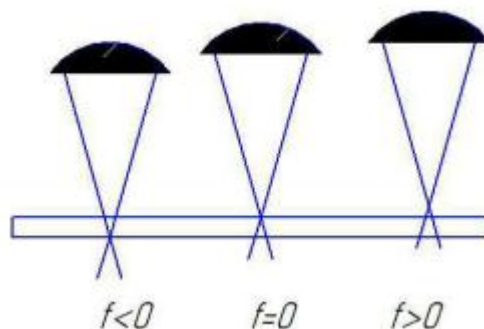


Рис. 1.4 Положення фокуса

Положення фокуса визначається методом контуру плазми (зміни кольору плазми) або визначенням мінімальної товщини утвореної прорізи на матеріалі.

Товщина заготовки впливає на режими і якість обробки. Чим товщі заготовка, тим більше шорсткість кромки різку і тим менша швидкість різання [3].

Властивості оброблюваних матеріалів (поглинальна здатність, теплопровідність, відбивна здатність і т.д.) визначають можливість їх поділу лазерним променем. Властивості матеріалів залежать від складових їх компонентів (наприклад, вмістом вуглецю, легуючих елементів). При різанні металів з високим вмістом вуглецю (залізні і сталеві листи) необхідно враховувати збільшення твердості матеріалу вздовж кромки різку. Листи з високим вмістом легуючих речовин поділяються важче, ніж з меншим вмістом. Через високу відбивну здатність і теплопровідності сплави алюмінію можуть оброблятися CO_2 лазером з потужністю 700 Вт тільки до товщини 4 мм. Одержуваний результат буде кращий при збільшенні легуючих речовин в алюмінієвому сплаві. Чистий алюміній погано різеться через дуже високу відбивну здатність. Максимальна товщина оброблюваного листа не більше 2 мм. Титанові листи можуть різатися товщиною до 5 мм з хорошим результатом різання при використанні аргону. Кольорові метали

(латунь, мідь) мають високу відбивну здатність і теплопровідність. При різанні міді слід використовувати кисень, використання азоту веде до повного відбиття лазерного променя, в результаті чого можуть бути зіпсовані конструктивні оптичні елементи обладнання. Максимальна товщина заготовки для міді - 3 мм. Латунь слід різати з використанням газу під високим тиском. В якості газу можна використовувати азот або кисень. Максимальна товщина латуні 4 мм. Срібло і золото практично не різуться лазерним променем [4].

Блискучі поверхні матеріалів призводять до сильного відбиття лазерного променя і поганих результатів різання. Шар окалини на поверхні оброблюваного листа також погіршує якість різання. Шорсткі і матові поверхні забезпечують високу швидкість різання. Наявність тонкого масляного листа позитивно впливає при врізанні листа зі 100% -ою потужністю лазера.

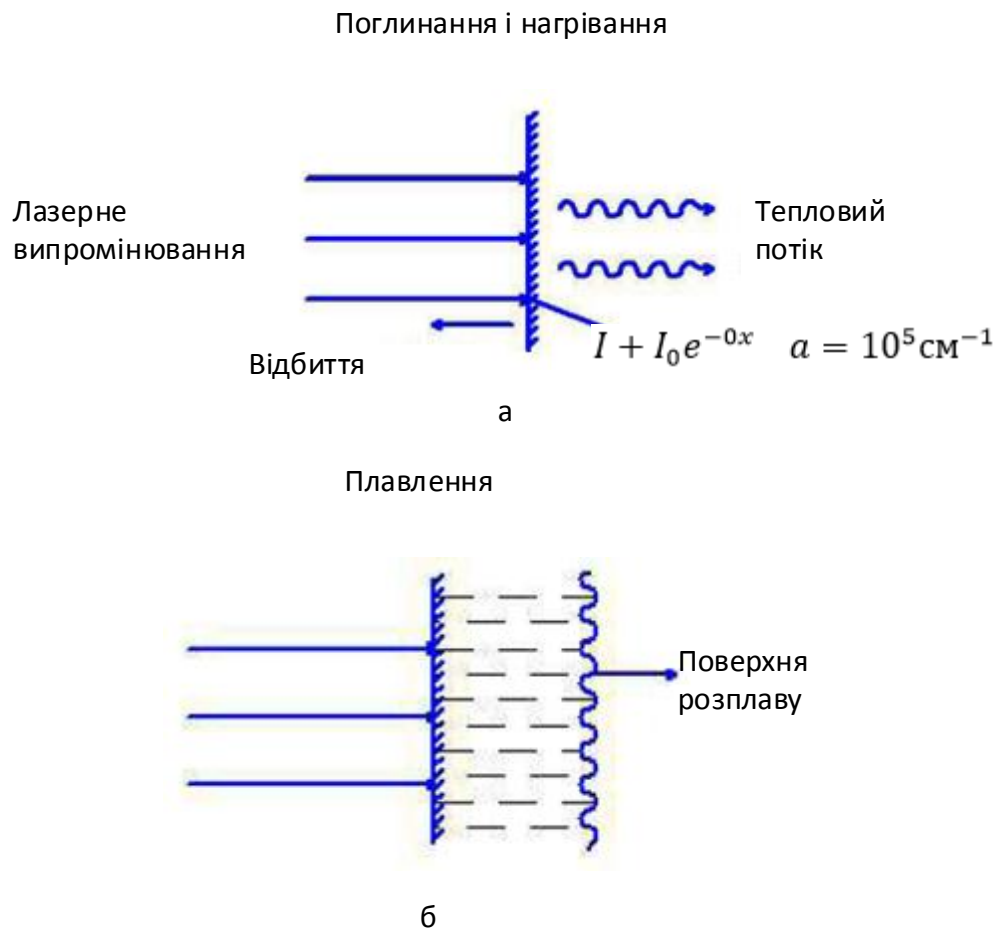


Рис. 1.5 Фізичні процеси, що протікають при впливі потужного лазерного пучка на поглинаючу поверхню: а – поглинання і нагрівання; б – плавлення

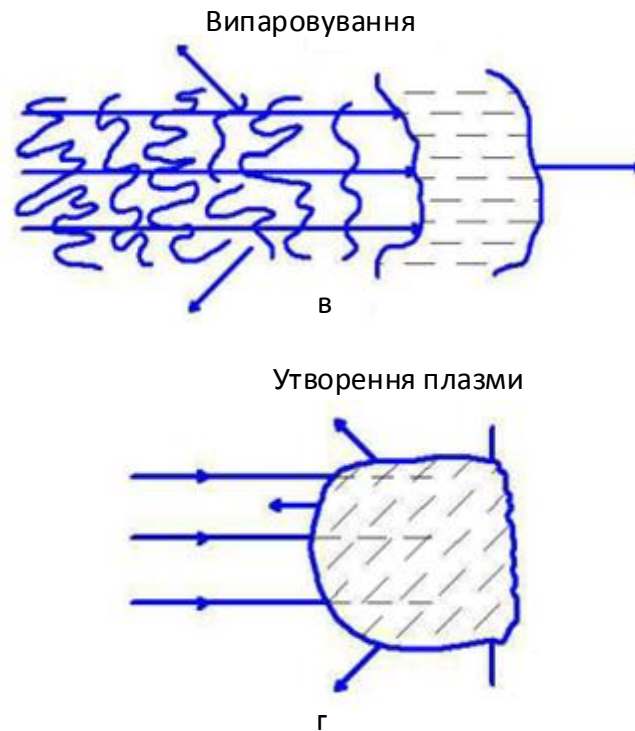


Рис. 1.5 Фізичні процеси, що протікають при впливі потужного лазерного пучка на поглинаючу поверхню: в – випаровування; г – утворення плазми

Ще одним параметром, що впливає на якість різання є геометрія заготовок. Так, наприклад, наявність гострих кутів, перемичок, невеликих отворів (діаметр менше подвоєної товщини листа) викликають складності при різанні. Обробка цих елементів проводиться зі зменшеною швидкістю різання, зменшеною потужністю випромінювання, низькою частотою проходження імпульсів [5].

Фізичні процеси, що виникають при взаємодії лазерного променя з речовиною можна представити у вигляді схеми (рис. 1.5-1.6).

На поверхні матеріалу лазерний промінь поглинається за експоненціальним законом Бугера-Ламберта:

$$I(x) = I_0^{-a \cdot x} \quad (1.1)$$

де $I(x)$ - інтенсивність лазерного випромінювання, який проникає на глибину x ; I_0 - інтенсивність падаючого лазерного випромінювання (для простоти не враховується частка відбитого випромінювання).

В металах коефіцієнт поглинання α по порядку величини дорівнює 10^5 см^{-1} . Отже, поглинена енергія виділяється в шарі товщиною $\sim 10^{-5} \text{ см}$.

Тепло що виділилося за рахунок теплопровідності проникає вглиб матеріалу (рис. 1.5,а). Після того як температура поверхні досягне точки плавлення, починається поширення границі рідкої фази в глиб матеріалу (рис. 1.5,б). Подальше випромінювання призводить до процесу випаровування поверхні (рис. 1.5,в), при цьому в матеріалі утворюється отвір. Якщо інтенсивність випромінювання досить велика, то після поглинання в матеріалі який видаляється з поверхні утворюється високотемпературна непрозора плазма, яка може поширюватися назустріч лазерному пучку в формі індукованої лазерним випромінюванням хвилі поглинання. Утворена плазма поглинає падаюче лазерне випромінювання і екранує поверхню (рис. 1.5,г).

У табл. 1 представлений діапазон зміни щільності потужності лазерного випромінювання в залежності від процесу, що протікає при обробці.

Відповідні значення є наближеними і наводяться для спектральних ділянок: видимої і ближньої інфрачервоної областей, а також для області генерації CO_2 -лазера ($\sim 10 \text{ мкм}$). При відносно невисоких значеннях щільності потужності випромінювання переважає плавлення. При впливі підвищеної щільності потужності випромінювання починається процес випаровування, що не викликає взаємодії між падаючим пучком і матеріалом який випарувався [6].

При подальшому підвищенні щільності потужності випромінювання виникають індуковані хвилі поглинання, які надають переважний вплив на фізичні процеси, в той час як роль випаровування знижується. Для CO_2 -лазерів поріг виникнення хвиль поглинання приблизно на порядок нижче, ніж для твердотільних і волоконних лазерів, що працюють в більш короткохвильовій частині оптичного спектру [7].

Таблиця 1.1. Діапазони щільності потужності лазерного випромінювання, в межах яких переважають ті чи інші процеси

Процес	Щільність потужності, Вт/см ²	
	Видима і ближня ІЧ-області	СО ₂ -лазер
Плавлення	~10 ⁵	~10 ⁵
Випаровування	10 ⁶ -1,5·10 ⁸	10 ⁶ -2,5·10 ⁷
Індукована хвиля поглинання	>1,5·10 ⁸	>2,5·10 ⁷
Зворотний гальмівний ефект в плазмі	<10 ¹²	-
Коллективні ефекти в плазмі	≥10 ¹³	-

При подальшому підвищенні щільності потужності випромінювання виникають індуковані хвилі поглинання, які надають переважний вплив на фізичні процеси, в той час як роль випаровування знижується. Для СО₂-лазерів поріг виникнення хвиль поглинання приблизно на порядок нижче, ніж для твердотільних і волоконних лазерів, що працюють в більш короткохвильовій частині оптичного спектру [7].

При дуже високих значеннях щільності потужності випромінювання починається поглинання лазерного випромінювання в індукованій ним плазмі в результаті зворотного гальмівного ефекту або колективних процесів, що протікають в плазмі.

Найбільший інтерес представляє область, розташована нижче порога виникнення хвилі поглинання. У ній енергія лазерного випромінювання витрачається на зміну стану оброблюваного матеріалу, тоді як в області вище порогу енергія в основному йде на підтримку індукованої хвилі поглинання та інших плазмових явищ.

На рис. 1.6 показані приблизні області з різними режимами взаємодії і відзначені їх можливі застосування.

1.3 Процеси обробки матеріалів

З огляду на всі перераховані вище параметри режимів різання, властивості матеріалу і геометричні розміри заготовки можна отримати необхідні результати обробки.

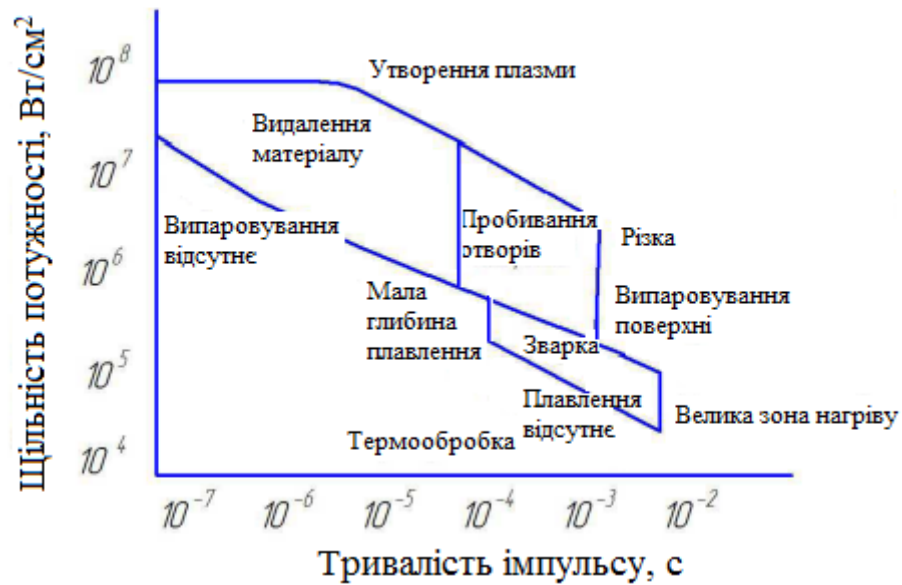


Рис. 1.6 Діапазони щільності потужності і тривалості імпульсів лазерного випромінювання, придатні для різних процесів обробки матеріалів

1.4 Порівняння основних характеристик ЛТУ

Хоча обробка лазером вважається найякіснішим і сучасним способом серед всіх інших, вона має як переваги, так і недоліки.

Плюси:

- Через відсутність механічного впливу обробці можуть піддаватися будь-які метали: від тендітних до досить міцних матеріалів.
- Найвища точність розрізу і рівно оброблені краї деталі. Відсутність дефектів при роботі.
- Деталь відразу готова до використання і не вимагає подальшої обробки.
- Через точність роботи є можливість кроїти деталі абсолютно будь-якої форми.
- Для завантаження форми в апаратуру досить креслення, виконаного в будь-якій креслярській програмі.
- Висока ефективність в поєднанні з продуктивністю, яка на порядок вище.
- Можливість компактного розміщення деталей на одному аркуші.
- Загальна економія з боку використання ресурсів, фінансів і робочого часу.

Мінуси:

- Досить дороге устаткування.
- Не піддаються впливу і обробці метали з підвищеними відбиваючими властивостями.
- Допустима товщина для оброблюваного металу – 30 міліметрів.

Таблиця 1.2. Характеристики лазерних технологічних установок

Установка для лазерного різання	BySprint Pro 3015	ALPHAREX AXD	TruLaser 3030	LaserCut FO Professional	
Потужність	4,4	6	3,2-4	0,7-4	кВт
Розмір оброблюваних листів	3000 1500	5000 3000	3000 1500	3000 1500	мм
Зона різання	3048 1524 70	-	-	3030 1530 100	мм
Тип джерела випромінювання	CO ₂	CO ₂	CO ₂	Ітербієвий лазер (волоконний)	
Швидкість позиціонування паралельно осям x, y	100	-	-	66	м/хв
Швидкість позиціонування одночасно по обох осях	140	-	140	-	м/хв
Максимальна товщина заготовки	25	25	20	-	мм
Вага заготовки	750	-	900	1000	кг

Таблиця 1.3. Характеристики лазерних технологічних установок

Установка для лазерного різання	ByStar Fiber 3015	Han-Kwang FL-3015	MAZAK Super Turbo X510 МК II	Koike Lasertex 4 KW	
Потужність	3	4	4	4	кВт
Розмір оброблюваних листів	3000 1500	-	3050 1525	-	мм
Зона різання	3100 1580 100	3700 1900 108	3048 1524 100	-	мм
Тип джерела випромінювання	Fiber	Лазер	CO ₂ (YB-L250 8M)	CO ₂	

Продовження таблиці 1.3

Установка для лазерного різання	ByStar Fiber 3015	Han-KwangFL-3015	MAZAKSuperTurboX510 MKII	Koike Laserte x 4 KW	
Швидкість позиціонування паралельно осям x, y	120	120	24	24	м/х в
Швидкість позиціонування одночасно по обох осях	169	120	-	-	м/х в
Максимальна товщина заготовки	30	25	30	20	мм
Вага заготовки	1100	850	810	-	кг

Висновки до розділу

Проведено аналіз основних типів газових лазерів для обробки матеріалів, розглянуто їх спектральні та інші оптичні характеристики, особливості функціонування, умов роботи та генерації імпульсів високої потужності. Також проведено порівняльний аналіз промислових технологічних комплексів для обробки матеріалів на основі газових лазерів.

Зроблено порівняння характеристик провідних виробників лазерних технологічних установок на основі CO₂ лазерів, розглянуто перспективні технології на газових лазерах із підвищення ефективності перетворення енергії накачки та ККД.

2 МЕТОДИ І МОДЕЛІ ЛАЗЕРНОЇ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ

2.1 Удосконалення методу лазерної обробки металів

Відомий метод [11] лазерної обробки з застосуванням випромінювання з круговою поляризацією. При такому методі лазерне випромінювання з лінійною поляризацією, що виходить з лазера, відбивається від поворотного дзеркала з фазосдвигаючим чвертьхвильовим покриттям. Відбите випромінювання має кругову поляризацію і направляється на оброблюваний зразок.

Перевагою такого методу є те, що поглинання випромінювання і на передньому фронті, і на бічних стінках каналу різки визначається одним законом, матеріал рівномірно руйнується по всій поверхні.

Недоліком такого методу є те, що коефіцієнт поглинання при круговій поляризації і заданому куті падіння K дорівнює середньому арифметичному від коефіцієнтів поглинання S і P -хвиль $K = (K_s + K_p)/2$. При великих кутах падіння, які спостерігаються при зварюванні, різанні, пробиванні отворів, коефіцієнт поглинання для P -хвилі значно вище, ніж для S -хвилі, так що $K \approx 0,5K_p$.

Таким чином, потенційні можливості поглинання лазерного випромінювання, закладені в механізмі поглинання P -хвилі тут, при круговій поляризації, не реалізуються.

Відомий метод [12] лазерного різання металів, при якому на оброблюваний зразок направляється лінійно-поляризований лазерний промінь з однаковим напрямком вектору коливань електричного поля у всіх точках поперечного перерізу променю.

Головним недоліком цього методу є те, що при будь-якому положенні вектору швидкості руху променю по відношенню до площини коливань вектору E різання є неефективним, тому що лише невелика частка випромінювання поглинається і йде на руйнування матеріалу.

У разі коли вектор швидкості руху променя перпендикулярний площині коливань вектора E , коефіцієнт поглинання випромінювання на передньому фронті різі малий (відповідає поглинанню S -хвилі).

Коли вектор швидкості руху променя паралельний площині коливань вектора E , коефіцієнт поглинання випромінювання на передньому фронті різі є великим (відповідає поглинанню P -хвилі), однак поглинання на бічних стінках каналу є малим (відповідає поглинанню S -хвилі), їх руйнування неефективне, що перешкоджає проникненню променю вглиб матеріалу.

Крім того, при довільному напрямку руху променя по відношенню до площини коливань вектора E параметри різі (глибина, ширина, форма) залежать від напрямку руху променя, що неприпустимо для багатьох застосувань.

Технічне завдання винаходу - підвищення ефективності та граничних параметрів лазерної обробки.

Зазначена задача досягається тим, що у відомому методі обробки металів лазерним випромінюванням, при якому на оброблюваний метал направляють лінійно поляризований сфокусований промінь, створюють лазерний промінь з радіальним напрямком поляризації, при якому площина коливань вектора електричного поля E в будь-якій точці поперечного перерізу променя проходить через вісь променя.

Суть удосконалення ілюструється рисунками 2.1 і 2.2.

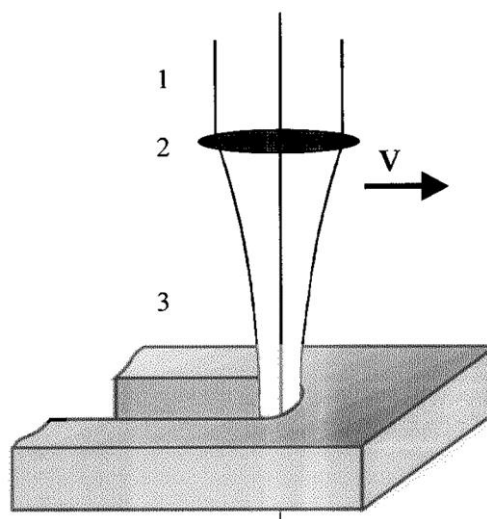


Рис. 2.1 Формування різі

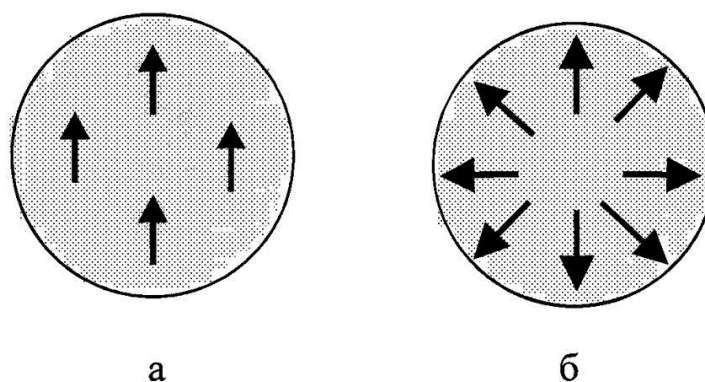


Рис. 2.2 Вплив поляризації

Лазерний промінь 1 (рис. 2.1) з радіальним напрямком поляризації фокусується лінзою 2 і направляється на оброблюваний метал 3. Стрілкою показаний напрямок руху променя, V - швидкість руху променя. На рис. 2.2,а показано напрямок вектора електричного поля E в поперечному перерізі променя при лінійній поляризації (прототип). На рис. 2.2,б показано радіальний напрямок поляризації, при якому площина коливань вектора електричного поля E в будь-якій точці поперечного перерізу променя проходить через вісь променя (пропонований удосконалений метод).

При лазерній обробці металів таким випромінюванням поглинання на всіх стінках відбувається за одним і тим же законом, причому коефіцієнт поглинання має максимально можливу величину, відповідну поглинанню Р-хвилі. Відбувається більш інтенсивне руйнування матеріалу, подальше проникнення променя вглиб матеріалу, граничні параметри обробки збільшуються за рахунок підвищення ефективності використання лазерного випромінювання.

Оцінка ефективності запропонованого рішення проводилась по тривимірній теорії лазерного різання металів [13]. Теорія лазерного різання металів адекватно описує граничні товщини різів, що спостерігаються експериментально при відомих поляризаційних характеристиках лазерного випромінювання: лінійної і циркулярної поляризаціях. При радіальній поляризації вона прогнозує збільшення граничної товщини металу, що розрізається в два рази в порівнянні з циркулярною

поляризацією. Фізична причина цього полягає в збільшенні коефіцієнта поглинання випромінювання на стінках каналу.

У таблиці наведено порівняльні якісні показники різання металів лазерним випромінюванням з відомими типами поляризації і з застосуванням запропонованого методу лазерної обробки.

Таблиця 2.1 Якість різання металів залежно від типу поляризації

Тип поляризації	Поглинання на передньому фронті	Поглинання на бічних стінках	Глибина різання в відносних одиницях
Лінійна $E \parallel V$ (прототип)	велике	мале	1
Кругова	середнє	середнє	1.2
з радіальним напрямком (запропонований спосіб)	велике	велике	2.5

У таблиці 2.1 V - вектор швидкості руху променя, E - вектор коливань електричного поля.

Таким чином, запропонований метод лазерної обробки металів дозволяє збільшити граничні параметри лазерної обробки в кілька разів у порівнянні з прототипом.

2.2 Модель утворення кратера у сталі для CO₂ лазера

Широке використання у обробці металів знайшли неперервні CO₂-лазери.

Джерелом випромінювання у моделі є неперервний одномодовий CO₂-лазер з максимальною потужністю 10 кВт. На виході з маніпулятора отримуємо пучок з діаметром ~500 мкм. Максимальна густина потужності в зоні впливу лазерного скальпеля досягає 1000 кВт·см⁻². Для візуалізації зони опромінення використовують світло He-Ne лазера.

При проведенні лазерної обробки, поряд з основними характеристиками лазерного випромінювання, важливу роль відіграє також фокусуюча оптика, від параметрів якої залежить глибина і конфігурація утвореного при опроміненні кратера. Розглянемо процес формування кратерів, утворених у сталі під дією сфокусованого неперервного випромінювання CO₂-лазера з метою оптимального вибору оптики лазерного випромінювача.

При попаданні лазерного випромінювання на метал частина його відбивається від поверхні, а друга частина проникає всередину, де спадає по експоненті:

$$P(z) = P_0 \exp[-(\alpha + \beta)z], \quad (2.1)$$

де α, β - коефіцієнти поглинання та розсіювання.

Оскільки випромінювання CO₂-лазера інтенсивно поглинається, а коефіцієнт поглинання істотно перевищує коефіцієнт розсіювання, то розсіюванням випромінювання можна знехтувати. Можна вважати, що утворення кратера є результатом пошарового усунення металу при поглинанні в шарі енергії, достатньої для випаровування. Глибину кожного шару Δh будемо вважати рівною оберненій величині коефіцієнта поглинання. Реалізація режиму випаровування визначається умовою $\tau \geq t$, де τ - характеристика часу відведення тепла з області поглинання випромінювання, t - час, необхідний для випаровування цієї області. Подібне обмеження в часі дає змогу розглядати процес утворення кратера без урахування відведення тепла, при наявності порогової густини потужності

випромінювання $P_{th} = \rho\chi\alpha$, де ρ, χ, α - густина, питома енергія випаровування та температуропровідність металу.

В даній моделі процес утворення кратера описується рівнянням:

$$dm/dSdt = (P_s - P_{th})/\chi, \quad (2.2)$$

де ліва частина - це швидкість випаровування біомаси матеріалу з одиничної поверхні, P_s - розподіл густини потужності по перерізу пучка, який має вигляд:

$$P_s = (2P_0/\pi r_i^2) \exp(2r^2/r_i^2), \quad (2.3)$$

де r_i - радіус пучка за фокальною площиною (у випадку гаусового пучка $r_i^2 = r_0 + (hr_b/f)^2$, де f - фокальна відстань лінзи, r_b - радіус пучка до входу в лінзу, r_0 - радіус пучка у фокальній площині, h - відстань від фокальної площини вздовж осі z). З наведених вище формул одержуємо таке рівняння для швидкості поглиблення кратера:

$$dh/dt = [(2P_0/\pi r_i^2) \exp(-2r^2/r_i^2) - P_{th}]/\rho\chi \quad (2.4)$$

Його розв'язком при $r=0$ (на осі пучка) є:

$$t = \frac{\rho\lambda}{P_{th}} \left[\frac{h_{max}^2 + (r_0 f / r_b)^2}{h_{max}} \operatorname{Arth} \left(\frac{h}{h_{max}} \right) - h \right], \quad (2.5)$$

де

$$h_{max} = [(2P_0 f^2 / \pi P_{th} r_b^2) - (r_0 f / r_b)^2]^{1/2}$$

є граничною глибиною кратера для даного матеріалу і заданих параметрів лазерного випромінювання.

В кінці процесу утворення кратера ($dh/dt=0$) вираз для його радіуса має вигляд:

$$r_{\eta p}^2 = \frac{1}{2} [r_0^2 + (r_b h / f)^2] \ln \left(\frac{2P_0}{\pi P_{th}} \right) [(r_b h / f)^2 + r_0^2]^{-1} \quad (2.6)$$

Конфігурація кратера, що визначається цією формулою, не залежить від часу, а радіус досягає максимальної величини на глибині:

$$H = [(2P_0 f^2 / \pi P_{th} r_b^2) - (r_0 f / r_b)^2]^{1/2}$$

і дорівнює $r_{кр.макс} = (P_0 / e\pi P_{th})$. Введемо безрозмірні змінні $T = Pt / \rho\chi h_{max}$ і $X = h / h_{max}$, що характеризують, відповідно, час та відносну глибину кратера, і, оскільки на практиці $(r_{of} / r_b)^2 \ll h_{max}^2 H^2$, одержимо для у нових змінних вираз:

$$ArthX - X = T. \quad (2.7)$$

Модельні залежності для сталі марки К8 та параметрів лазерного випромінювання згідно технічного завдання, отримані у пакеті прикладних програм Mathcad 2014, наведено на рисунках нижче.

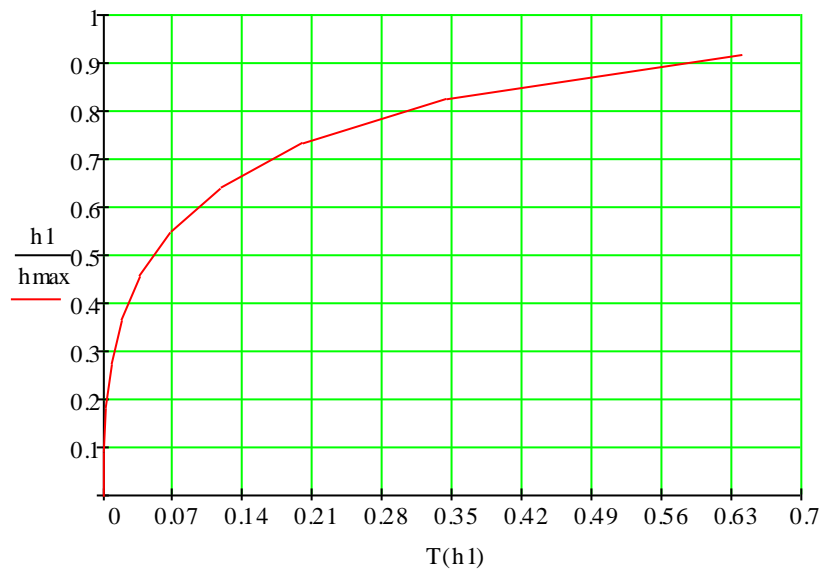


Рис. 2.3. Залежність відносної глибини утворення кратера від фокальної відстані (у см)

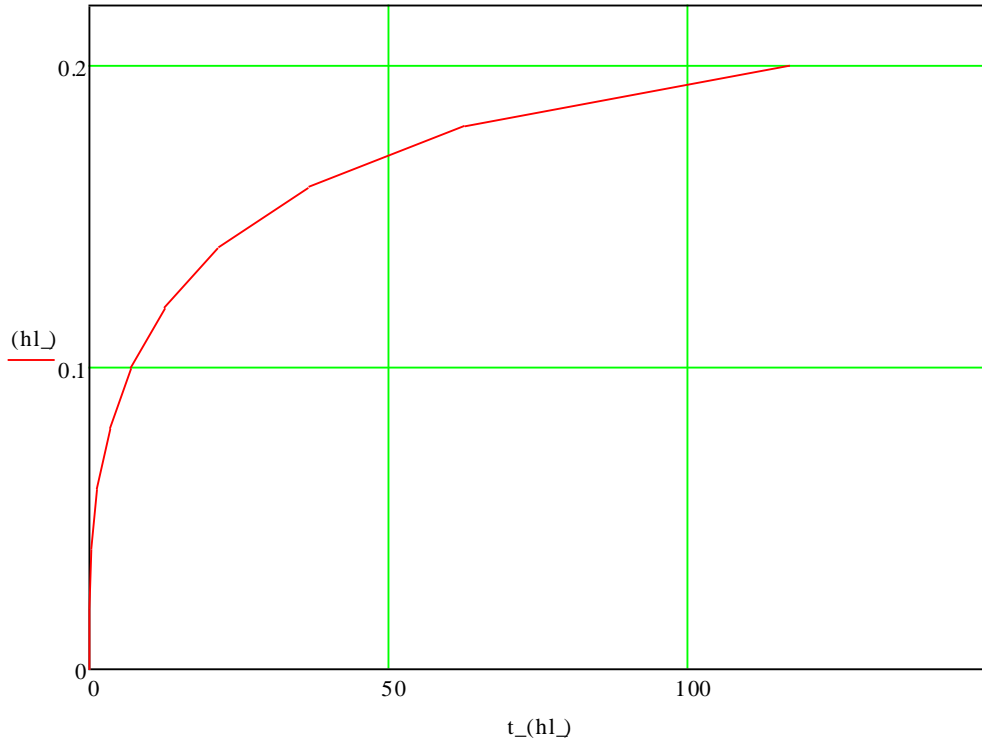


Рис. 2.4. Залежність часу утворення кратера (сек) від фокальної відстані (у см)

2.3 Модельний розрахунок параметрів лазерного випромінювача

Основним лазерним переходом у заданому лазері вважаємо переходи між коливально-обертальними рівнями у основному електронному стані з антисиметричного валентного коливального рівня ($00^{\circ}1$) на симетричний валентний коливальний рівень ($10^{\circ}0$), якому відповідають найбільш інтенсивна лінія (їй відповідає максимальна лазерна енергія – до 45% від загальної) – 10,6 мкм, а також дві інші – 10,1 мкм та 10,8 мкм.

Враховуючи, що активний елемент заданого молекулярного газового лазера на CO_2 , як і будь-якого іншого газового лазера має циліндричну геометрію, можливе його представлення як саме циліндричного об'ємного резонатора.

Загальний коефіцієнт внутрішніх втрат у резонаторі складається із дифракційних втрат (у нашому випадку зневажно малі), дисипативних втрат (на розсіювання) та втрат на дзеркалах:

$$\beta_{\Sigma} = \beta_{\text{дис}} + \beta_{\text{диф}} + \beta_{\text{дзер}} \quad (2.8)$$

Дифракційні втрати відкритого оптичного резонатора розраховують за числом Френеля :

$$N = \frac{a^2}{l\lambda} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{24^2 \cdot 10^{-6}}{10 \cdot 10,6 \cdot 10^{-6}} \\ \frac{24^2}{10 \cdot 10,44} \\ \frac{24^2}{10 \cdot 11,085} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} 5,434 \\ 5,517 \\ 5,196 \end{array} \right\} \quad (2.9)$$

Залежність дифракційних втрат на дзеркалі від хвильового параметра для основних типів хвиль відкритого оптичного резонатора для резонаторів із плоскими (1) та конфокальними (2) дзеркалами вказана на рис. 2.1 та 2.2.

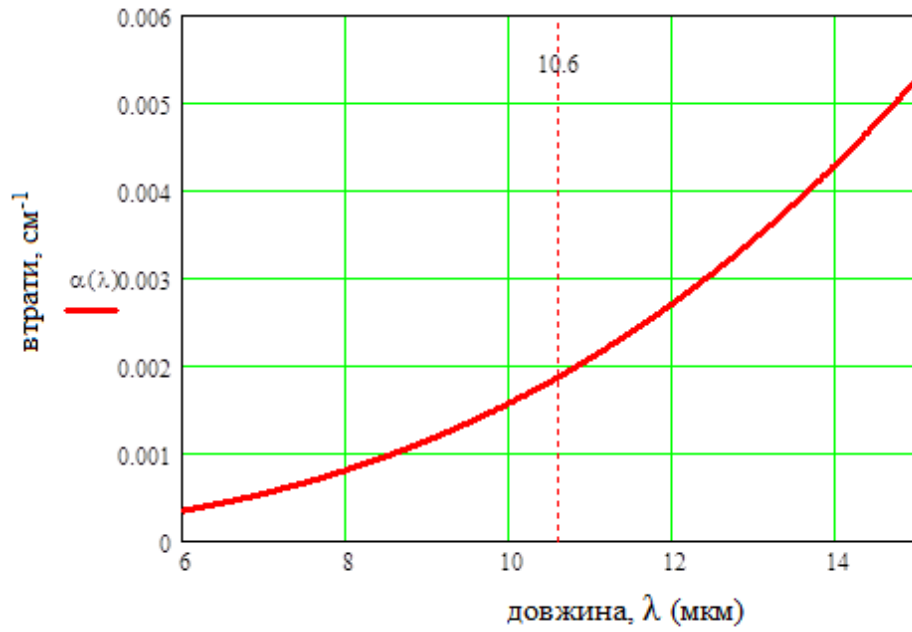


Рис. 2.1 Дифракційні втрати плоского оптичного резонатора в залежності від довжини хвилі

З рис. 2.1 бачимо, що для заданих довжин хвиль у розрахованому резонаторі з плоскими дзеркалами дифракційні втрати такого типу резонатора зневажено малі ($<0,2\%$).

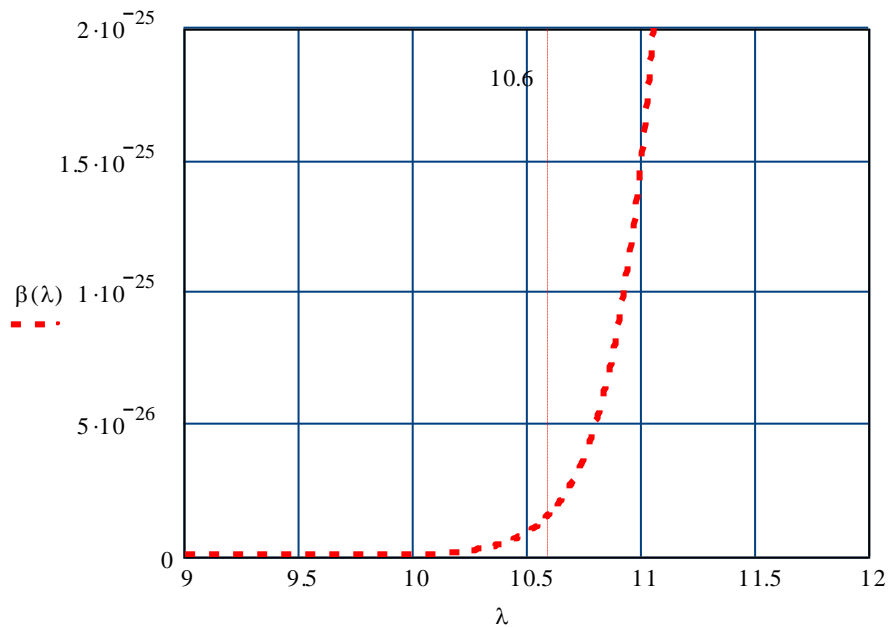


Рис.2.2 Дифракційні втрати конфокального резонатора

З рис. 2.2 видно, що і при використанні конфокальної системи дзеркал оптичного резонатора на заданих довжинах хвиль з урахуванням геометричних розмірів дифракційні втрати практично відсутні.

Одним із основних видів втрат у оптичному резонаторі лазера є втрати на дзеркалах, які визначаються через коефіцієнти відбиття дзеркал лазера:

$$\beta_{\text{дзер}} = \frac{(1 - R_1)(1 - R_2)}{2l} \quad (2.10)$$

Обчислимо відбиття дзеркал для вказаного матеріалу покриття дзеркал при нормальному падінні променів для заданої довжини хвилі. Згідно довідниковим даним, коефіцієнт відбиття при використанні матеріалу покриття “золото” може бути дуже високим.

Для металевих дзеркал коефіцієнт відбиття «глухого» дзеркала дорівнює:

$$R = \frac{(n - 1)^2 + k^2}{(n + 1)^2 + k^2} \quad (2.11)$$

де n - показник заломлення матеріалу на заданій довжині хвилі, k – показник поглинання.

Для заданих довжин хвиль випромінювання знаходимо для Au: $n=3,3$, $k=10,67$. Тобто:

$$R = \frac{(n - 1)^2 + k^2}{(n + 1)^2 + k^2} = \frac{2,3^2 + 10,67^2}{4,3^2 + 10,67^2} = 0,9003 \quad (2.12)$$

Для вихідного дзеркала лазера задане значення коефіцієнта пропускання $\sim 17\%$, тоді для нього коефіцієнт відбиття $R_2 = 0,9003 \cdot 0,83 = 0,747$.

Таким чином, втрати на дзеркалах:

$$\beta_{\text{дзер}} = \frac{(1 - 0,9003)(1 - 0,747)}{2 \cdot 10} \approx 1,26 \cdot 10^{-3} \quad (2.13)$$

Дисипативні втрати за один прохід вздовж резонатора довжиною L (вважаємо коефіцієнт розсіювання 0,15):

$$\beta_{\text{дис}} = e^{-2k_p \cdot L} = \frac{1}{e^{2 \cdot 0,15 \cdot 10}} \approx 0,051 \quad (2.14)$$

Загальні втрати у резонаторі $\beta_{\Sigma} \approx 0,052$

Відповідне значення добротності такого оптичного резонатора:

$$Q = \frac{2\pi l}{\beta_{\Sigma} \lambda_p} = \frac{\frac{6,283 \cdot 10}{10,6 \cdot 10^{-6} \cdot 0,052}}{\frac{6,283 \cdot 10}{10,44 \cdot 10^{-6} \cdot 0,052}} = \frac{1,1399 \cdot 10^8}{1,090 \cdot 10^8} = \frac{1,1618 \cdot 10^8}{11,085 \cdot 10^{-6} \cdot 0,052} \quad (2.15)$$

Маємо концентричний резонатор із двома плоскими дзеркалами. Але для такого резонатора не виконана умова стійкості і найменше роз'юстування резонатора призведе до виводу пучків за його межі.

Тому умовно для наступних розрахунків вважаємо резонатор концентричним із вигнутими дзеркалами нескінченного радіусу (враховуючи велику довжину резонатора, таке допущення є можливим). Розподілення поля у поперечній площині для резонатора із круговою симетрією (у циліндричних координатах) для коливань типа TEM_{plq} наближено записують за формулою [8]:

$$E(r, \varphi) = E_0 \left(\frac{r}{\omega} \sqrt{2} \right) L_p^l \left(2 \frac{r^2}{\omega^2} \right) \exp^{-\frac{r^2}{\omega^2}} \begin{pmatrix} \sin \\ \cos \end{pmatrix} l\varphi \quad (2.16)$$

де ω - радіус променя; L_p^1 - узагальнений поліном Лагерра:

$$L_p^1(x) = \sum_{v=0}^p \binom{p+l}{p-v} \frac{(-x)^v}{v!} \quad (2.17)$$

Для перших трьох степеней поліноми Лагерра мають вигляд:

$$L_0^1(x) = 1, L_1^1(x) = l+1-x, L_2^1(x) = 0,5(l+1)(l+2) - x(l+2) + x^2/2 \quad (2.18)$$

Для основної моди у концентричному оптичному резонаторі поперечне розподілення поля описується за функцією Гаусса:

$$E(r, \varphi) = A e^{-\frac{r^2}{\omega^2}} \cos \varphi \quad (2.19)$$

Для симетричного резонатора мінімальне значення перетину поля (перетяжка пучка) знаходиться в центрі резонатора, де радіус променя (перетяжка) становить:

$$\omega_0 = \begin{array}{l} \sqrt{\frac{10 \cdot 10,6 \cdot 10^{-6}}{6,283}} \\ \sqrt{\frac{10 \cdot 10,44 \cdot 10^{-6}}{6,283}} = \begin{array}{l} 4,107 \text{ (мм)} \\ 4,076 \text{ (мм)} \\ 4,200 \text{ (мм)} \end{array} \\ \sqrt{\frac{10 \cdot 11,085 \cdot 10^{-6}}{6,283}} \end{array} \quad (2.20)$$

Радіус променя на дзеркалі:

$$\omega = \sqrt{\frac{L\lambda}{\pi}} = \begin{array}{l} 2,904 \text{ (мм)} \\ 2,882 \text{ (мм)} \\ 2,970 \text{ (мм)} \end{array} \quad (2.21)$$

Поперечне розподілення поля вздовж радіуса має вид $\frac{E}{E_{max}} = e^{-\frac{r^2}{\omega^2}}$

$$\lambda := 10.6 \cdot 10^{-6}$$

$$l := 0.5 \quad z := -15, -14..15$$

$$\omega l(z) := \sqrt{\frac{10\lambda l}{2\pi}} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{2z}{10}\right)^2}$$

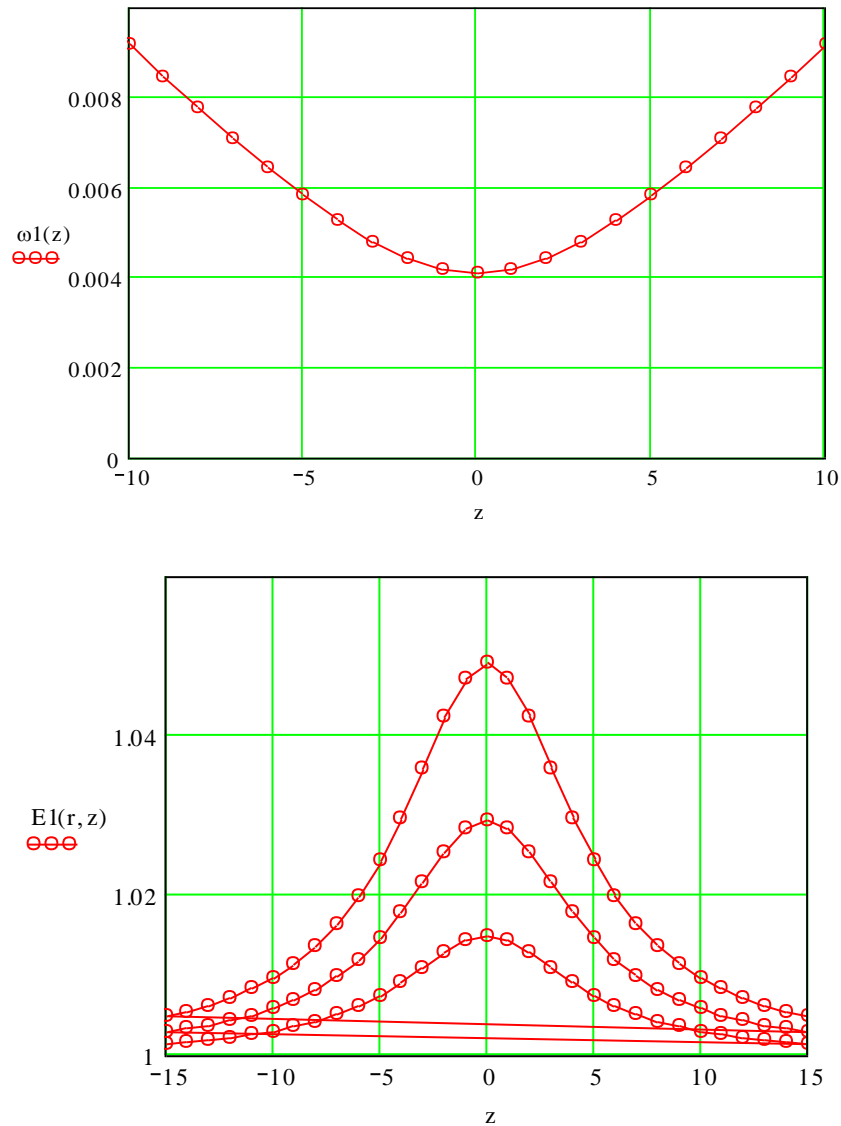


Рис. 2.3 Поперечне розподілення $E(r)$ моди H_{111}

Поле ослаблюється у 10 разів на відстані від оптичної вісі, що дорівнює:

$$r_{01} = \omega \sqrt{\ln 10} = 1,5174\omega \quad (2.22)$$

Відповідно в фокусі резонатора :

$$r_{01} = 1,5174\omega = \begin{matrix} 6,232 \text{ (мм)} \\ 6,185 \text{ (мм)} \\ 6,373 \text{ (мм)} \end{matrix} \quad (2.23)$$

На дзеркалах відстань від оптичної вісі, на якій поле ослаблюється у 10 разів дорівнює:

$$r_{01} = 1,5174\omega = \begin{matrix} 4,407 \text{ (мм)} \\ 4,373 \text{ (мм)} \\ 4,507 \text{ (мм)} \end{matrix} \quad (2.24)$$

Поле ослаблюється у e разів на відстані від осі симетрії резонатора, що дорівнює $r = \omega$ відповідно у заданій поперечній площині резонатора.

Для розрахунку спектральної ширини газового лазера використовують емпіричну формулу [8]:

$$\Delta\nu_N = 26 + 146p_r [\text{МГц}] \quad (2.25)$$

де p_r – тиск газу (у мм.рт.ст.) (відомо, що для нормальної роботи CO_2 –лазера необхідно забезпечити тиск газу 10^3 Па ($1 \text{ Па} = 133,32 \text{ мм.рт.ст.}$), тобто $p_r \approx 7,5$ (мм. рт. ст).

$$\text{Таким чином, } \Delta\nu_N = 26 + 146 \cdot 7,5 = 1121,1 [\text{МГц}]$$

Ширина доплерівськи поширеної спектральної лінії у молекулярних газових лазерах (у системі СГС):

$$\Delta\nu_D = 2\nu_0 \sqrt{\frac{2kT \ln 2}{Mc^2}} = 2 \cdot 2,83 \cdot 10^{13} \sqrt{\frac{2 \cdot 1,38 \cdot 10^{-16} \cdot 5000}{5 \cdot 10^{-24} \cdot 10^{20}}} = 8,233 \cdot 10^9 (\text{Гц}) \quad (2.26)$$

(при розрахунках враховувалось, що електронна температура газової плазми $T = 5000 \text{ К}$, молекулярна маса молекули CO_2 : $M = 5 \cdot 10^{-24} \text{ г}$)

Для розрахунку енергетичних характеристик молекулярних газорозрядних лазерів використовують формулу [8]:

$$P_{\text{вих}} = B \left(\frac{G_0}{\alpha_w + R_2} - 1 \right) R_2 \quad (2.27)$$

де B – коефіцієнт насичення (вважаємо 0,9);

$G_0 = \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \frac{\lambda_0^2}{\Delta\nu_D} \frac{A_{21}}{4\pi} \Delta N_{21}$ – резонансне значення коефіцієнта квантового підсилення для доплерівськи підширеної спектральної лінії (для вироджених ліній).

Для основної лазерної лінії:

$$G_0 = \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi} \frac{10,6^2 \cdot 10^{-8}}{8,233 \cdot 10^9} \frac{1,241 \cdot 10^4}{4\pi}} 1,326 \cdot 10^{15} = 83,945 \text{ (м}^{-1}\text{)} \quad (2.28)$$

$$P_{\text{вих}}^{\text{теор}} = 0,9 \left(\frac{83,945}{0,752} - 1 \right) 0,747 = 74,376 \text{ (Вт)} \quad (2.29)$$

Ширина резонансного піка (спектральної кривої резонатора):

$$\Delta\nu_p = \frac{\beta_{\Sigma} c}{2\pi l} = \frac{0,052 \cdot 3 \cdot 10^8}{2 \cdot 3,14 \cdot 10} = 2,483 \cdot 10^5 \text{ (Гц)} \quad (2.30)$$

Якщо практичне значення вихідної потужності лазера становить 85% від теоретичної (втрати на розсіювання, роз'юстування та ін.), вихідна потужність при вказаних параметрах становитиме:

$$P_{\text{las}} = 0,85 \cdot 74,376 = 63,22 \text{ (Вт)} \quad (2.31)$$

2.4 Розрахунок фокусувальної оптичної системи

Розраховуємо конфокальний параметр заданого резонатора за визначеним мінімальним розміром діаметра перетяжки лазера (λ_1) [9-11]:

$$R_e = \frac{2\lambda}{\pi\omega_0^2} = \frac{2 \cdot 5,09 \cdot 10^{-6}}{3,1416 \cdot 3,486^2 10^{-6}} = 0,2667 \text{ (м)}(\lambda_1) \quad (2.32)$$

Кут розбіжності пучка променів лазера для основної моди визначається за формулою:

$$\varphi = \varphi_{\text{дифр}} + \varphi_{\text{геом}} \approx \frac{2,44\lambda}{D} = \frac{2,44 \cdot 5,09 \cdot 10^{-6}}{32 \cdot 10^{-3}} = 3,881 \cdot 10^{-4} \text{ (рад.)} \quad (2.33)$$

Об'єктив із фокусною відстанню 12 м, встановлений за вихідним торцем лазера з визначеним кутом розбіжності, фокусує випромінювання лазера у задній фокальній площині на площадку розміром [11]:

$$\delta = 2f'tg\omega \approx 2 \cdot 12 \cdot 3,881 \cdot 10^{-4} = 93,12 \text{ (мм)} \quad (2.34)$$

Як бачимо, вважаючи що реальний кут розбіжності випромінювання лазера може бути ще більший, отримати фокусування лазера за допомогою звичайної лінзи в пляму розмірів 18 мкм принципово неможливо. Однокомпонентні системи можливо використовувати тільки при фокусуванні лазерного променя у пляму малих розмірів на невеликій відстані.

Оскільки задана відстань для фокусування досить велика, для забезпечення фокусування лазера у пляму діаметром 18 мкм необхідно використовувати трикомпонентну систему із афокальної насадки та об'єктива.

Діаметр ділянки, на яку фокусується випромінювання лазера, визначається за формулою:

$$\delta = 2f_e'tg\omega = 2f_3'tg\omega' \quad (2.35)$$

Розрахуємо кут розбіжності променів афокальної насадки, що забезпечує необхідне перетворення [9]:

$$w' = \arctg\left(\frac{\delta}{2f_3'}\right) = \arctg\frac{18 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 14} \approx 6,429 \cdot 10^{-7} \quad (2.36)$$

Кутове збільшення насадки:

$$\gamma = \frac{w'}{w} = \frac{6,429 \cdot 10^{-7}}{3,881 \cdot 10^{-4}} \approx 0,0017 \quad (2.37)$$

Діаметр першого компонента насадки визначається перетяжкою лазерного пучка, тобто $D_1 \gg 2y_s$:

$$D_1 \gg 2y \sqrt{1 + \left(2a/R_e\right)^2} = 2 \cdot 3,486 \cdot 10^{-3} \sqrt{1 + \left(7,5/0,2667\right)^2} = 0,1962 \text{ (м)} \quad (2.38)$$

З конструктивних міркувань явищ обираємо діаметр компонента рівним 20см, що забезпечує вказану вимогу.

Фокусна відстань першого компонента обирається із співвідношення, що з абераційних міркувань відносний отвір D_1/f_1 не повинен бути більш ніж $1/4$ [11]:

$$f_1' \geq 4D_1 \approx 80 \text{ (см)} \quad (2.39)$$

Для отримання мінімальної розбіжності пучка після системи необхідно, щоб положення перетяжки пучка, перетвореного першим компонентом, співпадало з передньою фокальною площиною другого компонента. У цьому випадку задній фокус F_1' першого компонента буде зміщений відносно переднього фокуса F_2 другого компонента Δ на розфокусування, щодорівнює зміщенню z_1' положення перетяжки перетвореного пучка відносно задньої фокальної площини першого компонента:

$$\Delta = z_1' = \frac{z_1}{\left(z_1/f_1'\right)^2 + \left(R_{e1}/2f_1'\right)^2} = \frac{a_1 + f_1'}{\left((a_1 + f_1')/f_1'\right)^2 + \left(R_e/2f_1'\right)^2} \quad (2.40)$$

$$\Delta = z_1' = \frac{7,5 + 0,8}{\left(8,3/0,8\right)^2 + \left(0,2667/1,6\right)^2} \approx 7,71 \text{ (см)} \quad (2.41)$$

Конфокальний параметр пучка, перетвореного першим компонентом:

$$R'_{e1} = \frac{R_e}{\left(1 + \frac{a_1}{f_1}\right)^2 + \left(\frac{R_e}{2f_r}\right)^2} = \frac{0,2667}{\left(1 + \frac{7,5}{0,8}\right)^2 + \left(\frac{0,2667}{2 \cdot 0,8}\right)^2} = 0,00245 \text{ (м)} \quad (2.42)$$

Діаметр перетяжки пучка, перетвореного першим компонентом:

$$2y'_1 = \sqrt{\frac{2\lambda R'_{e1}}{\pi}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 5,09 \cdot 10^{-6} \cdot 0,00245}{3,1416}} = 0,0896 \text{ (м)} \quad (2.43)$$

Фокусна відстань другого компонента насадки:

$$f'_2 = \frac{f'_1 R_e}{\gamma \sqrt{4z_1^2 + R_e^2}} = \frac{0,8 \cdot 0,2667}{0,0017 \sqrt{4 \cdot 0,077^2 + 0,2667^2}} = 226,16 \text{ (м)} \quad (2.44)$$

Діаметр D_2 другого компонента:

$$D_2 \geq 2y_2 \sqrt{1 + \varepsilon_2^2} = 2y'_1 \sqrt{1 + \left(2f'_2 / R'_{e1}\right)^2} \quad (2.45)$$

$$D_2 \geq 2y_2 \sqrt{1 + \varepsilon_2^2} = 2 \cdot 0,0896 \sqrt{1 + \left(2 \cdot 226,16 / 0,00245\right)^2} = 32565,54 \text{ (м)} \quad (2.46)$$

Довжина афокальної насадки:

$$L = f'_1 + f'_2 = 226,96 \text{ (м)} \quad (2.47)$$

Для забезпечення заданої глибини різкості (7 см) необхідно всю трикомпонентну оптичну систему за допомогою, наприклад, черв'ячного механізму передачі встановити на направляючу, яка може пересуватись на вказану відстань (7 см). Інший варіант - встановити панкратичну систему, при цьому рухатись вздовж направляючої буде тільки третя (фокусуєча) лінза.

Висновки до розділу

На основі фундаментальних законів квантової та оптичної електроніки розраховано основні характеристики резонатора лазера, енергетичні характеристики лазерного випромінювача та параметри оптичної системи для фокусування випромінювання.

3 РОЗРОБКА ЛАЗЕРНОЇ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ РІЗАННЯ МЕТАЛІВ

Загальна структурна схема лазерної технологічної установки на основі газового лазера представлена на рис. 3.1.

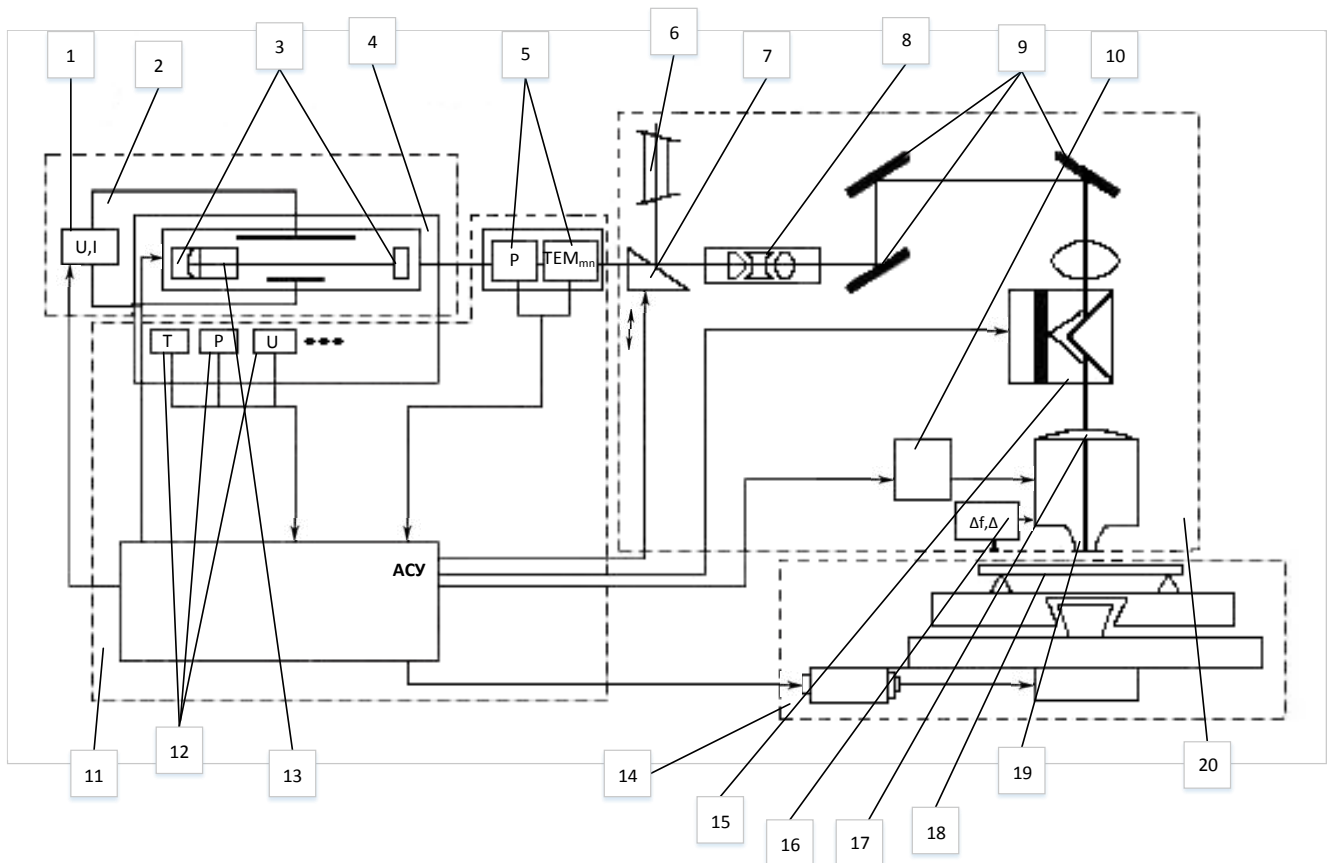


Рис.3.1 Структурна схема лазерної технологічної установки: 1 - Елементи системи накачування; 2 –Випромінювач; 3 - Дзеркала резонатора; 4 - Активне середовище; 5 - Система вимірювання вихідних параметрів лазерного пучка; 6 - Юстувальний лазер; 7 - Оптичний затвор; 8 - Об'єктив; 9 - Поворотні дзеркала; 10 - Система подачі газу; 11 - АСУ параметрами установки і технологічного процесу; 12 - Датчики параметрів лазера; 13 - Пристрій модуляції випромінювання; 14 - Координатний пристрій; 15 - Пристрій обертання площини поляризації; 16 - Система стабілізації положення фокальної площини і зазору; 17 - Фокусувальна система; 18 - Оброблювана деталь; 19 –Сопло; 20 - Система формування і транспортування випромінювання і газу.

Устаткування для лазерного різання складається з:

- випромінювача;
- системи формування і транспортування випромінювання і газу;
- координатного пристрою;
- автоматизованої системи управління (АСУ).

Випромінювач генерує лазерне випромінювання з необхідними для різання оптичними, енергетичними і просторово-часовими параметрами. До його складу входять:

- елементи системи накачування;
- активне середовище;
- дзеркала резонатора;
- при необхідності, пристрій модуляції випромінювання.

Система формування та транспортування випромінювання і газу призначена для передачі лазерного пучка від випромінювача до оброблюваної деталі, а також для формування необхідних параметрів газу, що надходить в зону різання через сопло. До складу даної системи входять:

- юстувальні лазер;
- оптичний затвор;
- оптичні трансформатори (об'єктиви);
- поворотні дзеркала;
- пристрій обертання площини поляризації;
- фокусується система;
- система стабілізації становища фокальній площині і зазору;
- система подачі газу;
- сопло.

За допомогою координатного пристрою виконується відносно переміщення лазерного променя і деталі в просторі. Такий пристрій містить двигуни, привід, виконавчі механізми.

АСУ призначена для контролю і управління параметрами лазера, передачі команд на виконавчі модулі координатного пристрою і системи формування і транспортування випромінювання і газу. До складу АСУ входять:

- підсистема датчиків параметрів лазера (температури, тиску, складу робочої суміші і ін.);
- підсистема датчиків параметрів випромінювання (розбіжність, потужності, стабільності осі діаграми спрямованості і ін.);
- підсистема управління затвором;
- підсистема управління адаптивною оптикою;
- підсистема управління координатним пристроєм.

Важливою складовою установки є випромінювач, характеристики якого розраховано вище.

Креслення оптичної схеми випромінювача технологічного лазера на CO_2 наведено на рис. 3.3.

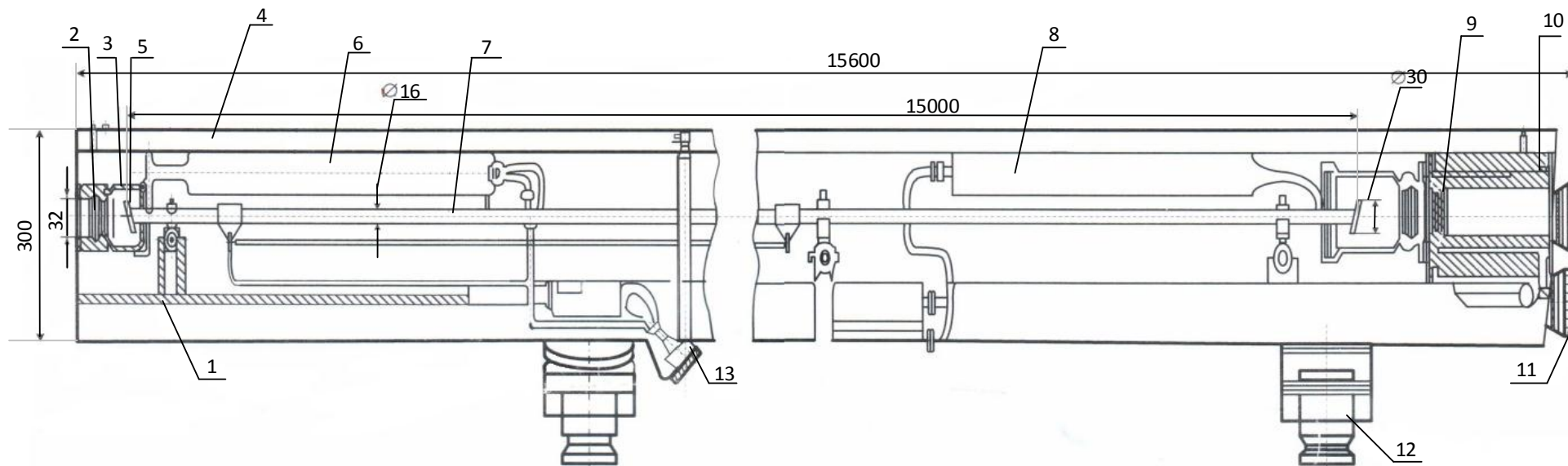


Рис. 3.3 Креслення оптичної схеми випромінювача технологічного лазера на CO_2

Таблиця 3.1 Перелік елементів випромінювача

Позиційне позначення	Найменування	Кількість
1	Основа	1
2	Вихідне сферичне дзеркало	1
3	Обійма	2
4	Кожух	1
5	Вікно Брюстера	2
6	Катод	1
7	Газорозрядна трубка з CO ₂	1
8	Анод	1
9	«Глухе» дзеркало	1
10	Вузел кріплення дзеркала	1
11	Юстувальний гвинт	2
12	Опора	4
13	Роз'єм	1

Висновки до розділу

Запропоновано загальну схему технологічного лазера та її удосконалення за рахунок способу адаптивної дії лазерного випромінювання на речовину. Також розроблено оптичні, структурні та електричні схеми блоків і вузлів установки та опис її роботи в цілому.

4 БЕЗПЕКА ПРИ РОБОТІ З ТЕХНОЛОГІЧНИМ ЛАЗЕРОМ

4.1 Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів у виробничому приміщенні

Під час роботи в даному приміщенні, виникають ряд небезпечних і шкідливих виробничих факторів, які класифікуються за [12-14].

Небезпечний виробничий фактор – небажане явище, яке супроводжує виробничий процес і дія якого за певних умов може призвести до травми або іншого раптового погіршення здоров'я працівника (гострого отруєння, гострого захворювання) і навіть до раптової смерті.

Шкідливий виробничий фактор – небажане явище, яке супроводжує виробничий процес і вплив якого на працюючого може призвести до погіршення самопочуття, зниження працездатності, захворювання, виробничо зумовленого чи професійного, і навіть смерті, як результату захворювання.

Як правило, всі несприятливі виробничі чинники розглядаються як єдине поняття – небезпечний та шкідливий виробничий фактор.

Визначальними ознаками небезпечних та шкідливих виробничих факторів є: можливість безпосереднього негативного впливу на організм працівника; ускладнення нормального функціонування органів людини; можливість порушення нормального стану елементів виробничого процесу, в результаті якого можуть виникати аварії, вибухи, пожежі, травматизм.

Дане приміщення характеризується небезпечними та шкідливими виробничими факторами фізичної, хімічної, біологічної та психофізіологічної груп [12], які розподіляються так:

- 1) Фізичні небезпечні і шкідливі виробничі фактори:
 - високий рівень інфразвуку, шуму, ультразвуку та вібрації;
 - високий рівень електромагнітних випромінювань;
 - високе значення напруги в електричній мережі;

- понижена або підвищена температура, вологість і швидкість руху повітря робочої зони;

- відсутність або недостатність природного освітлення;

- недостатня освітленість робочої зони;

- пряма або відбита блискучість.

2) Хімічні небезпечні і шкідливі фактори – шкідливі хімічні речовини.

3) Біологічні небезпечні і шкідливі виробничі фактори – немає.

4) Психофізіологічні небезпечні і шкідливі виробничі фактори:

а) фізичні перевантаження – немає.

б) нервово-психічні перевантаження:

- перенапруження аналізаторів;

- монотонність праці.

Наведеноімовірні причини виникнення вказанихчинників і стисло опишемо їхню дію на організм людини.

Високий рівень шуму і вібрації робочої зони спричиняєтьсяроботою таких елементів комп'ютерів, як жорсткий диск, вентилятори блоку живлення, охолодження мікропроцесора, швидкісні CD-ROM (DVD-ROM), механічні сканери, пересувні механічні частини принтера, що може викликатипсихічні та фізіологічні порушення, що знижують працездатність і створюють передумови для загальних та професійних захворювань і виробничого травматизму [15-16].

Високий рівень інфразвуку спричиняєтьсявентиляторами та іншими рухомими елементами обладнання з частотою рухів менше 20 Гц або 1200 об/хв, що супроводжується відчуттям обертання, розхитування, почуттям тривоги, страху, біллю у вухах, порушенням роботи органів рівноваги.

Високий рівень ультразвуку може бути викликанийобладнанням, у якому генеруються ультразвукові коливання для виконання технологічних операцій, а також обладнання, при експлуатації якого ультразвук виникає як побічний фактор, що може викликатизсуви у стані нервової, серцево-судинної, дихальної, ендокринної системах організму, у обміні речовин та терморегуляції людини.

Високий рівень електромагнітних випромінювань радіочастотного діапазону спричиняється лабораторними та вимірвальними приладами різного призначення, персональними комп'ютерами та інше, що може спровокувати при постійному впливі стійкі функціональні зміни у центральній нервовій та серцево-судинній системах, а при тривалому впливі – підвищену стомлюваність, дратівливість, головний біль тощо.

Підвищений рівень електромагнітних випромінювань промислової частоти спричиняється будь-якими електроустановками та струмоведучими частинами промислової частоти, що може спровокувати поляризацію атомів і молекул тіла людини, появу іонних струмів, і як наслідок – нагрівання тканин.

Підвищений рівень електромагнітних випромінювань оптичного діапазону спричиняється оптичними квантовими генераторами, що може спровокувати головний біль, порушення роботи терморегулюючого апарату, утворення ракових пухлин, електроофтальмію, нервові розлади.

Високе значення напруги в електричній мережі спричиняється наявністю електрообладнання, що може спровокувати ураження електричним струмом працівника.

Підвищена або понижена температура повітря робочої зони спричиняється різкою зміною температури повітря навколишнього середовища, наявністю або відсутністю опалення робочого приміщення тощо. Це може спровокувати перегрів або переохолодження організму людини.

Підвищена або понижена відносна вологість повітря робочої зони спричиняється різною кількістю води, що випаровується у приміщенні, метеорологічними умовами поза приміщенням, що може спровокувати зменшення або збільшення тепловіддачі організмом людини, що сприяє його перегріванню або переохолодженню.

Підвищена або понижена рухливість повітря робочої зони спричиняється нераціональними параметрами системи вентиляції або її відсутністю, що може спровокувати порушення реакції терморегуляції організму працівника.

Недостатність або відсутність природного освітлення спричиняється відсутністю або недостатніми розмірами віконних проїм, а також наявністю конфронтуючих будинків та споруд. Відсутність або недостатність природного освітлення приводить до напруження зору, послабляє увагу, приводить до настання передчасної стомленості.

Недостатня освітленість робочої зони спричиняється відсутністю або недостатністю природного освітлення, нераціональним розташуванням світильників та ламп штучного освітлення тощо. Недостатня освітленість може стати причиною багатьох важких і смертельних випадків на виробництві.

Пряма або відбита блискучість спричиняється наявністю в приміщенні блискучих поверхонь, які здатні відбивати промені світла, що може призвести до швидкої втоми органів зору працюючого.

Шкідливі хімічні речовини в повітрі робочої зони спричиняються виділенням пилу, озону, оксидів азоту й аероіонізації під час роботи за комп'ютером. У приміщеннях із ПК оператори піддаються впливу пилу, що притягається до працюючого і сильно наелектризованого обладнання. Головними джерелами озону на комп'ютеризованих місцях є електронно-променеві трубки відеотерміналів та лазерні принтери. При роботі ПК виникає іонізація середовища, що приводить до фізико-хімічних змін у структурі речовин. У процесі роботи за ПК при сильній запиленості приміщення часточки пилу попадають в організм людини, справляючи на нього несприятливий вплив, ускладнюючи дихання. Оксиди азоту (NO , N_2O_3 , NO_2 , N_2O_5) чинять подразливу дію на органи дихання, викликаючи кашель, блювоту, іноді головний біль. Особливу небезпеку щодо впливу на здоров'я представляє підвищена концентрація озону – високотоксичного подразнюючого газу. Озон можна виявити за запахом, або за сухістю та подразненням слизових оболонок. При більших концентраціях появляються головні болі, нездужання. При тривалій роботі в високоіонізованому повітряному середовищі може виникнути сильна перевтома, що може послабити захисні властивості організму та імунітет до інших захворювань.

Перенапруження аналізаторів спричиняється інтенсивною роботою за ЕОМ, що призводить до швидкої втоми органів зору працюючого і навіть до погіршення зору.

Монотонність праці спричиняється одноманітністю роботи працюючого і призводить до швидкої втоми працівника, зниження функціональних можливостей організму та інтересу до роботи, сонливості. Монотонність викликає також у працівника переоцінку тривалості робочого часу (зміна здається значно довшою), а також підвищує аварійність і травматизм, призводить до текучості кадрів.

4.2 Карта умов праці

З метою проведення атестації робочого місця за умовами праці необхідна карта умов праці. В таблиці 4.1 наведено оцінку факторів виробничого і трудового процесів [17].

I. Гігієнічна оцінка умов праці:

Підвищена концентрація шкідливої хімічної речовини 2-го класу небезпеки – 1 ст.

Підвищений рівень шуму – 1 ст.

Підвищений рівень неіонізуючих випромінювань радіочастотного діапазону – 1 ст.

Підвищений рівень неіонізуючих випромінювань оптичного діапазону – 1 ст.

Підвищена температура в теплий період року – 1 ст.

Підвищена відносна вологість повітря в теплий період року – 1 ст.

Недостатня освітленість робочої зони штучним освітленням – 1 ст.

II. Оцінка технічного й організаційного рівня:

Технічний рівень робочого місця не відповідає нормативним вимогам.

III. Атестація робочого місця:

Робоче місце атестовано за першим ступенем шкідливості.

Таблиця 4.1 – Оцінка факторів виробничого і трудового процесів

Номер	Фактори виробничого середовища і трудового процесу	Нормативне значення (ГДР, ГДК)		Фактичне значення	3-й клас: шкідливі умови і характер праці		
		ни-жнє	вер-хнє		I ступінь	II ступінь	III ступінь
1	Шкідливі хімічні речовини:						
	1-й клас небезпеки		–	–			
	2-й клас небезпеки		5	14,51	+		
	3-й, 4-й класи небезпеки		–	–			

Продовження таблиці 4.1

Номер	Фактори виробничого середовища і трудового процесу	Нормативне значення (ГДР, ГДК)		Фактичне значення	3-й клас: шкідливі умови і характер праці		
		нижнє	верхнє		I ступінь	II ступінь	III ступінь
2	Вібрація		76	28			
3	Шум		50	52	+		
4	Інфразвук		110	21			
5	Ультразвук		110	96			
6	Неіонізуючі випромінювання:						
	• радіочастотний діапазон		3	25	+		
	• діапазон промислової частоти		5	4,64			
	• оптичний діапазон		0,033	0,647	+		
7	Мікроклімат у приміщенні:						
	• температура повітря, °С	15	26	27	+		
	• швидкість руху повітря, м/с	0,2	0,6	0,4			
	• відносна вологість повітря, %		75	91	+		
8	Виробниче освітлення:						
	• КПО для природного освітлення, %	1,5		2,1			
	• освітленість для штучного освітлення, лк	200		149	+		
	Кількість факторів	–	–	–	7	0	0

4.3 Рекомендації щодо умов праці

З метою забезпечення чистоти повітря робочої зони потрібно доповнити природну вентиляцію механічною [18].

Для забезпечення допустимих параметрів шуму в приміщенні потрібно проводити постійне змащування підшипників вентиляторів системи вентиляції.

Для забезпечення допустимих параметрів неіонізуючих випромінювань радіочастотного діапазону в приміщенні потрібно екранувати джерела випромінювання.

З метою забезпечення нормованих параметрів неіонізуючих випромінювань оптичного діапазону в приміщенні необхідно застосувати захист відстанню або часом.

Для забезпечення нормованих параметрів температури повітря в приміщенні потрібно використати кондиціонування повітря.

Для забезпечення нормованих параметрів відносної вологості повітря в приміщенні потрібно застосувати систему кондиціонування повітря.

З метою забезпечення допустимих параметрів освітленості для штучного освітлення в приміщенні доцільно доповнити загальне штучне освітлення місцевим, утворивши систему комбінованого штучного освітлення.

4.4 Розрахунок безпечної відстані від лазерного випромінювання

Вихідні дані: потужність лазера $W = 13$ Вт, тривалість опромінення $t = 0,8$ с, кут розсіювання променя $\varphi = 0,008$ рад.

Як засіб захисту працюючих від лазерного випромінювання вибираємо захист відстанню [19].

Безпечну відстань L можна розрахувати за формулою:

$$L = \frac{1,2}{\varphi} \sqrt{\frac{W}{E}} \text{ (м)} \quad (4.1)$$

де W – потужність лазера, Вт;

E – гранично допустима щільність потужності, Вт/м²;

φ – кут розсіювання променя, рад.

Гранично допустима щільність потужності для хвилі з довжиною $\lambda = 1800 \dots 2500$ нм і тривалості опромінення від 3 до 100 с визначається за формулою [20]:

$$E = 5 \cdot 10^3 / \sqrt{t} \text{ (Вт/м}^2\text{)} \quad (4.2)$$

Підставивши у формулу (4.2) відоме значення тривалість опромінення, отримаємо гранично допустима щільність потужності:

$$E = 5 \cdot \frac{10^3}{\sqrt{0,8}} = 5590,17 \text{ (Вт/м}^2\text{)} \quad (4.3)$$

Використовуючи формулу (4.1) знайдемо безпечну відстань

$$L = \frac{1,2}{0,008} \sqrt{\frac{13}{5590,17}} = 7,2335 \text{ (м)} \quad (4.4)$$

Небезпечну зону слід чітко відокремити дисциплінарним бар'єром.

Лазерна установка, що розробляється за класом безпеки відноситься до 3 класу приладів, випромінювання яких є шкідливим при прямому або відбитому випромінюванні для очей і шкіри. Це зумовлює обов'язкове використання захисних

окулярів при роботі з лазером і чітке дотримання правил експлуатації лазерних установок 3 класу [21].

Висновки до розділу

Проаналізовано умови безпеки при роботі на виробництві, пов'язані з функціонуванням технологічного лазера.

5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

5.1 Оцінювання комерційного потенціалу розробки

Метою магістерської кваліфікаційної роботи є розробка методу і засобу лазерної обробки металів. У новій розробці удосконалено метод лазерної обробки металів, у якому на відміну від існуючих аналогів на оброблювану поверхню металу спрямовують лінійно поляризований сфокусований лазерний пучок випромінювання з радіальним напрямком поляризації.

Для оцінки комерційного потенціалу розробки проведемо технологічний аудит. Для проведення технологічного аудиту було залучено 3-х незалежних експертів Вінницького національного технічного університету, кафедра лазерної техніки та оптоелектроніки: Тужанський С. Є., Кожем'яко А. В., Мартинюк Т. Б. За допомогою таблиці 5.1 за п'ятибальною шкалою використовуючи 12 критеріїв оцінки комерційного потенціалу розробки експерти надали свої оцінки.

Таблиця 5.1 – Рекомендовані критерії оцінювання комерційного потенціалу розробки та їх можлива бальна оцінка

Критерії оцінювання та бали (за 5-ти бальною шкалою)					
Кри-терій	0	1	2	3	4
Технічна здійсненність концепції:					
1	Достовірність концепції не підтверджена	Концепція підтверджена експертними висновками	Концепція підтверджена розрахунками	Концепція перевірена на практиці	Перевірено роботоздатність продукту в реальних умовах
Ринкові переваги (недоліки):					
2	Багато аналогів на малому ринку	Мало аналогів на малому ринку	Кілька аналогів на великому ринку	Один аналог на великому ринку	Продукт не має аналогів на великому ринку
3	Ціна продукту значно вища за ціни аналогів	Ціна продукту дещо вища за ціни аналогів	Ціна продукту приблизно дорівнює цінам аналогів	Ціна продукту дещо нижче за ціни аналогів	Ціна продукту значно нижче за ціни аналогів

Продовження таблиці 5.1

4	Технічні та споживчі властивості продукту значно гірші, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту трохи гірші, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту на рівні аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту трохи кращі, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту значно кращі, ніж в аналогів
5	Експлуатаційні витрати значно вищі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати дещо вищі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати на рівні експлуатаційних витрат аналогів	Експлуатаційні витрати трохи нижчі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати значно нижчі, ніж в аналогів
Ринкові перспективи					
6	Ринок малий і не має позитивної динаміки	Ринок малий, але має позитивну динаміку	Середній ринок з позитивною динамікою	Великий стабільний ринок	Великий ринок з позитивною динамікою
7	Активна конкуренція великих компаній на ринку	Активна конкуренція	Помірна конкуренція	Незначна конкуренція	Конкурентів немає
Практична здійсненність					
8	Відсутні фахівці як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї	Необхідно наймати фахівців або витратити значні кошти та час на навчання наявних фахівців	Необхідне незначне навчання фахівців та збільшення їх штату	Необхідне незначне навчання фахівців	Є фахівці з питань як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї
9	Потрібні значні фінансові ресурси, які відсутні. Джерела фінансування ідеї відсутні	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування відсутні	Потрібні значні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Не потребує додаткового фінансування
10	Необхідна розробка нових матеріалів	Потрібні матеріали, що використовуються у військово-промисловому комплексі	Потрібні дорогі матеріали	Потрібні досяжні та дешеві матеріали	Всі матеріали для реалізації ідеї відомі та давно використовуються у виробництві
11	Термін реалізації ідеї більший за 10 років	Термін реалізації ідеї більший за 5 років. Термін окупності інвестицій більше 10-ти років	Термін реалізації ідеї від 3-х до 5-ти років. Термін окупності інвестицій більше 5-ти років	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій від 3-х до 5-ти років	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій менше 3-х років

Продовження таблиці 5.1

12	Необхідна розробка регламентних документів та отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту	Необхідно отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту, що вимагає значних коштів та часу	Процедура отримання дозвільних документів для виробництва та реалізації продукту вимагає незначних коштів та часу	Необхідно тільки повідомлення відповідним органам про виробництво та реалізацію продукту	Відсутні будь-які регламентні обмеження на виробництво та реалізацію продукту
----	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------

Таблиця 5.2 – Рівні комерційного потенціалу розробки

Середньоарифметична сума балів СБ, розрахована на основі висновків експертів	Рівень комерційного потенціалу розробки
0-10	Низький
11-20	Нижче середнього
21-30	Середній
31-40	Вище середнього
41-48	Високий

В таблиці 5.3 наведено результати оцінювання експертами комерційного потенціалу розробки.

Таблиця 5.3 – Результати оцінювання комерційного потенціалу розробки

Критерії	Прізвище, ініціали, посада експерта		
	Тужанський С.Є.	Кожем'яко А.В.	Мартинюк Т.Б.
	Бали, виставлені експертами:		
1	4	4	2
2	3	3	3
3	2	3	4
4	4	2	4
5	4	3	3
6	5	5	3
7	2	3	3
8	3	3	3
9	4	4	2

Продовження таблиці 5.3

10	3	2	2
11	2	1	4
12	1	3	3
Сума балів	СБ ₁ =37	СБ ₂ =35	СБ ₃ =36
Середньоарифметична сума балів $\overline{СБ}$	$\overline{СБ} = \frac{\sum_1^3 СБ_i}{3} = \frac{37 + 35 + 36}{3} = 36$		

Середньоарифметична сума балів, розрахована на основі висновків експертів склала 36, що згідно таблиці 5.2 вважається, що рівень комерційного потенціалу розробки є вище середнього.

5.2 Прогнозування витрат на виконання науково-дослідної роботи

1. Основна заробітна плата – винагорода за виконану роботу відповідно до встановлених норм праці. Вона встановлюється у вигляді тарифних ставок (окладів) і відрядних розцінок для робітників та посадових окладів для службовців. Стаття «Основна заробітна плата робітників» містить витрати на виплату основної заробітної плати робітникам, зайнятим виробництвом продукції.

Основна заробітна плата кожного із розробників (дослідників) Z розраховується за формулою:

$$Z = \frac{M}{T_p} * t, \text{ [грн.]}, \quad (5.1)$$

де M – місячний посадовий оклад конкретного розробника.

T_p – число робочих днів, $T_p = 22$;

t – число днів роботи розробника.

Розрахунки основної заробітної плати зведемо в таблицю 5.4:

Таблиця 5.4 – Розрахунок основної заробітної плати розробників

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, грн.	Оплата за робочий день, грн.	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, грн.
Керівник	12000	545.5	5	2727
Інженер	11000	500.0	32	16000
Всього				18727

2. Основна заробітна плата робітників Z_p розраховується за формулою:

$$Z_p = \sum_{i=1}^n t_i * C_i, \quad (5.2)$$

де n – число робіт по видах та розрядах;

t_i – норма часу на виконання конкретної операції, годин;

C_i – погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, який виконує певну роботу, грн./год.:

$$C_i = \frac{M_M * K_i}{T_p * T_{зм}}, \quad (5.3)$$

де M_M – мінімальна місячна оплата праці, грн.;

K_i – тарифний коефіцієнт робітника даного розряду;

T_p – число робочих днів в місяці ($T_p=21\dots23$ дні);

$T_{зм}$ – тривалість зміни, годин ($T_{зм} = 8$ годин).

Мінімальна місячна оплата праці робітника з 01.01.2019 року складає 4173,00 грн.

K_i – тарифний коефіцієнт робітника відповідного розряду. Величина чинних тарифних коефіцієнтів робітників відповідних розрядів для бюджетної сфери наведена в таблиці 5.5:

Таблиця 5.5 – Тарифний коефіцієнт робітника відповідного розряду

Розряд	K_i
1	1,00
2	1,09
3	1,18
4	1,27
5	1,36
6	1,45
7	1,54
8	1,64

Інформацію про основну заробітну плату заносимо до таблиці 5.6

Таблиця 5.6 – Основна заробітна плата робітників

Найменування робіт	Трудовісткість, нормо-годин	Розряд роботи	Погодинна тарифна ставка, грн.	Величина оплати, грн.
1	2	3	4	5
1.Підготовчі	8	1	23,7	189,7
2.Монтажні	18	3	28,0	503,6
3.Складальні	13	5	32,2	419,2
4.Налагоджувальні	6	2	25,8	155,1
5.Випробувальні	3	4	30,1	90,3
Всього				1357,9

3. До статті «Додаткова заробітна плата» відносяться витрати на виплату виробничому персоналу підприємства додаткової заробітної плати за працю понад установлені норми, заохочувальні виплати за поточну виробничу діяльність, компенсаційні виплати тощо. Звичайно, ці витрати встановлюються у відсотках до основної заробітної плати на підставі відповідних розрахунків на підприємстві:

$$З_д = 11\% * З_г, \quad (5.4)$$

$$З_д = 11\% * (18727 + 1357,9) = 2209,4 \text{ (грн.)}.$$

4. Витрати на соціальні заходи виникають внаслідок здійснення обов'язкової сплати єдиного внеску на загальнообов'язкове державне соціальне страхування. Відрахування на соціальні заходи здійснюється від суми всіх витрат на оплату праці робітників, зайнятих безпосередньо виробництвом продукції:

$$В_{СЗ} = (З_г + З_д) * \frac{\beta}{100\%}, \quad (5.5)$$

де β – ставка єдиного внеску на загальнообов'язкове державне соціальне страхування, %.

З 1.01.2016 року ставка єдиного внеску на загальнообов'язкове державне соціальне страхування встановлена залежно від класу професійного ризику виробництва і для бюджетної сфери $\beta=22,0\%$.

$$В_{СЗ} = (18727 + 1357,9 + 2209,4) * \frac{22,0\%}{100\%} = 4904,8 \text{ (грн.)}.$$

5. У спрощеному вигляді амортизаційні відрахування у загальному можуть бути розраховані за формулою:

$$А = \frac{Ц * Т}{Т_{кор} * 12} \text{ [грн.]}, \quad (5.6)$$

де $Ц$ – балансова вартість даного виду обладнання (приміщень), грн.;

$Т_{кор}$ – час користування;

$Т$ – термін використання обладнання (приміщень), цілі місяці.

Згідно пункту 137.3.3 Податкового кодексу амортизація нараховується на основні засоби вартістю понад 2500 грн.

Всі проведені розрахунки амортизаційних відрахувань заносимо в табл. 5.7.

Таблиця 5.7 – Розрахунок амортизаційних відрахувань

Найменування обладнання, приміщень	Балансова вартість, грн.	$t_{\text{кор}}$ (р)	Термін використання міс.	Величина амортизаційних відрахувань, грн.
1. Генератор	13000	4	1	270,83
2. Вольтметр	3500	4	1	72,92
3. Лазер	28800	4	1	600,00
4. Комп'ютер	9000	2	1	375,00
5. Паяльник	3500	4	1	72,92
Всього				1391,67

6. Норма витрат матеріалу – це плановий показник, який визначає максимально допустимі затрати відповідних ресурсів на виробництво одиниці продукції в умовах певного рівня техніки і організації виробництва.

Витрати на матеріали M , що були використані під час виконання даного етапу роботи, розраховуються по кожному виду матеріалів за формулою:

$$M = \sum_1^n N_i * C_i * K_i - \sum_1^n B_i * C_B \text{ грн.}, \quad (5.7)$$

де N_i – витрати матеріалу i -го найменування, кг;

C_i – вартість матеріалу i -го найменування, грн./кг.;

K_i – коефіцієнт транспортних витрат, $K_i = (1,1 \dots 1,15)$;

B_i – маса відходів матеріалу i -го найменування, кг;

C_B – ціна відходів матеріалу i -го найменування, грн/кг;

n – кількість видів матеріалів.

Інформацію про використані матеріали подамо у вигляді табл. 5.8.

7. Витрати на комплектуючі вироби, які використовують при виготовленні одиниці продукції, розраховуються, згідно їх номенклатури, за формулою:

$$K = \sum_{i=1}^n N_i * C_i * K_i, \quad (5.8)$$

де N_i – кількість комплектуючих i -го виду, шт.;

C_i – покупна ціна комплектуючих i -го найменування, грн.;

K_i – коефіцієнт транспортних витрат (1,1...1,15).

Таблиця 5.8 – Матеріали, що використані на розробку

Найменування матеріалу	Ціна за одиницю, грн.	Витрачено	Вартість витраченого матеріалу, грн.
Припой ПОС-90	35	0,11	3,85
Флюс Goot BS-10	460	0,027	12,42
Спиртобензин СВС-50	5	0,04	0,2
Дріт монтажний	0,45	0,06	0,027
Всього			16,49
З врахуванням коефіцієнта транспортування			18,14

Таблиця 5.9 – Комплектуючі, що використані на розробку

Найменування	Витрачено, шт.	Ціна, грн.	Вартість, грн.
Трансформатор	1	3000	3000
Діоди	7	2	14
Перемикач	1	1560	1560
Конденсатори	13	4	52
Резистори	18	200	3600
Транзистори	4	50	200
Мікросхеми	1	120	120
Сталь	3	790	2370
Витратні матеріали	1	700	700
Всього (з врахуванням транспортних витрат)			12777,60

8. До статті «Паливо та енергія на технологічні цілі» відносяться витрати на всі види палива й енергії, що безпосередньо використовуються у процесі виробництва продукції. У даному випадку будемо враховувати лише витрати на електроенергію. Витрати на енергію визначаються на основі витрат на одиницю продукції та тарифів на енергію за допомогою залежності:

$$V_e = V * П * Ф * K_{\pi}, \quad (5.9)$$

де B – вартість 1 кВт енергії, грн. $B = 8,44$ грн/кВт*год;

Π – установлена потужність обладнання, кВт. При паяні використовується паяльник потужність $\Pi = 500$ Вт або $\Pi = 0,5$ кВт;

Φ – фактична кількість годин роботи обладнання, год. $\Phi = 150$ год;

K_{Π} – коефіцієнт використання потужності, $K_{\Pi} = 0,65$.

$$B_e = 8,44 * 0,5 * 150 * 0,65 = 411,45 \text{ (грн.)}$$

9. Інші витрати B_{iH} охоплюють: витрати на управління організацією, оплата службових відряджень, витрати на утримання, ремонт та експлуатацію основних засобів, витрати на опалення, освітлення, водопостачання, охорону праці тощо.

Інші витрати B_{iH} можна прийняти як (100...300)% від суми основної заробітної плати розробників та робітників, які виконували дану МКНР, тобто:

$$B_{iH} = (1 \dots 3) * (3 + 3_p). \quad (5.10)$$

$$B_{iH} = 1 * (18727 + 1357,9) = 20085 \text{ (грн.)}$$

Сума всіх попередніх статей витрат дає витрати, які безпосередньо стосуються даного розділу МКНР

$$B = 18727 + 1357,9 + 2209,4 + 4904,8 + 1391,67 + 18,14 + \\ + 12777,60 + 411,45 + 20085 = 61883,3 \text{ грн.}$$

Загальна вартість всієї МКНР визначається за формулою:

$$B_{\text{заг}} = \frac{B}{\alpha}, \quad (5.11)$$

$$B_{\text{заг}} = \frac{61883,3}{1} = 61883,3 \text{ (грн.)}$$

Прогнозування загальних витрат $ЗВ$ на виконання та впровадження результатів виконаної МКНР здійснюється за формулою:

$$ЗВ = \frac{B}{\beta}, \quad (5.12)$$

де β - коефіцієнт, який характеризує стадію виконання даної НДР.

Оскільки, робота знаходиться на стадії розробки дослідного зразка, то коефіцієнт $\beta = 0,3$.

Звідси:

$$ЗВ = \frac{61883,3}{0,3} = 206278 \text{ (грн.)}.$$

5.3 Прогнозування комерційних ефектів від реалізації результатів розробки

У даному підрозділі кількісно спрогнозуємо, яку вигоду, зиск можна отримати у майбутньому від впровадження результатів виконаної наукової роботи. Розрахуємо збільшення чистого прибутку підприємства $\Delta\Pi_i$, для кожного із років, протягом яких очікується отримання позитивних результатів від впровадження розробки, за формулою:

$$\Delta\Pi_i = \sum_1^n (\Delta\Pi_0 * N + \Pi_0 * \Delta N)_i * \lambda * \rho * \left(1 - \frac{v}{100}\right), \quad (5.13)$$

де $\Delta\Pi_0$ – покращення основного оціночного показника від впровадження результатів розробки у даному році.

N – основний кількісний показник, який визначає діяльність підприємства у даному році до впровадження результатів наукової розробки;

ΔN – покращення основного кількісного показника діяльності підприємства від впровадження результатів розробки:

Π_0 – основний оціночний показник, який визначає діяльність підприємства у даному році після впровадження результатів наукової розробки;

n – кількість років, протягом яких очікується отримання позитивних результатів від впровадження розробки:

λ – коефіцієнт, який враховує сплату податку на додану вартість. Ставка податку на додану вартість дорівнює 20%, а коефіцієнт $\lambda = 0,8333$.

ρ – коефіцієнт, який враховує рентабельність продукту. $\rho = 0,25$;

v – ставка податку на прибуток. У 2019 році – 18%.

Припустимо, що при впровадженні результатів наукової розробки покращується якість, що дозволяє підвищити ціну його реалізації на 10000 грн. Кількість одиниць реалізованої продукції також збільшиться: протягом першого року на 2 шт., протягом другого року – на 3 шт., протягом третього року на 7 шт. Реалізація продукції до впровадження розробки складала 20 шт., а її ціна 225000 грн. Розрахуємо прибуток, яке отримає підприємство протягом трьох років.

$$\Delta\Pi_1 = [10000 * 20 + (225000 + 10000) * 2] * \\ * 0,833 * 0,25 * \left(1 + \frac{18}{100}\right) = 114454 \text{ (грн.)}$$

$$\Delta\Pi_2 = [10000 * 20 + (225000 + 10000) * (2 + 3)] * \\ * 0,833 * 0,25 * \left(1 + \frac{18}{100}\right) = 400721 \text{ (грн.)}$$

$$\Delta\Pi_3 = [10000 * 20 + (225000 + 10000) * (2 + 3 + 7)] * \\ * 0,833 * 0,25 * \left(1 + \frac{18}{100}\right) = 681731 \text{ (грн.)}$$

5.4 Розрахунок ефективності вкладених інвестицій та періоду їх окупності

Розрахуємо основні показники, які визначають доцільність фінансування наукової розробки певним інвестором, є абсолютна і відносна ефективність вкладених інвестицій та термін їх окупності. Теперішню вартість інвестицій PV , що вкладаються в наукову розробку прийmemo рівну загальним витратам $PV = 3B = 206278$ грн.

Розрахуємо абсолютну ефективність вкладених інвестицій $E_{абс}$ згідно наступної формули:

$$E_{абс} = (ПП - PV), \quad (5.14)$$

де $ПП$ – приведена вартість всіх чистих прибутків, що їх отримає підприємство від реалізації результатів наукової розробки, грн.;

$$ПП = \sum_1^T \frac{\Delta\Pi_i}{(1+\tau)^i}, \quad (5.15)$$

де $\Delta\Pi_i$ - збільшення чистого прибутку у кожному із років, протягом яких виявляються результати виконаної та впровадженої НДДКР, грн.;

T - період часу, протягом якою виявляються результати впровадженої НДДКР, роки;

τ - ставка дисконтування, за яку можна взяти щорічний прогнозований рівень інфляції в країні; для України цей показник знаходиться на рівні 0,2;

t - період часу (в роках).

$$ПП = \frac{114454}{(1 + 0,2)^1} + \frac{400721}{(1 + 0,2)^2} + \frac{681731}{(1 + 0,2)^3} = 770011,77 \text{ (грн.)}.$$

$$E_{абс} = (770011,77 - 206278) = 563733,97 \text{ (грн.)}.$$

Оскільки $E_{абс} > 0$ то вкладання коштів на виконання та впровадження результатів НДДКР може бути доцільним.

Розрахуємо відносну (щорічну) ефективність вкладених в наукову розробку інвестицій $E_{в}$. Для цього користуються формулою:

$$E_B = \sqrt[T_{\text{ж}}]{1 + \frac{E_{\text{абс}}}{PV}} - 1, \quad (5.16)$$

$T_{\text{ж}}$ – життєвий цикл наукової розробки, роки

$$E_B = \sqrt[3]{1 + \frac{563733,97}{206278}} - 1 = 0,55 = 55\%.$$

Визначимо мінімальну ставку дисконтування, яка у загальному вигляді визначається за формулою:

$$\tau = d + f, \quad (5.17)$$

де d - середньозважена ставка за депозитними операціями в комерційних банках; в 2018 році в Україні $d = (0,14 \dots 0,2)$;

f - показник, що характеризує ризикованість вкладень; зазвичай, величина $f = (0,05 \dots 0,1)$.

$$\tau_{\text{min}} = 0,18 + 0,05 = 0,23.$$

Так як $E_B > \tau_{\text{min}}$ то інвестор може бути зацікавлений у фінансуванні даної наукової розробки.

Розрахуємо термін окупності вкладених у реалізацію наукового проекту інвестицій за формулою:

$$T_{\text{ок}} = \frac{1}{E_B}, \quad (5.18)$$

$$T_{\text{ок}} = \frac{1}{0,55} = 1,8 \text{ (роки)}.$$

Так як $T_{\text{ок}} \leq 3 \dots 5$ -ти років, то фінансування даної наукової розробки в принципі є доцільним.

5.5 Висновки до розділу

В даному розділі було оцінено економічний потенціал розробки методу і засобу лазерної обробки металів, який виявився на вище середньому рівні.

Прогнозування витрат на виконання науково-дослідної роботи по кожній з статей витрат складе 61883,3 грн. Загальна ж величина витрат на виконання та впровадження результатів даної НДР буде складати 206278 грн.

Вкладені інвестиції в даний проект окупляться через 1,8 роки при прогнозованому прибутку 770011,77 грн. за три роки.

ВИСНОВКИ

Проведено аналіз основних типів газових лазерів для обробки матеріалів, розглянуто їх спектральні та інші оптичні характеристики, особливості функціонування, умов роботи та генерації імпульсів високої потужності. Також проведено порівняльний аналіз промислових технологічних комплексів для обробки матеріалів на основі газових лазерів.

Зроблено порівняння характеристик провідних виробників лазерних технологічних установок на основі CO₂ лазерів, розглянуто перспективні технології на газових лазерах із підвищення ефективності перетворення енергії накачки та ККД.

На основі фундаментальних законів квантової та оптичної електроніки розраховано основні характеристики резонатора лазера, енергетичні характеристики лазерного випромінювача та параметри оптичної системи для фокусування випромінювання.

Запропоновано загальну схему технологічного лазера та її удосконалення за рахунок способу адаптивної дії лазерного випромінювання на речовину. Також розроблено оптичні, структурні та електричні схеми блоків і вузлів установки та опис її роботи в цілому.

Проаналізовано умови безпеки при роботі на виробництві, пов'язані з функціонуванням технологічного лазера.

Прогнозування витрат на виконання науково-дослідної роботи по кожній з статей витрат складе 61883,3 грн. Загальна ж величина витрат на виконання та впровадження результатів даної НДР буде складати 206278 грн.

Вкладені інвестиції в даний проект окупляться через 1,8 роки при прогнозованому прибутку 770011,77 грн. за три роки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Альтудов Ю.К., Гарицин А.Г. Лазерные микротехнологии и их применения в электронике. – М.: «Радио и связь», 2001.
2. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюрлов А.И. Технологические процессы лазерной обработки. – М.: МГТУ, 2006.
3. Алмаметов В.Б., Баннов В.Я., Кочегаров И.И. Информационные технологии проектирования РЭС. Единое информационное пространство предприятия: Учебное пособие. - Пенза: Изд-во ПГУ, 2013.
4. Кочегаров И.И. и др. Автоматизация процессов измерения механических воздействий для защиты РЭС / Современные информационные технологии: труды международной научно-технической конференции. - Пенза: Пензенская государственная технологическая академия, 2011.
5. Межевов В.С., Петровский В.Н. Обработка материалов с помощью мощных волоконных лазеров - РИТМ. – 2008. – №4(34).
6. Гришко А.К., Баннов В.Я. Анализ моделей тепловых режимов в многоуровневых конструктивно-функциональных модулях радиоэлектронных систем специального назначения. / Труды международного симпозиума "Надежность и качество". - Пенза: Изд-во ПГУ, 2013. - т. 2.
7. Менушенков А.П., Неволин В.Н., Петровский В.Н. Физические основы лазерной технологии. – М.: НИЯУ МИФИ, 2010.
8. Пихтин А.Н. Физические основы квантовой электроники и оптоэлектроники - М.: Высш. шк., 1983. - 304 с.
9. Григорук В.І., Коротков П.А., Хижняк А.І. Лазерна фізика: Підручник - К. : “МП Леся”, 1997. -480 с.
10. Звелто О. Принципы лазеров: Пер. с англ. - М.: Мир, 1990. - 560с.
11. Заказнов Н.П. Прикладная оптика - М.Машиностроение, 1988. -312 с.
12. Окатов М.А. Справочник технолога-оптика – 2-е изд., перераб, и доп. – СПб.; Политехника, 2004. – 679 с.

13. Шувалов П.А. и др. Современная кристаллография, Т.4, Физические свойства кристаллов– М.:Наука, 1981. – 367 с.
14. Звелто О. Принципы лазеров. – М.: " Мир", 1984. – 400с.
15. Зверев В.А., Кривоустова Е.В., Точилина Т.В. Оптические материалы. Часть 1. Учебное пособие для конструкторов оптических систем и приборов. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 244 с.
16. ГОСТ 12.0.003-74. ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
17. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої та загальної вібрацій.
18. ДСН 3.3.6-037-99. Державні санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку.
19. ДСН 3.3.6.042-99. Державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень.
20. ДБН В.2.5-28-2006. Природне і штучне освітлення.
21. Порядок проведення атестації робочих місць за умовами праці (Затверджено постановою КМУ від 1 серпня 1992 року № 442).
22. Козловський В. О. Економіка, організація виробництва та менеджмент в дипломних роботах. Навчальний посібник / В. О. Козловський – Вінниця : ВНТУ, 2004. – 94.
23. Методичні рекомендації з комерціалізації розробок, створених в результаті науково-технічної діяльності – К.: Наказ державного комітету України з питань науки, інновацій та інформатики (Лист № 1/06-4-97 від 13.09.2010 р.).
24. Козловський В. О. Основи підприємництва. Курс лекцій. Част. 1. / В. О. Козловський – Вінниця : ВНТУ, 2005. – 196 с.
25. Козловський В. О. Основи підприємництва. Курс лекцій. Част. 2 / В. О. Козловський – Вінниця : ВНТУ, 2006. – 184 с.
26. Козловський В. О. Підприємницька діяльність. Практикум. Част. I. / В. О. Козловський – Вінниця : ВНТУ, 2006. – 175 с.

27. Козловський В. О. Підприємницька діяльність. Практикум. Част. II. / В. О. Козловський – Вінниця : ВНТУ, 2006. – 170 с.

28. Козловський В. О. Інноваційний менеджмент : Навчальний посібник / В. О. Козловський – Вінниця : ВНТУ, 2007. – 210 с.

29. Козловський В. О., Лесько О. Й. Бізнес-планування: Навчальний посібник / В. О. Козловський, О. Й. Лесько [2-е вид., доп. та переробл.] – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, ВНТУ, 2008. – 241 с.

30. Козловський В. О., Лесько О. Й. Інноваційний менеджмент: Практикум / В. О. Козловський, О. Й. Лесько. – Вінниця : ВНТУ, 2006. – 166 с.

31. Козловський В. О. Техніко-економічні обґрунтування та економічні розрахунки в дипломних проектах та роботах. Навчальний посібник / В. О. Козловський – Вінниця : ВНТУ, 2003. – 75 с.

32. А. Г. Григорьянц, А.А. Соколов "Лазерная резка металлов" Книга 7 из серии "Лазерная техника и технология" под редакцией А.Г. Григорьянца Москва, "Высшая школа", 1988 г., стр. 56-61.

33. "Технологические лазеры" Справочник в двух томах под редакцией Г.А. Абильситова Москва, "Машиностроение", 1991 г., том. 1, стр. 171 (прототип).

34. Низьев В.Г., Нестеров А.В. Форма и глубина реза поляризованным лазерным лучом. Физика и химия обработки материалов. 1998, N 1, стр. 22-28.

ДОДАТКИ

Додаток А
(обов'язковий)

Вінницький національний технічний університет
Факультет комп'ютерних систем та автоматики
Кафедра лазерної та оптикоелектронної техніки

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри лазерної та
оптикоелектронної техніки
д.т.н., професор

_____ Н.І. Заболотна
“ ___ ” _____ 2019 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на виконання магістерської кваліфікаційної роботи

Метод і засіб лазерної обробки металів

08-04 МКР.006.00.000.ТЗ

спеціальність 152 – «Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка»
освітня програма «Лазерна техніка та оптоінформатика»

Науковий керівник,
к.т.н., доцент

_____ С.Є. Тужанський

Магістрант гр. ЛТО-18м

_____ В. Г. Габрук

Вінниця, 2019 р.

1. Підстава для виконання магістерської кваліфікаційної роботи (МКР)

Робота виконується на підставі наказу ректора ВНТУ № _____ від _____ 2019 р. та індивідуального завдання на МКР.

2. Мета та призначення МКР

Метою МКР є розширення функціональних можливостей технологічного CO₂ лазера, а також підвищення ефективності лазерної обробки металів при різанні. Призначення розробки – виконання магістерської кваліфікаційної роботи.

3. Вихідні дані для виконання МКР

- Тип лазера – газовий, CO₂;
- Накачування - електричний розряд;
- Робоча довжина хвилі - 5,09 мкм, 5.4175 мкм або 6,541 мкм (обґрунтувати);
- Резонатор - сферичний, багатошаровий діелектрик;
- Потужність лазера - 50 Вт;
- Функціональне призначення – різання металевих листів;
- Система доставки випромінювання – фокусуєча лінза, координатний стіл
- Товщина зразка – 5 мм.

4. Вимоги до виконання МКР

- Аналітичний огляд методів та засобів лазерної обробки, провести аналіз основних типів газових лазерів для обробки металів, зробити порівняння характеристик лазерних технологічних установок на основі CO₂ лазерів
- Розробка методу лазерної обробки та оптичної схеми випромінюваного каналу
- Розробка структурної схеми технологічного лазера та складального креслення випромінювача
- Економічна частина

5. Джерела розробки

1. Пихтин А.Н. Физические основы квантовой электроники и оптоэлектроники - М.: Высш. шк., 1983. - 304 с.
2. Григоруку В.І., Коротков П.А., Хижняк А.І. Лазерна фізика: Підручник - К. : “МП Леся”, 1997. -480 с.
3. Звелто О. Принципы лазеров: Пер. с англ. - М.: Мир, 1990. - 560с.
4. Заказнов Н.П. Прикладная оптика - М.Машиностроение, 1988. -312 с.
5. Окатов М.А. Справочник технолога-оптика – 2-е изд.,перераб, и доп. – СПб.; Политехника, 2004. – 679 с.

6. Етапи МКР та очікувані результати

№ пп	Назва етапу	Термін виконання		Очікувані результати
		початок	кінець	
1	Аналіз методів і засобів лазерної обробки металів			Аналітичний огляд літературних джерел, задачі дослідження, розділ 1 ПЗ
2	Моделі і методи аналізу взаємодії лазерного випромінювання із матеріалами			Розділ 2 ПЗ

3	Вибір елементної бази, проектування і розрахунок основних характеристик засобу лазерного різання			Розділ 3 ПЗ
4	Аналіз лазерної безпеки засобу			Розділ 4 ПЗ
5	Розрахунок економічних показників			Розділ 5 ПЗ
6	Оформлення пояснювальної записки та презентації			Пояснювальна записка, презентація

7. Матеріали, що виносяться до захисту МКР

Пояснювальна записка МКР, графічні та ілюстративні матеріали, протокол попереднього захисту МКР на кафедрі, відгук наукового керівника, анотації до МКР українською та англійською мовами.

8. Порядок контролю виконання та захисту МКР

Виконання етапів, оформлення графічної та розрахункової документації МКР контролюється науковим керівником згідно зі встановленими термінами. Захист МКР. Захист МКР відбувається на засіданні Державної екзаменаційної комісії (ДЕК), затвердженої наказом ректора.

9. Вимоги до оформлення МКР

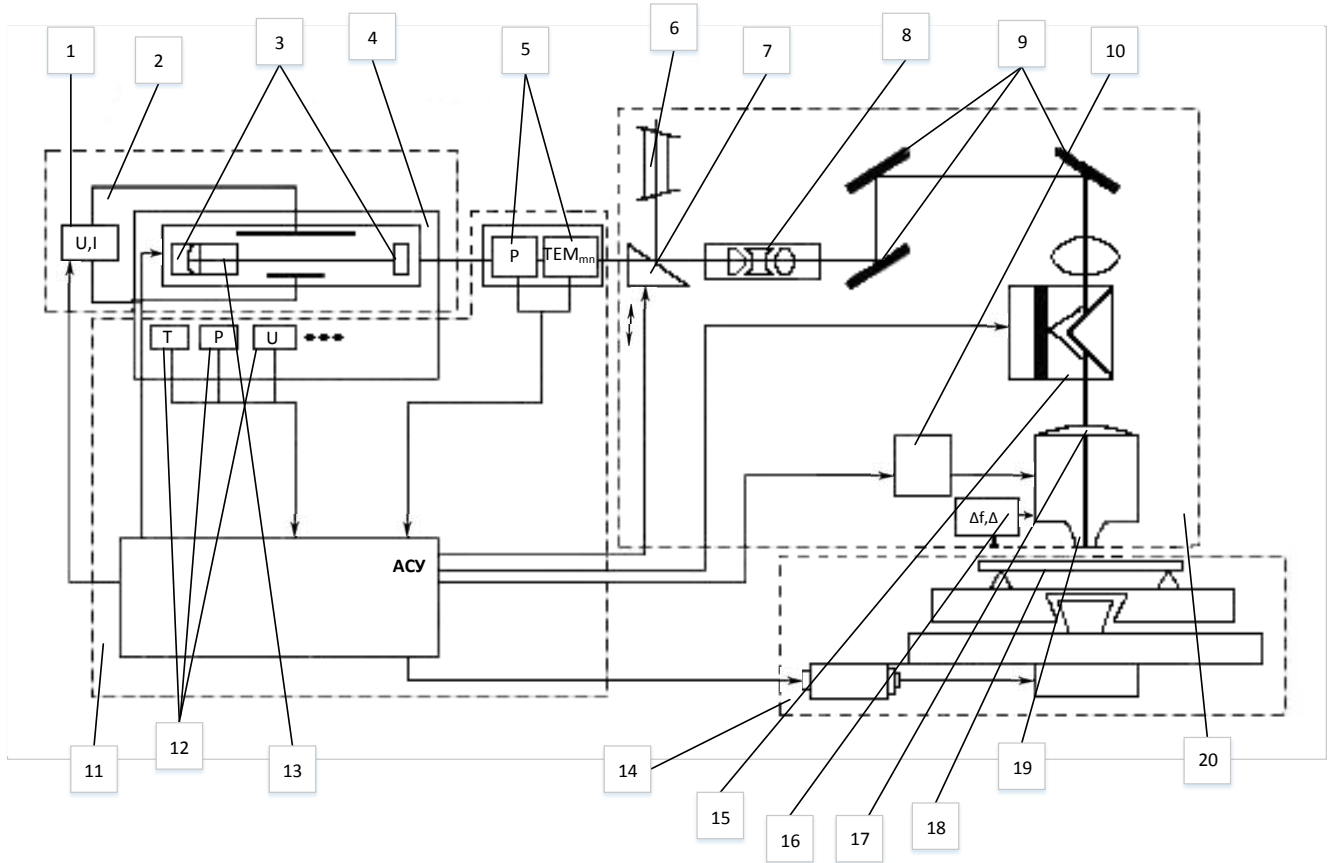
Оформлення магістерської роботи повинно відповідати вимогам, викладеним у ДСТУ 3008:2015. Звіти в сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення.

10. Вимоги щодо технічного захисту інформації в МКР з обмеженим доступом

Відсутні.

Додаток Б

Структурна схема лазерної технологічної установки
(ілюстративний)



Додаток Г
Розрахунок параметрів лазера
(ілюстративний матеріал)

Втрати на дзеркалах:

$$R = \frac{(n - 1)^2 + k^2}{(n + 1)^2 + k^2} = \frac{(1 - 0,9003)(1 - 0,747)}{2 \cdot 10} \approx 1,26 \cdot 10^{-3}$$

Спектральна ширина газового лазера:

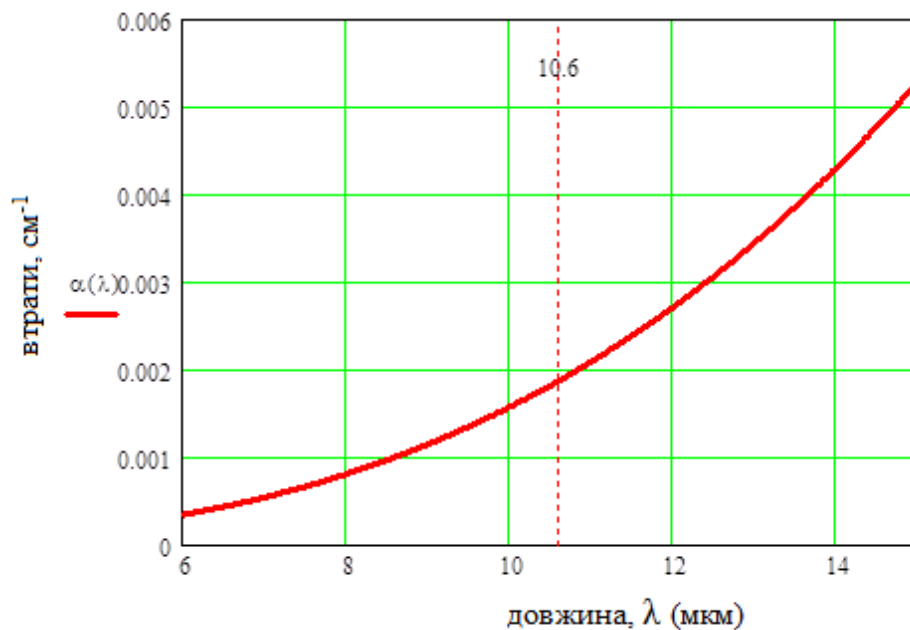
$$\Delta\nu_N = 26 + 146p_T = 1121,1 \text{ [МГц]}$$

Конфокальний параметр:

$$R_e = \frac{2\lambda}{\pi\omega_0^2} = \frac{2 \cdot 5,09 \cdot 10^{-6}}{3,1416 \cdot 3,486^2 \cdot 10^{-6}} = 0,2667 \text{ (м)}$$

Вихідна потужність лазера становить 85% від теоретичної:

$$P_{las} = (B \left(\frac{G_0}{\alpha_w + R_2} - 1 \right) R_2) \cdot 0,85 = 63,22 \text{ (Вт)}$$



Дифракційні втрати плоского оптичного резонатора в залежності від довжини хвилі

Додаток Д

Модель утворення кратера у сталі для CO₂ лазера

(ілюстративний матеріал)

$$dm/dSdt = (P_s - P_{th})/\chi,$$

де ліва частина - це швидкість випаровування біомаси матеріалу з одиничної поверхні, P_s - розподіл густини потужності по перерізу пучка, який має вигляд:

$$P_s = (2P_0/\pi r_i^2) \exp(2r^2/r_i^2),$$

З наведених вище формул одержуємо таке рівняння для швидкості поглиблення кратера:

$$dh/dt = [(2P_0/\pi r_i^2) \exp(-2r^2/r_i^2) - P_{th}]/\rho\chi$$

Його розв'язком при $r=0$ (на осі пучка) є:

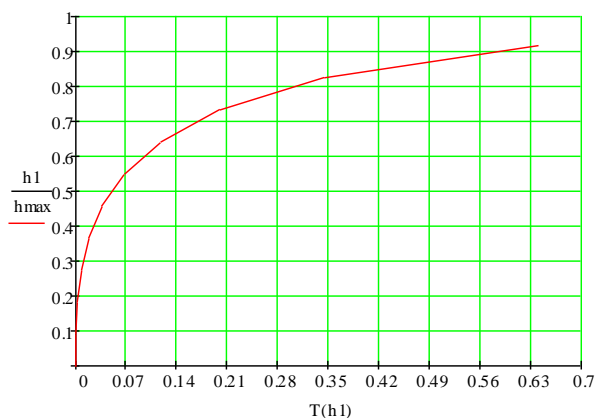
$$t = \frac{\rho\lambda}{P_{th}} \left[\frac{h_{max}^2 + (r_0 f/r_b)^2}{h_{max}} \operatorname{Arth} \left(\frac{h}{h_{max}} \right) - h \right],$$

де

$$h_{max} = [(2P_0 f^2/\pi P_{th} r_b^2) - (r_0 f/r_b)^2]^{1/2}$$

В кінці процесу утворення кратера ($dh/dt=0$) вираз для його радіуса має вигляд:

$$r_{np}^2 = \frac{1}{2} [r_0^2 + (r_b h/f)^2] \ln \left(\frac{2P_0}{\pi P_{th}} \right) [(r_b h/f)^2 + r_0^2]^{-1}$$



Залежність відносної глибини утворення кратера від фокальної відстані (у см)

Додаток Е

Модельний розрахунок параметрів лазерного випромінювача
(ілюстративний матеріал)

Для симетричного резонатора мінімальне значення перетину поля (перетяжка пучка) знаходиться в центрі резонатора, де радіус променя (перетяжка) становить:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{10 \cdot 10,6 \cdot 10^{-6}}{6,283}} = 4,107 \text{ (мм)}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{10 \cdot 10,44 \cdot 10^{-6}}{6,283}} = 4,076 \text{ (мм)}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{10 \cdot 11,085 \cdot 10^{-6}}{6,283}} = 4,200 \text{ (мм)}$$

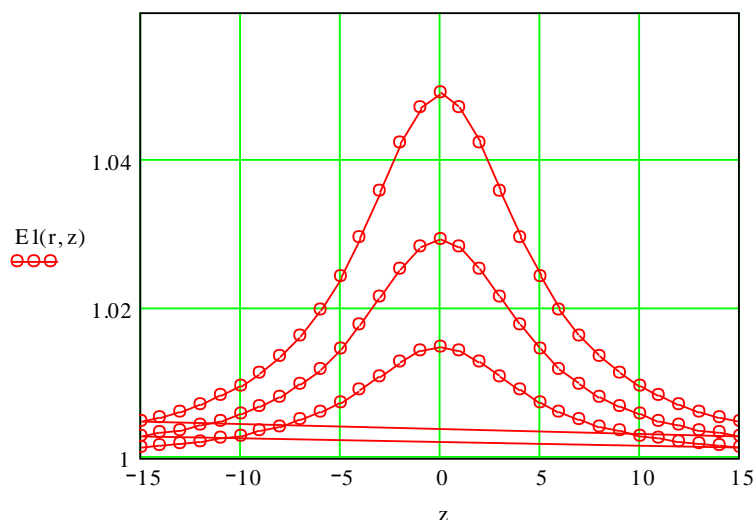
Радіус променя на дзеркалі:

$$\omega = \sqrt{\frac{L\lambda}{\pi}} = 2,904 \text{ (мм)}$$

$$\omega = 2,882 \text{ (мм)}$$

$$\omega = 2,970 \text{ (мм)}$$

Поперечне розподілення поля вздовж радіуса має вид $\frac{E}{E_{max}} = e^{-\frac{r^2}{\omega^2}}$



Поперечне розподілення $E(r)$ моди H_{111}