

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії  
(повна назва)

Кафедра Фізичних основ електронної техніки  
(повна назва)

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

СТВОРЕННЯ СИСТЕМИ МОНИТОРИНГУ, ЯКА ВИКОРИСТОВУЄ  
МІКРОКОНТРОЛЕРИ ДЛЯ ЗБОРУ ДАНИХ ПРО ЛАЗЕРНИЙ ПРОЦЕС  
І ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗВОТНОГО ЗВ'ЯЗКУ ДЛЯ КОРЕКЦІЇ  
В РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ  
(тема)

Виконав:  
здобувач 2 курсу, групи ФТОІм-23-1  
Ласкурик Д.П.  
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 175 Інформаційно-вимірювальні  
технології  
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма «Фотоніка та  
оптоінформатика»  
(повна назва освітньої програми)

Керівник ст. викл. каф. ФОЕТ Герасименко М.В.  
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

Гнатенко О.С.  
(прізвище, ініціали)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії  
(повна назва)  
Кафедра Фізичних основ електронної техніки  
(повна назва)  
Рівень вищої освіти другий (магістерський)  
Спеціальність 175 Інформаційно-вимірювальні технології  
(код і повна назва)  
Тип програми освітньо-професійна  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)  
Освітня програма «Фотоніка та оптоінформатика»  
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_

(підпис)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ р.

## ЗАВДАННЯ

### НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Ласкурику Дмитру Павловичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

- Тема роботи Створення системи моніторингу, яка використовує мікроконтролери для збору даних про лазерний процес і забезпечення зворотного зв'язку для корекції в реальному часі  
затверджена наказом університету від « 22 » листопада 2024 р. № 1230 Ст
- Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 28 січня 2025 р.
- Вихідні дані до роботи Інформація про лазерний процес; відомості стосовно конструкції систем для лазерної різки, лазерного зварювання та лазерної поверхневої взаємодії; теоретична інформація про механізм взаємодії лазерного випромінювання з поверхнею матеріалу; інформація про вплив параметрів лазера на зварний шов; структура системи для збору даних про лазерний процес та зворотнього зв'язку.
- Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі  
1 Провести теоретичний огляд поняття лазерного процесу та його різновидів;  
2 Дослідити взаємодію лазерного випромінювання з поверхнею матеріалів;  
3 Проаналізувати залежність параметрів лазерного випромінювання на якість зварного шва;  
4 Представити систему для збору даних про лазерний процес і забезпечення зворотного зв'язку.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій  
Демонстраційний матеріал – 12 слайдів

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Інформаційно-тематичний пошук та огляд літературних джерел стосовно спектроскопії	02.09.24–29.09.24	Виконано
2	Дослідження фізичних явищ, які використовуються в абсорбційній спектроскопії	29.09.23–19.10.23	Виконано
3	Огляд спектральних властивостей розповсюджених парникових газів та методів абсорбційної спектроскопії для їх детектування	19.10.23–27.11.23	Виконано
4	Проведення розрахунків оптичної потужності та амплітуд гармонік	27.11.23–18.12.23	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	18.12.23–03.01.24	Виконано
6	Оформлення графічних та демонстраційних матеріалів	03.01.25–16.01.25	Виконано
7	Проходження нормоконтролю та перевірки на академічний плагіат	16.01.25–19.01.25	Виконано
8	Отримання відгуку та рецензії	19.01.25–23.01.25	Виконано
9	Підготовка та захист кваліфікаційної роботи	23.01.25–29.01.25	Виконано

Дата видачі завдання 02 вересня 2024 р.

Здобувач \_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ ст. викл. каф. ФОЕТ Герасименко М.В.  
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 51 с., 22 рис., 2 табл., 1 додаток, 14 джерел.

ЛАЗЕРНИЙ ПРОЦЕС, ЛАЗЕРНА РІЗКА, ЛАЗЕРНЕ ЗВАРЮВАННЯ,  
ЛАЗЕРНА ПОВЕРХНЕВА ОБРОБКА, МІКРОКОНТРОЛЕР, СИСТЕМА  
ЗВОРОТНЬОГО ЗВ'ЯЗКУ

Об'єкт дослідження – система для збору даних та зворотнього зв'язку.

Метою кваліфікаційної роботи є створення системи для збору даних про лазерний процес та забезпечення зворотного зв'язку на основі мікроконтролера.

Метод дослідження – теоретичний.

Для досягнення мети в роботі поставлено та вирішено наступні завдання.

1. Провести теоретичний огляд поняття лазерного процесу та його різновидів.
2. Дослідити взаємодію лазерного випромінювання з поверхнею матеріалів.
3. Проаналізувати залежність параметрів лазерного випромінювання на якість зварного шва.
4. Представити систему для збору даних про лазерний процес і забезпечення зворотного зв'язку.

## ABSTRACT

Explanatory note of the qualification work: 51 pp., 22 figures, 2 tables, 1 appendice, 14 sources.

LASER PROCESS, LASER CUTTING, LASER WELDING, LASER SURFACE TREATMENT, MICROCONTROLLER, FEEDBACK SYSTEM

The object of research is remote laser sensing systems.

The research method is theoretical.

The purpose of the qualification work is to create a system for collecting data on the laser process and providing feedback based on a microcontroller.

To achieve this goal, the following tasks were set and solved.

1. To carry out a theoretical review of the concept of the laser process and its varieties.
2. To investigate the interaction of laser radiation with the surface of materials.
3. Analyse the dependence of laser radiation parameters on the quality of the weld.
4. Present a system for collecting data on the laser process and providing feedback.

## ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів .....	7
Вступ.....	8
1 Поняття лазерного процесу та його різновиди .....	9
1.1 Лазерне різання .....	9
1.2 Лазерне зварювання .....	14
1.3 Лазерна поверхнева обробка.....	21
2 Взаємодія лазерного випромінювання з поверхнею матеріала .....	25
2.1 Основи лазерної обробки поверхонь .....	25
2.1.1 Поширення світла в матеріалах .....	25
2.1.2 Механізми поглинання енергії.....	28
2.1.3 Рівняння теплоти .....	31
2.2 Вплив параметрів лазерного випромінювання на якість зварювання .....	34
3 Створення системи моніторингу для лазерного зварювання .....	40
3.1 Взаємозв'язок між глибиною зварювальної щілини та коливанням світла.....	40
3.2 Конструкція системи моніторингу .....	42
3.2.1 Фотодетектор.....	43
3.2.2 Мікроконтролер.....	45
3.2.3 Процес обробки інформації .....	46
Висновки .....	49
Перелік джерел посилання .....	50
Додаток А Демонстраційний матеріал.....	52

## СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

БХ – безперервно-хвильовий;

ЛЗ – лазерне зварювання;

ЛН – лазерне наплавлення;

ЛПН – лазерне поверхнєве легування;

УФ – ультрафіолетовий.

## ВСТУП

Системи моніторингу на основі мікроконтролерів дедалі частіше знаходять застосування в сучасних технологічних процесах, зокрема у сфері лазерної обробки матеріалів. Використання таких систем дозволяє не лише здійснювати точний контроль параметрів процесу, але й забезпечувати адаптивне керування завдяки зворотному зв'язку.

Особливо актуальним є моніторинг лазерних процесів, таких як різання, зварювання, гравіювання чи нанесення покриттів. Ці процеси потребують високої точності в регулюванні параметрів, зокрема потужності, частоти імпульсів та швидкості обробки. Наявність системи моніторингу, що забезпечує збір і аналіз даних у реальному часі, дозволяє оперативно реагувати на відхилення, зменшуючи кількість дефектів і підвищуючи якість кінцевої продукції.

Мікроконтролери, завдяки своїм компактним розмірам, енергоефективності та можливостям інтеграції з різними датчиками, стали основою для створення адаптивних систем моніторингу. Такі системи дозволяють не лише спостерігати за параметрами процесу, але й вносити корективи в режимі реального часу, що відкриває нові можливості для автоматизації та підвищення ефективності лазерних технологій.

Метою даної кваліфікаційної роботи є:

- 1) провести теоретичний огляд поняття лазерного процесу та його різновидів;
- 2) дослідити взаємодію лазерного випромінювання з поверхнею матеріалів;
- 3) проаналізувати залежність параметрів лазерного випромінювання на якість зварного шва;
- 4) представити систему для збору даних про лазерний процес і забезпечення зворотного зв'язку.

## 1 ПОНЯТТЯ ЛАЗЕРНОГО ПРОЦЕСУ ТА ЙОГО РІЗНОВИДИ

Лазерний процес – це універсальна технологія виробництва, що використовує сфокусовані лазерні промені для модифікації, різання, з'єднання або обробки матеріалів з винятковою точністю і мінімальним термічним впливом. Лазерний промінь, що характеризується когерентністю, високою інтенсивністю і монохроматичністю, служить потужним інструментом для різних застосувань, включаючи різання, зварювання, гравіювання, свердління і модифікацію поверхні. Основний принцип лазерної обробки ґрунтується на контрольованій взаємодії лазерної енергії з матеріалами, що призводить до локального нагрівання, плавлення або випаровування, залежно від густини енергії та тривалості впливу.

Основними різновидами лазерного процесу є різання, зварювання та обробка поверхні.

### 1.1 Лазерне різання

Лазерне променеве різання є добре відомим і ефективним методом різання широкого спектру матеріалів. Відомі варіанти технології лазерного різання включають:

- різання плавленням в інертному газі;
- різання плавленням в реактивному газі;
- різання випаровуванням.

Для різання нержавіючої сталі та інших високолегованих сталей, а також алюмінієвих і титанових сплавів найкращим є процес різання плавленням в інертному газі. Він базується на комбінованому використанні високоінтенсивного лазерного променя і струменя інертного газу (азоту або аргону) під високим тиском, які одночасно діють на заготовку, що розрізається, в коаксіальному розташуванні.

Лазерний промінь складається з електромагнітного випромінювання, яке є високомонохроматичним (з однією довжиною хвилі) і когерентним (фазовим). Здатність лазера різати пов'язана з цими двома характеристиками, які дозволяють фокусувати промінь на дуже малій ділянці (зазвичай від 0,1 мм до 0,4 мм). Оскільки лазерна потужність фокусується на відносно невеликій ділянці, результуюча щільність потужності на заготовці як перевищує  $10^6$  Вт/см<sup>2</sup>. При такій щільності падаючої потужності відбувається швидке плавлення, випаровування або розкладання багатьох матеріалів, що створює отвір і дозволяє викидати розплавлений матеріал (рис. 1.1). Коли заготовка рухається відносно променя, розплавлений, випарений або розкладений матеріал може безперервно викидатися, забезпечуючи тим самим дію різання [1]. Цей процес робить можливим різання товщиною в кілька сантиметрів.

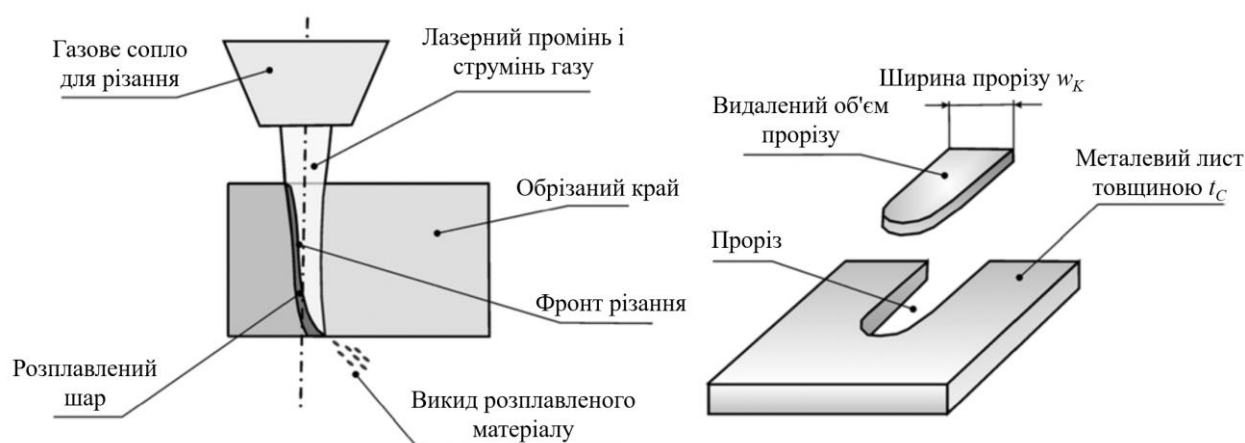


Рисунок 1.1 – Принципова схема процесу лазерного різання

Системи лазерного різання поєднують енергію (тепло) сфокусованого променя з допоміжним газом, який вводиться через сопло, коаксіально до сфокусованого променя. Високошвидкісний газовий струмінь служить для того, щоб:

а) сприяти видаленню матеріалу, видуваючи розплавлений, випарений або розкладений матеріал через задню частину заготовки;

б) захищати лінзу від бризок, що викидаються із зони різання (особливо під час проколювання);

в) в деяких комбінаціях матеріал/газ збільшувати швидкість різання.

Швидкість різання залежить від потужності лазера. Однак якість різки сильно залежить від того, як ця потужність передається в матеріал, що розрізається. Лазерне випромінювання може бути як імпульсним, так і безперервним (так званим безперервно-хвильовим (БХ)). Високотужне безперервно-хвильове різання передає значну кількість тепла в стінки прорізу, що призводить до погіршення якості різки і нагрівання заготовки. Цей ефект особливо важко подолати на товстих матеріалах, коли потрібна вузька ширина прорізу, і коли позиціонування заготовки не досягається з постійною швидкістю.

Імпульсна подача лазерного випромінювання може бути використана для зменшення цих проблем і отримання більш якісних розрізів за цих обставин. При імпульсному режимі потужність лазера циклічно вмикається і вимикається, між коротким імпульсом високої потужності і часом вимкнення. Через цю циклічність для визначення потужності лазера використовується «середня потужність», а не потужність БХ. Середня потужність – це потужність лазера, помножена на робочий цикл для нормальної імпульсної роботи. Під час імпульсу високої потужності матеріал розплавляється, випаровується або розкладається і викидається. Під час перерви в роботі матеріалу дають охолонути, поки матеріал або фокусуєчий модуль просувається в очікуванні наступного потужного імпульсу.

Високоякісні розрізи можуть бути отримані тільки при застосуванні стабільної лазерної енергії. Тому стабільність вихідної енергії лазера має вирішальне значення при різанні. Це включає в себе підтримку постійної вихідної енергії (стабільність потужності), стабільну якість променя (стабільність режиму) і фіксовану концентрацію енергії (стабільність наведення). Якщо потужність збільшується або зменшується більш ніж на кілька відсотків протягом короткочасної роботи, якість променя коливається

між гауссовим (або близьким до гауссового) і багатомодовим профілем, або розташування напрямку променя зміщується більш ніж на кілька десятих мілірадіана, це призведе до зміни доступної для різання щільності потужності і, як наслідок, до зміни якості різання.

Сфокусованість лазерного променя є функцією поперечної електромагнітної моди (зазвичай її називають TEM). По суті, це спосіб опису того, як розподіляється потужність всередині лазерного променя. Розподіл потужності у формі «дзвона» (або Гаусса) є найбільш сфокусованим режимом (також називається TEM<sub>00</sub>). Режими, які наближаються до цього розподілу потужності, можуть бути сфокусовані до теоретично мінімального розміру плями. Режим TEM<sub>00</sub> забезпечує найбільш сконцентровану щільність потужності, що дозволяє досягти найвищої швидкості різання та найменшої ширини пропила в листових матеріалах.

Режим лазера характеризується числовим значенням, яке називається M-квадрат ( $M^2$ ). Повний кут розбіжності (дальнє поле) вихідного лазерного променя ( $\varphi$ ) прямо пов'язаний зі значенням  $M^2$  і довжиною лазерної хвилі ( $\lambda$ ) і обернено пропорційний діаметру талії вихідного лазерного променя ( $D_o$ ), як показано нижче:

$$\varphi = M^2 (4\lambda / \pi D_o). \quad (1.1)$$

Тому профілі пучка вищого порядку або багатомодові профілі характеризуються тенденцією до розподілу енергії в напрямку від центру пучка. В результаті сфокусована пляма є більшою, а моди вищого порядку дають меншу густину або концентрацію потужності.

Крім того, профілі променя вищого порядку можуть мати різний (асиметричний) розподіл потужності по двох осях. Це є результатом наявності різних режимів по двох осях. Розбіжність променевих ефектів залежить від того, де розташована точка фокусування відносно фокусуючої оптики. Таким чином, промені з несиметричними режимами призводять до різного

розташування плями фокусування для кожної осі. Цей стан називається астигматизмом і призводить до того, що якість різку (наприклад, ширина прорізу і розплаву, а також геометрія прорізу) є непостійною і залежить від напрямку різку. Загалом, для різання CO<sub>2</sub> використовуються радіально-симетричні режими, що наближаються до TEM<sub>00</sub>, TEM<sub>01\*</sub> і TEM<sub>01</sub>, тоді як режими набагато вищого порядку досягаються за допомогою волоконно-оптичних систем подачі променя.

Саме розмір сфокусованого променя при заданій потужності диктує щільність потужності на заготовці, а отже, контролює швидкість різання, товщину матеріалу і ширину пропила. Тому корисно представити фактори, які впливають на розмір сфокусованого променя.

Параметрами лазера, які визначають розмір діаметра сфокусованої плями ( $d$ ) при фокусуванні лазерного променя, є довжина хвилі ( $\lambda$ ), режим/можливість фокусування лазерного променя ( $M^2$ ), фокусна відстань ( $f$ ) і діаметр необробленого променя на фокусуючій оптиці ( $D$ ), (рис. 1.2). Довжина хвилі залежить від типу лазера (наприклад, CO<sub>2</sub>, Nd:YAG тощо). Довжина хвилі CO<sub>2</sub> лазера становить 10,6 мкм, для Nd:YAG лазера довжина хвилі становить 1,064 мкм [2]. Фокусування лазерного променя є функцією поперечної електромагнітної моди. Для ідеального «дзвоноподібного» розподілу потужності  $M^2 = 1$  (називається високою якістю променя або низьким порядком), для інших типів розподілу  $M^2 > 1$  (називається низькою якістю променя або високим порядком). Фокусна відстань визначає відстань від фокусуючої оптики до фокальної площини. Діаметр лазерного променя на фокусуючій оптиці, а не діаметр променя на виході з лазерної головки, визначає розмір сфокусованої плями, оскільки лазерні промені не є ідеально колімованими.

Ці параметри пов'язані з діаметром сфокусованої плями наступним рівнянням:

$$d = M^2 (4\lambda f / \pi D). \quad (1.2)$$

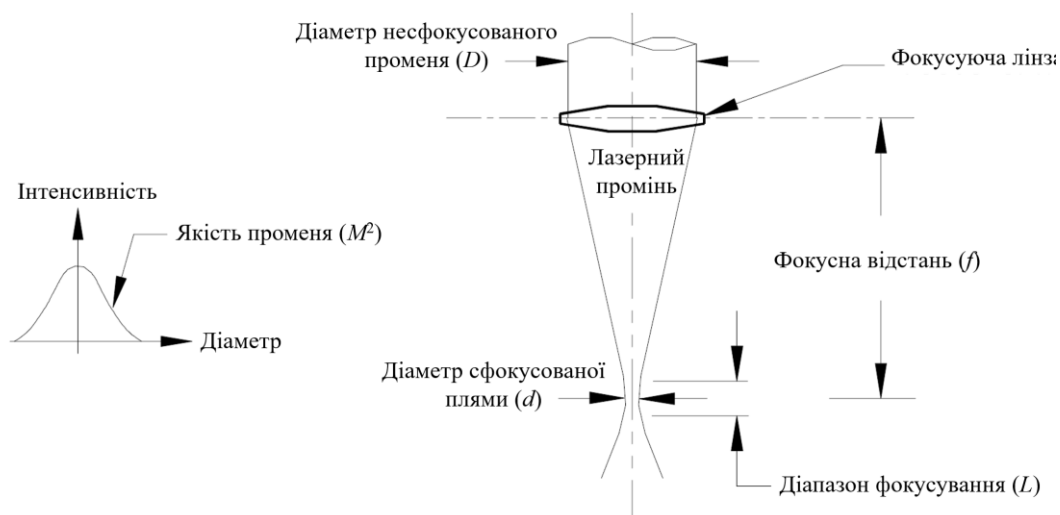


Рисунок 1.2 – Параметри фокусування

## 1.2 Лазерне зварювання

Лазерне зварювання (ЛЗ) – це один з інноваційних методів зварювання плавленням. Шляхом опромінення високоенергетичним лазерним променем передбачуваного зазору забезпечується тепло, необхідне для розплавлення кромки і її заповнення, і досягається процес з'єднання.

Принцип процесу ЛЗ представлено на рисунку 1.3:

а) насос, який є джерелом енергії, забезпечує енергію, необхідну для процесу. Насос стимулює лазер до такої міри, що електрони, які утримуються атомами, переміщуються на більш високі енергетичні рівні;

б) електрони різко знижують свої енергетичні рівні, випускаючи фотони. Спонтанне випромінювання фотонів призводить до утворення лазерного променя;

в) фотони, що спонтанно випромінюються, стикаються з фотонами з вищими енергетичними рівнями. Зіткнення знижує енергетичні рівні електронів, що призводить до випромінювання іншої групи фотонів;

г) фотони випромінюються в усіх напрямках. Однак всі вони обмежуються рухом в одному середовищі і потрапляють в резонатор перед тим,

як відбитися від нього. Дзеркало, що підсилює, визначає рівень і напрямок випромінювання;

д) лазерний промінь спрямовується і фокусується на заготовки, що зварюються. Високо сфокусована світлова енергія перетворюється на теплову енергію на поверхні заготовки;

е) під час процесу, відомого як поверхнева провідність, вироблене тепло розплавляє поверхню матеріалу.

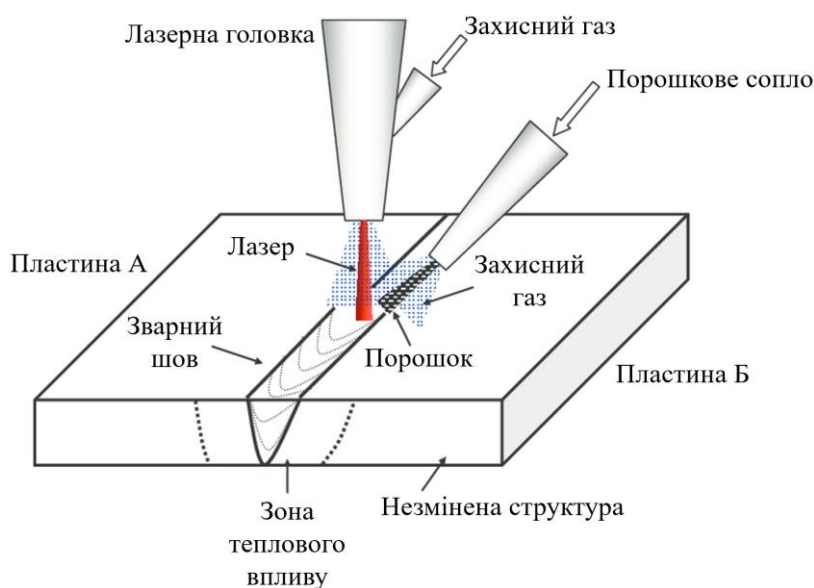


Рисунок 1.3 – Процес лазерного зварювання

Температура, що генерується, контролюється таким чином, щоб вона була нижчою за температуру кипіння вихідного матеріалу. Ця технологія є ідеальним рішенням для зварювання матеріалів з високою теплопровідністю. Крім зварювання, інші процедури, такі як свердління, різання і зачистка, можуть бути виконані з використанням енергії лазерного променя [3].

Параметрами, які пов'язані з джерелом лазера є:

- тип джерела лазера;
- безперервний або імпульсний лазер;
- середня потужність лазера;

- енергія, тривалість та частота лазерних імпульсів;
- параметри лазерного променя;
- оптичні характеристики системи фокусування лазерного променя.

Принцип дії лазерного джерела залежить від стану речовини активного середовища джерела (газового або твердотільного). Найвідомішими газовими лазерами є CO<sub>2</sub>-лазери, що використовують комбінацію газів гелію, азоту та вуглекислого газу у співвідношенні 1:1:18. Джерела працюють на основі молекулярних енергетичних рівнів газу. Тому вони вважаються молекулярними лазерами. Найважливішим фактором оптимізації роботи CO<sub>2</sub>-лазера є ефективне охолодження газу і запобігання розкладанню і руйнуванню молекул газу.

Nd:YAG лазери є найбільш широко використовуваними твердотільними джерелами, що мають вищі оптичні та фізичні властивості, а також більшу ефективність порівняно з газовими лазерами. У Nd:YAG лазерах активним середовищем є кристал Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>, в якому частина іонів Y<sup>3+</sup> заміщена іонами Nd<sup>3+</sup>, що призводить до утворення кристалу Nd:YAG і забезпечує перспективне активне середовище з декількома високоінтенсивними довжинами хвиль в інфрачервоній області. Інше твердотільне джерело використовується в діодних лазерах (напівпровідникових лазерах), що дозволяє виготовляти джерела з надвисокою ефективністю і великою можливістю перенастроювання. Однак головним обмеженням цих лазерів є їхня висока розбіжність.

У більшості випадків для зварювання використовується прямокутна форма імпульсу (рис. 1.4). Але два інших типи форми імпульсу також використовуються в спеціальних зварних швах. Перший тип (стрибкоподібний імпульс) використовується для світловідбиваючих матеріалів, таких як мідь і алюміній. Другий тип (відпалювальний імпульс) використовується для мінімізації циклу променевого тепла під час зварювання для матеріалів, чутливих до утворення тріщин.

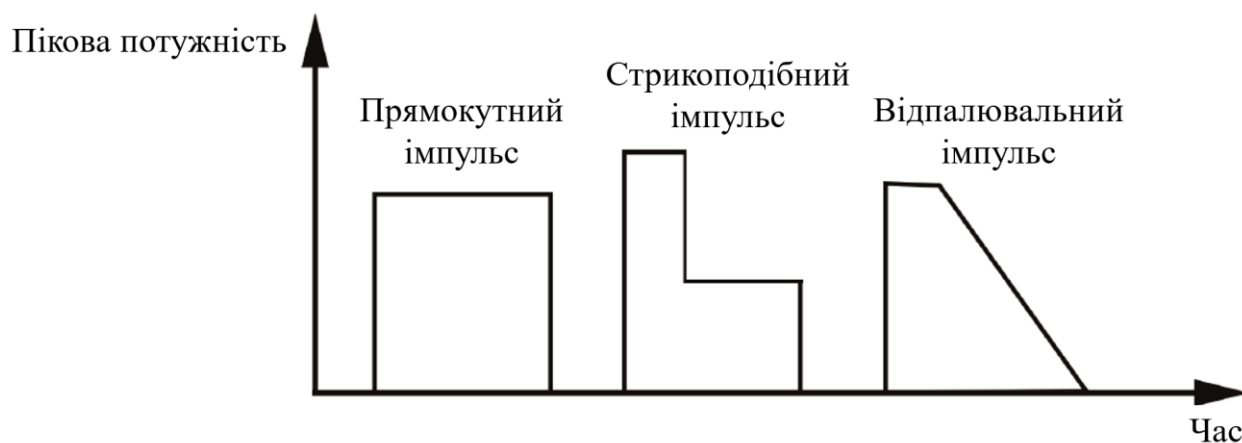


Рисунок 1.4 – Форми імпульсу, що використовуються при зварюванні

Пікова потужність лазерного джерела – це максимальна потужність, яку джерело може забезпечити в режимах безперервного або імпульсного зварювання. Вона вимірюється у ватах (Вт) або кіловатах (кВт). Одним з важливих параметрів імпульсного лазерного зварювання є пікова потужність імпульсу. Фактично, з такою піковою потужністю можна створювати зварювання проплавленням за допомогою лазера малої потужності. Пікова потужність прямокутного імпульсу ( $P_p$ , (Дж/мс)) дорівнює енергії імпульсу (Дж), поділеній на час або ширину імпульсу (тривалість імпульсу (мс)).

$$P_p = \frac{\text{Енергія імпульсу}}{\text{Тривалість імпульсу}}. \quad (1.3)$$

Ширина імпульсу – це тривалість кожного лазерного імпульсу (мс). Під час увімкнення імпульсу заготовка відчуває потужність імпульсу, а в проміжку між двома лазерними імпульсами (вимкнення імпульсу) відбувається охолодження основного матеріалу. Ширина імпульсу контролює тепловий вплив на заготовку, ширину зварювання та тепловий цикл. Збільшення тривалості імпульсу розширює зварювальний шов і розміри зони теплового впливу через збільшення часу теплопередачі.

Іншими словами, тривалість імпульсу є параметром точного налаштування, який використовується для регулювання проплавлення і ширини шва і, за необхідності, для стабілізації зварного шва. Збільшуючи ширину імпульсу і подовжуючи час теплопередачі, можна регулювати розміри зварного шва.

З точки зору опромінюваного матеріалу, кожен лазерний імпульс діє як пакет енергії, який називається енергією імпульсу (енергія імпульсу  $E$  (Дж)) і його зв'язок з піком потужності ( $P_p$ , (Дж/мс)) і тривалістю імпульсу ( $T$ , (мс)) (ширина імпульсу або тривалість імпульсу) (рис. 1.5).

$$E = P_p \times T. \quad (1.4)$$

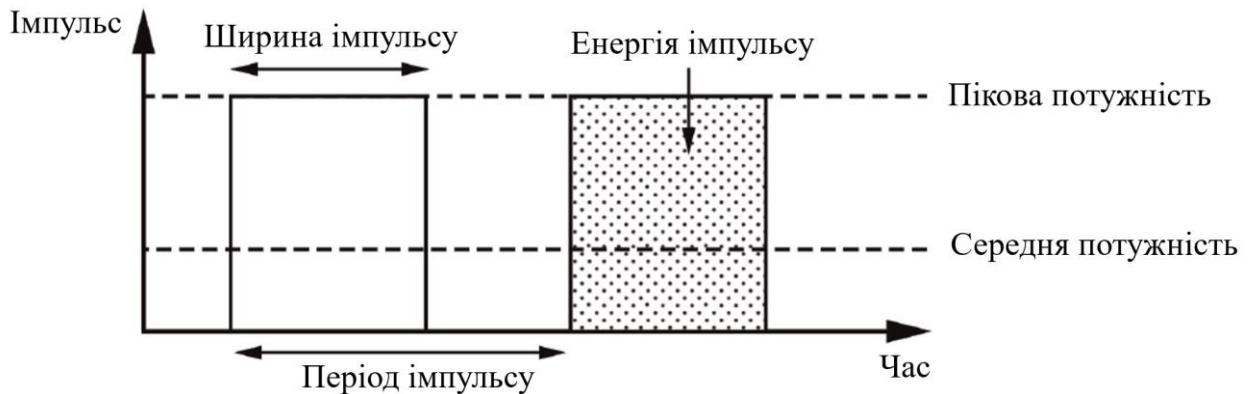


Рисунок 1.5 – Залежність між частотою, тривалістю імпульсу та рівнем енергії

Частота ( $f$ ) вказує на кількість імпульсів лампи спалаху і, отже, на кількість лазерних імпульсів в секунду. Частота виражається в герцах (Гц) або імпульсах в секунду. З іншого боку, частота, обернена до частоти ( $1/f$ ), дорівнює інтервалу між двома послідовними імпульсами. Знаючи амплітуду лазерного імпульсу ( $T$ ), можна оцінити час між двома імпульсами, тобто час згасання лазера. Він також контролює теплову потужність, що підводиться до заготовки, і тепловий цикл.

$$f = \frac{1}{\text{Період імпульсу}}. \quad (1.5)$$

Середня потужність є параметром для зварних швів, що використовують більше одного імпульсу. Фактично, середня потужність ( $P_{сер}$ ) лазерного джерела виходить шляхом множення енергії кожного імпульсу на його частоту:

$$P_{сер} = E \cdot F. \quad (1.6)$$

Середня потужність застосовується, коли для зварювання потрібно більше одного імпульсу. Зі збільшенням середньої потужності зростає швидкість тепловкладення, отже, зі збільшенням тепловкладення збільшується глибина проплавлення і ширина шва. Загалом, при постійній потужності, чим менший діаметр променя, тим більш концентроване тепло і менша зварювальна ванна. Діаметр вихідного лазерного променя можна збільшити, збільшуючи потужність.

Густина або інтенсивність потужності ( $I$ ) в будь-який момент часу дорівнює кількості прямої потужності, що дорівнює площі поперечного перерізу пучка ( $D$ ) на поверхні вихідного матеріалу. Діаметр лазерної плями у фокусі залежить від типу лазера, якості його променя і системи фокусування променя. Густина потужності є функцією інструменту фокусування променя і максимальної вихідної потужності лазера:

$$I = \frac{\text{Потужність}}{\pi \frac{D^2}{4}}. \quad (1.7)$$

Величина інтенсивності променя визначає стан процесу зварювання і формування або неформування замкового отвору.

Вибір системи фокусування лазерного променя залежить від типу процесу, типу лазера і матеріалу заготовки. Фактично, площа поперечного перерізу лазерного променя у фокусі, яка є одним з двох основних факторів, що визначають інтенсивність лазерного випромінювання у фокусі, залежить від вибору фокусної відстані системи фокусування лазерного променя. Зв'язок між діаметром лазерної плями у фокусі ( $D_F$ ) і фокусною глибиною або довжиною Релея ( $R_L$ ) з фокусною відстанню системи фокусування пучка наведено в рівняннях:

$$D_F = M^2 \left( \frac{4}{\pi} \right) \lambda \left( \frac{f}{D_L} \right), \quad (1.8)$$

$$R_L = D_F \left( \frac{f}{D_L} \right), \quad (1.9)$$

де  $f$  – фокусна відстань системи фокусування променя;

$\lambda$  – довжина хвилі лазера;

$M^2$  – добротність лазерного променя.

Довжина Релея – це відстань, на якій інтенсивність лазерного випромінювання досягає 70,7 % від максимальної інтенсивності у фокусі, і вважається фокусною глибиною або ефективною фокусною відстанню. Чим більша фокусна відстань системи фокусування, тим менший діаметр лазерної плями у фокусі (рис. 1.6).

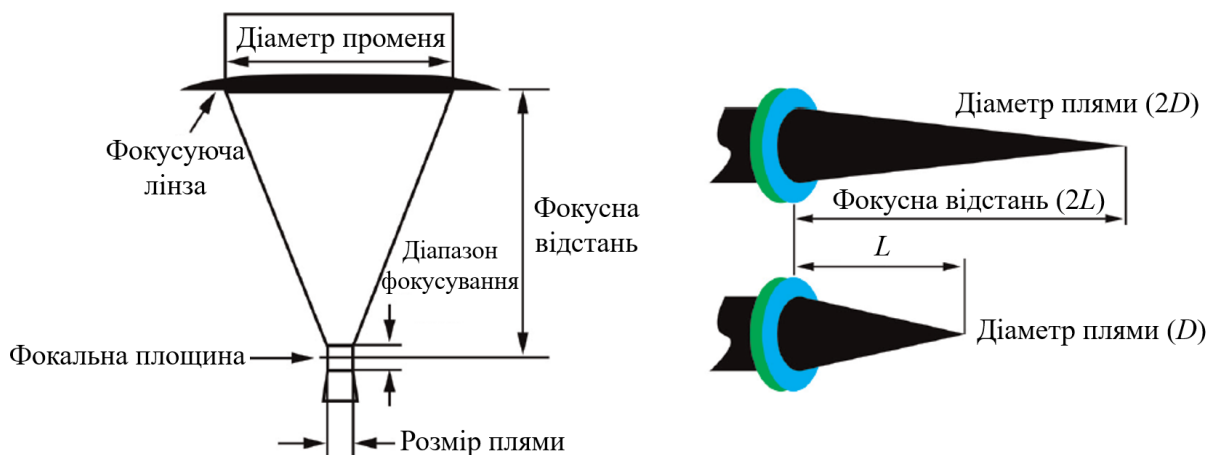


Рисунок 1.6 – Схема системи фокусування лазерного променя

### 1.3 Лазерна поверхнева обробка

Лазерна обробка поверхні відноситься до групи методів обробки матеріалів, які використовують сфокусовані лазерні промені для модифікації поверхневих властивостей матеріалу. Цей процес передбачає взаємодію високоінтенсивного лазерного світла з поверхнею заготовки, що призводить до локального нагрівання, плавлення або випаровування. Обробка може призвести до різних бажаних ефектів, таких як підвищення твердості, зносостійкості, корозійної стійкості або зміна морфології поверхні [4].

Усього існує 3 основних процеси, що підпадають під поверхневу обробку:

- лазерне наплавлення;
- лазерне поверхнєве легування;
- селективне лазерне плавлення.

Лазерне наплавлення (ЛН) використовується для отримання покриттів з покращеними поверхневими властивостями або для усунення поверхневих дефектів різних компонентів. ЛН використовує високу щільність енергії лазерних променів для плавлення і легування поверхні матеріалів підкладки. Завдяки високій щільності енергії можна плавити і легувати більшість металів.

Зазвичай, коли відсоток розведення становить менше 10 %, лазерне наплавлення має сенс, оскільки при даному процесі бажана низька концентрація субстрату. Можна створювати товсті та помірні шари майже з будь-якого матеріалу.

Матеріал, який наноситься на підкладку, може бути поданий двома методами: попереднє осадження порошку або метод коосадження. Ці методи відрізняються способом подачі матеріалу, що покривається. У першому методі, як показано на рисунку 1.7, а, порошок, що підлягає покриттю, спочатку змішується з певними клеями (полівініловим спиртом) для утворення суспензії. Цю суспензію наносять на підкладку у вигляді рівномірного шару і дають їй висохнути і затвердіти. Це робиться для того, щоб вона могла витримати тиск захисного газу і природу частинок лазера.

У другому методі, як показано на рисунку 1.7, б, порошок, що підлягає покриттю, подається через сопло подавача порошку на лазерний промінь, а потім на розплавлений басейн. Подача порошку може здійснюватися під різними кутами через лазерний промінь. Коли кут подачі дорівнює нулю градусів, це утворює коаксіальну систему подачі.

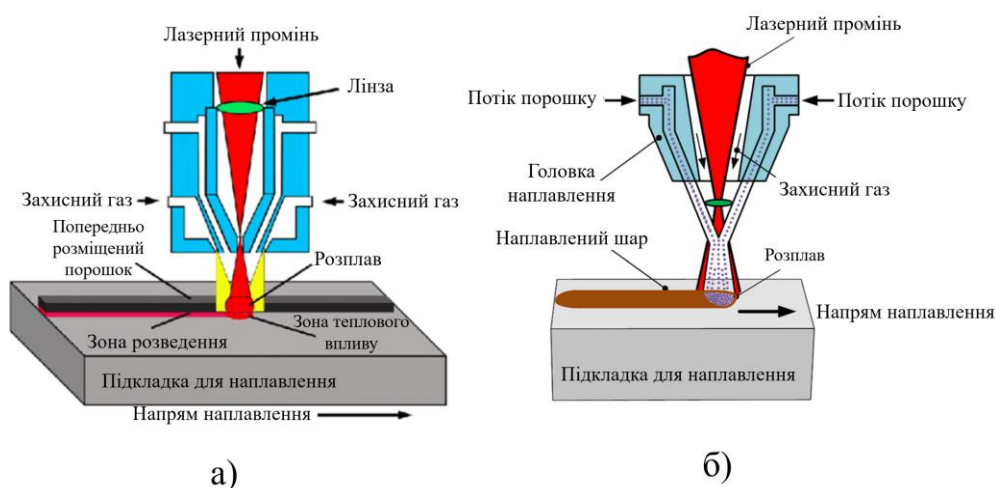


Рисунок 1.7 – Метод попереднього розміщення (а) та метод кодепозиції (б) лазерного наплавлення

Лазерне поверхнєве легування (ЛПЛ) – це процес, подібний до лазерного наплавлення, але з використанням високої густини енергії (рис. 1.8). Зазвичай, лазерне наплавлення використовується в умовах, що вимагають абсолютно різних властивостей на поверхні і в серцевині матеріалу, в той час як легування використовується коли необхідні зміни властивостей на більшій глибині.

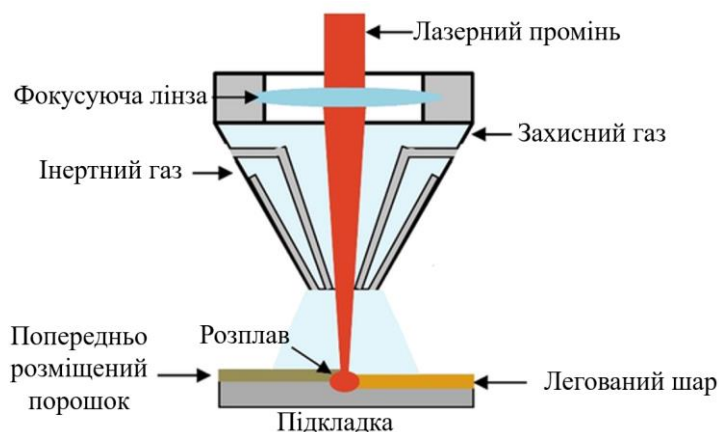


Рисунок 1.8 – Процес лазерного поверхневого легування

Селективне лазерне плавлення використовує лазерну енергію для створення тривимірних деталей, використовуючи тривимірну модель, побудовану за допомогою систем автоматизованого проектування. Потім 3D-модель розбивається на двомірний набір шарів, які формують необхідну геометрію. Двовимірні шари створюються за допомогою лазерного сканування по площі поперечного перерізу. Лазерне сканування розплавляє і з'єднує частинки разом, утворюючи тонкий шар. Повторюючи цей процес, можна створити наступний шар і приєднати його до попередніх шарів. Ці сформовані стоси 2D-шарів представляють кінцеву 3D-геометрію. Принцип роботи селективного лазерного плавлення наведено на рисунку 1.9.

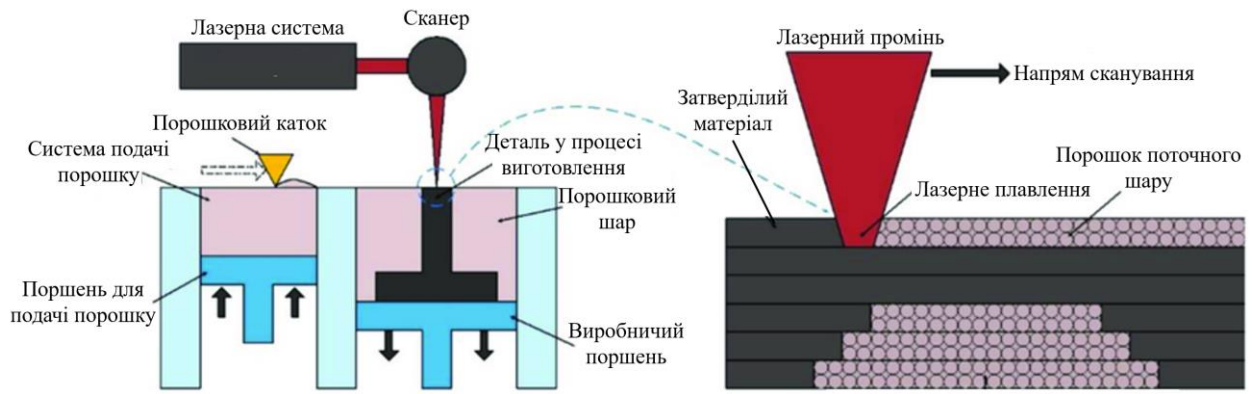


Рисунок 1.9 – Процес лазерного плавлення

## **2 ВЗАЄМОДІЯ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ З ПОВЕРХНЕЮ МАТЕРІАЛА**

Лазери дають можливість точно доставляти велику кількість енергії в обмежені ділянки матеріалу для досягнення бажаної реакції. У непрозорих матеріалах ця енергія поглинається поблизу поверхні, змінюючи хімічний склад поверхні, кристалічну структуру та/або різномасштабну морфологію без зміни об'єму матеріалу.

### **2.1 Основи взаємодії лазерного випромінювання з матеріалами**

Однією з головних переваг лазера як інструменту для обробки матеріалів є можливість точно контролювати, де саме в матеріалі і з якою швидкістю депонується енергія. Цей контроль здійснюється шляхом правильного вибору параметрів лазерної обробки для досягнення бажаної модифікації матеріалу.

#### **2.1.1 Поширення світла в матеріалах**

Зосередження осадженої енергії в потрібних ділянках на поверхні матеріалу можна досягти шляхом керування просторовим профілем інтенсивності лазера. Переважні методи керування включають керування променем за допомогою нерухомих або гальванометричних скануючих дзеркал, фокусування променя за допомогою телескопічної або збіжної оптики, а також формування променя за допомогою гомогенізаторів, амплітудних масок, заломлюючих елементів і дифракційних оптичних елементів. Однак можна також використовувати більш досконалі оптичні пристрої, такі як просторові модулятори світла, деформовані дзеркала і лінзи з перенастроюваним індексом акустичного градієнта, що дозволяють модулювати профіль інтенсивності променя на поверхні в реальному часі.

Коли світло падає на поверхню матеріалу, частина його відбивається від поверхні розділу через розрив у реальному показнику заломлення, а решта проникає в матеріал. Частка падаючої потужності, яка відбивається від поверхні  $R$ , залежить від поляризації та кута падіння і світла, а також від показника заломлення атмосфери  $n_1$  і матеріалу  $n_2$ . Коефіцієнти відбиття для  $s$ -поляризованої та  $p$ -поляризованої складових світла можна розрахувати з відомих рівнянь Френеля [5]:

$$R_s = \left[ \frac{E_r}{E_i} \right]^2 = \left[ \frac{n_1 \cos(\theta_i) n_2 - \cos(\theta_t)}{n_1 \cos(\theta_i) n_2 + \cos(\theta_t)} \right]^2, \quad (2.1)$$

$$R_p = \left[ \frac{E_r}{E_i} \right]^2 = \left[ \frac{n_1 \cos(\theta_t) - n_2 \cos(\theta_i)}{n_1 \cos(\theta_t) + n_2 \cos(\theta_i)} \right]^2 \quad (2.2)$$

і пов'язані з коефіцієнтами пропускання через  $T_s = 1 - R_s$  і  $T_p = 1 - R_p$ . Для випадку нормального падіння світла на плоску поверхню наведені вище рівняння зводяться до більш звичного вигляду:

$$R = R_s = R_p = \left( \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2. \quad (2.3)$$

Відбивна здатність певного матеріалу залежить від частоти джерела світла через дисперсійне співвідношення його показника заломлення. Наприклад, у випадку нормального падіння, значення коефіцієнта відбиття металів у ближньому УФ і видимому спектральному діапазоні зазвичай знаходяться в межах від 0,4 до 0,95, а в ІЧ-діапазоні – від 0,9 до 0,99 [6, 7]. Крім того, відбивна здатність поверхні залежить від температури матеріалу через зміни в діелектричній проникності, зонній структурі, плазмових коливаннях або фазовому стані матеріалу. Наприклад, при плавленні відбивна здатність кремнію збільшується приблизно в 2 рази, тоді як відбивна здатність такого

металу, як нікель, змінюється лише на кілька відсотків. У випадку дрібномасштабних або структурованих матеріалів можливі додаткові оптичні резонанси, такі як поверхневі та об'ємні плазмони і поляритони, які можуть призвести до посилення поглинання або відбиття через деталі фотонно-електронних взаємодій.

Потрапляючи всередину матеріалу, поглинання спричиняє зменшення інтенсивності світла з глибиною зі швидкістю, що визначається коефіцієнтом поглинання матеріалу  $\alpha$ . Загалом,  $\alpha$  є функцією довжини хвилі і температури, але при постійному  $\alpha$  інтенсивність  $I$  спадає експоненціально з глибиною  $z$  відповідно до закону Бугера-Ламберта-Бера:

$$I(z) = I_0 e^{-\alpha z}, \quad (2.4)$$

де  $I_0$  – інтенсивність безпосередньо всередині поверхні після врахування втрат на відбиття. Величина градієнта інтенсивності дає об'ємну швидкість розсіювання енергії  $\alpha I_0 e^{-\alpha z}$ .

Зручно визначити глибину оптичного проникнення або поглинання,  $\delta = 1/\alpha$ , тобто глибину, на якій інтенсивність світла, що проходить, падає до  $1/e$  від початкового значення на межі розділу фаз. На рисунку 2.1 показано глибину оптичного поглинання як функцію довжини хвилі для різних металів і напівпровідників. Важливо відзначити, що глибини поглинання малі порівняно з розмірами об'ємного матеріалу. Наприклад, у випадку більшості металів, що піддаються УФ-освітленню, глибина поглинання становить близько 10 нм. Хоча інтерпретація глибини поглинання була розроблена для плоскої хвилі, той факт, що поглинання енергії приблизно обмежене глибиною поглинання, залишається справедливим і для більш загальних профілів променів. Тому вибір довжини хвилі з короткою глибиною поглинання може дозволити локальну модифікацію властивостей поверхні без зміни основної маси матеріалу.

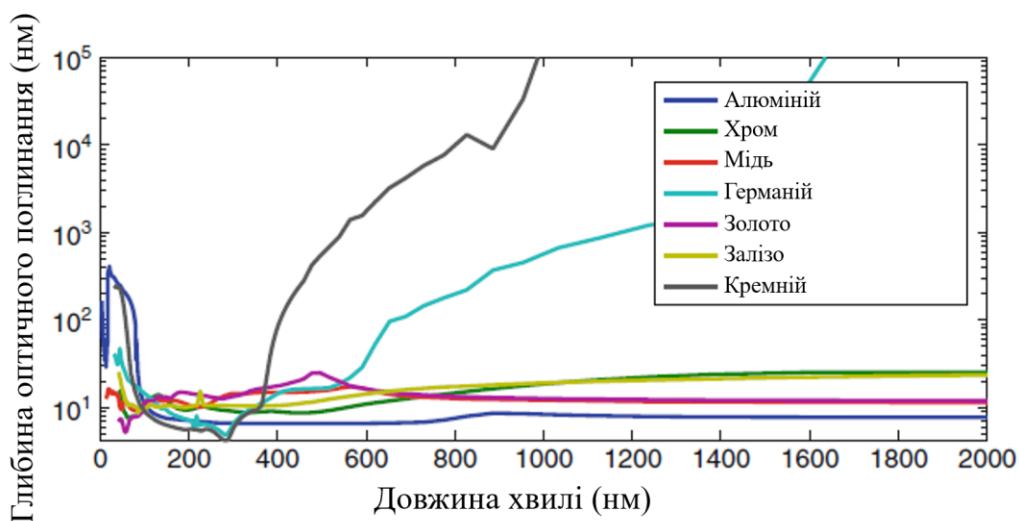


Рисунок 2.1 – Глибина оптичного поглинання для різноманітних матеріалів у діапазоні довжин хвиль

Вище було розглянуто лише лінійні оптичні явища; однак, це не обов'язково так для всіх матеріалів і не для всіх умов падаючого лазерного випромінювання. Деякі матеріали, такі як скло, демонструють сильну нелінійність показника заломлення, що може призвести до низки цікавих ефектів, таких як самофокусування, розфокусування або поширення солітонів. При роботі з лазерними імпульсами безперервного випромінювання або наносекундної тривалості зазвичай вважається, що більшість поглинання зумовлена взаємодією одиничних фотонів. Однак для пікосекундних і фемтосекундних лазерів надзвичайно висока миттєва інтенсивність уможлиблює такі явища, як оптичний пробій і багатофотонне поглинання, які можуть значно зменшити глибину поглинання.

### 2.1.2 Механізми поглинання енергії

Коефіцієнт поглинання, який можна вивести з діелектричної функції та провідності матеріалу, визначає поглинання світла як функцію глибини. Однак конкретні механізми, за допомогою яких відбувається поглинання, залежать від типу матеріалу. Загалом, фотони з'єднуються з доступними електронними або

коливальними станами в матеріалі залежно від енергії фотонів. В ізоляторах і напівпровідниках поглинання лазерного світла відбувається переважно через резонансні збудження, такі як переходи електронів валентної зони в зону провідності (міжзонні переходи) або всередині зон (міжпідзонні переходи). Збуджені електронні стани можуть передавати енергію фононам решітки. Фотони з енергією нижче ширини забороненої зони матеріалу не поглинаються (якщо тільки немає інших домішок або дефектних станів, з якими вони можуть з'єднатися, або якщо має місце багатофотонне поглинання). Такі енергії зазвичай відповідають світловим частотам нижче вакуумного ультрафіолету для ізоляторів і нижче від видимого до інфрачервоного спектру для напівпровідників. Однак, в деяких випадках можливе резонансне зв'язування з високочастотними оптичними фононами в ближній інфрачервоній області.

У металах оптичне поглинання домінує за рахунок вільних електронів через такі механізми, як зворотне гальмівне випромінювання. З часом енергія передається фононам решітки шляхом зіткнень. Важливим параметром, що пов'язує електронну густину металу  $N_e$  з його оптичними властивостями, є частота плазми [5]:

$$\omega_p = \sqrt{N_e e^2 / m_e \varepsilon_0}, \quad (2.5)$$

де  $m_e$  – маса електрона;

$\varepsilon_0$  – діелектрична проникність вільного простору.

Відбивна здатність і поглинання для частот світла нижче частоти плазми є високими, оскільки електрони в металі екранують електричне поле світла. Однак вище плазмової частоти відбиття і поглинання різко падають, оскільки електрони не можуть реагувати достатньо швидко, щоб екранувати його. Крім того, можуть збуджуватися електронні або коливальні стани, пов'язані з дефектами, домішками або поверхневими явищами, такими як дифузне розсіювання електронів, плазмони і поляритони.

Час, необхідний для того, щоб збуджені електронні стани передали енергію фононам і термалізувалися, залежить від конкретного матеріалу і специфічних механізмів у цих матеріалах. Для більшості металів цей час термалізації становить від  $10^{-12}$  с до  $10^{-10}$  с, тоді як у неметалів механізми поглинання значно більше варіюються, і час термалізації може сягати  $10^{-6}$  с. Полімери та діелектрики, як правило, знаходяться на більш повільному кінці цього діапазону. Дефекти та квантово обмежені електронні стани можуть відігравати значну роль у сповільненні часу термалізації.

Коли швидкість індукованого лазером збудження низька порівняно зі швидкістю термалізації, деталі перехідних електронно-збуджених станів не є суттєвими. Скоріше, можна вважати, що поглинута лазерна енергія безпосередньо перетворюється на тепло. Такі процеси називаються фототермічними (піролітичними), а реакція матеріалу може розглядатися суто термічно. Наприклад, лазерна обробка металів або напівпровідників з малою тривалістю лазерного імпульсу (менше наносекунди) зазвичай характеризується фототермічними механізмами.

Коли швидкість індукованого лазером збудження висока порівняно зі швидкістю термізації, в проміжних станах можуть накопичуватися великі енергії збудження. Ці енергії збудження можуть бути достатніми для безпосереднього розриву зв'язків (фоторозкладання). Цей тип нетермічної модифікації матеріалу зазвичай називають фотохімічною (фотолітичною) обробкою. Під час суто фотохімічної обробки температура системи залишається відносно незмінною. Опромінення полімерів короткохвильовим лазерним світлом, де енергія фотонів має порядок енергії хімічного зв'язку, є прикладом фотохімічної обробки. Аналогічно, надшвидкі фемтосекундні лазерні імпульси можуть уможливити фотохімічну обробку металів і напівпровідників. Однак навіть у цих випадках можлива термічна модифікація після того, як збуджені стани розігріваються фононами решітки. Реакції матеріалів, які демонструють як теплові, так і нетеплові механізми, зазвичай називають фотофізичними.

### 2.1.3 Рівняння теплоти

При фототермічній обробці реакцію матеріалу можна пояснити підвищеною температурою. Тому важливо мати можливість моделювати потік тепла всередині матеріалу. Часова і просторова еволюція температурного поля всередині матеріалу описується рівнянням теплопровідності. Рівняння теплопровідності випливає із закону збереження енергії та закону теплопровідності Фур'є, який стверджує, що локальний тепловий потік пропорційний від'ємному значенню градієнта температури. У системі координат, яка фіксується лазерним променем, рівняння теплопровідності можна записати як:

$$\rho(\mathbf{x}, T) c_p(\mathbf{x}, T) \frac{\partial T(\mathbf{x}, t)}{\partial t} - \nabla [\kappa(\mathbf{x}, T) \nabla T(\mathbf{x}, t)] + \rho(\mathbf{x}, T) c_p(\mathbf{x}, T) \mathbf{v}_s \nabla T(\mathbf{x}, t) = Q(\mathbf{x}, t), \quad (2.6)$$

де  $\rho$  – густина маси;

$c_p$  – питома теплоємність при постійному тиску;

$\kappa$  – теплопровідність;

$\mathbf{v}_s$  – швидкість підкладки відносно джерела тепла.

Ліва частина описує зміну температури внаслідок теплопровідності, а також конвективний член  $\mathbf{v}_s$  для врахування зсуву системи відліку. У багатьох процесах лазерної обробки лазерний промінь раструється по заготовці або використовується певна форма керування рухом для переміщення підкладки відносно променя. Тому ця форма дає зручні перетворення, за допомогою яких можна вирішити ці проблеми. Права частина включає в себе  $Q(\mathbf{x}, t)$ .

Ріст температури всередині матеріалу спочатку визначається об'ємним коефіцієнтом нагрівання  $Q(\mathbf{x}, t)$ , а також граничними умовами конкретної задачі. Теплообмін за рахунок конвекції і випромінювання на поверхні може бути врахований в граничних умовах конкретної задачі. У більшості випадків

лазерне випромінювання є основним джерелом об'ємного нагріву. Загалом, для складних профілів пучка спочатку потрібно розв'язати хвильове рівняння для всього просторового розподілу інтенсивності світла в матеріалі, а потім взяти величину градієнта інтенсивності як об'ємну швидкість нагріву внаслідок лазерного поглинання і ввести її в рівняння теплопровідності. Однак, у випадку неглибокого поверхневого поглинання, цей внесок можна приблизно розділити на просторову форму  $g(x, y)$ , яка визначається профілем пучка, член ослаблення  $f(z)$ , який визначається з (2.5), а також часову форму  $q(t)$ , яка може бути константою для безперервного випромінювання, імпульсом або навіть послідовністю імпульсів з певною формою. Фазові зміни або хімічні реакції можуть бути враховані за допомогою  $U(\mathbf{x}, t)$  і об'ємний член нагрівання стає:

$$Q(\mathbf{x}, t) = g(x, y) f(z) q(t) + U(\mathbf{x}, t). \quad (2.7)$$

У загальному випадку рівняння теплопровідності (2.6) є нелінійним диференціальним рівнянням у частинних похідних, що ускладнює пошук аналітичного розв'язку. Ситуація ще більше ускладнюється в реальних матеріальних системах через зміну оптичних властивостей (і, отже, об'ємного терміну нагрівання) як функції температури та інтенсивності лазерного випромінювання. Таким чином, для отримання кількісної інформації, як правило, потрібні такі методи, як чисельний аналіз методом скінченних різниць або скінченних елементів. У деяких випадках надзвичайно швидкого нагрівання матеріалу або дуже малих розмірів матеріалу, припущення континууму у рівнянні (2.6) можуть порушуватися під час початкової взаємодії лазера з матеріалом, що вимагає альтернативного моделювання, наприклад, молекулярно-динамічного моделювання. Однак у більшості випадків незабаром після початкової взаємодії рівняння теплопровідності відновлює свою справедливість. У деяких випадках існують спрощувальні припущення, які можна застосувати для отримання аналітичних розв'язків, наприклад, вважати властивості матеріалу константами, включити лазерне нагрівання через

граничні умови у випадку поверхневого поглинання або розглядати член форми лазерного випромінювання як дельта-функцію у випадку щільно сфокусованої лазерної плями.

Важливою величиною, яка впливає з цих спрощених процедур, є довжина теплової дифузії:

$$l_T \approx \zeta \sqrt{D\tau}, \quad (2.8)$$

де  $D = \kappa/\rho c_p$  – коефіцієнт температурної провідності матеріалу.

Довжина теплової дифузії характеризує відстань, на яку поширюються зміни температури за деякий характерний час  $\tau$ . Префактор  $\zeta$  – це геометрична константа порядку одиниці, яка залежить від конкретної геометрії задачі (наприклад, поглинання в об'ємі чи в тонкій плівці). Як правило,  $\tau$  розглядається час перебування лазерного променя або часова ширина імпульсу, в цьому випадку ми можемо розглядати довжину теплової дифузії як міру того, наскільки далеко поширюється енергія під час лазерного випромінювання. Після цієї початкової взаємодії подальше поширення тепла призводить до підвищення температури на відстанях, що перевищують цю довжину. Поширення енергії під час лазерного імпульсу в поєднанні з поширенням енергії після імпульсу може призвести до змін у властивостях матеріалу. Область, в якій відбуваються ці зміни, називається зоною термічного впливу і може мати ряд суттєвих відмінностей від об'ємного матеріалу.

Враховуючи попередню обробку лазерного поглинання, що дає глибину оптичного поглинання, і рівняння теплопереносу, що дає довжину теплової дифузії, ми можемо почати чітко бачити важливість лазерів для модифікації поверхні і способи, якими можна контролювати ці взаємодії. Для непрозорих матеріалів глибина оптичного поглинання дуже мала. При короткому часі перебування лазера довжина теплової дифузії також мала. У такому випадку ми перебуваємо в режимі, для якого можна вважати, що вся оптична енергія поглинається на поверхні з просторовим профілем, що відповідає профілю

променя, і без значної теплової дифузії з цієї області під час початкової взаємодії. Крім того, це обмеження можна послабити, збільшивши довжини поглинання і дифузії за рахунок відповідного вибору довжини лазерної хвилі і збільшення часу витримки. Таким чином, існує велика гнучкість у розробці лазерних процесів для досягнення точного бажаного результату обробки матеріалу.

## 2.2 Вплив параметрів лазерного випромінювання на якість зварювання

Основними параметрами, що впливають на якість зварювання є:

- пікова потужність;
- швидкість лазера;
- форма лазерного імпульсу.

Пікова потужність суттєво впливає на теплову енергію, що виділяється під час зварювання, яка, в свою чергу, впливає на геометрію та властивості зварного шва. Зі збільшенням пікової потужності зростає щільність енергії, що призводить до більшого розплавлення та випаровування металу. Це призводить до збільшення як ширини, так і глибини зварного шва, що забезпечує краще проплавлення. Однак надмірна пікова потужність може дестабілізувати зварювальну ванну і спричинити розбризкування або інші дефекти, як це спостерігається, коли потужність перевищує оптимальні рівні.

Взаємозв'язок між піковою потужністю і якістю зварного шва також проявляється при формуванні зони сплавлення. Оптимальна пікова потужність забезпечує майже повне проплавлення, підвищуючи механічну цілісність. Це особливо важливо для таких матеріалів, які схильні до гарячого розтріскування та пористості. Належним чином відкалібрована пікова потужність мінімізує ці проблеми шляхом досягнення збалансованого теплового профілю, сприяючи кращому змішуванню основного і присадочного матеріалів, зменшуючи при цьому різкість швидкості охолодження.

Проте, надмірна пікова потужність може посилити термічні напруження, що призводить до небажаних деформацій зварного шва та мікроструктурних аномалій. Точне регулювання пікової потужності, доповнене точним регулюванням інших параметрів, таких як швидкість зварювання і форма імпульсу, має важливе значення для збереження цілісності і надійності зварного шва. Вплив пікової потужності на зварний шов продемонстровано на рисунках (2.2, 2.3) [8].

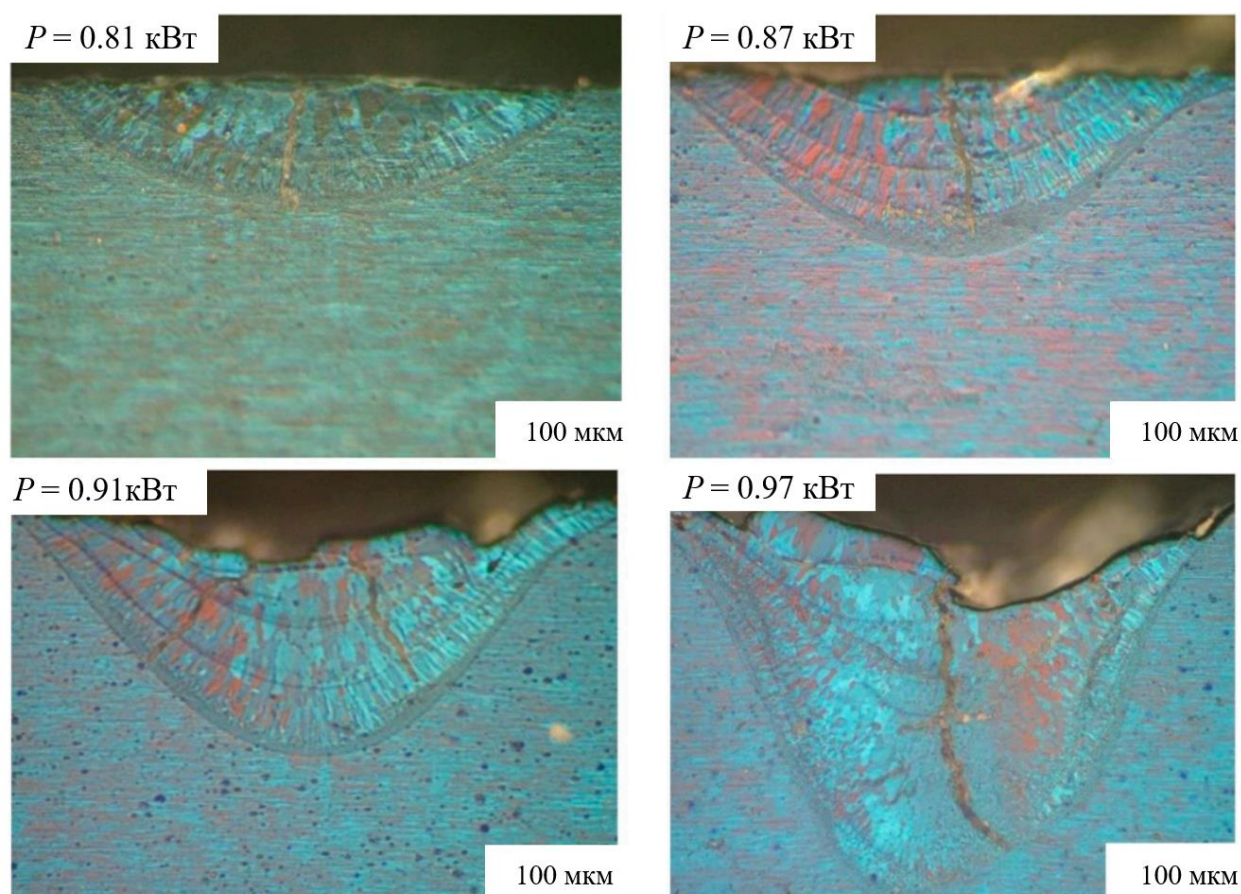


Рисунок 2.2 – Вплив пікової потужності лазерного випромінювання на форму поперечного перерізу зварного шва

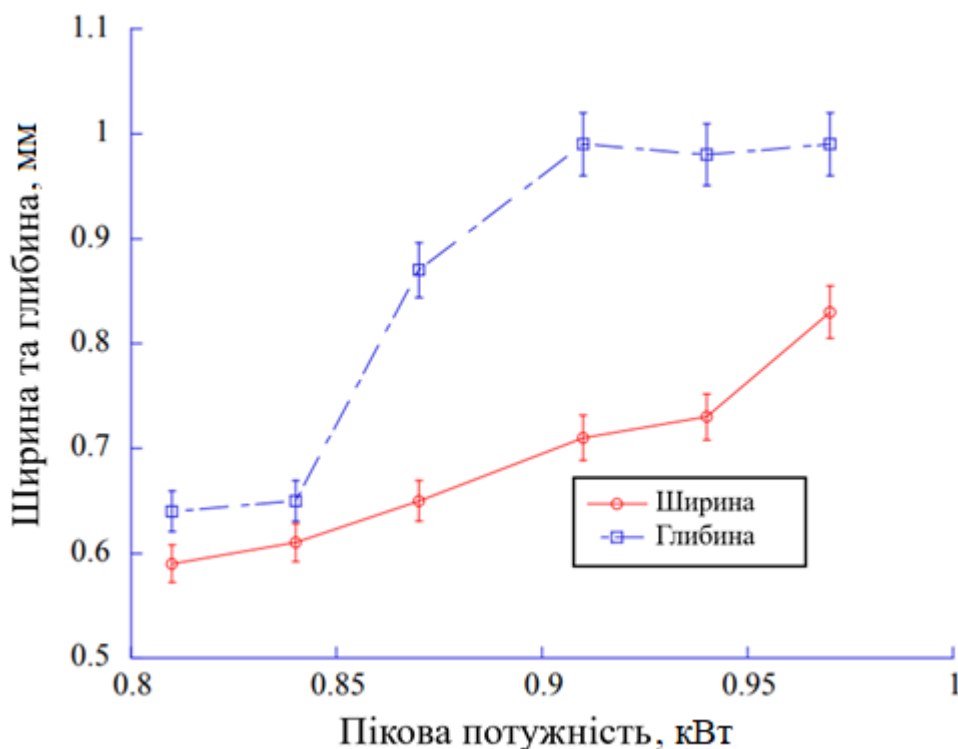


Рисунок 2.3 – Вплив пікової потужності лазера на ширину та глибину проплавлення зварного шва

Швидкість лазерного зварювання відіграє вирішальну роль у визначенні геометрії, структурних властивостей і загальної якості зварного шва. Зі збільшенням швидкості лазера час взаємодії між лазерним променем і матеріалом зменшується, що призводить до зменшення вхідного тепла на одиницю довжини шва. Це призводить до більш глибокого проплавлення і вузьких зварних швів. Більші швидкості також можуть обмежувати перемішування розплавленої ванни, збільшуючи ймовірність виникнення дефектів, таких як неповне сплавлення або пористість.

І навпаки, нижчі швидкості лазера дозволяють збільшити тепловіддачу, що сприяє більш глибокому проникненню і більш широким зварним швам (рис. (2.4, 2.5)). Однак надмірне накопичення тепла на дуже низьких швидкостях може дестабілізувати зварювальну ванну, викликаючи розбризкування або переплавлення, і може посилити термічні деформації в матеріалі.

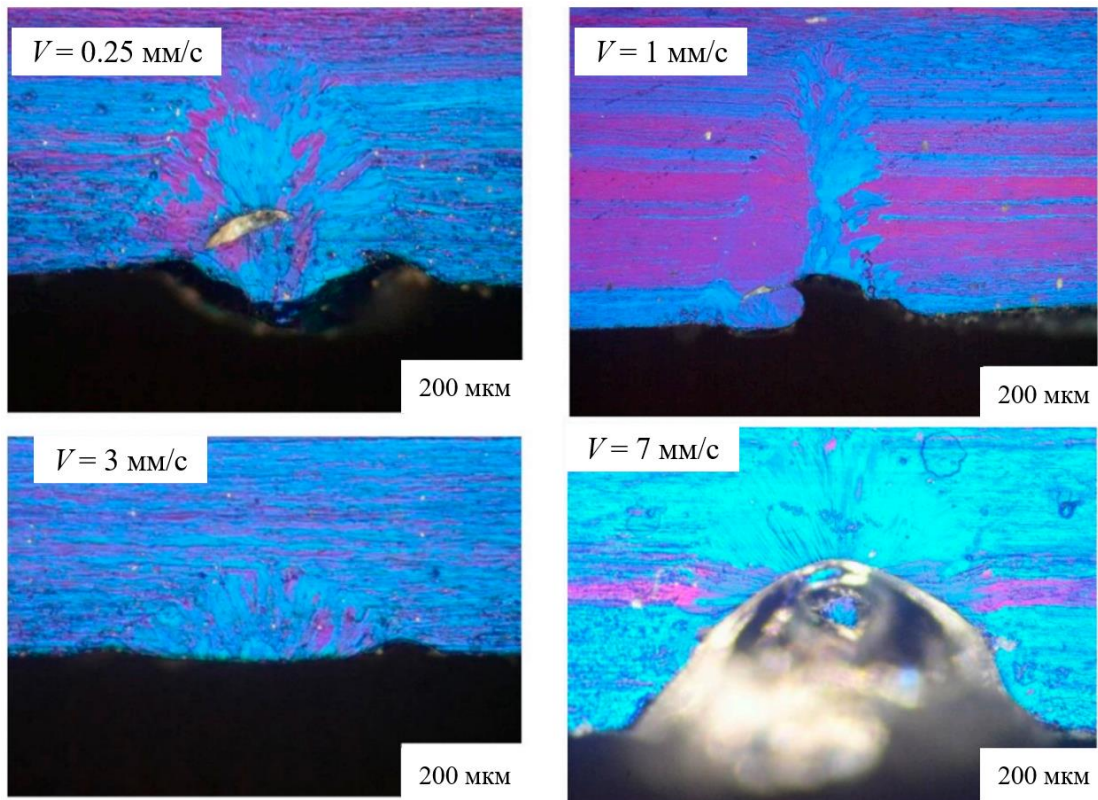


Рисунок 2.4 – Вплив швидкості лазера на форму поперечного перерізу зварного шва

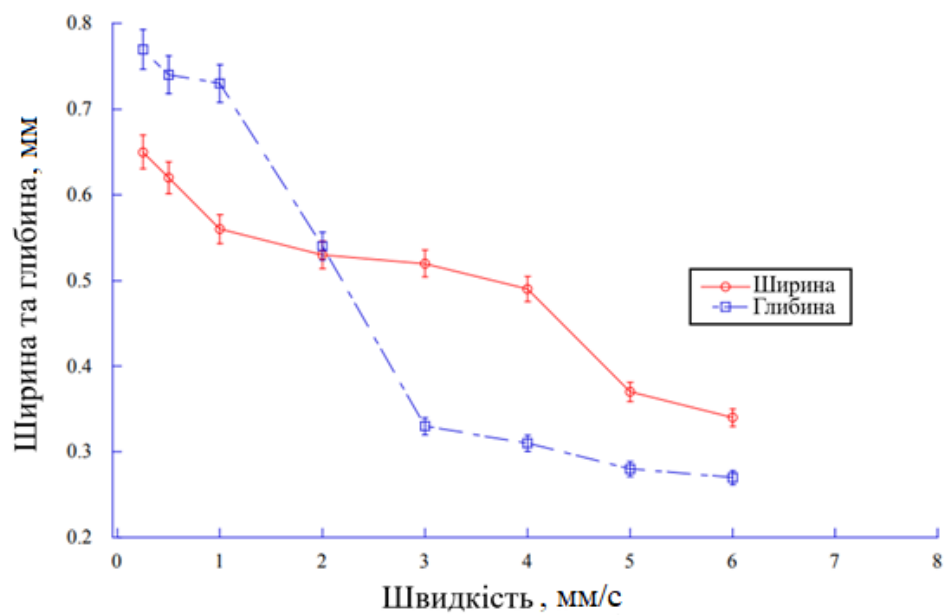
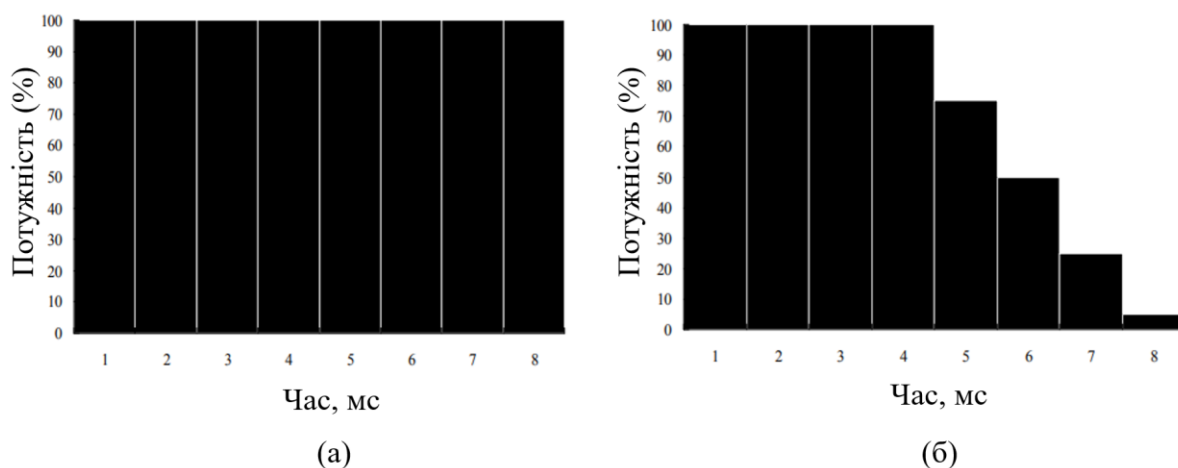


Рисунок 2.5 – Вплив швидкості лазера на ширину та глибину проплавлення шва

Результати підкреслюють важливість вибору оптимальної швидкості лазера, яка балансує між достатнім тепловим впливом для належного плавлення і мінімальним термічним пошкодженням навколишнього матеріалу.

Крім того, швидкість лазера впливає на швидкість охолодження і мікроструктурні характеристики зварного шва. На більш високих швидкостях швидке охолодження може призвести до більш тонкої мікроструктури, але це також збільшує ризик гарячого розтріскування. З іншого боку, нижчі швидкості подовжують тривалість охолодження, що сприяє кращій гомогенізації розплавленої ванни, але може призвести до огрубіння зерна [8].

Формування лазерного імпульсу глибоко впливає на тепловий профіль, мікроструктуру і загальну цілісність зварного шва шляхом модуляції часового розподілу лазерної енергії. Два найпоширеніші методи формування імпульсу – прямокутний і спадаючий – ілюструють вплив контрольованої подачі енергії на процес зварювання (рис. 2.6). Прямокутна форма імпульсу, яка підтримує постійну пікову потужність протягом усього імпульсу, часто призводить до швидких циклів нагрівання та охолодження. Різкі теплові коливання можуть спричинити гаряче розтріскування в алюмінієвих сплавах через високі теплові напруження, що виникають під час неконтрольованого охолодження.

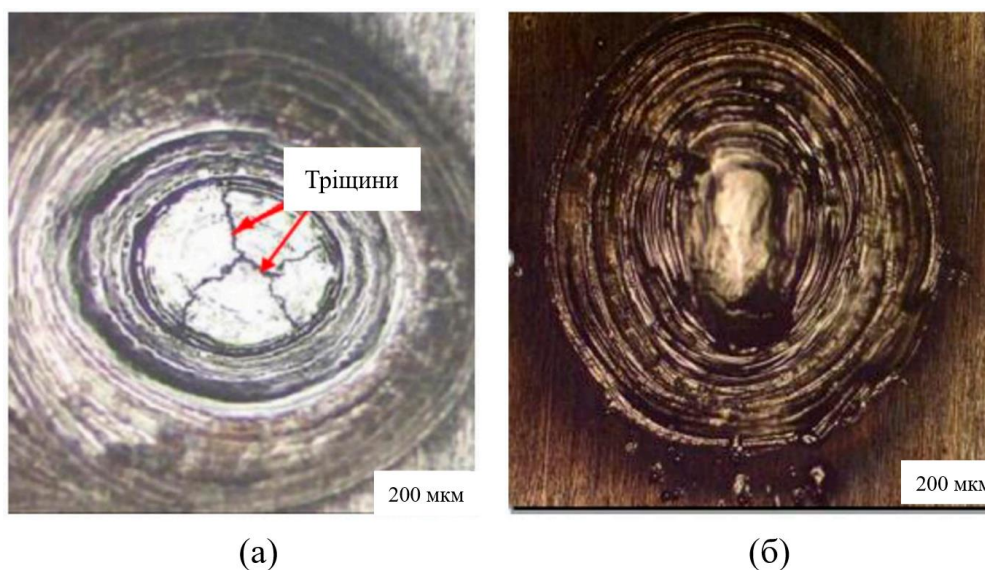


а) прямокутний; б) спадаючий.

Рисунок 2.6 – Форми лазерного імпульсу

На противагу цьому, формування спадаючого імпульсу дозволяє поступово зменшувати потужність лазера до кінця імпульсу, сприяючи більш контрольованому процесу охолодження. Більш плавний тепловий перехід мінімізує утворення тріщин і пористості в зварному шві. Поступове зменшення потужності дозволяє розплавленій ванні застигати більш рівномірно, що призводить до поліпшення мікроструктурної однорідності та механічних властивостей. Наприклад, імпульсне формування з поступовим зниженням потужності усуває видимі тріщини в точкових зварних швах, що підкреслює його переваги для отримання високоякісних зварних швів.

Вибір форми імпульсу безпосередньо впливає на здатність зварного шва витримувати механічні та термічні навантаження. Прямокутні імпульси, хоча і є потенційно більш ефективними з точки зору подачі енергії, можуть знизити надійність зварного шва в чутливих сферах застосування (рис. 2.7) [8].



а) прямокутний; б) спадаючий.

Рисунок 2.7 – Вплив форми імпульсу на лазерний точковий зварний шов:

### 3 СТВОРЕННЯ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ДЛЯ ЛАЗРЕНОГО ЗВАРЮВАННЯ

#### 3.1 Взаємозв'язок між глибиною зварювальної щілини та коливанням світла

Кореляція між глибиною індукованої лазером зварної щілини та коливальними характеристиками світла, що випромінюється під час лазерного зварювання, викликає значний інтерес через її значення для моніторингу якості зварного шва та керування процесом. Динамічна поведінка ключового отвору і навколишнього плазмового факела відображає критичні властивості зварювального процесу, включаючи його стабільність і глибину проплавлення.

Під час лазерного зварювання замкова щілина діє як канал для передачі енергії, а її стабільність суттєво впливає на якість зварного шва. Високі температури в зварній щілині генерують плазмовий факел, який випромінює світло, інтенсивність якого змінюються в результаті коливання всередині системи. Дані коливання залежать від таких параметрів процесу, як потужність лазера, швидкість і положення фокусу, і мають чіткі частотні характеристики, які корелюють з глибиною проплавлення шпонкового отвору. Неглибоке проникнення характеризується частотним спектром, в якому переважають низькі частоти, в той час як більш глибоке проникнення призводить до більш рівномірного розподілу спектру.

Для кількісної оцінки цієї кореляції нормований частотний спектр випромінюваного світла піддається лінійному регресійному аналізу, в результаті якого отримується параметр  $S$ , що представляє суму квадратів залишків [9]. Значення параметра  $S$  зменшується в міру того, як амплітудний розподіл стає більш рівномірним, що свідчить про глибше проникнення. Математично цю залежність можна виразити таким чином:

$$S = \sum_{i=1}^N (y_i - (ax_i + b))^2, \quad (3.1)$$

де  $y_i$  – нормована амплітуда на частоті  $x_i$ ;

$a, b$  – коефіцієнти регресії;

На рисунку 3.1 наведено приклад частотного спектру, характерного для глибокого та неглибокого проникнення (суцільна лінія) та пряма лінія, отримана за допомогою лінійної регресії (пунктирна лінія). Сума квадратів залишків  $S$  менша у випадку глибокого проникнення, оскільки амплітуди розподілені більш рівномірно [10].

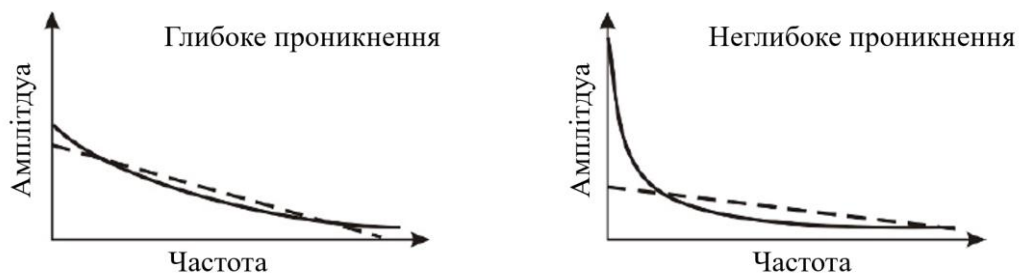


Рисунок 3.1 – Приклад спектра характерних частот (суцільна лінія) і результати обчислення суми квадратів залишків (пунктирна лінія) у випадку глибокого і неглибокого проникнення

Взаємозв'язок між глибиною проплавлення і світловими коливаннями виходить за рамки якісних спостережень. Наприклад, збільшення теплового навантаження, що визначається як відношення потужності лазера до швидкості зварювання, збільшує амплітуду низьких частот через збільшення маси розплавленого матеріалу. Цю залежність можна представити так:

$$H = \frac{P}{v}, \quad (3.2)$$

де  $H$  – тепловіддача;

$P$  – потужність лазера;

$v$  – швидкість зварювання.

Залежність характеристик частотного спектра від  $H$  підкреслює важливість оптимізації цих параметрів для стабільного та ефективного зварювання.

Універсальність параметра  $S$  для різних типів лазерів і матеріалів має важливе значення для моніторингу та управління лазерним зварюванням в режимі реального часу. Системи адаптивного зворотного зв'язку, що використовують цей параметр, можуть динамічно регулювати параметри процесу для підтримки оптимальних умов, тим самим підвищуючи якість і ефективність зварювання. Такі системи використовують алгоритми для періодичного обчислення  $S$  і зміни параметрів, таких як положення фокусу, для досягнення постійної глибини проплавлення.

Отже, кореляція між глибиною зварного отвору і характеристиками світлових коливань пропонує надійну основу для розуміння і контролю процесу лазерного зварювання.

### 3.2 Конструкція системи моніторингу

На рисунку 3.2 представлена запропонована структура установки для лазерного зварювання з імплементованою системою моніторингу та зворотнього зв'язку.

На рисунку 3.3 наведено блок-схему системи моніторингу та зворотнього зв'язку, до складу якої входить: 1 – фотодетектор; 2 – робочі поверхні, на яких проводиться зварювання; 3 – мікроконтролер; 4 – комп'ютер; 5 – пропорційний клапан установки для зварювання.

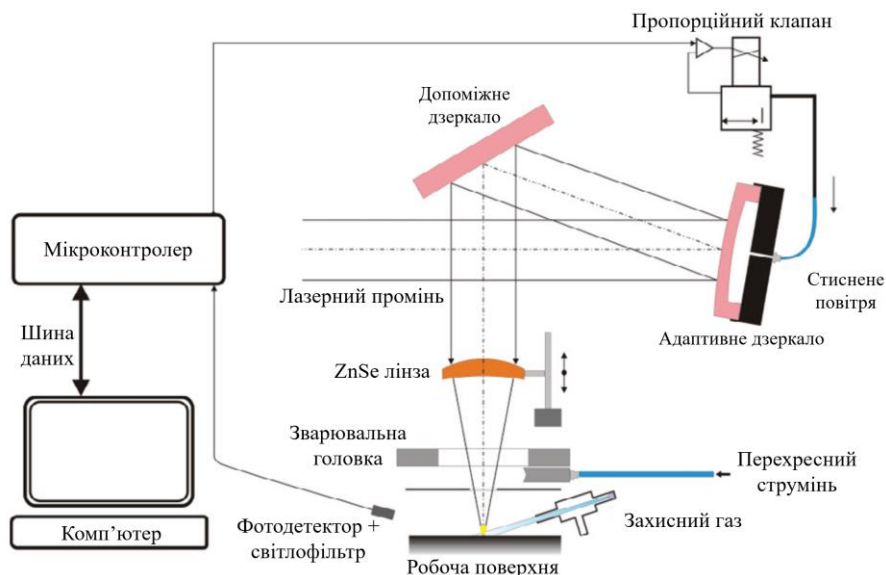


Рисунок 3.2 – Будова лазерної установки з імплементованою системою моніторингу та зворотнього зв'язку на основі мікроконтролера

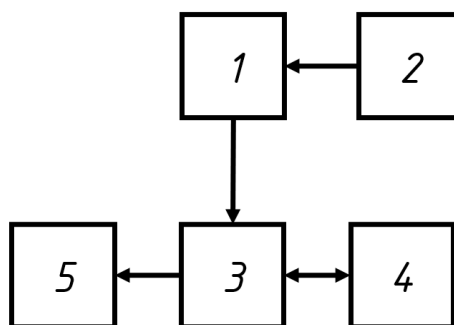


Рисунок 3.3 – Блок-схема системи системою моніторингу та зворотнього зв'язку

### 3.2.1 Фотодетектор

Основним завданням фотодетектору є реєстрація змін інтенсивності випромінювання плазми та виплавленого матеріалу, що виникають через коливання ключового отвору та інших динамічних характеристик процесу.

У якості фотодетектору потенційними є фотодіоди S1226 або S1337 від Hamamatsu або FDS100 від Thorlabs, що представлені на рисунку 3.4 [11,12].

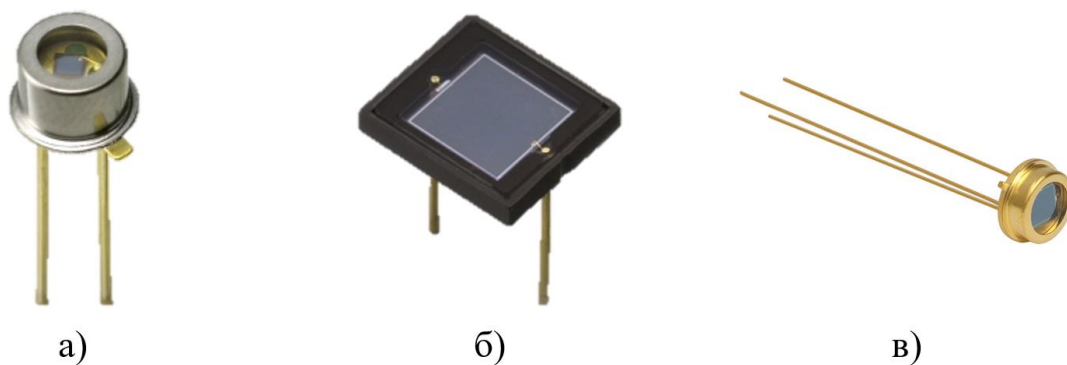


Рисунок 3.4 – Фотодіоди серій: а) S1226, б) S1337, в) FDS100

Характеристики, що важливі для детектування змін інтенсивності випромінювання плазми та виплавленого матеріалу наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Основні параметри світлодіодів

Серія світлодіоду	S1226	S1337	FDS100
Спектральний діапазон (нм)	190 – 1100	190 – 1100	350 – 1100
Довжина хвилі пікової чутливості (нм)	720	960	960
Час підйому/спаду (нс)	150	200	10 нс
Фоточутливість (А/В)	0.12	0.12	0.65
Еквівалентна потужність шуму (Вт/Гц <sup>1/2</sup> )	$1.6 \times 10^{-15}$	$1 \times 10^{-14}$	$1.2 \times 10^{-14}$

Світлофільтр виконує функцію захисту фотодетектора від перенасичення та відсічення небажаних спектральних компонентів. Він може блокувати довжини хвиль, які не є інформативними для аналізу процесу, зосереджуючи увагу на сигналах від плазми або виплавленого матеріалу. Також фільтр забезпечує захист фотодетектора від надмірно інтенсивного випромінювання, що може призвести до перегріву чи пошкодження сенсора, а також сприяє підвищенню співвідношення сигнал/шум, що забезпечує отримання чіткіших даних для аналізу.

### 3.2.2 Мікроконтролер

У даному випадку мікроконтролер представлений платою розробника ESP32, зображення якої наведено на рисунку 3.5. Основні характеристики мікроконтролера наведені у таблиці 3.2.

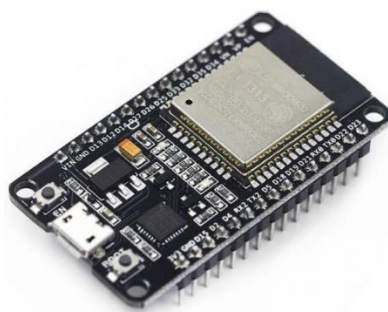


Рисунок 3.5 – Плата розробника ESP32

Таблиця 3.2 – Основні характеристики ESP32 [13]

Характеристика	Опис
Процесор	Двоядерний Tensilica Xtensa LX6 з тактовою частотою до 240 МГц
Роз'єми	GPIO (34 пінів), SPI, I2C, I2S, UART, PWM
Wi-Fi	Вбудований модуль Wi-Fi 802.11 b/g/n
Аналогові входи (ADC)	18 каналів (12-бітний АЦП)
Цифрові входи/виходи	До 34 пінів GPIO
ШІМ-виводи	До 16 каналів керування
ЦАП	2 канали 8-бітного цифро-аналогового перетворювача
Підтримка SPI	До 4 шини SPI (одна головна та три периферійні)
Підтримка I2C	Два інтерфейси I2C для підключення сенсорів
Підтримка UART	До 3 апаратних портів UART
Живлення	Напруга живлення: 3,3 В
Інтеграція датчиків	Можливість підключення датчиків через I2C, SPI, UART або GPIO
Розмір (мм)	25 × 52
ОС та бібліотеки	Підтримка SDK для програмування (ESP-IDF, Arduino IDE)

Наведені характеристики роблять ESP32 дуже придатним для використання у системах моніторингу, зокрема для збору даних із фотодетекторів, обробки сигналів, зв'язку з іншими пристроями через Wi-Fi або інші методи бездротового з'єднання, та керування зовнішніми компонентами, такими як пропорційні клапани чи адаптивні дзеркала.

Мікроконтролер у системі зворотного зв'язку для лазерного зварювання виконує ключову роль у забезпеченні стабільності та ефективності процесу за рахунок аналізу даних, отриманих від фотодетектора, та управління виконавчими елементами. Основною задачею мікроконтролера є обробка сигналів, що надходять від фотодетектора, який реєструє інтенсивність випромінювання.

Крім обробки сигналів, мікроконтролер забезпечує інтеграцію системи з програмним забезпеченням, яке управляє лазерним зварюванням. Це передбачає передачу обчислених параметрів у реальному часі до програмної платформи, що дозволяє адаптивно змінювати параметри лазера, такі як потужність, швидкість сканування та фокусна відстань, залежно від умов процесу.

Також важливою функцією мікроконтролера є керування пропорційним клапаном, який регулює подачу стисненого повітря для управління положенням адаптивного дзеркала. Зміна кута нахилу дзеркала дозволяє коригувати траєкторію лазерного променя, забезпечуючи точне позиціонування та компенсацію нестабільностей процесу. Таким чином, мікроконтролер виступає центральним елементом системи зворотного зв'язку, забезпечуючи аналіз сигналів, зв'язок між апаратними та програмними компонентами, а також управління виконавчими елементами для стабілізації та оптимізації процесу лазерного зварювання.

### 3.2.3 Процес обробки інформації

Для обробки отриманої інформації пропонується дискретне короткочасне перетворення Фур'є (ДКПФ), що представляє собою інструмент для аналізу сигналів, які змінюються в часі, і використовується для дослідження частотних компонент у тимчасових інтервалах. Дана методика розширює класичне дискретне перетворення Фур'є, яке забезпечує глобальний аналіз частотного спектра, додаючи можливість локалізації частот у часі. Основна ідея полягає в

тому, щоб розбити сигнал на сегменти шляхом застосування віконної функції, а потім виконати дискретне перетворення Фур'є для кожного сегмента.

Математично ДКПФ визначається наступним чином [14]:

$$X(f, \tau) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N x(t) w(t - \tau) e^{-2\pi jft/N}, \quad (3.3)$$

де  $\tau$  – визначник часового інтервалу, що визначає його положення;

$f$  – дискретне значення частоти;

$t$  – дискретне значення часу;

$X(f, \tau)$  – комплексний коефіцієнт Фур'є.

Функція інтервалу  $x(t)$  обмежує аналіз сигналу лише невеликим тимчасовим інтервалом навколо  $\tau$ , що забезпечує локалізацію частотних компонент у цьому інтервалі.

Результатом перетворення є комплексна величина, амплітуда якої визначає енергетичний вміст частотної компоненти  $f$  у момент часу  $\tau$ , а фаза відображає фазову інформацію. Таким чином, ДКПФ дозволяє отримати спектр сигналу як функцію часу та частоти, що зручно візуалізується у вигляді спектрограми (рис. 3.6).

Ключовим параметром ДКПФ є вибір функції інтервалу  $x(t)$  і її довжини. Вікно визначає компроміс між часовою та частотною роздільною здатністю: коротке вікно забезпечує кращу локалізацію в часі, тоді як довге вікно – вищу частотну роздільну здатність.

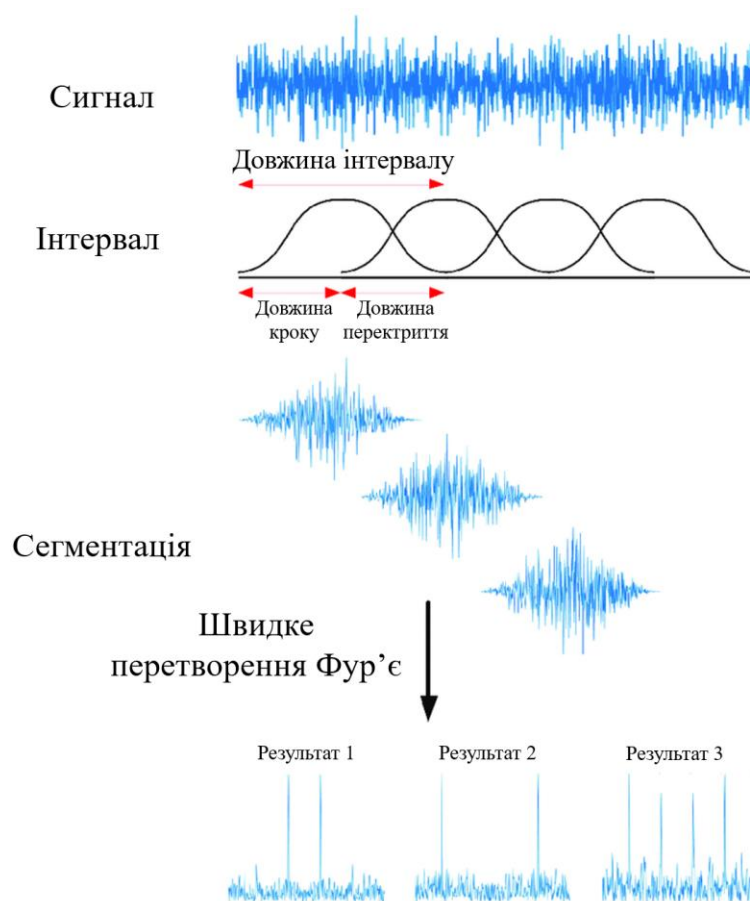


Рисунок 3.6 – Приклад дискретного короточасного перетворення Фур'є

## ВИСНОВКИ

Системи моніторингу на основі мікроконтролерів є важливим інструментом для забезпечення точності, ефективності та адаптивності в лазерних технологічних процесах. Їх впровадження дозволяє здійснювати детальний збір і аналіз параметрів у реальному часі, що сприяє підвищенню якості продукції, мінімізації дефектів та оптимізації ресурсів. Завдяки компактності, енергоефективності та можливості інтеграції з різноманітними датчиками, такі системи стають невід'ємною частиною сучасних автоматизованих виробничих ліній.

У ході кваліфікаційної роботи проведено теоретичний огляд поняття лазерного процесу, розглянуто конструкцію систем лазерного різання, зварювання та поверхневої обробки.

Досліджено механізм взаємодії лазерного випромінювання з поверхнею матеріалів.

Проаналізовано залежність пікової потужності, швидкості переміщення лазера та форми лазерного імпульсу на якісні характеристики зварного шва.

Представлено систему моніторингу, яка використовує мікроконтролер для збору даних про лазерний процес і забезпечення зворотного зв'язку для корекції в реальному часі, на основі плати ESP32 та фотодіоду.

Перспективи розвитку систем моніторингу пов'язані з удосконаленням алгоритмів обробки даних, впровадженням штучного інтелекту та розширенням функціональних можливостей мікроконтролерів. Інтеграція таких систем у лазерні процеси забезпечить не лише підвищення якості та стабільності обробки матеріалів, але й відкриє нові можливості для автоматизації та гнучкого управління технологічними процесами.

**ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ**

1. Mahrle A., Beyer E. Theoretical aspects of fibre laser cutting. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2009. Т. 42, № 17. С. 175507. URL: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/42/17/175507> (дата звернення: 17.01.2025).
2. Афанасьєва О. В., Лалазарова Н. О. Технологічне застосування лазерів малої потужності // Optimization of Teaching and Learning in a Covid-19 Era: Conference Proceedings of the 1st International Conference, січень 27-29, 2021. Sheffield, UK, Primedia elaunch LLC. С. 7–15.
3. Tayebi M., Mohammad Soltani H., Rajaei A. Laser Welding. *Welding Principles and Application*. 2022. URL: <https://doi.org/10.5772/intechopen.102456> (дата звернення: 17.01.2025).
4. Ahmad Siddiqui A., Kumar Dubey A. Laser Surface Treatment. *Engineering Steels and High Entropy-Alloys*. 2020. URL: <https://doi.org/10.5772/intechopen.91800> (дата звернення: 17.01.2025).
5. Brown M. S., Arnold C. B. Fundamentals of Laser-Material Interaction and Application to Multiscale Surface Modification. *Laser Precision Microfabrication*. Berlin, Heidelberg, 2010. P. 91–120. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-10523-4\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-642-10523-4_4) (дата звернення: 17.01.2025).
6. Interaction of Laser Radiation (UV) with Materials / O. V. Afanasieva та ін. *Journal of Nano- and Electronic Physics*. 2024. Т. 16, № 5. С. 05034–1–05034–6. URL: [https://doi.org/10.21272/jnep.16\(5\).05034](https://doi.org/10.21272/jnep.16(5).05034) (дата звернення: 17.01.2025).
7. Physical and Technological Principles of Processing Steel with UV Laser Radiation / O. S. Hnatenko та ін. *Journal of Nano- and Electronic Physics*. 2023. Vol. 15, No 2. P. 02031–1–02031–4. URL: [https://doi.org/10.21272/jnep.15\(2\).02031](https://doi.org/10.21272/jnep.15(2).02031) (дата звернення: 17.01.2025).
8. Effect of Laser Welding Process Parameters and Filler Metals on the Weldability and the Mechanical Properties of AA7020 Aluminium Alloy / S. Adisa та ін. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2018. Vol 2, No 2. P. 33. URL: <https://doi.org/10.3390/jmmp2020033> (дата звернення: 17.01.2025).

9. Correlation between the Keyhole Depth and the Frequency Characteristics of Light Emissions in Laser Welding / L. Mrňa та ін. *Physics Procedia*. 2013. Vol. 41. P. 469–477. URL: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2013.03.103> (дата звернення: 17.01.2025).

10. Feedback Control of Laser Welding Based on Frequency Analysis of Light Emissions and Adaptive Beam Shaping / L. Mrňa та ін. *Physics Procedia*. 2012. Vol. 39. P. 784–791. URL: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.10.101> (дата звернення: 17.01.2025).

11. Hamamatsu Photonics. S1226, S1337 Series Photodiodes: Технічна документація / Hamamatsu Photonics. 2022. 20 p. URL: [https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99\\_SALES\\_LIBRARY/ssd/s1226\\_s1337\\_kpin1024e.pdf](https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/s1226_s1337_kpin1024e.pdf) (дата звернення: 17.01.2025).

12. ON Semiconductor. FDS100 Infrared Photodiode: Технічна документація / ON Semiconductor. 2021. 10 p. URL: <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/fds100-d.pdf> (дата звернення: 17.01.2025).

13. Espressif Systems. ESP32 Series Datasheet [Текст]: Технічна документація / Espressif Systems. 2023. 55 p. URL: [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf) (дата звернення: 17.01.2025).

14. Area-Efficient Short-Time Fourier Transform Processor for Time–Frequency Analysis of Non-Stationary Signals / H. Jeon та ін. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10, No 20. P. 7208. URL: <https://doi.org/10.3390/app10207208> (дата звернення: 17.01.2025).