

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»



МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання практичних і лабораторних робіт
з дисципліни
«Лазерні та комбіновані технології»

Харків
2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання практичних і лабораторних робіт
з дисципліни
«Лазерні та комбіновані технології»

для студентів
спеціальності «Прикладна механіка»
денної, заочної та дистанційної форм навчання

Затверджено
редакційно-видавничою
радою університету,
протокол № 3 від 12.10.2023 р.

Харків
НТУ «ХП»
2023

Методичні вказівки до виконання практичних і лабораторних робіт з дисципліни «Лазерні та комбіновані технології» для студентів спеціальності «Прикладна механіка» денної, заочної та дистанційної форм навчання / Уклад.: Л. І. Пупань. – Харків : НТУ «ХПІ», 2023. – 78 с.

Укладач Л. І. Пупань

Рецензент Я. М. Гаращенко

Кафедра «Інтегровані технології машинобудування» ім. М. Ф. Семка

ЗМІСТ

Вступ.....	4
Практична робота «Технічні характеристики технологічних лазерів»	5
Практична робота «Лазерне прошивання отворів та розрахунок його продуктивності»	14
Практична робота «Методика розрахунку параметрів режиму лазерного зварювання»	23
Практична робота «Критерії безпеки лазерної техніки»	29
Лабораторна робота «Матеріали активних елементів твердотільних лазерів та методи їх виготовлення».....	36
Лабораторна робота «Визначення точності та якості отворів, отриманих лазерною технологією».....	47
Лабораторна робота «Визначення якості зварного з'єднання, отриманого лазерним випромінюванням».....	57
Лабораторна робота «Технічні та технологічні параметри системи лазерної стереолітографії на базі установки SLA 5000»	63
Література	77

ВСТУП

Серед різних видів сучасних технологій обробки матеріалів особлива роль належить променевим технологіям, заснованим на поверхневому впливі на матеріал заготовки висококонцентрованих вузькоспрямованих променевих потоків або високоенергетичних струменів – потоку прискорених заряджених частинок (електронів), світлового променя високої енергії, що формується лазерами.

Відмінною особливістю променевих методів є висока концентрація енергії на оброблюваній поверхні, локальність та високошвидкісний характер впливу.

Одна з провідних технологій, що багато в чому визначають сучасний рівень виробництва в промислово розвинених країнах, – лазерна технологія, результатами застосування якої у різних видах виробництв є висока якість виробів, їхня мініатюризація, досить висока продуктивність процесів, забезпечення прецизійності обробки, економія матеріальних ресурсів, екологічна чистота, загальне підвищення культури виробництва.

Лазерна обробка може використовуватись для різних матеріалів (металів, твердих сплавів, кераміки, скла, пластмас, гум, напівпровідникових матеріалів, дорогоцінного каміння, біологічних матеріалів) у багатьох галузях промисловості – в мікроелектроніці, в машинобудуванні, в промисловості будівельних матеріалів, в медицині, у сільському господарстві, у ювелірній промисловості.

Технології, засновані на використанні лазерного випромінювання, можуть бути успішно інтегровані в технологічні ланцюжки отримання виробів у комбінації з традиційними процесами, наприклад, литтям.

У методичних вказівках подано матеріал для виконання практичних та лабораторних робіт з дисципліни «Лазерні та комбіновані технології». Розглянуто як технічні характеристики лазерного обладнання та особливості технологій виготовлення основних конструктивних елементів лазерів, так і основні техніко-економічні показники різних операцій лазерної обробки матеріалів – прошивання отворів, різання, зварювання. Надано також інформацію про безпеку застосування лазерів у промисловості та використання відповідних захисних засобів.



ПРАКТИЧНА РОБОТА
«ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЛАЗЕРІВ»

1. ЦІЛЬ РОБОТИ

- ♦ ознайомитись з основними технічними характеристиками лазерів різного типу;
- ♦ освоїти методику розрахунку технічних характеристик технологічних лазерів.

2. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Оскільки більшість технологічних застосувань лазерів ґрунтується на тепловому впливі світла, до технологічних лазерів відносяться лазери, які здатні нагріти об'єкт впливу до температур, при яких в оброблюваному матеріалі відбуваються ті чи інші фізико-хімічні процеси, наприклад, зміна фазового стану та структури, хімічні реакції, фізичні переходи плавлення, випаровування тощо.

До основних технічних параметрів сучасних технологічних лазерів належать такі характеристики.

- ♦ *Довжина хвилі випромінювання, що генерується λ , мкм.*

У лазерах сучасного рівня діапазон довжин хвиль становить від кількох нанометрів до 1 мм, рис. 2.1.

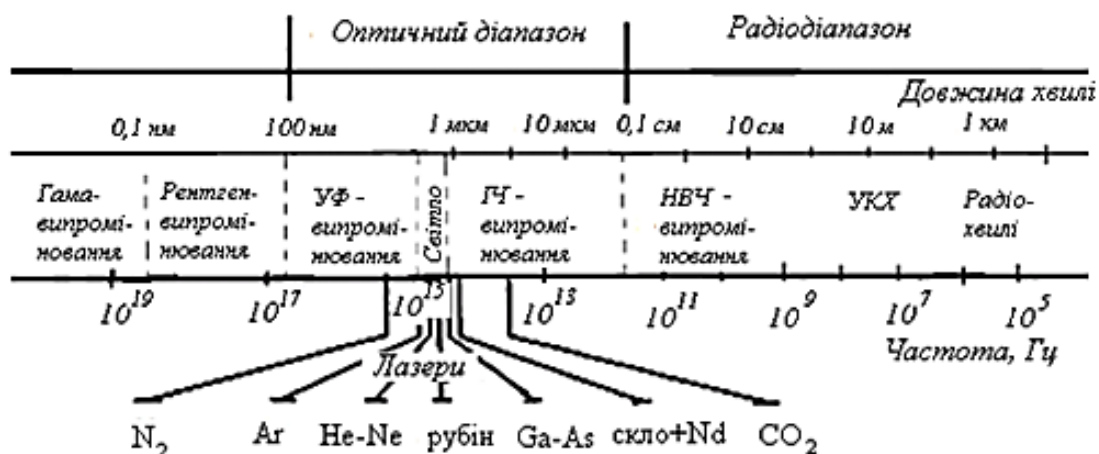


Рисунок 2.1 – Електромагнітний спектр і діапазон довжин хвиль, в якому здійснюється лазерне випромінювання

Довжина хвилі технологічних лазерів повинна лежати в області найбільшої поглинаючої здатності матеріалу: для металів – у видимій, для скла – в інфрачервоній, для полімерів та пластмас – в ультрафіолетовій.

Поглинаюча здатність залежить, перш за все, від оптичних характеристик матеріалу – коефіцієнта відбиття R , коефіцієнта поглинання $A = 1 - R$, показника поглинання α . Глибина проникнення випромінювання $\delta = 1/\alpha$.

♦ **Потужність випромінювання P , Вт.**

Середня потужність випромінювання сучасних лазерів P становить від кількох міліват до 10^6 Вт (1 МВт).

Саме цю величину можна розглядати як критерій технологічних лазерів, оскільки процеси лазерної обробки пов'язані з тепловим процесом випромінювання. З погляду теплофізичного підходу до лазерного впливу на матеріали до технологічних лазерів відносять лазери, здатні нагріти поверхню до заданої температури.

Наприклад, при розмірній обробці (нагріванні до температури випаровування) достатня потужність більшості матеріалів як у безперервному режимі роботи лазера, так і в імпульсному становить $P \approx 10^3$ Вт.

♦ **Щільність потужності випромінювання** безперервних та імпульсних лазерів q , Вт/м² – найважливіший параметр теплового впливу лазерного випромінювання.

Під щільністю потужності q розуміють потужність P , поглинену одиницею площі плями фокусування S :

$$q = P/S, \quad (2.1)$$

Оскільки $P = E/\tau$, де E – енергія в імпульсі, τ – його тривалість; площа плями фокусування $S = \pi d^2/4$ (d – діаметр плями фокусування, залежно від технологічного завдання становить 0,001...0,2 мм), то щільність потужності імпульсного випромінювання можна визначити так:

$$q_{\text{імп}} = E/\tau S = 4E/\pi d^2 \tau. \quad (2.2)$$

Для безперервного випромінювання щільність потужності

$$q_{\text{безперерв.}} = P_{\text{ср}}/S. \quad (2.3)$$

У сучасних лазерах q становить від 10^{10} до 10^{24} Вт/м². Для порівняння – густина потужності випромінювання на поверхні Сонця – 10^{12} Вт/м².

♦ Для імпульсних лазерів **енергія імпульсу E** , Дж становить 0,1...1000 Дж.

♦ **Питома поверхнева енергія W** , Дж/м²

$$W = Pt/S, \quad (2.4)$$

де t – час дії випромінювання; P – потужність випромінювання у плямі фокусування; S – площа плями фокусування.

♦ **Пікова потужність імпульсних лазерів P_n , Вт** – максимальна потужність в імпульсі, становить до 10^{13} Вт,

$$P_n = E/\tau. \quad (2.5)$$

♦ **Тривалість впливу випромінювання t , с** – це тривалість імпульсу для імпульсних лазерів ($\tau = 10^{-2} \dots 10^{-18}$ с) або час ефективного впливу для безперервних лазерів, що визначається як

$$t = d/V_{\text{шв}}, \quad (2.6)$$

де d – діаметр плями у фокусі; $V_{\text{шв}}$ – швидкість сканування випромінювання.

Тривалість впливу випромінювання визначає багато характеристик процесу обробки – порогову енергію процесів, глибину шару, що нагрівається, величину термомеханічних напружень, стабільність розміру опромінюваної зони і т. д.

♦ Для обох типів лазерів (безперервного та імпульсного випромінювання) до основних технічних параметрів відносять також **коефіцієнт корисної дії ККД** – відношення потужності лазерного випромінювання до потужності збудження, що підводиться до випромінювача. ККД становить від десятих часток відсотка у твердотільних лазерах до десятків відсотків (50 % і більше) у напівпровідникових та волоконних лазерах.

♦ **Кутова розбіжність променя θ , мрад**

$$\theta = 1,22 \lambda/d, \quad (2.7)$$

складає для різних типів лазерів від 0,2 (газовий He-Ne лазер) до 200 мрад (напівпровідниковий GaAs-лазер).

Необхідно врахувати також такі аспекти:

♦ Наведені чисельні значення параметрів є граничними, оскільки лазерна техніка безперервно вдосконалюється.

♦ Максимальні значення зазначених характеристик досягаються не у всіх лазерних установках, а переважно в установках, що застосовуються у фундаментальних дослідженнях.

♦ Для оптимального вибору лазера необхідно розглядати передусім його найважливіші властивості, до яких відносять довжину хвилі і потужність.

Технічні характеристики деяких типів технологічних лазерів представлені у табл.2.1.

Таблиця 2.1 – Характерні параметри технологічних лазерів

Назва лазера	Активний елемент	Режим роботи	Довжина хвилі λ , мкм	Мінімальний діаметр фокального плями d , мкм	Енергія імпульсу E , Дж	Потужність випромінювання $P_{\text{вп}}$ Вт	Тривалість імпульсу τ	Частота повторення імпульсів f , Гц	Кутова розбіжність випромінювання θ , мрад	ККД, %	Сфера використання
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1. Твердотільні лазерні											
Лазер на алюмоітрієвому гранаті з неодимом	$\text{Nd:Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$	Імп.	1,06	5	1	До 10^4	10 мс	10^2	0,2...20	1...3	Обробка матеріалів, спектроскопія, датчики, наукові дослідження
Лазер на алюмоітрієвому гранаті з неодимом	$\text{Nd:Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$	Без-перерв.	1,06	5	-	$10^5 \dots 2000$	-	-	0,2...20	3	
Рубіновий лазер	$\text{Cr:Al}_2\text{O}_3$	Імп.	0,69	2	0,1...50	$10^5 \dots 5 \cdot 10^9$	20 пс... 0,5 мс	До 10^2	0,4...10	1	Спектроскопія, медицина (офтальмологія)
Титан-сапфіровий лазер	$\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$	Імп.	0,7... 1,0	2	10^{-8}	50	10 фс... 0,1 пс	10^8	0,4...10	<1	Фундаментальні дослідження, атомна літографія, оптична метрологія, високошвидкісний запис інформації

Продовження табл. 2.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2. Газові лазери											
CO ₂ - лазер	CO ₂	Імп.	10,6	30	0,5	До 10 ³	0,1 ... 10 нс	10 ² ... 2,5·10 ³	0,4...10	20	Обробка матеріалів, медицина, наукові дослідження
CO ₂ - лазер	CO ₂	Без- перевн.	10,6	30	-	До 10 ³	-	-	0,4...10	20	
Гелій-неоновий лазер	He-Ne	Імп.	0,63	10	10 ⁶ ... 10 ⁻³	10 ²	0,1 мкс	10 ³	0,1...1	<1	Стереолітографія, голографія, вимірювання, датчики, наукові дослідження
На парах міді	Cu	Імп.	0,51... 0,58	20	10 ⁻³	10 ²	10 нс	10 ⁴	0,03... 10	1	Наукові дослідження, обробка матеріалів
3. Напівпровідникові лазери											
Арсенід-галієвий лазер	GaAs	Імп.	0,635 ...0,95	5	10 ⁻²	10 ³ ... 5·10 ³	10 пс	10 ³	0,2... 200	10... 15	Інформаційні технології (оптичний зв'язок, зберігання інформації, друк, сканери), датчики, наукові дослідження,
Фосфор- індієвий лазер	InP	Імп.	0,95... 1,55	5	10 ⁻²	10...10 ²	0,1 нс	10 ³	0,2... 200	10... 15	

3. ХІД ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Ознайомитись з основними технічними параметрами лазерів; оцінити їх максимальні значення для сучасних типів технологічних лазерів.

2. За табл. 3.1 відповідно до номера варіанта вибрати лазер з певною речовиною активного елемента і, користуючись даними табл. 2.1, табл. 3.1, вказати:

- ◆ тип даного лазера;
- ◆ матеріал активного елемента;
- ◆ режим роботи даного лазера;
- ◆ довжину хвилі генерованого випромінювання λ та відповідний діапазон, частоту f та енергію випромінювання E ;
- ◆ мінімальний діаметр фокальної плями d ;
- ◆ кутову розбіжність лазерного випромінювання θ ;
- ◆ потужність лазера P ;
- ◆ його ККД;
- ◆ для імпульсних лазерів:
 - енергію імпульсу;
 - його тривалість;
 - частоту повторення імпульсів.
- ◆ сферу використання даного лазера.

Таблиця 3.1 – Вихідні дані для визначення основних технічних характеристик технологічних лазерів

№ варіанта	Активний елемент лазера	Режим роботи	Довжина хвилі генерованого випромінювання λ , мкм
1	2	3	4
1, 16	Nd:Y ₃ Al ₅ O ₁₂	Імпульсний	1,06
2, 17	Cr:Al ₂ O ₃	Імпульсний	0,69
3, 18	CO ₂	Імпульсний	10,6
4, 19	Ti:Al ₂ O ₃	Імпульсний	0,7
5, 20	Nd:Y ₃ Al ₅ O ₁₂	Безперервний	1,06
6, 21	CO ₂	Безперервний	10,6
7, 22	Ti:Al ₂ O ₃	Імпульсний	0,8
8, 23	He-Ne	Імпульсний	0,63
9, 24	Cu	Імпульсний	0,51
10, 25	GaAs	Імпульсний	0,635

Продовження табл. 3.1

1	2	3	4
11, 26	Ti:Al ₂ O ₃	Імпульсний	1,0
12, 27	InP	Імпульсний	0,95
13, 28	Cu	Імпульсний	0,58
14, 29	GaAs	Імпульсний	0,95
15, 30	InP	Імпульсний	1,55

$V_{\text{ск}} = 5$ м/хв (безперервний Nd-YAG-лазер);

$V_{\text{ск}} = 0,5$ м/хв (безперервний CO₂-лазер)

3. Зіставити отримані значення з максимальними характеристиками для промислових технологічних лазерів.

4. Розрахувати для зазначеного типу лазера (з урахуванням режиму його роботи):

- величину щільності потужності випромінювання q ;
- кут розбіжності лазерного випромінювання θ ;
- питому поверхневу енергію W ;
- пікову потужність $P_{\text{п}}$.

За наявності певного діапазону зміни величини (наприклад, тривалості імпульсу, частоти його повторення) розрахунок проводити для крайніх значень (найбільшого та найменшого).

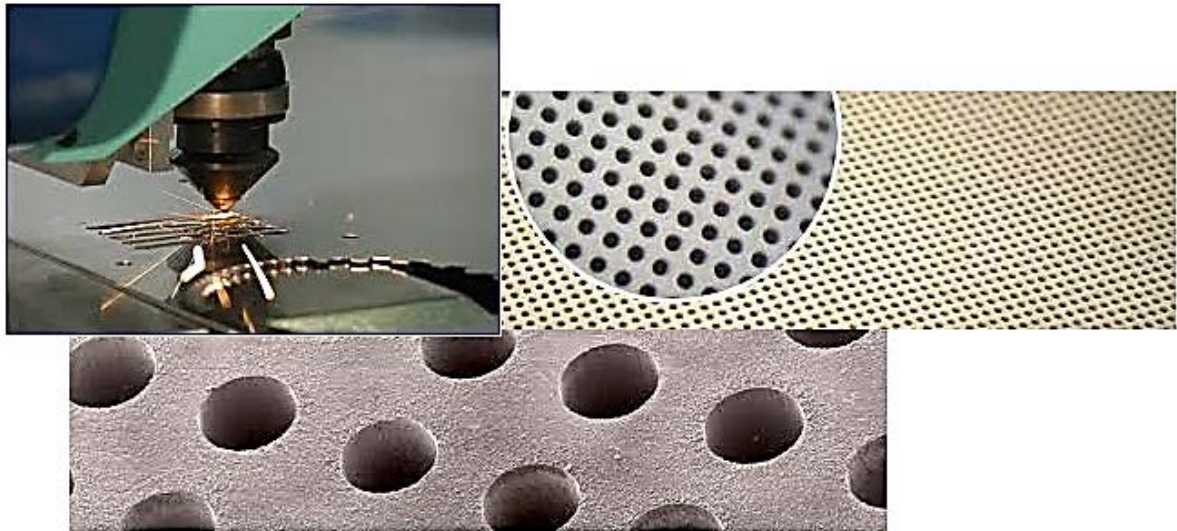
4. ЗМІСТ ЗВІТУ

1. Ціль роботи.
2. Технічні характеристики сучасних технологічних лазерів.
3. Характеристики технологічного лазера, вибраного за табл. 3.1.
4. Розрахунок основних технічних характеристик зазначеного лазера.
5. Висновки.

Питання для самоперевірки

1. Що таке технологічні лазери?
2. Які основні технічні характеристики технологічних лазерів?
3. Вкажіть діапазон значень основних характеристик технологічних лазерів.
4. Які вимоги до діапазону довжини хвилі генерованого випромінювання при виборі лазера для обробки різних матеріалів?

5. Яку характеристику можна прийняти як критерій технологічних лазерів і чому?
6. Що розуміють під щільністю потужності випромінювання?
7. Від яких параметрів залежить щільність потужності випромінювання лазера?
8. Що таке пікова потужність?
9. Що є питома поверхнева енергія?
10. Що розуміють під тривалістю впливу випромінювання безперервних та імпульсних лазерів?
11. Яке значення має тривалість впливу випромінювання у лазерній обробці матеріалів?
12. Що розуміють під ККД лазера?
13. Що таке кутова розбіжність променя і від чого вона залежить?
14. Які характеристики лазера є найважливішими під час його оптимального вибору?
15. Вкажіть сферу застосування різних типів технологічних лазерів.



ПРАКТИЧНА РОБОТА
«ЛАЗЕРНЕ ПРОШИВАННЯ ОТВОРІВ ТА РОЗРАХУНОК ЙОГО
ПРОДУКТИВНОСТІ»

1. ЦІЛЬ РОБОТИ

- ♦ ознайомитись з особливостями процесу отримання отворів за допомогою лазерного випромінювання;
- ♦ ознайомитись з методикою визначення продуктивності лазерного прошивання отворів.

2. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Історично першим та досить поширеним на сьогодні технологічним застосуванням лазерного випромінювання є *лазерне прошивання отворів (лазерне свердління)*.

Порівняно з механічною обробкою дана операція має ряд суттєвих переваг, до яких належать наступні.

- ♦ Отримання отворів у будь-якому матеріалі незалежно від його механічних властивостей.
- ♦ Одержання отворів незначних за розміром діаметрів (від кількох мікрометрів до 0,3 ... 0,5 мм) з суттєвим значенням відношення глибини до діаметра ($h/d = 10 \dots 25$), рис. 2.1, а. При високих значеннях h/d лазерне прошивання перевершує за економічністю всі інші способи.
- ♦ Можливість отримання отворів з віссю, спрямованою під кутом до поверхні (рис. 2.1, б).
- ♦ Отримання отворів у важкооброблюваних матеріалах (наприклад, у твердих і жароміцних сплавах).
- ♦ Отримання некруглих (наприклад, овальних) отворів (рис. 2.1, в).
- ♦ Можливість застосування лазерного свердління для виконання отворів у важкодоступних місцях (наприклад, у паливних форсунках) завдяки використанню дрібної оптики.
- ♦ Достатньо високі показники продуктивності (десятки і навіть тисячі отворів на секунду) та якості.
- ♦ Створення умов для автоматизації процесу та технологічна гнучкість.

До недоліків процесу лазерного свердління порівняно з традиційним свердлінням відносяться більш висока вартість свердління, значні енергозатрати, а отже низький ККД.

Лазерне прошивання отворів знайшло широке застосування при виготовленні фільтрів, форсунок, сопел та пристроїв для контролюваного напуску газів; діафрагм для оптичних пристроїв; каналів охолодження компонентів турбінних двигунів (одна з найхарактерніших операцій лазерної обробки); при обробці алмазів, каменів (наприклад, рубінів) у годинниковій промисловості, гравіюванні виробів, у гіроскопічних пристроях, при балансуванні роторів високошвидкісних двигунів і т. д.

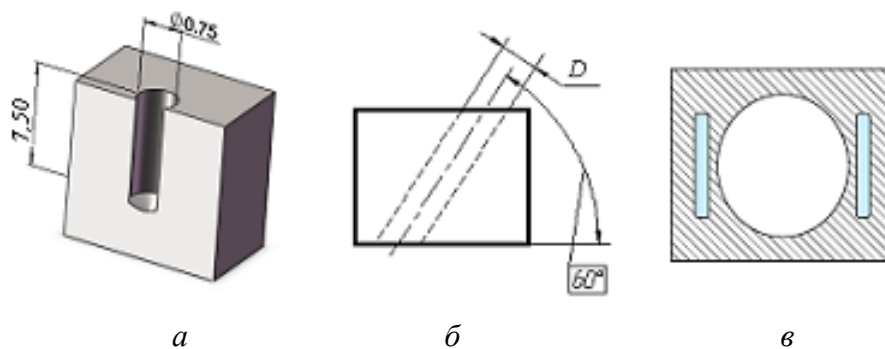


Рисунок 2.1 – Лазерне прошивання отворів

Даний вид обробки виконується, як правило, імпульсним випромінюванням – моноімпульсним, багатоімпульсним. Для лазерного свердління в металах і сплавах зазвичай використовують імпульсні Nd:YAG-лазери ($\lambda = 1,06$ мкм), а в неметалевих матеріалах – CO₂-лазери ($\lambda = 10,6$ мкм). Однак є ряд операцій, для яких доцільно використовувати безперервне випромінювання.

Для лазерного прошивання використовують лазери потужністю 100...400 Вт.

Базовим процесом технології прошивання отворів (як і для операцій різання, отримання щілин, пазів) є утворення елементарної лунки (отвору) під дією одиничного імпульсу або серії імпульсів. Особливістю лазерного прошивання отворів є реалізація процесу не за рахунок механічного видавлення матеріалу, а в результаті його плавлення і випаровування (рис. 2.2).

Лазерне прошивання отворів може проводитись у двох режимах: 1) за участю рідкої фази; 2) в режимі сублімації, тобто переходу з твердого стану в газоподібний, минаючи рідку фазу.

У першому випадку в зоні впливу випромінювання утворюється рідка фаза, яка видаляється за рахунок газодинамічного ефекту, утвореного парами матеріалу. Цей метод продуктивний, але менш точний, ніж метод,

заснований на формуванні отворів за рахунок сублімації. Механізм видалення матеріалу при прошиванні отворів у значній мірі залежить також від тривалості імпульсів.

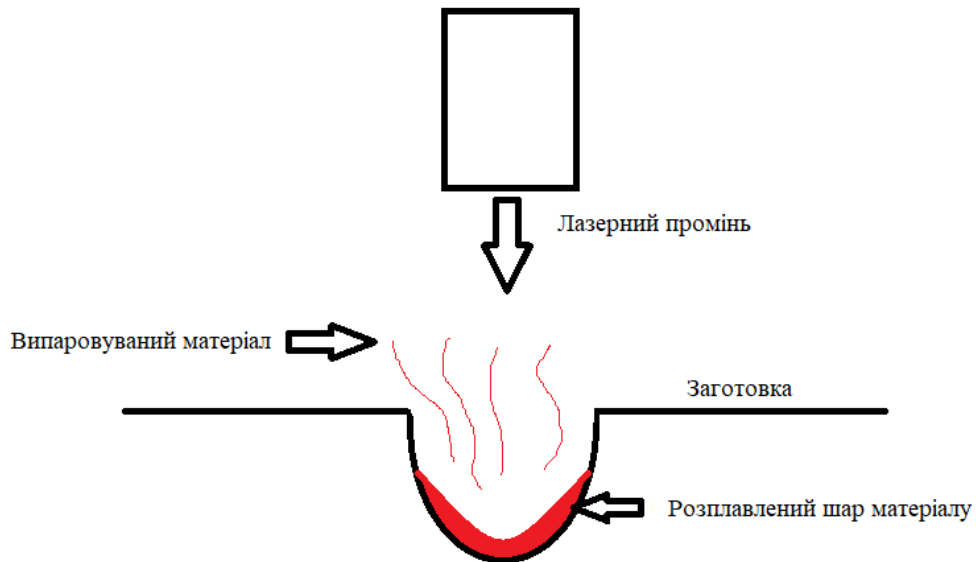


Рисунок 2.2 – Схема лазерного прошивання отвору

Для забезпечення даних процесів необхідно мати щільність потужності $q = 10^6 \dots 10^9$ Вт/см², що створюється оптичною системою у фокальній плямі.

Тривалість імпульсів τ вибирається, виходячи з необхідної якості отвору. Зменшення тривалості імпульсу знижує його енергію. Типові значення тривалості імпульсу, використовуваної для лазерного свердління, знаходяться в діапазоні 0,5...2 мкс, проте є установки, що працюють з тривалістю імпульсів кілька десятків наносекунд. Зменшення тривалості імпульсу іноді дозволяє поліпшити якість отримуваних отворів.

Вибрана частота імпульсів f повинна забезпечувати оптимальний баланс між продуктивністю і якістю обробки. При прошиванні її призначають у межах від 5...20 Гц (Nd: YAG- лазери) до 1000 Гц (CO₂- лазери).

Енергія імпульсу E залежить від діаметра оброблюваного отвору, товщини і виду матеріалу. З її зростанням збільшується продуктивність, але знижуються якісні характеристики отвору.

Розмір фокальної плями d визначає діаметр оброблюваного отвору. При прошиванні тонких матеріалів (до 1 мм) він призначається рівним діаметру отримуваного отвору.

Точність обробки знижується зі збільшенням довжини хвилі лазерного випромінювання λ . Остання впливає і на продуктивність обробки (рис. 2.3).

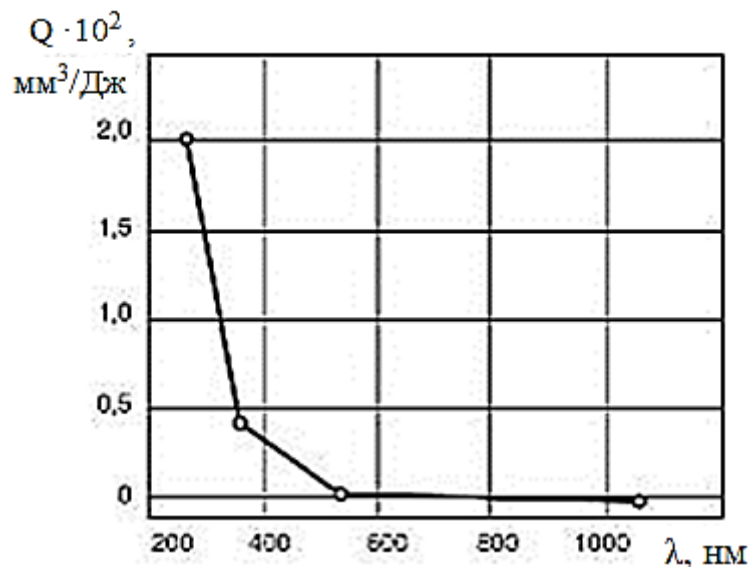


Рисунок 2.3 - Вплив довжини хвилі лазерного випромінювання на об'ємну швидкість видалення матеріалу

Продуктивність як технологічний параметр процесу лазерного прошивання отворів можна трактувати подвійно. З одного боку, його можна розглядати як питому ерозію матеріалу (обсяг матеріалу, що видаляється в одиницю часу). Крім того, під продуктивністю можна розуміти кількість отворів необхідних розмірів та точності, прошитих за одиницю часу.

Об'ємний показник продуктивності Π (хвилинна продуктивність, см³/хв) зазвичай розглядають щодо одного отвору (порожнини):

$$\Pi = \frac{n E f}{L_e}, \quad (2.1)$$

де n – кількість лазерних імпульсів, необхідних для прошивання одиничного отвору; E – енергія випромінювання в імпульсі; f – частота подачі імпульсів; L_e – питома енергія руйнування матеріалу, табл. 2.1.

Наприклад, при обробці твердого сплаву ВК6 лазерними імпульсами ($n = 6$) з енергією $E = 20$ Дж та частотою $f = 10$ Гц хвилинна продуктивність становить 0,45 см³/хв. При прошиванні отворів в алюмінії лазерним

випромінюванням за подібними параметрами розрахункова продуктивність буде вищою – 3,6 см³/хв.

Таблиця 2.1 – Значення питомої енергії руйнування матеріалів

Матеріал	L_e , кДж/см ³	Матеріал	L_e , кДж/см ³
<i>Тверді сплави</i>		<i>Метали</i>	
T30K4	270	Fe	100
TN20	240	Ti	45
BK2	170	Al	20
BK6	160	Nb	80
BK20	140	W	100
<i>Карбіди</i>		Mo	138
TiC	250	Cu	70
WC	150	Zn	39
		Ni	64
		Pb	14
		Cr	16

Показник штучної продуктивності $\Pi_{шт}$ (кількість отворів, про-
шитих за одиницю часу) використовується для оцінки можливостей
обробки серії отворів у деталі. У цьому випадку продуктивність залежить
від частоти подачі імпульсів і кількості імпульсів, необхідних для проши-
вання одного отвору, а також часу відносного переміщення променя або за-
готовки після прошивання чергового отвору.

$$\Pi_{шт} = \frac{N}{nT + t_n}, \quad (2.2)$$

де T – період проходження імпульсів; n – кількість імпульсів, необхідних
для прошивання одиничного отвору; t_n – час переміщення променя або за-
готовки після прошивання чергового отвору; N – кількість променевих ка-
налів у технологічній установці (зазвичай $N = 1$).

При одноімпульсному прошиванні отворів машинний час обробки
визначається тривалістю імпульсу (зазвичай менше 1 мс). Цей час на два
порядки менший за час переміщення заготовки, наприклад, при механічній
інерційній завантажувальній системі ($\approx 0,5 \dots 0,8$ с). Тому першим доданком
у знаменнику можна знехтувати. Тоді продуктивність може досягати 2 отв/с.

При багатоімпульсній обробці на обладнанні з механічним переміщенням заготовки роль першого доданого знаменника зростає, якщо nT є порівняним з $t_{\text{п}}$. Це буде мати місце при невеликій частоті подачі імпульсів та значній їх кількості, необхідній для прошивання одиничного отвору. Так, при $f = 40$ Гц та $n = 20$ продуктивність становить 1 отв/с.

На технологічному обладнанні з безінерційним скануванням випромінювання tn може бути зменшено до сотих і тисячних часток секунди. Тоді визначальну роль при розрахунку штучної продуктивності гратиме доданок nT .

При частоті проходження імпульсів до 100...500 Гц розрахункова продуктивність може становити від кількох десятків кількох сотень отворів на секунду.

Збільшення продуктивності може бути досягнуто використанням кількох світлових каналів у технологічному обладнанні (при $N > 1$).

3. ХІД ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Ознайомитись з принципом реалізації процесу лазерного прошивання отворів (лазерного свердління) та його перевагами порівняно з традиційним свердлінням.

2. Відповідно до формули (2.1) розрахувати об'ємний показник продуктивності Π (хвилинну продуктивність, $\text{см}^3/\text{хв}$). Вихідні дані наведено у таблицях 2.1, 3.1.

3. За формулою (2.2) розрахувати штучну продуктивність $\Pi_{\text{шт}}$, отв/с, прийнявши кількість променевих каналів у технологічній установці $N = 1$; $T = 1/f$. Вихідні дані наведено у таблиці. 3.1.

Таблиця 3.1 – Вихідні дані для розрахунку продуктивності лазерного прошивання отворів

№ варіанта	Оброблюваний матеріал	Енергія випромінювання в імпульсі E , Дж	Тривалість імпульсу τ , мс	Частота проходження імпульсів f , Гц	Кількість імпульсів n	Час переміщення променя або заготовки після прошивання чергового отвору t_n , с
1	2	3	4	5	6	7
1,16	Алюміній	1,5	1,5	10	6	0,45
2,17	Алюміній	2,0	4,5	35	8	0,48
3,18	Вольфрам	1,0	2,0	20	10	0,50
4,19	Залізо	1,5	2,0	1,0	12	0,54
5,20	Залізо	2,0	5,0	35	8	0,56
6,21	Мідь	0,5	1,5	1,5	9	0,59
7,22	Мідь	0,6	2,0	20	6	0,62
8,23	Нікель	6,0	2,5	10	8	0,64
9,24	Нікель	5,0	4,5	30	7	0,66
10,25	Свинець	0,1	2,0	10	3	0,69
11,26	Хром	0,4	1,5	10	4	0,71
12,27	Хром	0,5	5,0	20	5	0,73
13,28	Молибден	0,3	2,0	0,1	9	0,76
14,29	Молибден	0,5	4,0	3	7	0,78
15,30	Титан	4,0	5,0	15	7	0,80

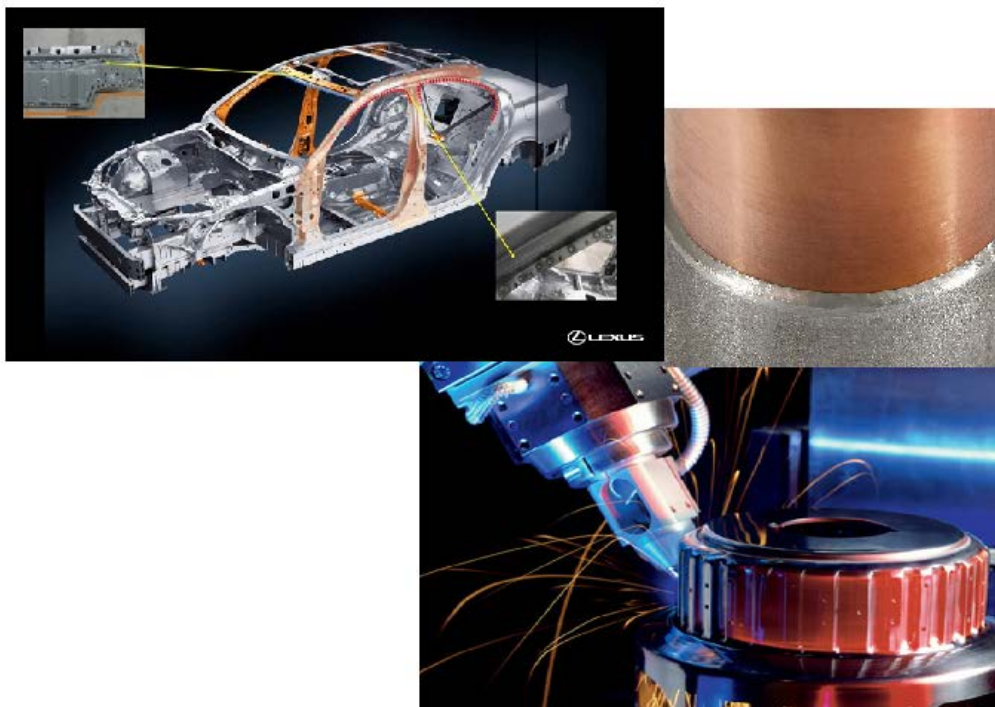
4. ЗМІСТ ЗВІТУ

1. Ціль роботи.
2. Основні значення технологічних параметрів лазерного прошивання отворів.
3. Розрахунок продуктивності лазерного прошивання отворів за індивідуальним варіантом.
4. Висновки.

Питання для самоперевірки

1. У чому полягають основні переваги лазерного прошивання отворів порівняно з механічною обробкою (свердлінням)?

2. Які галузі застосування лазерного прошивання отворів?
3. Яким є механізм видалення матеріалу під час лазерного свердління?
4. Які типи лазерів використовують для лазерного прошивання отворів?
5. За яких значень щільності потужності відбувається лазерне прошивання отворів?
6. Вкажіть основні принципи вибору технологічних параметрів лазерного прошивання отворів.
7. Які з технологічних параметрів мають найбільший вплив на продуктивність процесу?
8. Які основні характеристики продуктивності лазерної прошивки та якими факторами вони визначаються?
9. Що розуміють під об'ємним показником продуктивності?
10. Що розуміють під штучною продуктивністю?



ПРАКТИЧНА РОБОТА
«МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ РЕЖИМУ ЛАЗЕРНОГО
ЗВАРЮВАННЯ»

1. ЦІЛЬ РОБОТИ

- ♦ ознайомитись із сутністю лазерного зварювання;
- ♦ розрахувати основні технологічні показники процесу.

2. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Одним з найбільш важливих напрямків застосування лазерів у машинобудуванні, приладобудуванні, медицині та інших галузях є **лазерне зварювання**.

Основними перевагами лазерного зварювання порівняно з традиційними способами зварювання є такі.

- ♦ При лазерному зварюванні забезпечуються висока точність та продуктивність (швидкість) процесу. Наприклад, швидкість лазерного зварювання безперервним випромінюванням у кілька разів перевищує швидкість традиційних способів зварювання плавленням і може досягати 500 м/год.

- ♦ Лазерним зварюванням можна з'єднувати різні матеріали завтовшки від кількох мікрометрів до десятків міліметрів. Поєднують однорідні та різнорідні метали (Au-Ge, Au-Si, Ni-Ta), у тому числі з великою різницею в температурі плавлення (W-Al, Cu-Ta), метали з неметалами (керамікою, склом), неметалеві матеріали.

- ♦ Лазерний промінь легко керується та регулюється, за допомогою дзеркальних оптичних систем легко транспортується та спрямовується у важкодоступні для інших способів місця.

- ♦ Через високу концентрацію енергії у процесі лазерного зварювання забезпечуються невеликий об'єм зварювальної ванни, незначна ширина зони термічного впливу, високі швидкості нагрівання та охолодження. Це зумовлює високу технологічну міцність зварних з'єднань, невеликі деформації зварних конструкцій.

- ♦ При лазерному зварюванні можна досягти високі значення відношення глибини до ширини проплавленого матеріалу (так званий «кинджальний» або «нитковий» шов).

Лазерне зварювання виконується як твердотільними, так і газовими лазерами; режим випромінювання може бути безперервним та імпульсним.

Для зварювання використовують, як правило, потужні (до 15 кВт в режимі глибокого проплавлення) безперервні CO₂-лазери, твердотільні імпульсні Nd:YAG-лазери, а також волоконні лазери (потужністю 5...20 кВт).

Основними параметрами режиму імпульсного лазерного зварювання є щільність потужності лазерного випромінювання q , тривалість його дії (тривалість імпульсу) τ , діаметр сфокусованого випромінювання d .

За енерговкладом в одиницю об'єму оброблюваного матеріалу лазерне зварювання займає проміжне положення між поверхневою термообробкою та різанням.

На практиці лазерне зварювання металу невеликої товщини (0,5...1,0 мм) ведуть при $q = 10^5 \dots 10^7$ Вт/см². При даних значеннях щільності потужності випромінювання відбувається активне локальне розігрівання матеріалу без помітного випаровування.

Перевищення верхньої межі q (до $10^7 \dots 10^9$ Вт/см²) викликає інтенсивне об'ємне кипіння та випаровування, що приводить до викидів металу та дефектів шва.

При $q < 10^5$ Вт/см² лазерне випромінювання втрачає свою основну перевагу – високу концентрацію енергії.

Варіювання q і τ дозволяє зварювати лазерним променем різні конструкційні матеріали різного діапазону товщин.

Тривалість імпульсів приблизно визначається із співвідношення

$$\tau = \delta^2 / (4a), \quad (2.1)$$

де δ і a – відповідно товщина та коефіцієнт температуропровідності матеріалу, що зварюється.

Значення τ для тонких деталей ($\delta = 0,1 \dots 0,2$ мм) становить кілька мілісекунд. При збільшенні δ більше 1,0 мм тривалість імпульсу зростає і може значно перевищувати досягну тривалість лазерних імпульсів. Тому лазерне зварювання металів товщиною понад 1,0 мм імпульсним випромінюванням є проблематичним.

При зварюванні деталей завтовшки понад 1,0 мм на проплавну здатність променя насамперед впливає потужність випромінювання. Оскільки зварювання таких деталей ведеться при безперервному випромінюванні, то до основних параметрів режиму додається швидкість зварювання. При вибраному значенні потужності випромінювання швидкість зварювання визначають, виходячи з особливостей формування шва:

мінімальне значення швидкості обмежене відсутністю «кинджального» проплавлення, а максимальне – погіршенням якості шва, появою пор, непроварів.

3. ХІД ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Ознайомитися з сутністю лазерного зварювання, його основними перевагами порівняно з традиційними способами.

2. Розрахувати основні технологічні параметри лазерного зварювання.

♦ Використовуючи вихідні дані, табл. 3.1, відповідно до формули (2.1) розрахувати тривалість лазерних імпульсів τ , с.

Таблиця 3.1 – Вихідні дані для розрахунку параметрів лазерного зварювання

№ варіанта	Зварюваний матеріал	Температуро-провідність a , $\text{см}^2/\text{с}$	Глибина проплавлення δ , мм	Енергія імпульсу E , Дж	Діаметр плями фокусування d , мм	Коефіцієнт перекриття світлових імпульсів k_{Π}	Частота подавання імпульсів f , Гц	Довжина зварного шва L , м
1, 16	Вуглецева сталь	0,119	0,25	8	0,40	0,2	20	2,0
2, 17	Корозійно-стійка сталь	0, 056	0,30	10	0,45	0,3	25	3,5
3, 18	Алюміній	0,474	0,45	12	0,55	0,4	30	0,43
4, 19	Вольфрам	0,62	0,80	9	0,67	0,5	35	0,55
5, 20	Вуглецева сталь	0,119	0,47	11	0,60	0,6	40	0,62
6, 21	Мідь	0,95	0,78	10	0,72	0,7	45	1,7
7, 22	Титан	0,08	0,87	11	0,74	0,8	50	2,2
8, 23	Залізо	0,21	0,42	12	0,77	0,9	27	3,8
9, 24	Алюміній	0,474	0,55	13	0,81	0,2	38	4,9
10,25	Мідь	0,95	0,64	14	0,83	0,3	49	5,7
11,26	Нікель	0,24	0,45	7	0,84	0,4	54	6,6
12,27	Корозійно-стійка сталь	0,056	0,33	9	0,92	0,6	23	0,82
13,28	Алюміній	0,474	0,48	10	0,96	0,7	42	3,5
14,29	Нікель	0,24	0,45	11	1,00	0,8	54	4,4
15,30	Титан	0,08	0,26	6	1,10	0,9	68	0,59

♦ Розрахувати щільність потужності лазерного випромінювання q , Вт/см² для реалізації зварювання даних заготовок

$$q = \frac{E}{S\tau}, \quad (3.1)$$

де E – енергія лазерного імпульсу, Дж; S – площа плями фокусування, см².

♦ Розрахувати продуктивність (швидкість) лазерного зварювання V , м/с:

$$V = dk_{\text{п}}f, \quad (3.2)$$

де $k_{\text{п}}$ – коефіцієнт перекриття імпульсів; f – частота проходження імпульсів.

♦ Визначити тривалість технологічного процесу t , год

$$t = L/V. \quad (3.3)$$

♦ Визначити потужність теплового потоку всередині заготовки P , кВт

$$P = qs. \quad (3.4)$$

♦ Визначити енергоємність процесу Q , кВт·год

$$Q = Pt. \quad (3.5)$$

♦ Розрахувати вартість лазерного зварювання партії деталей, грн:

$$C_{\text{дет}} = C_{\text{пит}} Ln, \quad (3.6)$$

де $C_{\text{пит}}$ – вартість виконання зварного шва завдовжки 1 м заданої глибини проплавлення (питома вартість), табл. 3.2; L – довжина зварного шва, м (табл. 3.1); n – кількість деталей у партії, табл. 3.3.

Таблиця 3.2 – Питома вартість лазерного зварювання $C_{\text{пит}}$ (грн/м)

Матеріал	Глибина проплавлення, мм							
	0,1...0,25	0,3...0,45	0,5...0,65	0,7...0,85	0,9...1,05	1,1...1,25	1,3...1,45	1,5...1,65
Вуглецева сталь	0,4	0,55	0,65	0,76	0,85	0,95	3,0	5,5
Корозійно-стійка сталь	1,1	1,7	2,38	2,74	3,27	3,58	4,25	4,73
Нікель	1,15	1,72	2,40	2,81	3,35	3,62	4,57	5,38
Алюміній	1,35	1,85	2,45	3,24	3,89	4,86	5,46	6,53
Мідь	1,45	1,92	2,64	3,38	3,97	4,97	5,68	6,65
Титан	1,57	2,32	3,48	3,94	4,53	5,45	6,67	6,95
Вольфрам	1,71	2,57	4,35	4,78	5,21	5,93	7,25	7,78

Таблиця 3.3 – Кількість деталей в партії

№ варіанта	Кількість деталей
1	2
1,11,21	24
2,12,22	55

Продовження табл. 3.3

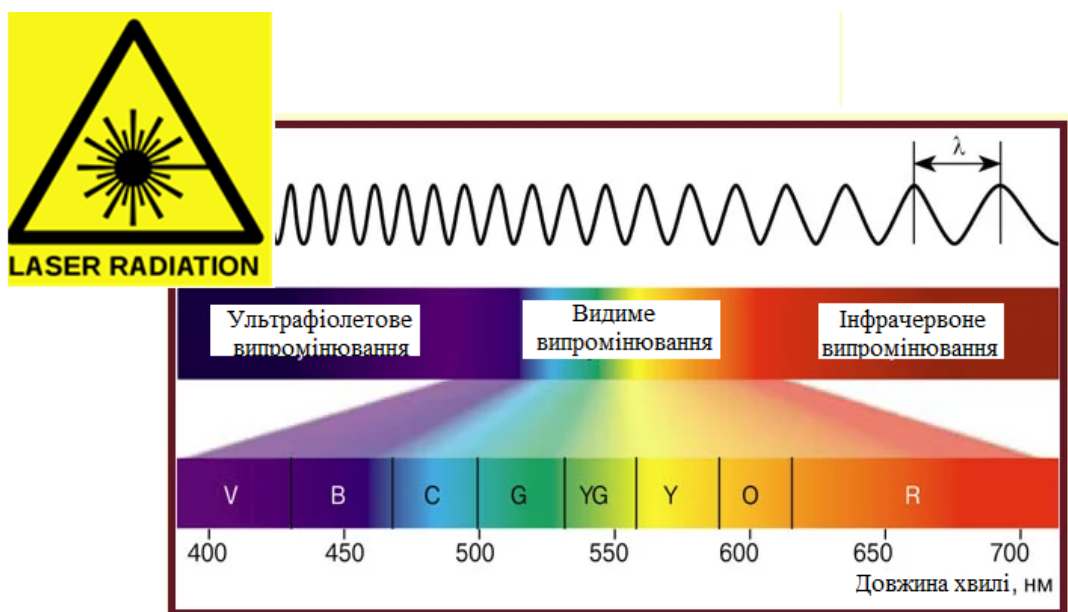
1	2
3,13,23	45
4,14,24	110
5,15,25	32
6,16,26	47
7,17,27	17
8,18,28	8
9,19,29	13
10,20,30	32

4. ЗМІСТ ЗВІТУ

1. Ціль роботи.
2. Розрахунок основних параметрів режиму лазерного зварювання.
3. Висновки.

Питання для самоперевірки

1. Опишіть сутність та основні переваги лазерного зварювання.
2. Які типи лазерів застосовують для зварювання?
3. Які основні технологічні параметри процесу лазерного зварювання?
Якими факторами вони визначаються?
4. Який діапазон густин потужності при лазерному зварюванні? Якими факторами він обмежений?
5. Якими факторами обмежується оптимальний вибір тривалості імпульсів лазерного зварювання τ ?
6. Які особливості зварювання металів товщиною понад 1,0 мм?



ПРАКТИЧНА РОБОТА
«КРИТЕРІЇ БЕЗПЕКИ ЛАЗЕРНОЇ ТЕХНІКИ »

1. ЦІЛЬ РОБОТИ

- ♦ ознайомитись з джерелами потенційної небезпеки промислових лазерів у процесі їх експлуатації та правилами техніки безпеки під час роботи з лазерними пристроями і можливими засобами захисту;
- ♦ користуючись нормативними документами та технологічними даними щодо параметрів робочого процесу лазерної обробки, визначити тип захисного засобу.

2. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

2.1. Джерела небезпеки лазерного випромінювання

Основною небезпекою лазерного випромінювання є *вплив на очі людини*. У діапазоні хвиль від 0,4 до 1,4 мкм очі є прозорими для випромінювання, рис. 2.1, отже лазерне випромінювання фокусується на сітківці. При цьому утворюється фокальна пляма діаметром ~ 10 мкм, щільність потужності збільшується приблизно в 500000 разів (діаметр зіниці ~ 7 мм, збільшення щільності потужності становить $(7 \cdot 10^3 / 10)^2$).

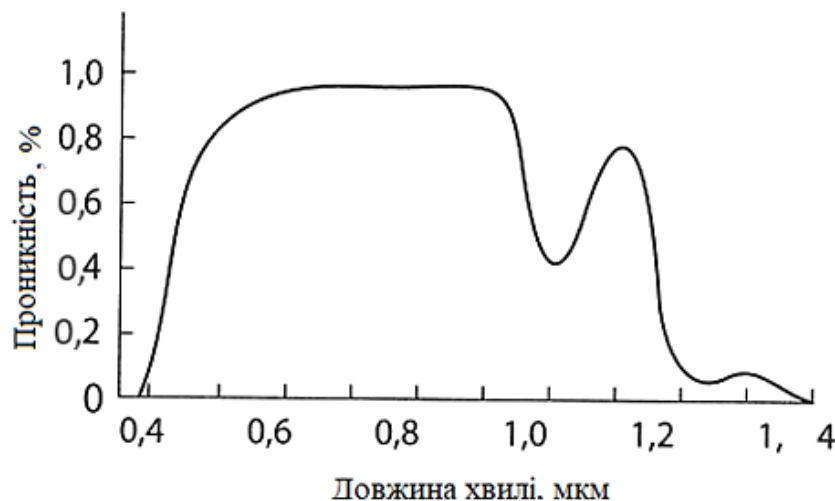


Рисунок 2.1 – Проникність людського ока до сітківки залежно від довжини хвилі. Видима область спектра становить від 0,4 до 0,7 мкм

Отже, в діапазоні від 0,4 до 1,4 мкм лазерне випромінювання вкрай небезпечне, навіть невеликі потужності ~ 1 мВт за несприятливих умов можуть призвести до пошкодження сітківки.

Особливу обережність слід виявляти у разі невидимого світла. В інфрачервоних областях (понад 1,4 мкм) випромінювання активно поглинається тканинною рідиною, тому промені проникають у верхні шари рогівки. Граничні значення у разі вищі, оскільки відбувається фокусування через кришталік. В ультрафіолетових областях спектра має місце сильне поглинання у рогівці. Граничні значення в даному випадку досить низькі, проте заподіяна шкода носить акумулятивний характер, навіть незначне опромінення протягом тривалого часу може спричинити тяжке захворювання.

2.2. Граничні показники безпеки лазерних пристроїв відповідно до міжнародних норм

Щодо експлуатації лазерів діють європейські норми «Безпека лазерних пристроїв DIN EN 60 825-1». Одночасно Спільною промисловців і підприємців розроблено власні правила техніки безпеки «Лазерне випромінювання BVG B2(VBG 93)».

Відповідно до встановлених норм існують граничні показники безпеки лазерів для очей.

Максимально допустима величина опромінення залежить від довжини хвилі та тривалості опромінення. Значення максимально допустимої величини опромінення при дії одиночних імпульсів наведено у табл. 2.1 та на рис. 2.2.

Таблиця 2.1 – Значення максимально допустимої величини опромінення рогівки ока за нормами BVG B2 (VBG 93)

Діапазон довжини хвилі, нм	Тривалість імпульсів, с	Щільність потужності, Вт/м ²	Тривалість імпульсів, с	Щільність потужності, Вт/м ²	Тривалість імпульсів, с	Щільність потужності, Вт/м ²
180...315	≥ 30000	0,001	< 10 ⁻⁹	3·10 ¹⁰	10 ⁻⁹ ... 3·10 ⁻⁴	10 ⁹ ...10 ⁵
315...1400	>5·10 ⁻⁴ ... 10	10	< 10 ⁻⁹	5·10 ⁶	10 ⁻⁹ ... 5·10 ⁻⁴	10 ⁶ ...10 ⁴
1400...10 ⁶	>0,1 ... 10	1000	< 10 ⁻⁹	10 ¹¹	10 ⁻⁹ ... 0,1	10 ¹² ...10 ⁸

При визначенні щільності потужності та щільності енергії середні значення мають бути отримані на основі площі кола з наступними діаметрами: $D = 1$ мм ($\lambda = 180...315$ нм); $D = 7$ мм ($\lambda = 315...1400$ нм); $D = 10$ мм

($\lambda = 1400 \dots 10^4$ нм).

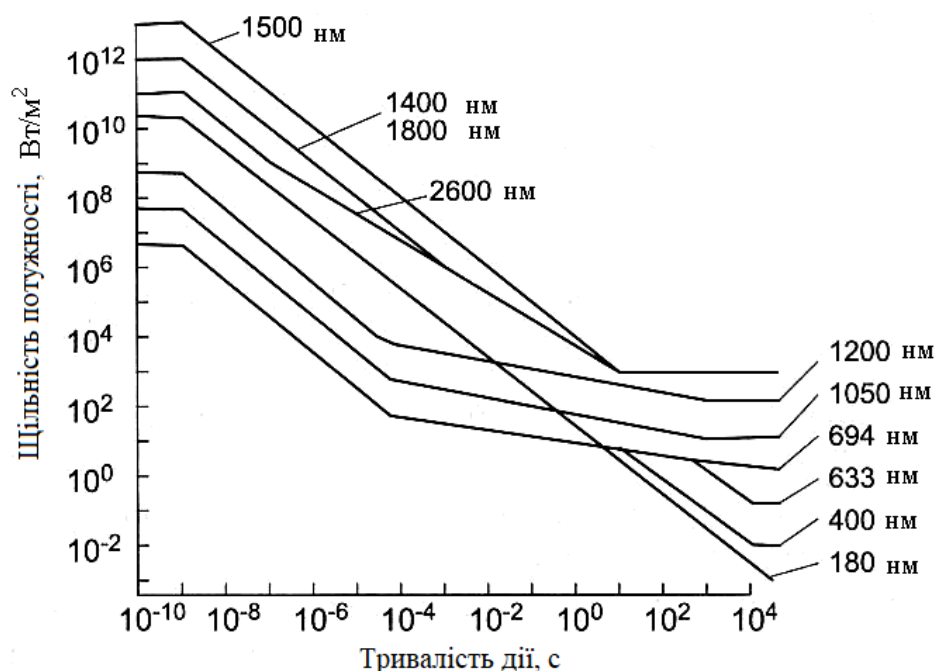


Рисунок 2.2 – Максимально допустиме опромінення рогівки ока при деякій довжині вибірових хвиль DIN EN 60 825-1

2.3. Класи лазерів та потенціал небезпеки

Залежно від потенційної небезпеки лазери ділять на класи 1, 1М, 2, 2М (символ «М» – від англ. *magnification* – посилення), 3R (символ «R» – від англ. *relaxation* – ослаблення), 3В та 4, табл. 2.2. Віднесення лазера до того чи іншого класу визначається не лише довжиною хвилі, а й часом, протягом якого здійснюється випромінювання.

Таблиця 2.2 - Класи лазерів та їх потенційна небезпека

Клас	Небезпека
1	2
1	Доступне лазерне випромінювання небезпеки не становить
1М	Лазерне випромінювання не є небезпечним, поки не використовуються оптичні інструменти (світлодіоди, системи з колімованими променями великого поперечного перерізу)
2	Цей клас визначено лише у видимій області діапазону. Лазери даного класу при опроміненні до 0,25 с (рефлекторне змикання повік) не є небезпечними. Гранична потужність 1 мВт
2М	Цей клас визначено лише у видимій області діапазону. Лазери даного класу при опроміненні до 0,25 с (рефлекторне змикання повік) не є небезпечними, якщо не використовуються оптичні інструменти

Продовження табл. 2.2

1	2
3R	У видимій області спектра вихідні значення (при опроміненні до 0,25 с) у 5 разів вищі, ніж у лазера класу 2 (5 мВт). У видимій області вихідні значення при опроміненні часу до 100 с у 5 разів вищі, ніж у лазера класу 1
3B	Доступне лазерне випромінювання є небезпечним для очей, а в особливих випадках і для шкіри. Верхня межа потужності складає 0,5 Вт
4	Лазерне випромінювання небезпечне для очей та шкіри. Небезпеку може становити і дифузне розсіяне випромінювання. Випромінювання лазерів даного класу здатне викликати пожежі та вибухи

2.4. Засоби захисту та основні правила техніки безпеки

Простір, у якому перевищуються максимально допустимі величини опромінення, називають «зоною лазерного випромінювання». Над входом у небезпечне з цього погляду приміщення мають бути встановлені таблички з відповідним попередженням або сигнальні лампи.

При лазерах класу 3B та 4 додатково передбачається огорожа.

До індивідуальних засобів захисту відносять спеціальні окуляри, які повинні носити всі особи, які наражаються на потенційну небезпеку з боку лазерного випромінювання.

Лазерні захисні окуляри повинні відповідати нормам DIN EN 207. Їх класифікують залежно від ступеня захисту L1... L10; цифра вказує оптичну густину.

Зв'язок між ступенем захисту та характеристиками лазерів наведено в табл. 2.3.

На лазерних захисних окулярах обов'язково має бути зазначений ступінь захисту, довжина хвилі та режим генерації лазера.

Додатково до норм EN 208 передбачені спеціальні окуляри для юстування лазерів.

Правила техніки безпеки під час роботи на лазерних установках визначено відповідно до документа «Лазерне випромінювання BVG B2(VBG 93)».

Таблиця 2.3 – Визначення ступеня захисту лазерних окулярів залежно від показників лазерів

Ступінь захи-сту	Максимальний коефіцієнт спек-трального пропус-кання	Максимальна густина потужності у діапазоні довжин хвиль					
		180...315 нм		315...1400 нм		1400...10000 нм	
		Режим роботи лазера					
		Безпе-рерв-ний	Ім-пульс-ний	Безпе-рерв-ний	Ім-пульс-ний	Безпе-рерв-ний	Ім-пульс-ний
		q , Вт/м ²	q , Вт/м ²	q , Вт/м ²	q , Вт/м ²	q , Вт/м ²	q , Вт/м ²
L1	10 ⁻¹	10 ²	0,01	10 ²	0,05	10 ⁴	10 ³
L2	10 ⁻²	10 ³	0,1	10 ³	0,5	10 ⁵	10 ⁴
L3	10 ⁻³	10 ⁴	1	10 ⁴	5	10 ⁶	10 ⁵
L4	10 ⁻⁴	10 ⁵	10	10 ⁵	50	10 ⁷	10 ⁶
L5	10 ⁻⁵	10 ⁶	10 ²	10 ⁶	5·10 ²	10 ⁸	10 ⁷
L6	10 ⁻⁶	10 ⁷	10 ³	10 ⁷	5·10 ³	10 ⁹	10 ⁸
L7	10 ⁻⁷	10 ⁸	10 ⁴	10 ⁸	5·10 ⁴	10 ¹⁰	10 ⁹
L8	10 ⁻⁸	10 ⁹	10 ⁵	10 ⁹	5·10 ⁵	10 ¹¹	10 ¹⁰
L9	10 ⁻⁹	10 ¹⁰	10 ⁶	10 ¹⁰	5·10 ⁶	10 ¹²	10 ¹¹
L10	10 ⁻¹⁰	10 ¹¹	10 ⁷	10 ¹¹	5·10 ⁷	10 ¹³	10 ¹²

3. ХІД ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Ознайомитись із джерелами небезпеки лазерного випромінювання для людини та необхідними заходами захисту.
2. Розглянути граничні показники безпеки лазерних пристроїв відповідно до міжнародних норм.
3. За табл. 3.1, 3.2 вибрати заданий тип лазера та його основні характеристики.
4. З урахуванням п. 2.2 розрахувати щільність потужності q даного типу лазера.
5. За табл. 2.3 вибрати рекомендований захисний засіб (лазерні захисні окуляри).
6. Визначити значення щільності пропускнуої потужності даним захисним засобом.
7. Зіставити отримані дані з максимально допустимими величинами за нормами BVG B2 (VBG 93).

Таблиця 3.1 - Вихідні дані для вибору лазерних захисних окулярів

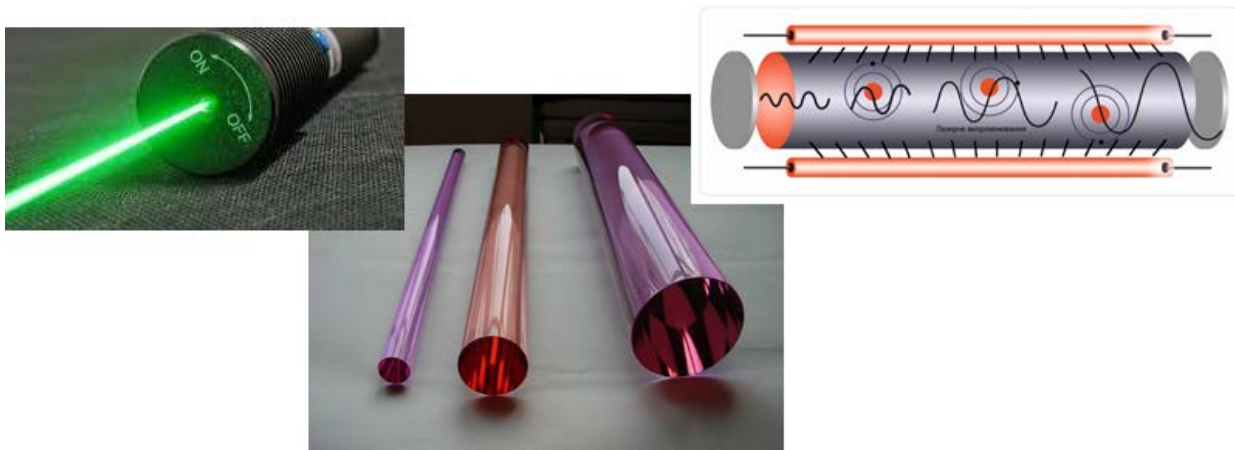
№ варіанта	Тип активної речовини лазера	Режим роботи	Середня потужність P , Вт
1,16	Cr:Al ₂ O ₃	Імпульсний	6,8
2,17	Ti:Al ₂ O ₃	Імпульсний	92
3,18	Ti:Al ₂ O ₃	Безперервний	92
4,19	Nd-YAG	Безперервний	33
5,20	Лазер на склі з Nd	Безперервний	10
6,21	CO ₂	Безперервний	12
7,22	CO ₂	Імпульсний	12
8,23	He-Ne	Безперервний	0,05
9,24	He-Cd	Безперервний	0,008
10,25	Cu	Безперервний	36
11,26	Au	Імпульсний	6,5
12,27	InGaAsP	Безперервний	0,01
13,28	GaAlAs	Безперервний	1,0
14,29	Лазер на ексимері F ₂	Безперервний	7,4
15,30	Лазер на ексимері XeCl	Безперервний	28,5

1. ЗМІСТ ЗВІТУ

1. Ціль роботи.
2. Граничні показники безпеки промислових лазерів.
3. Класи лазерів залежно від потенційної небезпеки.
4. Вибір особистого засобу захисту з урахуванням вихідних даних.

Питання для самоперевірки

1. Назвіть основні наслідки впливу лазерного випромінювання на людину.
2. Які види шкідливого впливу лазерного випромінювання можливі під час використання лазерів різного типу (різної довжини хвилі)?
3. Яким є вплив лазерного випромінювання на очі людини?
4. Якими міжнародними документами регламентують безпеку лазерних пристроїв?
5. Якими є граничні показники безпеки лазерів?
6. Які класи лазерів розрізняють залежно від потенціалу небезпеки?
7. Які засоби захисту передбачені під час роботи на лазерних установках?
8. За яких параметрів лазера вибирають захисні лазерні окуляри?
9. Який основний параметр лазерних захисних окулярів, що визначає їх ступінь захисту?



ЛАБОРАТОРНА РОБОТА
«МАТЕРІАЛИ АКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТВЕРДОТІЛЬНИХ
ЛАЗЕРІВ ТА МЕТОДИ ЇХ ВИГОТОВЛЕННЯ»

1. ЦІЛЬ РОБОТИ

- ♦ ознайомитися з матеріалами, використовуваними для виготовлення активних елементів твердотільних лазерів, та основними вимогами до них;
- ♦ визначити технології виготовлення активних елементів твердотільних лазерів;
- ♦ розрахувати основні технологічні параметри процесу вирощування кристалів активних елементів лазера методом Чохральського.

2. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

2.1. Основні типи активних середовищ лазерів

Основним елементом лазера є *активне середовище* (активний елемент). Як активні середовища лазерів використовують тверді тіла, рідини, гази, плазмовий стан. Лазерна генерація отримана на більш ніж 450 різних переходах атомів 34-х хімічних елементів.

Компоненти активного середовища підбирають так, щоб енергетичні рівні атомів утворювали квантову систему, в якій є хоча б один метастабільний рівень, що забезпечує інверсне заселення.

Лазери, які застосовують у різних галузях науки і техніки, можуть бути класифіковані за принципом агрегатного стану активної речовини на наступні групи:

- твердотільні;
- рідинні;
- газові;
- лазери на вільних електронах.

У лазерах на *твердих тілах* активними середовищами є кристалічні або аморфні речовини.

За принципом дії до твердотільних лазерів близькі *рідинні лазери*, в яких як активне середовище використовуються рідкі діелектрики з розчиненими домішками (розчини неорганічних сполук рідкісноземельних елементів та органічних барвників).

Енергія імпульсу випромінювання твердотільних та рідинних лазерів змінюється від десятих часток джоуля до 10^3 Дж і вище. Потужність

випромінювання імпульсних лазерів залежно від режиму роботи може змінюватися від сотень кіловат до кількох гігават.

Граничне значення ККД лазерів визначається переважно внутрішніми втратами в кристалі активного середовища та ефективністю використання енергії накачування. Так, для лазерів на рубіні величина реального ККД не перевищує 1 %, а лазерів на склі з неодимом – 2 %.

Активним середовищем *газових лазерів* є газ, суміш кількох газів або суміш газу з парами металу. До газових відносять і хімічні лазери, тому що в них застосовуються газоподібні активні середовища. У хімічному лазері збудження активного середовища забезпечується швидкопротікаючими хімічними реакціями.

Як активні частинки у газових лазерах використовують нейтральні атоми, іони і молекули газів.

Лазери на нейтральних атомах дозволяють генерувати випромінювання з довжиною хвилі переважно в інфрачервоній частині спектру, деякі – у червоній ділянці видимого спектру. Іонні газові лазери здійснюють переважно видиме та ультрафіолетове випромінювання. Молекулярні газові лазери генерують випромінювання з довжиною хвилі в інфрачервоному та субміліметровому діапазонах.

Потужність лазерів на нейтральних атомах не перевищує 50 мВт, іонних досягає 500 Вт, молекулярні лазери є найбільш потужними. Так, лазери на вуглекислому газі в безперервному режимі мають вихідну потужність до кількох десятків кіловат.

ККД лазерів на нейтральних атомах та іонах практично не перевищує 0,1 %, молекулярні мають значно більший ККД, що досягає 20 %.

Найбільш перспективними для використання в багатьох технологічних процесах є *волоконні лазери* з використанням активних елементів на основі волоконної оптики (активне середовище являє собою скляну або полімерну нитку діаметром від нанометрів до 1000 мкм з оптично прозорого матеріалу). Середня вихідна потужність подібних лазерів становить від 2 до 50 кВт, ККД – до 50 %. Технічні характеристики волоконних лазерів дозволяють реалізувати режим дистанційної обробки, що істотно спрощує вбудовування лазерного обладнання в сучасні роботизовані виробничі лінії.

2.2. Матеріали активного середовища твердотільних лазерів та основні вимоги до них

З усіх типів лазерів найбільш поширені *твердотільні лазери* (ТЛ).

У лазерах на твердих тілах активними середовищами є кристалічні чи аморфні речовини (скло) у вигляді циліндричних або призматичних стрижнів, рис. 2.1 (діаметром 3...10 мм, довжиною 50...200 мм), леговані оптично активними речовинами – перехідними металами (Cr, Ni, Co) або рідкісноземельними елементами (Nd, Er, Ho).



Рисунок 2.1 – Активний елемент твердотільних лазерів

Робоча речовина для ТЛ (кристал або скло) повинна мати сприятливі оптичні, механічні та термічні властивості, у тому числі оптичну однорідність для виключення втрат світла через розсіювання, високу теплопровідність, стійкість по відношенню до різних фізико-хімічних факторів (наприклад, перепадів температури та вологості) з метою збереження стабільності структури та властивостей.

Крім перерахованих властивостей, тверді лазерні матеріали повинні мати високу міцність і витримувати без руйнування механічну обробку (різання, шліфування, полірування), необхідну для виготовлення з них активних елементів.

Виходячи з зазначених вимог, для виготовлення кристалів використовують оксиди та фториди, для скла – фосфати та силікати.

Із оксидів можуть бути використані штучний рубін (сапфір), гранати та алюмінати.

У перших реалізованих лазерних системах активною речовиною був рубін – оксид Al_2O_3 , легований іонами хрому (Cr^{3+}). З гранатів найбільш відомі: $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (АІГ, YAG – алюмо-ітрієвий гранат), $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ (ГГГ, GGG – гадоліній-галієвий гранат) і $\text{Gd}_3\text{Sc}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$ (ГСГГ, GS GG – гадоліній-скандій-галієвий гранат). Із алюмінатів використовується YAlO_3 , легований Nd, Er, Mo або Tm. Із фторидів – CaF_2 , YLiF_4 , леговані різними іонами – Nd, Ho, Er.

Для легування зазвичай використовують перехідні метали (хром Cr, нікель Ni, кобальт Co) або рідкісні землі (неодим Nd, ербій Er, гольмій Ho). При легуванні частина атомів основної речовини (від 10^{-4} до 10^{-1}) замінюється домішковими атомами (іонами). Концентрація домішкових атомів – від 0,05 до кількох відсотків (за масою).

Діапазон роботи сучасних твердотільних лазерів включає ультрафіолетову, видиму та найближчу інфрачервону область спектру.

Зазначені активні середовища дозволяють порівняно з іншими матеріалами створювати лазери з великою вихідною енергією та високим ККД. Розглянуті лазерні матеріали мають високу концентрацію активних частинок, дуже невелику ширину лінії генерації і незначну кутову розбіжність випромінювання.

До недоліків слід віднести низький (1...5%) коефіцієнт перетворення електричної енергії в енергію лазерного випромінювання в системі лампа накачування-кристал, складність виготовлення лазерних стрижнів великих розмірів та необхідної оптичної однорідності.

Хімічний склад, фізико-хімічні властивості та довжина хвилі випромінювання лазерних (твердотільних) матеріалів на основі кристалів з домішками представлені у табл. 2.1.

У склі як матеріалі активного елемента лазера досягається висока концентрація активних частинок. Іншою перевагою скла є можливість виготовлення активних елементів великих розмірів (до 1,8 м завдовжки і до 70 мм діаметром) практично будь-якої форми з високою оптичною однорідністю з дешевої сировини.

До недоліків скла як лазерного матеріалу слід віднести відносно широку смугу генерації (3...10 нм) і низьку теплопровідність, що перешкоджає швидкому відведенню тепла при потужному оптичному накачуванні.

Таблиця 2.1 – Склад та властивості кристалічних матеріалів для створення активних елементів твердотільних лазерів

Кристал	Активні домішки		Густина, кг/м ³	Показник заломлення	Температура плавлення, К	Твердість (за мінералогічною шкалою)	Довжина хвилі генерації, мкм
	Речовина	Вміст, % (за масою)					
Al ₂ O ₃	Cr ³⁺	0,03...0,7	3980	1,764	2303	9	0,6943 R ₁ -линія 0,6929 R ₂ -линія
Y ₃ Al ₅ O ₁₂	Nd ³⁺	0,5...2,5	4560	1,835	2203	8,5	1,0641 при 300 К
CaWO ₄	Nd ³⁺	0,5...3	6066	1,926	1843	4,5...5	1,058 при 300 К
CaF ₂	Dy ²⁺	0,02...0,06	3180	1,434	1639	4	2,36 при 77 К
LaF ₃	Nd ³⁺	0,5...2	-	-	1766		1,0633 при 295 К 1,0631 при 77 К 1,0399 при 77 К

2.3. Методи виготовлення активних елементів твердотільних лазерів

Лазерні кристали з дозованими домішками вирощуються зазвичай спрямованою кристалізацією розплаву в спеціальних (кристалізаційних) апаратах, що забезпечують високу стабільність температури розплаву та швидкість зростання кристала. Вміст сторонніх домішок у вихідних речовинах для вирощування кристалів не повинен перевищувати 0,01 % за масою, а інколи навіть 0,0001 %.

Методи вирощування активних елементів засновані на реалізації однієї з двох наступних умов: 1) створення умов для зростання одиничного кристала та підтримання повільної швидкості його зростання; 2) наявності монокристалічної затравки (кристалу, на якому починається зростання заготовки), що знімає необхідність переохолодження для утворення критичного зародка і дозволяє регулювати структуру кристала.

Існує велика різноманітність методів вирощування лазерних кристалів, найбільш досконалим та широко застосовуваним у промисловості є **метод Чохральського**.

Сутність цього методу, рис. 2.2, 2.3, у тому, що вихідний матеріал кристала спочатку розплавляється в спеціальному тугоплавкому тиглі.

Наступна кристалізація здійснюється шляхом виведення частини розплаву з тигля за допомогою затравки (тонкого стрижня діаметром кілька міліметрів). Після часткового оплавлення торця затравки її разом з кристалом, що росте на ній, витягують з розплаву. Температура затравки дещо нижча за температуру розплаву, тому при витягуванні розплав поступово кристалізується на її поверхні. В результаті тепловідведення через затравку на ній починається орієнтована кристалізація.

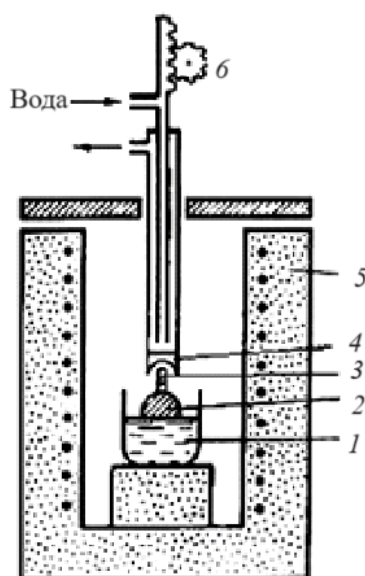


Рисунок 2.2 – Схема апарату для вирощування лазерних кристалів методом Чохральського:

1 – тигель із розплавом; 2 – кристал; 3 – затравка; 4 – холодильник; 5 – нагрівач; 6 – механізм витягування

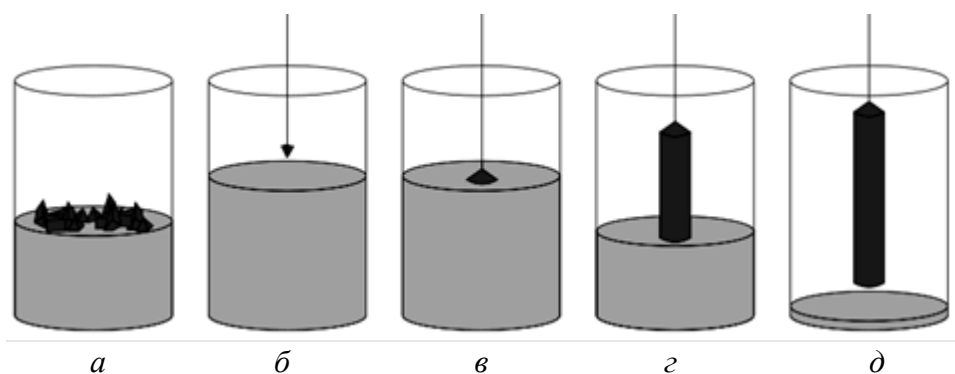


Рисунок 2.3 – Основні стадії методу Чохральського:

а – плавлення основного матеріалу, введення домішок;
 б – введення затравочного кристала; в – початок кристалізаційного зростання;
 г – вилучення кристала з розплаву; д – сформований кристал

Діаметр зростаючого кристала регулюється шляхом підбору швидкості вилучення та температури розплаву.

Одним із суттєвих недоліків технології є низька швидкість росту кристалів (0,5 мм/год). Для вирощування кристала середніх розмірів (довжина близько 150 мм) потрібно до 300 годин безперервної роботи ростової установки.

У процесі зростання в центральній частині кристалів виникають механічні напруження, що призводять до оптичних спотворень. Тому активні елементи у формі циліндричних стрижнів різних розмірів (діаметром до 40 мм, довжиною до 200 мм) для лазерів вирізають на високоточних металорізальних верстатах за допомогою алмазних інструментів з периферійних областей кристала. Торці стрижнів шліфують, а потім полірують. У більшості випадків стрижні виготовляють із плоскими торцями, паралельними один одному (з точністю 3...5") і строго перпендикулярними геометричній осі стрижня. Можливе застосування торців сферичної або іншої (нестандартної) конфігурації.

Для створення лазерних кристалів можливе застосування також інших методів, наприклад, *метод Вернейля*, який полягає в тому, що вихідна шихта (наприклад, порошок окису алюмінію та окису хрому при вирощуванні рубінових кристалів) з бункера за допомогою дозатора потрапляє у водневоексигенне полум'я пальника, де розплавляється і далі стікає на стрижень-кристалоносій, формуючи кулю. Стрижень опускається зі швидкістю, що відповідає швидкості зростання кристала. Метод має ряд переваг порівняно з методом Чохральського: він є безтигельним (тобто запобігає процесам фізико-хімічної взаємодії розплаву з контейнером); у методі практично знято проблему появи залишкових напружень у кристалах; можливе збільшення розмірів кристалів та швидкості їх зростання (до 20 мм/год). До суттєвих недоліків методу відноситься зниження якості кристалів порівняно з методом Чохральського.

На рис. 2.4 наведено лазерні кристали, вирощені різними методами, та отримані з них у результаті механічної обробки активні елементи.



Рисунок 2.4 – Лазерні кристали та виготовлені з них активні елементи

3. ОБЛАДНАННЯ ТА ЗАГОТОВКИ

Активні елементи лазера на основі гранату та рубіну; штангенциркуль; профілометр-профілограф *Surtronic 3+*; оптичний USB-мікроскоп *Supereyes B008*.

4. ХІД ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Ознайомитись з основними матеріалами, які застосовуються для виготовлення активних елементів твердотільних лазерів.

2. Ознайомитись із принципом роботи та технологічними параметрами установок для вирощування лазерних кристалів методом Чохральського (на базі обладнання лазерних кристалів Інституту монокристалів НАН України).

3. За допомогою штангенциркуля виміряти геометричні параметри вирощених та оброблених різанням монокристалічних стрижнів активних елементів.

4. За допомогою профілометра-профілографа *Surtronic 3+* (*Taylor-Hobson*) визначити шорсткість поверхні торцевих поверхонь стрижнів активних елементів.

5. Здійснити розрахунок деяких параметрів вирощування кристалів для активних елементів лазера за методом Чохральського:

♦ Розрахувати швидкість зростання кристала V , м/с:

$$V = 10^{-6} \frac{Tk}{\rho\lambda D}, \quad (3.1)$$

де T – температура розплаву, К; k – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К); ρ – щільність матеріалу, кг/м³; λ – питома теплота плавлення, Дж/кг; D – діаметр кристала, м. Вихідні дані для розрахунку наведено у табл. 3.1, а також у табл. 2.1.

♦ Розрахувати час t , год, необхідний для вирощування кристала заданої довжини.

Таблиця 3.1 – Вихідні дані для розрахунку параметрів вирощування кристалів для активних елементів лазера за методом Чохральського

№ варіанта	Матеріал активного елемента	Питома теплота плавлення λ , кДж/кг	Коефіцієнт теплопровідності k , Вт/(м·К)	Діаметр активного елемента D , мм	Довжина активного елемента L , мм
1,16	Cr:Al ₂ O ₃	390	38,5	2,5	130
2,17	Nd:Y ₃ Al ₅ O ₁₂	280	25,5	2,8	144
3,18	Cr:Al ₂ O ₃	390	38,5	4,2	156
4,19	Nd:Y ₃ Al ₅ O ₁₂	280	25,5	4,5	148
5,20	Cr:Al ₂ O ₃	390	38,5	2,7	189
6,21	Nd:Y ₃ Al ₅ O ₁₂	280	25,5	3,9	100
7,22	Cr:Al ₂ O ₃	390	38,5	4,3	114
8,23	Nd:Y ₃ Al ₅ O ₁₂	280	25,5	5,6	127
9,24	Cr:Al ₂ O ₃	390	38,5	7,5	164
10,25	Nd:Y ₃ Al ₅ O ₁₂	280	25,5	5,9	158
11,26	Cr:Al ₂ O ₃	390	38,5	8,2	170
12,27	Nd:Y ₃ Al ₅ O ₁₂	280	25,5	10,0	228
13,28	Cr:Al ₂ O ₃	390	38,5	1,7	125
14,29	Nd:Y ₃ Al ₅ O ₁₂	280	25,5	2,4	154
15,30	Cr:Al ₂ O ₃	390	38,5	3,5	168

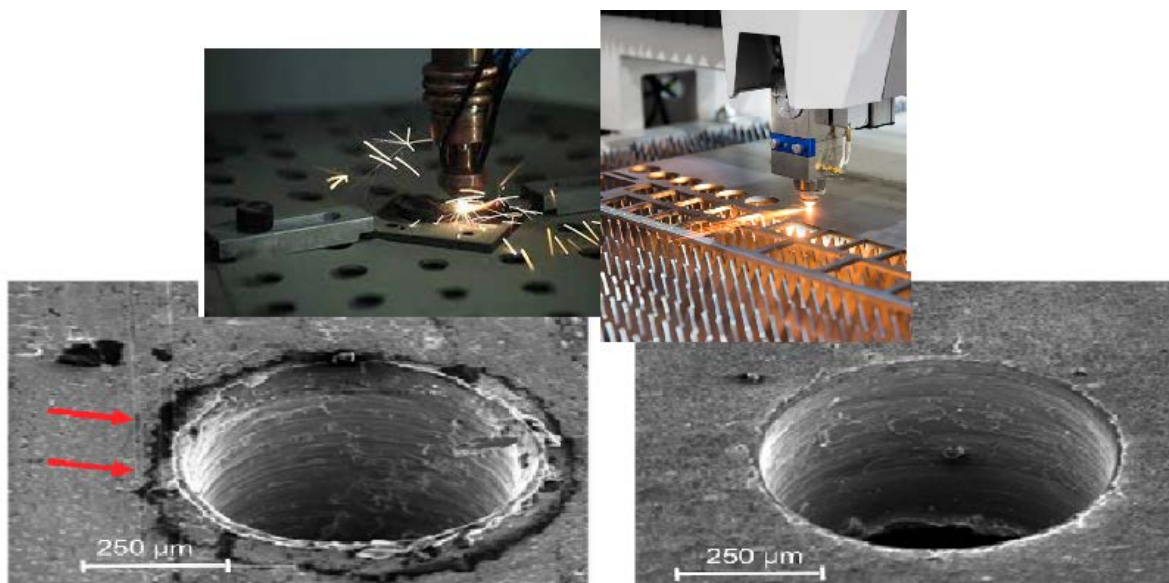
4. ЗМІСТ ЗВІТУ

1. Ціль роботи.
2. Основні вимоги до матеріалів активних елементів твердотільних лазерів та технології їх виготовлення.

3. Сутність методу Чохральського та його схема.
4. Розрахунок основних параметрів вирощування кристалів активних елементів лазера.

Питання для самоперевірки

1. Які вимоги пред'являються до активного середовища лазерів?
2. Які речовини використовують для виробництва активного елемента твердотільних лазерів?
3. Які елементи використовують для легування активного середовища твердотільних лазерів, як здійснюється їх вибір?
4. Вкажіть найпоширеніші кристалічні матеріали активних елементів твердотільних лазерів та довжину хвилі генерованого випромінювання.
5. Які геометричні параметри мають кристалічні активні елементи у твердотільних лазерах?
6. Назвіть основні методи виготовлення кристалічних активних елементів лазерів.
7. У чому сутність методу Чохральського? Для вирощування яких лазерних кристалів він застосовується?
8. Які особливості способу Вернейля?
9. Які параметри впливають на швидкість вирощування активних кристалічних елементів за методом Чохральського? Яким є час цього процесу?
10. Яку роль відіграє механічна обробка у створенні активних елементів лазерів?



ЛАБОРАТОРНА РОБОТА
«ВИЗНАЧЕННЯ ТОЧНОСТІ ТА ЯКОСТІ ОТВОРІВ, ОТРИМАНИХ
ЛАЗЕРНОЮ ТЕХНОЛОГІЄЮ»

1. ЦІЛЬ РОБОТИ

- ◆ ознайомитись з обладнанням, що застосовується для лазерного прошивання отворів, технічними характеристиками установки «Квант-12»;
- ◆ розрахувати розмірні характеристики отворів, отриманих за допомогою установки «Квант-12»;
- ◆ ознайомитись з методикою визначення точності та якості отворів, отриманих лазерною технологією.

2. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

2.1. Розмірні характеристики отворів

Найбільш важливими розмірними характеристиками отворів є глибина h і діаметр d , рис. 2.1.

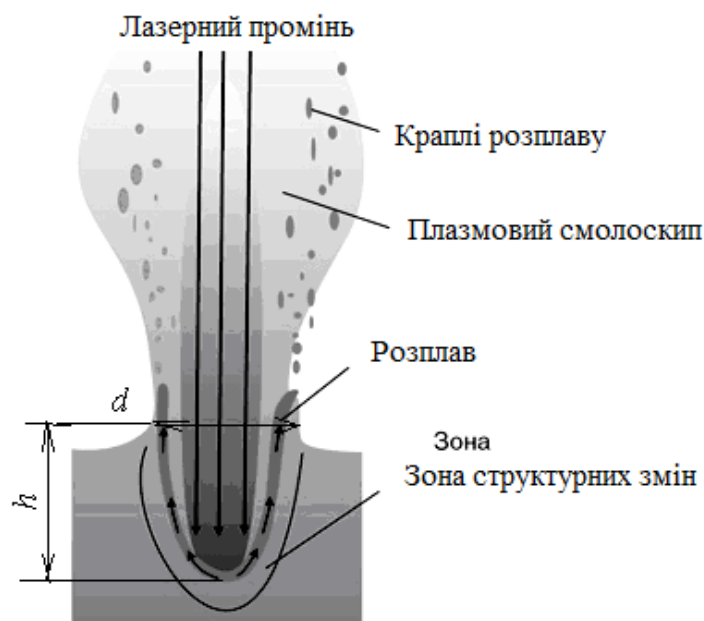


Рисунок 2.1 – Схема лазерного прошивання та розмірні характеристики отвору

Керовані параметри процесу лазерної обробки отворів є такі: енергія випромінювання в імпульсі E , тривалість імпульсу τ , фокусна відстань фокусуючої системи F , зміщення поверхні деталі щодо фокальної площини фокусуючої системи ΔF , кількість імпульсів n . Ці параметри на

сучасному технологічному обладнанні можуть змінюватися в досить широкі межі і, відповідно, забезпечувати досить великий діапазон глибин отворів h і діаметрів d .

Так, зі збільшенням *енергії випромінювання в імпульсі* E зростають як діаметр, так і глибина отворів (лунки), причому діаметр і глибина залежать від енергії випромінювання нелінійно.

Збільшення *фокусної відстані* при заданих E і τ приводить до зменшення щільності потужності лазерного випромінювання, що викликає зменшення глибини вхідного діаметра отвору.

До зміни щільності потужності випромінювання приводить зміна *тривалості імпульсу* τ (за постійної енергії). При впливі на матеріал імпульсів різної тривалості характер руйнування поверхні неоднаковий.

Так, при коротких імпульсах внаслідок вищої щільності потужності зростає температурний градієнт, що приводить до зростання частки випарованого матеріалу у продуктах лазерної ерозії.

У разі дії довгих світлових імпульсів картина руйнування дещо відмінна. У продуктах викиду переважає розплавлений матеріал, який за допомогою значного кратера залишається на краю отвору.

Є різні підходи до визначення діаметра та глибини отворів.

У загальному випадку при прошиванні отвору лазером із заданою тривалістю імпульсу глибина отвору h та його діаметр d можуть бути визначені з наступних співвідношень:

$$h = \sqrt[3]{\left(\frac{r}{\operatorname{tg}(\phi/2)}\right)^3 + \frac{3E}{\pi \operatorname{tg}^2(\phi/2) L_v \rho}} - \frac{r}{\operatorname{tg}(\phi/2)}, \quad (2.1)$$

$$d = 2 \sqrt[3]{\frac{r^3}{\operatorname{tg}^3(\phi/2)} + \frac{3E \operatorname{tg}(\phi/2)}{\pi L_p \rho}}, \quad (2.2)$$

де r – радіус плями фокусування; $\phi/2$ – половина кута світлового конуса випромінювання; E – енергія випромінювання в імпульсі; L_v – прихована теплота випаровування речовини (кількість тепла, яку потрібно повідомити рідкому або твердому тілу для перетворення його на пару при незмінній температурі); L_p – прихована теплота плавлення речовини (кількість тепла, яку

потрібно повідомити твердій речовині для переведення в рідкий стан за постійної температури); ρ – густина матеріалу.

Наближена оцінка розмірних характеристик отворів, одержаних за допомогою лазерного випромінювання, може бути виконана за допомогою співвідношень:

$$h \approx \sqrt[3]{\frac{E}{\operatorname{tg}^2(\phi/2) L_{\pi} \rho}}, \quad (2.3)$$

$$d \approx 2 \sqrt[3]{\frac{E \operatorname{tg}(\phi/2)}{L_{\pi} \rho}}. \quad (2.4)$$

2.2. Якість поверхні отворів

Область застосування лазерної технології на прошивочних операціях обмежується в даний час отворами, призначеними в основному не для поєднання з іншими деталями, а для пропускання променів (світлових, електронних), рідких або газоподібних середовищ (палива, води, повітря тощо). У зв'язку з цим *жорсткі вимоги пред'являються зазвичай не стільки до якості обробленої поверхні, скільки до точності розмірних характеристик отвору.*

Проте для ряду технічних застосувань даної технології важливою є також оцінка макро- і мікрогеометрії поверхні отвору, впливу різних факторів на шорсткість обробленої поверхні.

Мікрорельєф обробленої поверхні визначається переважно гідродинамічними процесами, що мають місце при взаємодії лазерного випромінювання з матеріалами. Зокрема, значний вплив на мікрорельєф поверхні отвору при лазерній обробці має в'язкість розплавленого металу.

У вуглецевих сталях зі збільшенням вмісту вуглецю спостерігається тенденція до зниження шорсткості поверхні отворів, одержуваних лазерною обробкою, рис. 2.2. Це пояснюється зменшенням в'язкості розплаву зі збільшенням вмісту вуглецю. У зв'язку з цим для сталей з підвищеним вмістом вуглецю при лазерній обробці через низьку в'язкість розплаву створюються сприятливі умови для його видалення з порожнини отвору. І, навпаки, умови евакуації погіршуються для маловуглецевих сталей.

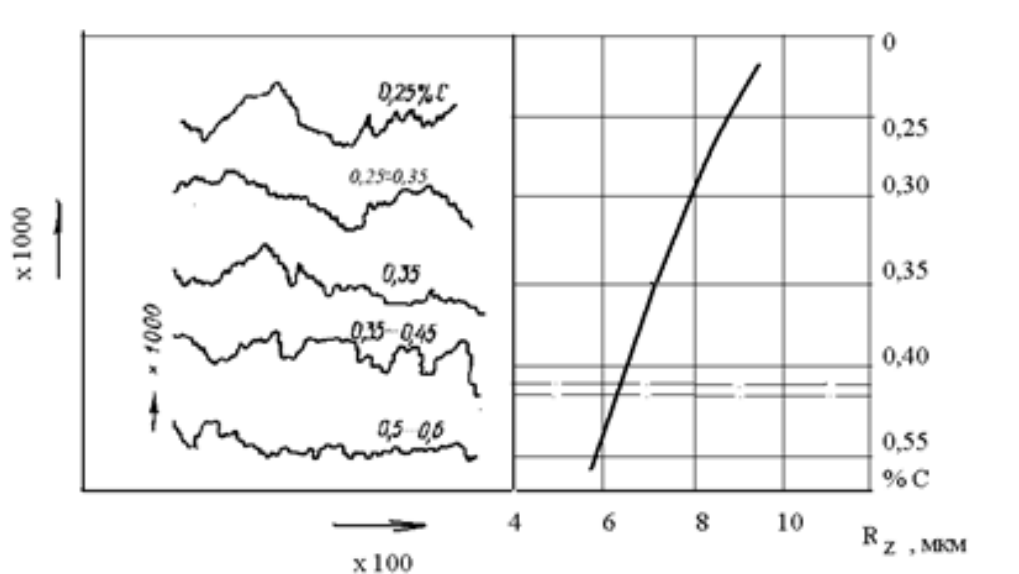


Рисунок 2.2 – Вплив вмісту вуглецю на шорсткість поверхні отворів, отриманих за допомогою лазерного випромінювання у вуглецевих сталях

При визначенні впливу режимів обробки на шорсткість поверхні найбільш важливими є три фактори: енергія випромінювання E , тривалість імпульсу τ та кількість імпульсів n .

Загальна залежність визначення висоти мікронерівностей R_z , мкм при обробці променем лазера має вигляд

$$R_z = cE^x \tau^y n^z, \quad (2.5)$$

де c – коефіцієнт, що характеризує властивості оброблюваного матеріалу (залежить від оброблюваності лазерним випромінюванням); E – енергія в імпульсі, Дж; τ – тривалість імпульсу, мс; n – кількість імпульсів; x, y, z – показники ступеня (визначаються експериментально, залежать від умов обробки та матеріалу).

З наведеної залежності видно, що при збільшенні енергії випромінювання або зменшенні тривалості імпульсу висота мікронерівностей поверхні збільшується.

Наприклад, на зразках із сталі X18H9T шорсткість поверхні отворів, отриманих при $E = 10$ Дж, $\tau = 1,3$ мс, $F = 40$ мм і $n = 1$, знаходиться в межах $R_z = 1,5 \dots 2$ мкм.

Під час розгляду впливу різних чинників на мікрорельєф поверхні слід враховувати випадкові відхилення від геометричного профілю отвору, викликані різними сторонніми включеннями, забрудненнями, пористістю матеріалу тощо. При вивченні мікрошліфів поздовжнього перерізу отворів

у ряді випадків досить чітко виявляють мікрораковини, що виникли в поверхневому шарі обробленого лазерним випромінюванням матеріалу.

Якість поверхні оброблених отворів характеризується не лише шорсткістю, а й розмірами дефектного шару.

Дефектним шаром вважається прилеглий до отвору шар матеріалу з властивостями, відмінними від вихідного матеріалу, див. рис. 2.1. Цей шар є зоною термічного впливу; для більшості металевих сплавів він має підвищену твердість (у 1,2...1,5 рази вище твердості вихідного матеріалу). Глибина цього шару невелика – зазвичай 10 ... 45 мкм для типових тривалостей імпульсу. Для багатьох застосувань наявність такого зміцненого шару можна розглядати як позитивний фактор (наприклад, отвори опорних підшипників ковзання, соплові отвори і т. д.). Якщо зміна властивостей прилеглого до отвору шару небажана, величина припуску під довідну операцію визначається товщиною дефектного шару.

2.3. Точність лазерної обробки отворів

Діапазон діаметрів отворів, одержуваних на сучасних лазерних технологічних установках, зазвичай становить від кількох мікрометрів до 03...05 мм. Для цього діапазону діаметральних розмірів поле розсіювання лежить у межах від 5...12 до 35...60 мкм залежно від діаметра отвору. На рис. 2.3 показано емпіричну криву розподілу середніх діаметрів отворів ($D_{\text{ном}} = 0,06$ мм).

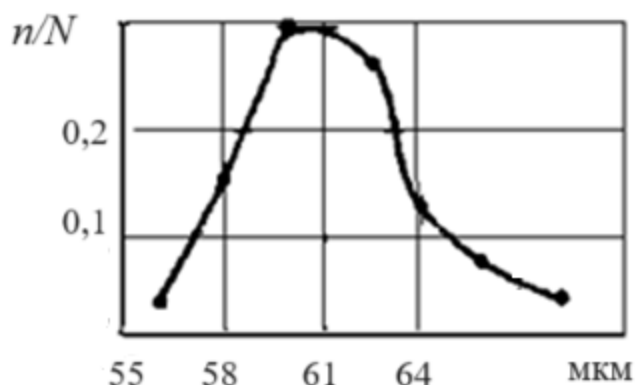


Рисунок 2.3 – Полігон розподілення середніх діаметрів отворів
(матеріал – БрКМц3-1, режим оброблення: $E = 1,6$ Дж, $F = 43$ мм, $\tau = 1,5$ мс,
 $h = 200$ мкм, $t = 60$ с)

Оцінка відхилень розмірів отворів показує, що отвори, оброблені в моноімпульсному режимі без застосування спеціальних прийомів, можна віднести до 6...7 квалітетів залежно від умов обробки. З урахуванням відхилень форми точність отворів може бути нижчою.

Відносно невисока точність обробки знаходиться у певному протиріччі з високою продуктивністю процесу, з іншими важливими перевагами лазерної обробки. Тому проблема підвищення точності лазерної обробки матеріалів відіграє першорядну роль.

На точність процесу лазерної обробки впливає багато чинників, зокрема. похибки технологічного процесу, похибки обладнання, а також властивості матеріалу, що обробляється.

2.4. Обладнання для лазерного прошивання отворів

У зв'язку з тим, що лазерне випромінювання для прошивання отворів застосовується з початку появи самих лазерів, обладнання для цього типу операцій набуло найбільшого розвитку та поширення.

Застосовують CO₂-лазери ($\lambda = 10,6$ мкм), лазери з активним середовищем на гранаті ($\lambda = 1,06$ мкм), рубіні ($\lambda = 0,6943$ мкм). Реалізуються переважно імпульсні режими обробки.

Процес удосконалення лазерного обладнання для прошивання йде шляхом створення серійних універсальних установок, розробки спеціалізованих варіантів серійних установок та спеціального обладнання.

2.4.1. Технічні характеристики установки «Квант-12»

Лазерна технологічна установка «Квант-12» вітчизняного виробництва, що є в НТУ «ХП», зразки оброблення на якій використовуються в даній роботі, є багатофункціональним обладнанням, що призначене для прошивання (перфорації) отворів, зварювання однорідних та різнорідних металів та сплавів малих товщин, різання.

Обробці можуть піддаватися різні метали та їх сплави, керамічні та напівпровідникові матеріали.

Деякі технічні характеристики цієї установки наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики лазерної технологічної установки «Квант-12»

Активний елемент з алюмоітрієвого граната, мм	6,3×100
Довжина хвилі випромінювання, мкм	1,06
Режим генерації	імпульсний
Середня потужність випромінювання, Вт	30
Тривалість імпульсу, мс	1,5; 2; 2,5; 4; 5
Енергія імпульсу випромінювання, Дж	0,1...10
Частота повторення імпульсів, Гц	0,1...35
Швидкість перфорації отворів у матеріалі завтовшки до 2 мм, отв/с	20
Максимальна товщина стінки для прошивання отворів, мм	15...20
Максимальна товщина різку, мм	5...6
Ширина різку, мм	0,2...0,4
Максимальна швидкість зварювання, мм/хв	точкового – 150...350; шовного – 600
Максимальна глибина проплавлення, мм	2...3
Напруга живлення, В	200/380
Споживана потужність, кВт	6
Габарити, мм	1000x950x1230
Маса, кг	350

3. ОБЛАДНАННЯ ТА ЗАГОТОВКИ

Лазерна технологічна установка «Квант-12»; зразки вуглецевої сталі з отворами, прошитими лазерною технологією; оптичний USB-мікроскоп *Supereyes B008*.

4. ХІД ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Ознайомитись із принципом роботи та технічними характеристиками лазерної технологічної установки «Квант-12» з лазером на алюмоітрієвому гранаті.

2. Задати необхідні параметри режиму та зробити прошивання отвору у зразку з вуглецевої сталі завтовшки 5 мм.

3. Проаналізувати якість поверхні за допомогою оптичного USB-мікроскопа.

4. Розрахувати основні розмірні показники отворів, отриманих за допомогою лазерного випромінювання за різних режимів роботи установки «Квант-12», а також характеристики їх точності, якості та продуктивності.

♦ Відповідно до формул (2.3) та (2.4), а також вихідних даних, наведених у табл. 3.1, розрахувати основні розмірні параметри отворів, отриманих лазерним променем, – глибину h , мм і діаметр d , мкм. Розрахувати співвідношення h/d .

♦ Використовуючи необхідні дані, наведені у табл. 3.1, 3.2, за допомогою формули (2.5) провести оцінку параметра шорсткості поверхні отвору R_z , мкм, отриманого в матеріалі за допомогою лазерного випромінювання.

Таблиця 3.1 – Вихідні дані для розрахунку

№ варіанта	Оброблюваний матеріал	Енергія випромінювання в імпульсі E , Дж	Тривалість імпульсу t , мс	Частота проходження імпульсів f , Гц	Кількість імпульсів n	Кут світлового конуса променя лазера φ , мрад	Прихована теплота плавлення речовини L_p , Дж/кг $\cdot 10^3$	Прихована теплота випаровування речовини L_v , Дж/кг $\cdot 10^6$	Густина матеріалу ρ , г/см ³
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1,16	Алюміній	1,5	1,5	10	6	9	372	10,53	2,7
2,17	Алюміній	2,0	4,5	35	8	4	372	10,53	2,7
3,18	Вольфрам	1,0	2,0	20	10	7	183	4,48	19,3
4,19	Залізо	1,5	2,0	1,0	12	5	260	6,12	7,8
5,20	Залізо	2,0	5,0	35	8	8	260	6,12	7,8
6,21	Мідь	0,5	1,5	1,5	9	6	204	4,82	8,9
7,22	Мідь	0,6	2,0	20	6	12	204	4,82	8,9
8,23	Нікель	6,0	2,5	10	8	10	296	5,83	8,8
9,24	Нікель	5,0	4,5	30	7	4	296	5,83	8,8
10,25	Свинць	0,1	2,0	10	3	15	24	0,86	11,3
11,26	Хром	0,4	1,5	10	4	17	128	0,66	7,2
12,27	Хром	0,5	5,0	20	5	6	128	0,66	7,2
13,28	Молибден	0,3	2,0	0,1	9	5	200	0,59	10,2
14,29	Молибден	0,5	4,0	3	7	11	200	0,59	10,2
15,30	Титан	4,0	5,0	15	7	20	360	8,97	4,5

Таблиця 3.2 - Коефіцієнти для оцінки параметра шорсткості поверхні отвору R_z

№ варіанта	Оброблюваний матеріал	Оброблюваність лазерним випромінюванням	c	x	y	z
1,2,16,17	Al	4,57	10,3	1,3	0,78	0,24
3,18	W	1	18,4	1,8	0,97	0,27
4,5,19,20	Fe	0,9	19,2	1,9	0,98	0,28
6,7,21,22	Cu	1,43	16,1	1,7	0,95	0,25
8,9,23,24	Ni	2,35	14,5	1,4	0,88	0,26
10,25	Pb	35,8	4,6	1,2	0,58	0,20
11,12,26,27	Cr	23,3	5,8	1,3	0,66	0,22
13,14,28,29	Mo	1,25	15,4	1,7	0,96	0,26
15,30	Ti	3,50	12,3	1,5	0,85	0,23

4. ЗМІСТ ЗВІТУ

1. Ціль роботи.
2. Технічні характеристики лазерної установки «Квант-12».
3. Основні показники точності, якості та продуктивності лазерного прошивання отворів та їх залежність від властивостей матеріалу і параметрів режиму оброблення.
4. Розрахунок основних розмірних характеристик отворів, отриманих лазерним прошиванням, а також шорсткості поверхні.
5. Висновки.

Питання для самоперевірки

1. Від яких параметрів лазерного випромінювання залежать розмірні характеристики отворів?
2. Які фактори впливають на якість поверхні отворів у сталі?
3. Який вплив має в'язкість розплаву на шорсткість поверхні?
4. Що розуміють під дефектним шаром обробленого лазерним випромінюванням отвору?
5. Яку точність мають отвори, отримані лазерним випромінюванням?
6. Чому основні вимоги лазерного прошивання отворів пред'являються не до якості поверхні, а до точності?
7. Якими є джерела похибки при лазерному прошиванні отворів?
8. Які параметри входять у загальну залежність визначення висоти мікронерівностей поверхні отвору під час оброблення променем лазера?



ЛАБОРАТОРНА РОБОТА
«ВИЗНАЧЕННЯ ЯКОСТІ ЗВАРНОГО З'ЄДНАННЯ,
ОТРИМАНОГО ЛАЗЕРНИМ ВИПРОМІНЮВАННЯМ»

1. ЦІЛЬ РОБОТИ

- ♦ ознайомитись з основними вимогами до якості зварного з'єднання та методами її контролю;
- ♦ за допомогою механічних випробувань (на мікротвердість) та оптичних досліджень визначити якість зварного з'єднання, отриманого лазерною технологією.

2. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Від якості з'єднань багато в чому залежить працездатність зварних виробів і конструкцій, а отже, їх безпека в процесі експлуатації для навколишнього середовища і людей. Задана якість зварювання може бути забезпечена заходами, що входять в систему управління якістю.

Показники якості зварних з'єднань визначаються тією або іншою сукупністю наступних властивостей:

- міцністю;
- надійністю;
- відсутністю дефектів;
- структурою металу шва та біляшовної зони;
- корозійною стійкістю тощо.

Забезпечення якості зварних з'єднань залежить в першу чергу від використання технології – від відповідності її сучасному рівню, а також від дотримання технологічної дисципліни. Виявлення дефектів служить сигналом не лише до відбракування продукції, але і до оперативного коригування технології.

Під дефектами зварного з'єднання розуміють будь-які відхилення від заданих нормативними документами параметрів з'єднання при зварюванні, що утворилися внаслідок порушення вимог до зварювальних матеріалів, підготовки, складання і зварювання деталей, термічної та механічної обробки зварних з'єднань й конструкції в цілому.

Згідно з відповідними стандартами (ДСТУ 3491-96, ДСТУ EN ISO 6520-1:2015) дефекти, що виникають при утворенні зварних з'єднань, поділяють на шість груп:

- 1) тріщини – порушення суцільності, викликане місцевим розривом

шва, що може виникнути в результаті охолодження або впливу навантажень;

2) пори – порушення суцільності довільної форми, утворене газами, що залишились у розплавленому металі;

3) тверді включення – тверді сторонні металеві чи неметалеві речовини у металі зварного шва;

4) несплавлення та непровар – відсутність з'єднання між металом зварного шва і основним металом або між окремими ділянками зварного шва;

5) порушення форми шва – відхилення форми зовнішніх поверхонь зварного шва або геометрії з'єднання від сталого значення;

6) інші дефекти – усі дефекти, що не можуть бути віднесені до однієї з перелічених вище груп.

Деякі з видів дефектів надано на рис. 2.1.

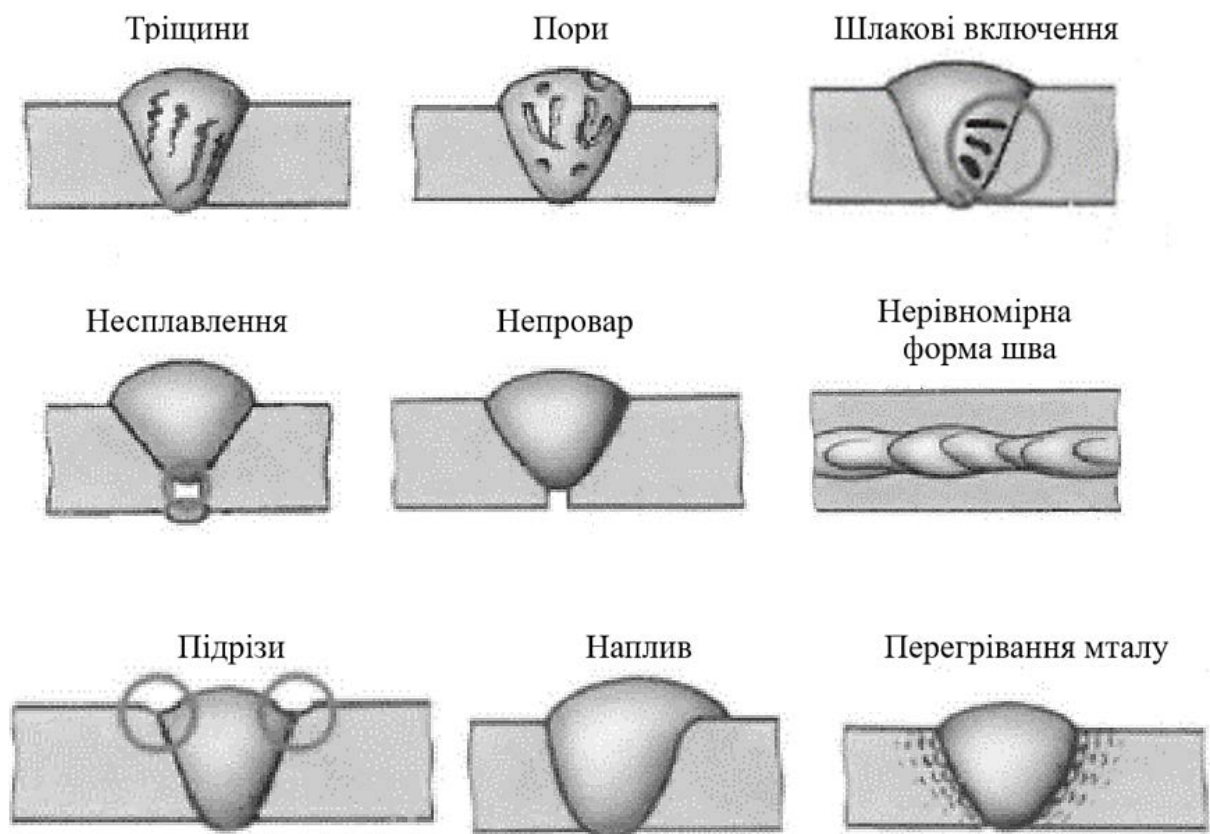


Рисунок 2.1 – Дефекти зварного шва

Для визначення якості зварного з'єднання використовують спеціальні методи контролю.

За можливістю використання проконтрольованої продукції контроль

може бути **руйнівним** (для отримання контрольованих кількісних показників продукції; у деяких випадках – з частковим порушенням цілісності матеріалу виробу) та **неруйнівним** (не впливає на цілісність продукції та побічно характеризує її якість).

За засобами контролю та одержання інформації контроль поділяється на **візуальний** (піддають 100 % виробів) та **інструментальний** (більш досконалий, оскільки здійснюється за допомогою різноманітних технічних засобів контролю).

До неруйнівних методів контролю якості зварних з'єднань відносять наступні: зовнішній огляд; контроль на непроникність гідравлічним випробуванням, гасом, стисненим повітрям, вакуумуванням та течешукачами; методи, що застосовуються переважно для виявлення дефектів, що виходять на поверхню зварних з'єднань (магнітний, електромагнітний, люмінесцентний, кольоровий); методи, що застосовуються переважно для виявлення прихованих і внутрішніх дефектів (радіаційний, ультразвуковий, магнітографічний).

До руйнівних методів контролю належать механічні випробування; металографічні дослідження; спеціальні випробування з метою отримання характеристик зварних з'єднань. Ці випробування проводять на зварних зразках, вирізаних з самого виробу або з спеціально зварених контрольних з'єднань, виконаних відповідно до конкретних вимог.

До **механічних випробувань** належать випробування на статичний розтяг, статичний вигин, ударний розрив та вигин, а також на мікротвердість.

Основним завданням **металографічного аналізу** є встановлення однорідності структури металу, виявлення наявності і характеру дефектів. Металографічні дослідження включають в себе макро-і мікроструктурний методи дослідження.

Лазерне випромінювання дозволяє отримувати зварні з'єднання різних металів, проте не всі метали піддаються якісному зварюванню, тобто **зварюваність різних металів різна**.

Так, цинк, алюміній, олово, тантал або вольфрам важко зварюються на відміну від маловуглецевої сталі, нікелю, паладію, платини, золота.

Якщо застосувати десятибальну систему, де 10 балів характеризують найкращу якість, відповідну з'єднанню однойменних металів, а 1 – найгіршу якість, ефективність зварювання різних металів один з одним можна оцінити за табл. 2.

Таблиця 2.1 – Зварюваність різних металів лазерним зварюванням

Метал	Ag	Al	Cr	Cu	Fe	Mo	Ni	Pd	Pt	Sn	Ta	Ti	W
Ag	10	5	1	4	2	1	1	9	4	1	1	4	1
Al	5	10	1	1	1	1	4	1	1	1	1	4	1
Cr	1	1	10	1	9	9	8	6	7	1	1	7	9
Cu	4	4	1	10	4	1	9	8	8	1	1	4	1
Fe	2	4	9	4	10	7	7	6	6	1	4	4	1
Mo	1	1	9	1	7	10	4	6	6	1	9	9	9
Ni	1	4	8	9	7	4	10	8	8	1	7	4	3
Pd	9	1	6	8	6	6	8	10	8	3	6	3	3
Pt	4	1	7	8	6	6	8	8	10	4	4	3	6
Sn	1	1	1	1	1	1	1	3	4	10	1	1	1
Ta	1	1	1	1	4	9	7	6	4	1	10	9	9
Ti	4	4	7	4	4	9	4	3	3	1	9	10	3
W	1	1	9	1	4	9	3	3	6	1	9	3	10

Однією з найбільш важливих переваг лазерного зварювання є висока керованість режимами обробки та висока точність дозування енергії, що при використанні прецизійних систем руху дозволяє отримувати найбільш якісні з'єднання, особливо при обробці мініатюрних деталей. *Лазер дозволяє отримувати високоякісні шви з мінімальною кількістю дефектів. Механічні та фізичні властивості з'єднання є порівнювальними з аналогічними параметрами вихідного матеріалу.*

3. ОБЛАДНАННЯ ТА ЗАГОТОВКИ

У роботі використовуються: мікротвердомер ПМТ-3, оптичний металографічний мікроскоп МІМ-7, оптичний USB-мікроскоп; заготовки з вуглецевої сталі завтовшки 1,5 мм, зварені точковим зварюванням на установці «Квант-12».

4. ХІД ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. За допомогою оптичного мікроскопа МІМ-7 та USB-мікроскопа визначити наявність дефектів отриманого зварного з'єднання та виміряти їх розміри.
2. За допомогою мікротвердомера виміряти мікротвердість у 5-ти точках

зварного шва та прилеглих зонах металу. Отмані дані представити у графічному вигляді розподілу $H_\mu(h)$, де H_μ – мікротвердість у вимірюваній точці, h – відповідна відстань.

3. Оцінити зварюваність вихідного матеріалу з іншими металами (табл. 2.1); підібрати найефективніші варіанти.

4. ЗМІСТ ЗВІТУ

1. Ціль роботи.
2. Виявлені дефекти зварного шва та їх розмір.
3. Графік розподілення мікротвердості $H_\mu(h)$ у перерізі зварного з'єднання.
4. Висновки.

Питання для самоперевірки

1. Що розуміють під якістю зварного з'єднання?
2. Назвіть основні види дефектів зварного шва та біляшовної зони.
3. Які методи використовують для контролю якості зварного з'єднання?
4. Які методи контролю належать до руйнівних?
5. Які методи контролю належать до неруйнівних?
6. Яку інформацію про якість зварного шва отримують за допомогою металографічного аналізу?
7. Яку інформацію про якість зварного шва отримують за допомогою механічних випробувань на твердість?
8. Як оцінюють ефективність зварювання різних металів один з одним?
9. У чому особливість якості зварних швів, отриманих лазерним зварюванням?



ЛАБОРАТОРНА РОБОТА
«ТЕХНІЧНІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ПАРАМЕТРИ
СИСТЕМИ ЛАЗЕРНОЇ СТЕРЕОЛІТОГРАФІЇ
НА БАЗІ УСТАНОВКИ SLA 5000»

1. ЦІЛЬ РОБОТИ

- ♦ ознайомитися з сутністю процесу лазерної стереолітографії (SLA) та практичною реалізацією процесу на установці SLA 5000;
- ♦ визначити основні технічні характеристики використовуваного обладнання;
- ♦ розрахувати технологічний час виготовлення виробу комбінованою SLA-технологією.

2. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Одним із прикладів сучасних інтегрованих (комбінованих) технологій є технології пошарового вирощування виробів – адитивні технології (АТ). Цей напрямок інтегрує останні досягнення інформаційних, лазерних технологій, матеріалознавства, квантової електроніки, фотохімії, ливарного виробництва тощо.

Однією з найбільш популярних АТ-технологій є стереолітографія – SLA, яка базується на створенні тривимірних об'єктів пошаровою полімеризацією (затвердінням) рідких фотомономерних матеріалів при впливі на них ультрафіолетового випромінювання або випромінювання видимої частини спектра (рис. 2.1).

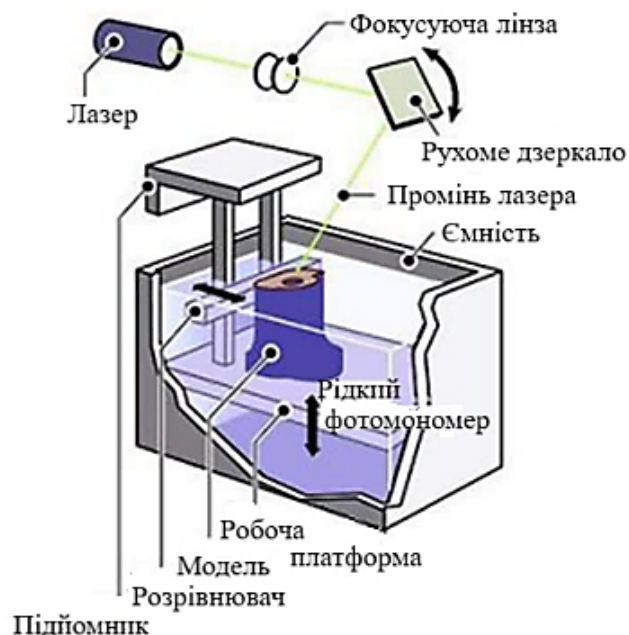


Рисунок 2.1 – Принципова схема SLA-установки

Технологія здійснюється таким чином. Композиція, схильна до фото полімеризації, заливається в ванну. На глибині одного шару (0,025 ... 0,20 мм на машинах різного типу) нижче поверхні рідкого полімера розташовується рухома платформа, здатна переміщатися у вертикальному напрямку. За допомогою дзеркала промінь лазера сканує шар полімера над платформою, що приводить до його затвердіння за формою відповідного поперечного перерізу. Далі платформа опускається на глибину одного шару і процес повторюється доти, поки об'єкт повністю не побудується.

Основою стереолітографії є локальна зміна фазового стану вихідного середовища (перехід рідина-тверде тіло) в результаті фотоініційованої полімеризації в заданому об'ємі. Суть цього процесу полягає у створенні за допомогою ініційованого, наприклад, лазерного випромінювання в рідкому реакційно-здатному середовищі (композиції, що фотополімеризується – ФПК) активних центрів (радикалів, іонів, активованих комплексів), які, взаємодіючи з молекулами мономеру, ініціюють зростання полімерних ланцюгів, тобто процес полімеризації. Наслідком полімеризації є зміна фазового стану середовища – в опромінену об'ємі утворюється твердий полімер.

Перевагами способу лазерної стереолітографії порівняно з іншими АТ є висока точність, відсутність обмежень за складністю форми виробу, можливість виготовлення виробів великих розмірів частинами з подальшим відтворенням виробу в цілому. Очевидною перевагою даного процесу є також отримання поверхні об'єкта практично такої ж якості, як і після механооброблення на багатоопераційних верстатах з ЧПК. Шорсткість поверхні без будь-якої обробки не перевищує 100 мкм. Процес стереолітографії дозволяє досягти лінійної точності ± 100 мкм при товщині шару 50 мкм. Час формування полімеризованого шару становить 35...50 с залежно від параметрів лазерного випромінювання.

До недоліків процесу відноситься висока вартість вихідної фотополімерної композиції (термореактивного полімеру). Крім того, ця речовина дуже токсична і має різкий запах, а також вимагає захисту від прямого засвітлення різними джерелами світла, щоб уникнути передчасної полімеризації. Крім того, установка є чутливою до зміни температури та вологості приміщення, вібрацій; потрібна сталість потужності лазерного випромінювання.

2.1. Технічні та технологічні параметри установки

Загальний вигляд установки *SLA-5000* (*3D Systems*) наведено на рис. 2.2. Найчастіше в *SLA* використовують випромінювання лазера з довжиною хвилі λ в ближній і середній УФ-області спектра для забезпечення енергії впливу, необхідної для реалізації процесу полімеризації з достатньою швидкістю. Наприклад, у багатьох установках *SLA* джерелом випромінювання є твердотільний ванадатовий лазер з активним елементом на основі Nd: YVO_4 з діодним накачуванням ($\lambda \approx 0,355$ мкм, УФ-зона), потужністю не менше 216 мВт. До складу обладнання входить також система фіксованих переміщень платформи, що забезпечує отримання товщин шарів у межах 0,05...0,15 мм, оптична система управління лазерним променем з діаметром світлової плями 0,23...0,28 мм та швидкістю сканування до 5,0 м/с, ванна об'ємом 253,61 л, табл. 2.1.

Допустима вага побудованого виробу становить 68,04 кг при максимальних габаритах 508x508x584 мм (XxYxZ).



Рисунок 2.2 – Установка *SLA-5000*

Таблиця 2.1 – Основні характеристики установки SLA 5000

Лазер	Тип Довжина хвилі Потужність на протязі 5000 год роботи Гарантія	Твердотільний Nd: YVO ₄ 354,7 нм 216 мВт 5000 год або 18 місяців
Система нанесення шарів	Спосіб Рекомендована мінімальна товщина шару Мінімально можлива товщина шару	Пристрій Zephyr 0,1 мм 0,05 мм
Оптична та скануюча система	Діаметр променя Рекомендована швидкість побудування деталі Мінімальний розмір елемента	0,23...0,28 мм 5,0 м/с = ($\varnothing_{\text{променя}} + 0,02$) мм (по X та Y) = товщина шару (вісь Z)
Рухома платформа	Вертикальна роздільна здатність Повторюваність позиції Максимальна вага деталі	0,00177 мм +0,013 мм 68,04 кг
Ванна	Об'єм Максимальні розміри деталі Змінна ванна	253,61 л 508x508x584 мм (X, Y, Z) Так
Програмне забезпечення	3D Lightyear, Buildstation 5.1 Операційна система Формат вхідного файлу	Windows NT 4,0 STL та SLC
Електроживлення		220 В, 50 Гц, 1 фаза 90 А
Габарити	Робочий модуль в упаковці (без упаковки) Сервісний модуль в упаковці (без упаковки)	2,1x1,4x2,3 м (1,9x1,2x2,0 м) 1,22x1,22x1,35 м
Вага	Робочий модуль в упаковці (без упаковки) Сервісний модуль в упаковці (без упаковки)	1363 кг (1318 кг) 322 кг (284 кг)
Навколишнє середовище	Діапазон температур Макс. швидкість зміни температури Відносна вологість	20...26 °C 1 °C/год 10 %...50 % не конденсована
Стандарти безпеки	Виріб відповідає стандарту CFR21, розділ J. Лазер класу I при нормальній роботі; класу IV при проведенні обслуговування. SLA-5000 відповідає вимогам CE	

2.2. Система лазерної стереолітографії

Система лазерної стереолітографії є основним обладнанням, що використовується у дослідженнях та виготовленні. Вона включає, рис. 2.3, установку SLA-5000 фірми 3D Systems; комп'ютерну станцію підготовки процесу; камеру PCA 500 для остаточної полімеризації виробу, вирощеного з фотомономера; вакуумну камеру виробництва фізико-технічного інституту НАНУ (Харків); низькотемпературну шафу; мийну камеру.



Установка лазерної стереолітографії
SLA-5000 та керуюча комп'ютерна станція



Робоча станція
підготовки процесу



Камера ультрафіолетового
затвердіння PCA-500



Вакуумна камера



Низькотемпературна
термошафа

Рисунок 2.3 - Система лазерної стереолітографії на базі установки SLA-5000

Програмне забезпечення лазерної стереолітографії має забезпечити перегляд та редагування комп'ютерних образів об'єктів у форматі *STL*, який є загальноприйнятим вхідним форматом для обладнання лазерної стереолітографії.

Комп'ютерна станція підготовки процесу під час роботи з *STL*-файлом виконує такі функції:

- раціональне розміщення виробу перед побудовою на робочій платформі;
- трансформація *3D CAD* моделі в сукупність *2D CAD* плоских перерізів (із заданою товщиною шарів) за одночасного контролю якості опису

вихідної моделі за перерізами (дотримання умов безперервності поверхні та контроль мінімально допустимої товщини стінок виробу);

- підготовка програми управління рухом лазерного променя, визначення параметрів процесу, орієнтації моделі, автоматичний або ручний режим створення елементів підтримки (технологічних опор).

Камера РСА-500 призначена для остаточної полімеризації виробу. Вона має джерела ультрафіолетового випромінювання – 8 флуоресцентних ламп загальною потужністю 640 Вт, а також рефлекторні дзеркала. Виріб поміщається на столі 800 мм, що обертається зі швидкістю 1 об/хв. Рефлекторні дзеркала забезпечують рівномірне висвітлення об'єкта.

У вакуумній камері виконуються роботи з робочими сумішами під час виготовлення гнучких (силіконових) прес-форм на етапі тиражування.

Низькотемпературна термошафа призначена для термообробки виготовленого виробу з метою підвищення його механічних властивостей після повного затвердіння, а мийна камера – для промивання готових виробів та видалення технологічних опор після побудови.

2.3. Технологічний час виготовлення виробів методом стереолітографії

Технологічний процес виготовлення виробів пошаровим вирощуванням можна представити у вигляді послідовності наступних операцій:

- підготовчі операції (монтаж робочої платформи, дозаправлення робочої ємності вихідними матеріалами);
- пошарова побудова технологічних опор (підтримок);
- пошарове виготовлення виробу;
- заключні операції (демонтаж виробу з робочої платформи, видалення технологічних опор, промивання виробу, постобробка тощо).

Практичний досвід використання способу лазерної стереолітографії показав, що сумарний час на підготовчо-заклучні операції знаходиться в інтервалі 1...5 % загального технологічного часу побудови виробу, тому в першому наближенні цю складову можна не розглядати.

Таким чином, технологічний час створення виробу пошаровим вирощуванням T_B у загальному випадку є сумою часів створення деталей T_d і опор T_o :

$$T_B = \sum_{\delta=1}^{N_D} T_{D(\delta)} + \sum_{\omega=1}^{N_O} T_{O(\omega)}, \quad (2.1)$$

де N_D, N_O – кількість деталей на робочій платформі та опор.

У рамках концепції пошарового вирощування просторових виробів час створення окремої деталі та супутніх їй опор визначається часом створення всіх складових шарів:

$$T_{D(\delta)} = \sum_{i=1}^{N_{шД}} T_{шД(i)}; T_{O(\omega)} = \sum_{j=1}^{N_{шО}} T_{шО(j)}, \quad (2.2)$$

де $T_{шД(i)}, T_{шО(j)}$ – відповідно час створення i -го та j -го шарів деталі та опор. У свою чергу, часи створення i -го шару деталі та j -го шару опори є сумою наступних технологічних процедур:

$$T_{шД(i)} = T_{фД(i)} + T_{пД(i)} + T_{вД(i)}, \quad (2.3)$$

$$T_{шО(j)} = T_{фО(j)} + T_{пО(j)} + T_{вО(j)}, \quad (2.4)$$

де $T_{фД(i)}, T_{фО(j)}$ – час формоутворення шару (час впливу лазерного променя на поверхню фотомономерної смоли); $T_{пД(i)}, T_{пО(j)}$ – час опускання платформи; $T_{вД(i)}, T_{вО(j)}$ – час витримки (відновлення плоскої форми поверхні фотомономерної смоли).

Узагальнений вираз для технологічного часу створення виробу з урахуванням (2.3) і (2.4) набуває наступного вигляду:

$$T_B = \sum_{\delta=1}^{N_D} \sum_{i=1}^{N_{шД}} (T_{фД(i)} + T_{пД(i)} + T_{вД(i)}) + \sum_{\omega=1}^{N_O} \sum_{j=1}^{N_{шО}} (T_{фО(j)} + T_{пО(j)} + T_{вО(j)}). \quad (2.5)$$

2.3.1. Технологічний час пошарового формування деталі

Час формоутворення i -го шару деталі. Промінь лазера проходить через оптичну систему і, відбиваючись від поверхні управляючого дзеркала, попадає на поверхню рідкого фотомономера (діаметр плями лазерного променя). Час, необхідний для полімеризації, залежить від спектральних характеристик фотомономера, характеристик лазерного променя (довжини хвилі, щільності потужності, діаметра плями лазерного променя) і швидкості його переміщення по поверхні фотомономера (швидкість променя лазера

V_L). Процес затвердіння фотомономера залежить від кількості отриманої оптичної енергії в області фокусування лазерного променя. З урахуванням напівпрозорості фотомономера лазерний промінь проникає на певну глибину (більшу, ніж задана товщина фотополімеризованого шару). Переміщаючись зі швидкістю V_L по поверхні фотомономера, лазерний промінь повинен забезпечувати необхідну експозицію, що сприяє затвердінню фотомономера, тобто його полімеризації. Необхідна експозиція підтримується параметрами траєкторії лазерного променя та її взаємним перекриттям з урахуванням адитивності сумарної енергії полімеризації, отриманої окремими елементарними ділянками i -го шару деталі, що формується. Технологічним параметром, що регулює цей процес, є коефіцієнт проходів променя $K_{\text{пд}}$.

Сформований i -й шар є плоским перерізом просторової деталі. Для опису технологічних параметрів шару доцільно використовувати площу робочої області, зайнятої деталями (площа поверхні в перерізі i -го шару, обмежена замкнутою контурною лінією за зовнішніми межами елементів деталі або деталей). Для обліку внутрішніх порожнеч необхідно ввести коефіцієнт заповнення робочої області деталями $K_{\text{зд}}$.

З урахуванням вищесказаного час формоутворення i -го шару можна подати у вигляді аналітичної залежності від п'яти технологічних параметрів:

$$T_{\text{ФД}(i)} = \frac{S_{\text{д}} K_{\text{зд}} K_{\text{пд}}}{D_{\text{л}} V_{\text{л}}}, \quad (2.6)$$

де $S_{\text{д}}$ — площа робочої області, зайнятої деталями, мм^2 ; $K_{\text{зд}}$ — коефіцієнт заповнення робочої області деталями; $K_{\text{пд}}$ — коефіцієнт проходів променя при побудові деталі; $D_{\text{л}}$ — діаметр плями лазерного променя, мм ; $V_{\text{л}}$ — швидкість променя лазера, мм/с .

Час опускання платформи для i -го шару деталі. При створенні шару деталі платформа зі швидкістю $V_{\text{п}}$ опускається на глибину шару $h_{\text{ш}}$ і додаткову величину $h_{\text{ш}(\text{min})} = 0,025 \text{ мм}$. В результаті час опускання платформи залежатиме від двох технологічних параметрів:

$$T_{\text{пд}(i)} = \frac{h_{\text{ш}} + 0,025}{V_{\text{п}}}. \quad (2.7)$$

Час витримки для i -го шару деталі. Після опускання платформи на задану глибину проводиться зупинка процесу (витримка) для повернення поверхні рідкої смоли в плоский вихідний стан. Як показали проведені дослідження, необхідний час витримки може бути описаний наступною залежністю:

$$T_{ВД(i)} = T_{БД} \left(\frac{S_D}{S_{Д(баз)}} \right)^{m_s} \left(\frac{h_{Ш(баз)}}{h_{Ш}} \right)^{m_h}, \quad (2.8)$$

де $T_{БД}$ – базовий час витримки, с; S_D – площа робочої області, зайнятої деталями, мм²; $S_{Д(баз)}$ – базова площа робочої області, яку займають деталі, мм²; m_s – показник ступеня впливу площі робочої області, зайнятої деталями, на тривалість витримки; $h_{Ш}$ – товщина фотополімеризованого шару, мм; $h_{Ш(баз)}$ – базова товщина фотополімеризованого шару, мм; m_h – показник ступеня впливу товщини фотополімеризованого шару на тривалість витримки.

З урахуванням базових значень $S_{Д(баз)} = 1 \cdot 10^4$ мм², $h_{Ш(баз)} = 0,125$ мм та показників ступеня впливу $m_s = 0,3$, $m_h = 1,5$, маємо остаточно:

$$T_{ВД(i)} = T_{БД} \left(\frac{S_D}{1 \cdot 10^4} \right)^{0,3} \left(\frac{0,125}{h_{Ш}} \right)^{1,5} = 2,79 \cdot 10^{-3} T_{БД} \frac{S_D^{0,3}}{h_{Ш}^{1,5}}. \quad (2.9)$$

Кількість шарів, що становлять деталі, N_D залежить від висоти виробу H_B і товщини фотополімеризованого шару та визначається рівнянням:

$$H_B = \sum_{i=1}^{N_D} h_{Ш(i)}. \quad (2.10)$$

Для випадку сталості товщини фотополімеризованого шару та інших параметрів час створення деталі визначається наступною залежністю:

$$T_D = \frac{H_B}{h_{Ш}} \left[\frac{S_D K_{ЗД} K_{ПД}}{D_L V_L} + \frac{h_{Ш} + 0,025}{V_{П}} + 2,79 \cdot 10^{-3} T_{БД} \frac{S_D^{0,3}}{h_{Ш}^{1,5}} \right]. \quad (2.11)$$

2.3.2. Технологічний час побудови опор

Час побудови опор визначається аналогічно до часу побудови деталі з урахуванням особливостей, властивих даному процесу.

Час формоутворення j -го шару опор.

$$T_{\text{ФО}}(j) = \frac{S_{\text{Д}} K_{30} K_{\text{ПО}}}{D_{\text{Л}} V_{\text{Л}}}, \quad (2.12)$$

де $S_{\text{Д}}$ – площа робочої області, зайнятої деталями, мм^2 ; K_{30} – коефіцієнт заповнення опор; $K_{\text{ПО}}$ – коефіцієнт проходів променя при побудові опор; $D_{\text{Л}}$ – діаметр плями лазерного променя, мм ; $V_{\text{Л}}$ – швидкість променя лазера, мм/с .

Час опускання платформи для j -го шару опор. При створенні шару опор платформа зі швидкістю $V_{\text{П}}$ опускається на глибину шару $h_{\text{Ш}}$ і додаткову величину $H_{\text{ПО}}$:

$$T_{\text{ПО}}(j) = \frac{h_{\text{Ш}} + H_{\text{ПО}}}{V_{\text{П}}}. \quad (2.13)$$

Час створення j -го шару опор. Час створення шару опор складається з наступних функціональних доданків: часу формоутворення, опускання платформи та витримки $T_{\text{ВО}}$:

$$T_{\text{О}}(j) = \frac{S_{\text{Д}} K_{30} K_{\text{ПО}}}{D_{\text{Л}} V_{\text{Л}}} + \frac{h_{\text{Ш}} + H_{\text{ПО}}}{V_{\text{П}}} + T_{\text{ВО}}. \quad (2.14)$$

У загальному випадку час формування опор визначається сумою часів формування шарів $1 \leq j \leq N_{\text{О}}$.

Аналітичний вираз для часу побудови опор має вигляд

$$T_{\text{О}} = \sum_{j=1}^{N_{\text{О}}} T_{\text{ШО}}(j) = \sum_{j=1}^{N_{\text{О}}} \left(\frac{S_{\text{Д}} K_{30} K_{\text{ПО}}}{D_{\text{Л}} V_{\text{Л}}} + \frac{h_{\text{Ш}} + H_{\text{ПО}}}{V_{\text{П}}} + T_{\text{ВО}} \right)_{(j)}, \quad (2.15)$$

де під знаком суми параметри, значення яких у загальному випадку можуть змінюватися для кожного j -го шару.

Кількість шарів, що становлять опори $N_{\text{О}}$, буде залежати від висоти опор $H_{\text{О}}$ та товщини фотополімеризованого шару $h_{\text{Ш}(j)}$ і визначається рівнянням:

$$H_{\text{О}} = \sum_{j=1}^{N_{\text{О}}} h_{\text{Ш}(j)}. \quad (2.16)$$

Для випадку сталості товщин фотополімеризованого шару та інших параметрів

$$T_O = \frac{H_O}{h_{III}} \left(\frac{S_D K_{ZO} K_{ПО}}{D_L V_L} + \frac{h_{III} + H_{ПО}}{V_{II}} + T_{BO} \right). \quad (2.17)$$

3. ХІД ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Ознайомитись із сутністю процесу лазерної стереолітографії та основними етапами його реалізації.
2. Ознайомитись із технічними характеристиками установки лазерної стереолітографії SLA-5000, основними складовими системи лазерної стереолітографії та їх призначенням.
3. Виконати практично процес вирощування виробу з використанням вихідної речовини (рідкого фотомономера) та призначених параметрів режиму вирощування.
4. Ознайомитись з методикою розрахунку технологічного часу пошарової побудови виробу.
5. Використовуючи співвідношення, наведені в п. 2.3, розрахувати технологічний час пошарової побудови виробу методом стереолітографії з урахуванням основних технологічних етапів (пошарового виготовлення деталі, пошарової побудови технологічних опор). Вихідні дані для розрахунку наведено у табл. 3.1.

Таблиця 3.1 - Вихідні дані для розрахунку технологічного часу пошарового створення виробу

№ п/п	По-знач.	Найменування	Значення параметрів для різних варіантів									
			1, 11	2, 12	3, 13	4, 14	5, 15	6, 16	7, 17	8, 18	9, 19	10, 20
1	2	3	4									
1	D_L	Діаметр плями лазерного променя, мм	0,230	0,255	0,280	0,230	0,255	0,280	0,230	0,255	0,280	0,280
2	V_L	Швидкість променя лазера, мм/с	3000	4000	5000	4000	3000	5000	3000	4000	5000	5000
3*	S_D	Площа робочої області, що зайнята деталями, мм ²	1·10 ⁴	2·10 ⁴	3·10 ⁴	4·10 ⁴	5·10 ⁴	7·10 ⁴	9·10 ⁴	1,2·10 ⁵	1,4·10 ⁵	1,6·10 ⁵
4*	$K_{ЗД}$	Коефіцієнт заповнення робочої області деталями	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,9
5*	$K_{Ф}$	Коефіцієнт форми робочої області по осі Y	0,5	0,7	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,7	1,8	2,0
6*	h_{III}	Товщина фотополімеризованого шару, мм	0,025	0,027	0,030	0,055	0,085	0,10	0,15	0,17	0,18	0,20

Продовження табл. 3.1

1	2	3	4									
7	$K_{\text{ПД}}$	Коефіцієнт проходів променя при побудові деталі	3	4	11	3	4	11	3	4	11	3
8	$K_{\text{ПО}}$	Коефіцієнт проходів променя при побудові опор	2	4	6	2	6	2	4	2	4	6
9	$V_{\text{П}}$	Швидкість опускання робочої платформи, мм/с	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1
10*	$T_{\text{БД}}$	Базовий час витримки, с	5	7	9	10	12	13	15	20	25	30
11*	$H_{\text{В}}$	Вихідна висота виробу, мм	10	25	30	70	100	150	200	250	300	400
12*	$K_{\text{ЗО}}$	Коефіцієнт заповнення опор	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8	0,9	0,9
13	$H_{\text{О}}$	Висота опор, мм	9	12	15	9	12	15	9	12	15	914
14	$H_{\text{ПО}}$	Глибина занурення платформи при побудові опор, мм	6,25	10	15	6,25	10	15	6,25	10	15	15
15*	$T_{\text{ВО}}$	Час витримки при побудові опор, с	3	5	6	7	8	10	14	16	18	22

Примітка. Знаком * позначені параметри, регульовані оператором.

4. ЗМІСТ ЗВІТУ

1. Ціль роботи.
2. Основні технічні параметри установки SLA-5000; основні складові системи лазерної стереолітографії на базі установки SLA-5000 та їх призначення.
3. Розрахунок технологічного часу пошарової побудови виробу.
4. Висновки.

Питання для самоперевірки

1. Опишіть сутність та основні етапи процесу лазерної стереолітографії.
2. Як відбувається селективне затвердіння вихідного фотомономера?
3. Які основні переваги та недоліки SLA-технології порівняно з іншими адитивними методами?
4. Назвіть основні технічні характеристики установки SLA-5000.
5. З яких основних елементів складається система лазерної стереолітографії? Які функції вони виконують?

6. З яких основних технологічних операцій складається процес пошарового створення виробу?
7. Які складові входять у поняття технологічного часу пошарового виготовлення виробу?
8. Від яких чинників залежить час формоутворення i -го шару деталі?
9. Від яких чинників залежить час опускання платформи для i -го шару деталі?
10. Від яких чинників залежить час витримки для i -го шару деталі?
11. Які параметри процесу виготовлення виробів за допомогою лазерної стереолітографії можуть регулюватись оператором?

ЛІТЕРАТУРА

1. Бобицький Я. В. Лазерні технології : навч. посібник : Ч. 1 / Я. В. Бобицький, Г. Л. Матвіїшин. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2015. – 320 с.
2. Бобицький Я. В. Лазерні технології : навч. посібник : Ч. 2 / Я. В. Бобицький, Г. Л. Матвіїшин. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2020. – 112 с.
3. Пупань Л. І. Лазерні технології у машинобудуванні : навч. посібник для студентів спеціальності «Прикладна механіка» денної, заочної та дистанційної форм навчання / Л. І. Пупань. – Харків: НТУ «ХПІ», 2020. – 109 с.
4. Інтегровані технології обробки матеріалів : підручник / Е. С. Геворкян, Л. А. Тимофеева, В. П. Нерубацький та ін. – Харків: УкрДУЗТ, 2016. – 238 с.
5. Integrirovannyye generativnyye tekhnologii: ucheb. posobiye / A. I. Grabchenko, Yu. N. Vnukov, V. L. Dobroskok, L. I. Pupan', V. A. Fadeyev; pod red. A. I. Grabchenko. – Kh.: NTU «KHPI», 2011.– 396 s.
6. Пуховський Є. С. Прогресивні процеси обробки матеріалів : навч. посібник для студентів, які навчаються за спеціальністю 131 «Прикладна механіка» / Є. С. Пуховський. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 132 с.
7. Schaaf P. Laser Processing of Materials : Fundamentals, Applications and Developments / P. Schaaf. – Springer Berlin, Heidelberg, 2010. – 234 p.

Навчальне видання

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання практичних і лабораторних робіт
з дисципліни
«Лазерні та комбіновані технології»

для студентів спеціальності «Прикладна механіка»
денної, заочної та дистанційної форм навчання

Укладач ПУПАНЬ Лариса Іванівна

Роботу до видання рекомендував Олександр ШЕЛКОВИЙ

В авторській редакції

План 2023 р., поз. 619.

Підп. до друку 06.11.2023 р. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 3,7.

Видавничий центр НТУ «ХПІ», вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002
Свідоцтво про державну реєстрацію № 5478 від 21.08.2017 р.

Електронна версія