

Котляров В.П.

Технологія лазерної розмірної обробки

**електронний дидактичний демонстраційний
матеріал
супроводження дисципліни**

Відповідальний редактор електронного посібника
доц. Зоренко О.В.

Рекомендовано Методичною радою НТУУ «КПІ» про (протокол
№7 від 27 березня 2014 р.) (свідоцтво НМУ № Е13/14-061)

Київ НТУУ КПІ - 2014

Технологія лазерної розмірної обробки

Презентація 1(лекції 1,2)

електронний дидактичний демонстраційний матеріал
супроводження дисципліни

ММІ, каф. ЛТФТТ, IVкурс VII семестр
(36 годин лекційний курс, 36 годин лабораторних занять, 180 години із СРС)
5 кредитів

Рекомендовано Методичною радою НТУУ «КПІ» про (протокол №__
від __.__._____2014 р.)

Автор: проф. Котляров В.П.

Відповідальний редактор електронного посібника
доц. Зоренко О.В.

Методична характеристика дисципліни

Семестр /код кредитного модуля/	Всього (кредит/годин)	Розподіл годин за видами занять					Кількість МКР	Вид індивід. завданн я	Семестрова атестація
		Лекції	Прак-тичні заняття	Лабораторні роботи	СРС				
					Всього	У тому числі на виконання індив. завд.			
7(ЗП-11)	5/180	36	-	36	108	15	2	РГР	екзамен

Зміст кредитного модуля дисципліни

Мета вивчення дисципліни

През. №1. сл.№7

Вступ: Зміст та завдання курсу

През. №1. сл.№7

Тема 1. Характеристики нетрадиційних методів обробки През. №1. сл.№10

1.1. Порівняння технологічних та техніко-економічних показників,

виявлення переваг та недоліків

лазерної розмірної обробки (ЛРО)

Контрольні запитання та завдання

Бібліографічний опис

Додаток до теми 1: завдання на СРС

През. №1. сл.№11

През. №1. сл.№13

През. №1. сл.№14

През. №1. сл.№15

Тема 2. Фізичні основи ЛРО

През. №1. сл.№16

2.1. Етапи діяння лазерного променя на заготовку

През. №1. сл.№17

2.2. Види впливу опромінення на матеріал заготовки

През. №1. сл.№19

2.3. Шляхи керування результатами лазерного опромінення

През. №1. сл.№21

Контрольні запитання та завдання

През. №1. сл.№24

Бібліографічний опис

През. №1. сл.№26

Додаток до теми 2: завдання на СРС

През. №1. сл.№27

Тема 3. Умови та алгоритм проектування технологічної операції ЛРО

През. №2. сл.№2

3.1. Обставини та умови проектування

През. №2. сл.№3

3.1. Алгоритм проектування технологічної операції ЛРО

През. №2. сл.№4

Контрольні запитання та завдання

През. №2. сл.№8

Бібліографічний опис

През. №2. сл.№10

Додаток до теми 3: завдання на СРС

През. №2. сл.№11

Зміст кредитного модуля дисципліни (подовження)

Тема 4. Технологічні схеми обробки порожнин (отворів, лунок, щілин, пазів) різноманітної форми та розмірів

4.1. Методи управління формою попереку порожнини

4.2. Формування та перетворення каустики
пучка випромінювання як інструменту

4.3. Схеми формоутворення глибоких отворів
із попереком простої форми

4.4. Схеми обробки точних та отворів
складного профілю

4.5. Методи управління повздовжньою формою порожнини

Контрольні запитання та завдання

Бібліографічний опис

Додаток до теми 4: завдання на СРС

През. №2. сл.№13

През. №2. сл.№14

През. №2. сл.№18

През. №3. сл.№2

През. №3. сл.№10

През. №3. сл.№21

През. №3. сл.№26

През. №3. сл.№29

През. №3. сл.№30

Тема 5. Методи визначення режиму лазерної обробки порожнини

5.1. Прогнозування результатів обробки
за аналітичними моделями

5.2. Проектування режимів ЛРО за аналітичними моделями

5.3. Дослідження та моделювання операцій ЛРО
експериментальними методами

5.4. Проектування режимів ЛРО. Одно критеріальні задачі

5.5. Проектування режимів ЛРО. Багато критеріальні задачі

Контрольні запитання та завдання

Бібліографічний опис

Додаток до теми 5: завдання на СРС

През. №4. сл.№1

През. №4. сл.№4

През. №4. сл.№12

През. №5. сл.№2

През. №5. сл.№17

През. №8. сл.№2

През. №8. сл.№17

През. №8. сл.№24

През. №8. сл.№25

Лекція 1

Мета вивчення дисципліни

През. №1. сл.№6

Вступ: Зміст та завдання курсу

През. №1. сл.№7

Мета вивчення дисципліни

Метою вивчення цієї дисципліни є:

- надбання знань та умінь аналізу змісту Технічного завдання (ТЗ) на проектування технологічної операції з результатом аргументованого визначення:
 - ефективного методу формоутворення порожнини (отвору);
 - оптимальної технологічної схеми обробки;
 - відповідного методу проектування режимів ЛРО;
- використання надбаних знань та умінь для:
 - реалізації обраної методики проектування режимів ЛРО;
 - постановки та виконання серії експериментальних досліджень з метою оптимізації процесу обробки або його моделювання;
 - виміру та визначення чисельних характеристик розмірних та якісних показників результатів натурних досліджень з метою оцінки виконання передумов застосування обраного експериментального методу;
 - статистичного аналізу експериментальних даних та оцінювання достовірності кінцевих результатів;
 - формулювання змісту, завдання та порядку рішення оптимізації режимів обробки за умови виконання вимог ТЗ в повному обсязі або з виключенням критичних (критичного) показників технологічної операції.

Пізнавальна база дисципліни

Дисципліна “Технологія лазерної розмірної обробки” базується на знаннях та уміннях, які отримано студентами у дисциплінах:

- “Фізика лазерів” (код ЗП-03 , обсяг кредитів 7,5 ECTS);
- “Фізика взаємодії концентрованих потоків енергії з речовиною” (код ЗП-04 , обсяг кредитів 8,5 ECTS);
- “Основи наукових досліджень та технічна творчість” (код ЗП-06 , обсяг кредитів 3 ECTS).

Дисципліна “Технологія лазерної розмірної обробки” є основою для вивчення дисциплін:

- “Лазерна розмірна обробка” (код ЗП-07, обсяг кредитів 4 ECTS);
- “Лазерне технологічне обладнання” (код ВП-08, обсяг кредитів 4,5 ECTS)
- «Оптимізація технологічних об’єктів та систем» (код ВП-04, обсяг кредитів 3 ECTS)

Розподіл навчального часу за темами

Найменування розділів, тем	Розподіл по семестру та за видами занять (год)				Найменування розділів, тем	Розподіл по семестру та за видами занять (год)			
	Всього	Лекції	Лабор. роб.	СРС		Всього	Лекції	Лабор. роб.	СРС
1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Вступ	1	1	-	-	4.3. Схеми формоутворення глибоких отворів з малим попереком	4	1	-	3
Тема 1 Характеристики нетрадиційних методів розмірної обробки.	3	1	-	2	4.4. Схеми обробки точних та отворів складного профілю	3	1	-	2
Тема 2. Фізичні основи лазерної розмірної обробки. Етапи руйнування матеріалу	6	4	-	2	4.5. Методи управління повздожнього формою порожнини	2	1	-	1
заготовки пучком лазерного випромінювання					Тема 5. Методи визначення режиму лазерної обробки порожнини	95	20	36	39
Тема 3. Умови та алгоритм проектування технологічної операції ЛРО	8	4	-	4	5.1. Прогнозування результатів обробки за аналітичними моделями	23	2	10	11
3.1. Обставини та умови проектування	2	1	-	1	5.2. Проектування режимів ЛРО за аналітичними моделями	2	2	-	-
3.2. Алгоритм проектування гехнологічної операції ЛРО	6	3	-	3	5.3. Дослідження та моделювання операцій ЛРО	10	6	-	4
Тема 4. Технологічні схеми обробки порожнин (отворів, щілин, пазів) різноманітної форми та розмірів.	16	6	-	10	5.4. Проектування режимів ЛРО. Одно критеріальні задачі	41	4	26	11
4.1. Методи управління формою попереку порожнини	2	1	-	1	5.5. Проектування режимів ЛРО. Багато критеріальні задачі	19	6	-	13
4.2. Формування та перетворення каустики пучка випромінювання	5	2	-	3	РГР	15	-	-	15
					Екзамен	36	-	-	36

Лекція 1 (подовження)

Тема 1. Характеристики нетрадиційних методів обробки

1.1. Порівняння технологічних та техніко-економічних показників, виявлення переваг та недоліків лазерної розмірної обробки (ЛРО)
През. №1. сл.№10, 11

Контрольні запитання та завдання
Бібліографічний опис

През. №1. сл.№12
През. №1. сл.№13

Тема 1. Характеристики нетрадиційних методів обробки [1], [2], [5]

1.1. Технологічні показники

№	Характеристика методу	ЕЕО	ЕХРО	ФХО	УЗО	ЕО	ЛРО
1	Матеріал заготовки	Електропровідний	Електропровідний	Хімічно-активний	Крихкий	Любий	<u>Любий</u>
2	Поперечний розмір порожнини, мм	0,009÷20	0,05÷100	0,025÷25,4	0,076÷100	0,025÷1,27	0,04÷1,27
	мінімальний	0,009	0,05	0,025	0,076	0,025	<u>0,0003</u>
	максимальний	20	100	25,4	100	1,27	1,27
	середній (практично)	6,35*	76,2*	2,54*	8,46*	1,0*	0,8*
3	Глибина, мм (практична)	3,18	127	1,59	1,59	2,54	5,1
	гранична	63,5	914	7,62	25,4	7,62	17,8
4	Відношення глибини до поперечного розміру: (типове)	10:1	16:1	2:1	2,5:1	6:1	16:1
	максимальне	20:1	300:1	5:1	10:1	100:1	<u>100:1</u>
5	Кількість одночасно оброблювальних порожнин	200	100	безмежна	10	1	20
6	Лінійна швидкість обробки мм/с	0,76	1,5	0,25	0,05-25,4	15	<u>1000</u>
7	Точність поперечного розміру, мм (%)	±0,013	±0,05	±0,025	±0,025	5÷10%	5÷20%
8	Шорсткість поверхні порожнини R_z, мкм	1,6÷3,2	0,25÷3,2	0,8÷3,2	0,4÷0,8	0,8÷6,3	0,8÷6,3
9	Продуктивність, шт. порожнин./с	—	—	—	0,5	5000	1000

* шляхом одночасного руйнування поперечного перетину порожнини (без трепанації)

Тема 1. Характеристики нетрадиційних методів обробки [1], [2], [5]

1.2. Техніко-економічні показники

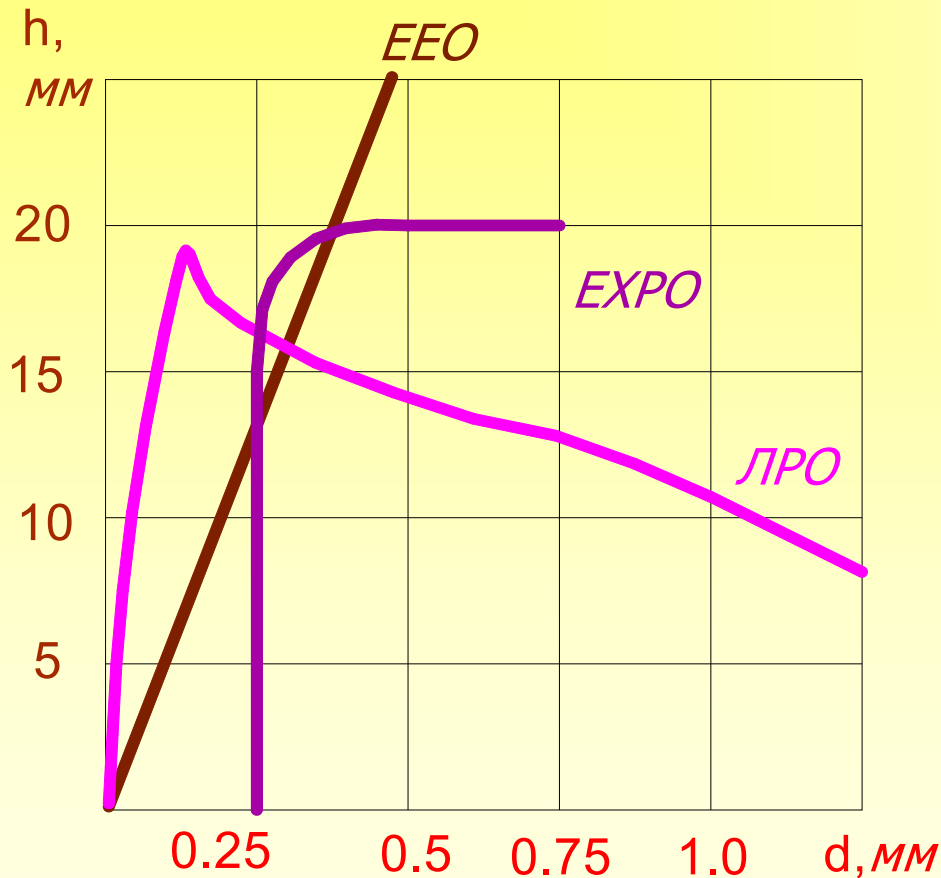


Рис.1.1. Можливості методів обробки порожнин різних розмірів (h - глибина, d - поперечний розмір)

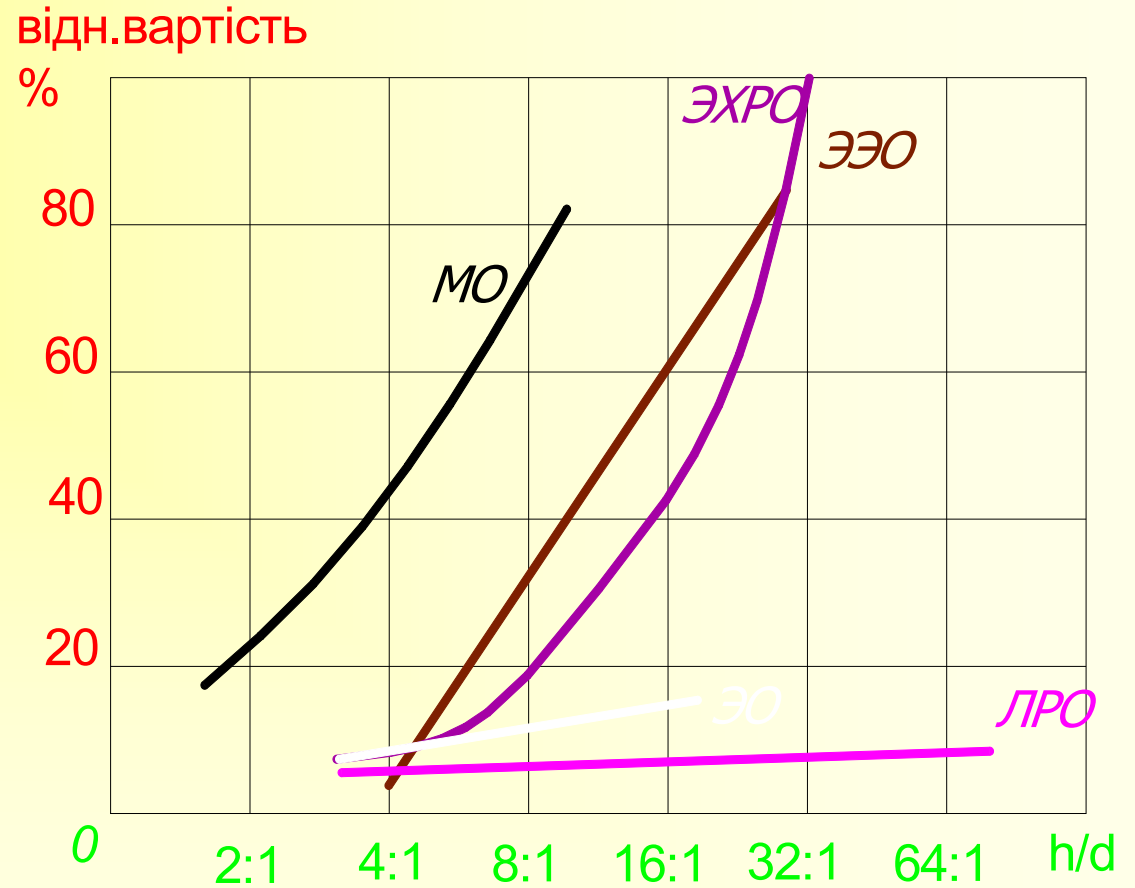


Рис.1.2. Вплив відносної глибини порожнини (h/d) на собівартість технологічної операції

Тема 1. Характеристики нетрадиційних методів обробки

Контрольні запитання та завдання

- 1.1. Сформулюйте мету вивчення дисципліни, які базові дисципліни потрібні для успішного її оволодіння та які дисципліни потребують надбаних знань та умінь.
- 1.2. Які особливості складових технічного завдання ставлять механічну обробку не конкурентною апріорі порівняно з не традиційними методами?
- 1.2. Якою загальною перевагою володіють лазерна та обробка електронним променем?
- 1.3. Перерахуйте переваги і недоліки, які властиві ЛРО.
- 1.4. Для яких нетрадиційних методів обробки собівартість технологічної операції майже не залежить від глибини порожнини?
- 1.5. Який із наведених методів обробки може апріорі ефективно застосовуватися для формування крізної порожнини з квадратним перетином розміром $0,05 \times 0,05$ мм в заготівці із кераміки товщиною 2 мм.

Бібліографічний опис до Теми 1

Література:

Основна:

1. Котляров В.П. Технологія лазерної обробки (операції розмірної обробки). Ніжин: НДУ ім. М. Гоголя, - 2010. – 308с. стор. 8-11;
5. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов. Учеб. пособие. В 2-х томах. Т. 1, 2. // Б.А.Артамонов, Ю.С.Волков, В.П.Смоленцев и др. Под ред. В.П.Смоленцева.- М: Высшая школа, 1983.

Додаткова:

1. Вейко В.П. Лазерная микрообработка. - Санкт-Петербург: ГУ ИТМО, 2005. – 110с., стор. 15-18.

Додаток до Теми 1: завдання на СРС

Кількісні досягнення відносно розмірних, якісних та економічних показників **конкурентних методів**. Навести ті, з яких **лазерна розмірна обробка** перевершує досягнення інших методів. Які **практичні технологічні задачі обробки отворів** вирішуються з меншими витратами (економічними та технічними) з використанням нетрадиційних методів обробки. Вибрати **найбільш ефективний метод формування** системи з чотирьох отворів діаметром 0,1мм, які розташовано у кутах квадрату із стороною 0,5мм. Заготовка – листовий матеріал із конструкційної кераміки 22ХС товщиною 0,5мм. Обґрунтувати зроблений вибір шляхом аналізу можливостей кожного з методів в умовах поставленого завдання.

Лекція 2

Тема 2. Фізичні основи ЛРО

- 2.1. Етапи діяння лазерного променя на заготовку През. №1. сл.№15
- 2.2. Види впливу опромінення на матеріал заготовки През. №1. сл.№18
- 2.3. Шляхи керування результатами лазерного опромінення През. №1. сл.№19
- Контрольні запитання та завдання През. №1. сл.№22
- Бібліографічний опис През. №1. сл.№24

Тема 2. Фізичні основи ЛРО

2.1. Етапи діяння лазерного променя на заготовку

Явища при діянні пучка випромінювання на заготовку із метала



Рис. 2.1. Етапи діяння лазерного випромінювання на металеву заготовку.

Тема 2. Фізичні основи ЛРО

2.1. Етапи діяння лазерного променя на заготовку

- Поглинання та перетворення енергії лазерного випромінювання
 - баланс енергії в зоні опромінення:

$$E = E_{\text{від}} + E_{\text{погл}} = E(R_1 + R_2) + E_{\text{погл}} = ER + EA$$

- закон Бугера-Ламберта:

$$I_{p_z} = I_{p_0} (1 - R)e^{-\alpha z}$$

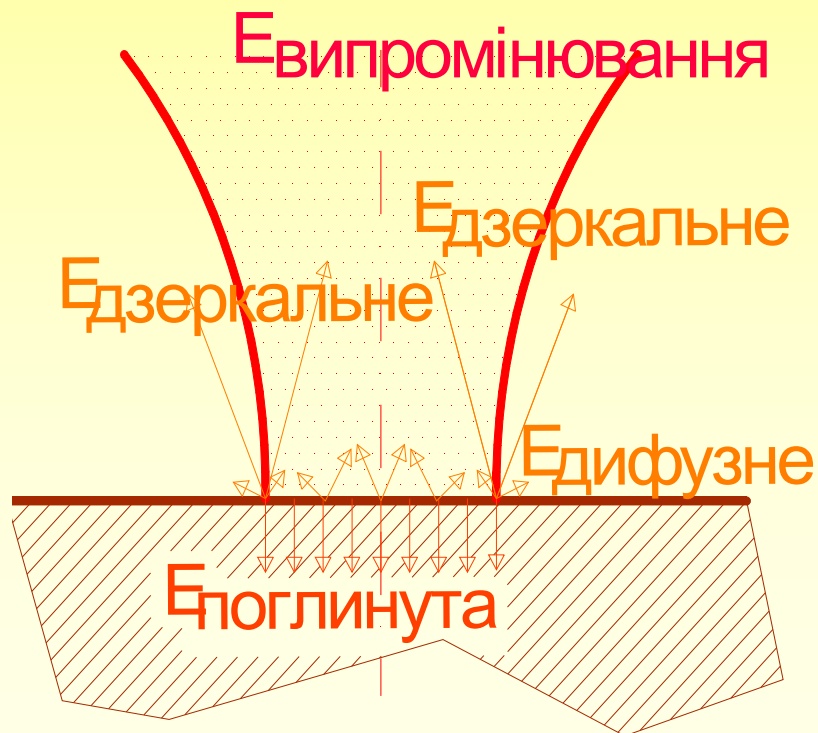


Рис.2.2. Схема опромінення

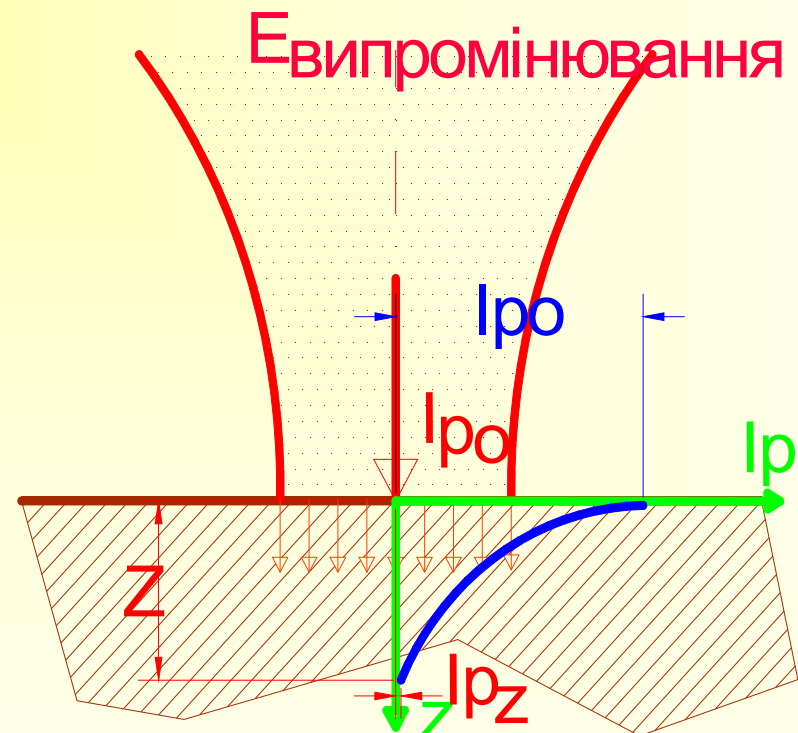
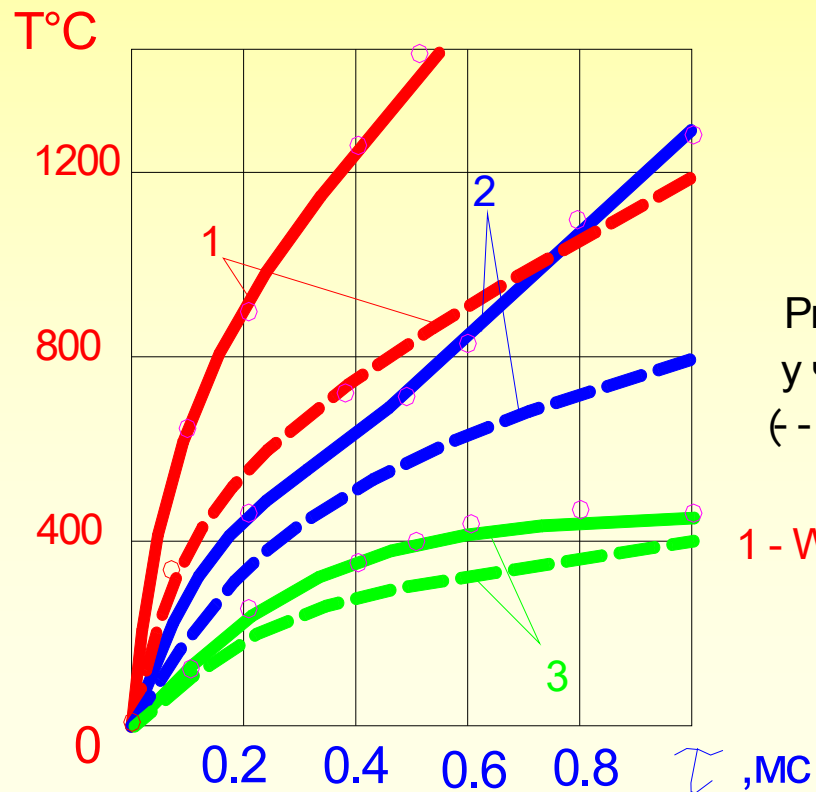


Рис.2.3. Схема поглинання

- керування рівнем поглинання енергії випромінювання

Таблиця 2.1

λ , мкм	Au	Cu	Mo	Ag	Al	Cr	Fe	Ni
0,488	0,415	0,437	0,445	0,952	0,85	—	—	0,597
0,694	0,93	0,831	0,498	0,961	0,82	0,555	0,575	0,676
1,06	0,981	0,901	0,582	0,964	0,733	0,57	0,65	0,741
10,6	0,975	0,984	0,945	0,989	0,97	0,93	—	0,941



$$\Delta A_1 = V_A (T_1 - T_0),$$

Рис.2.4. Змінення температури поверхні заготовки у часі нагрівання для трьох режимів опромінення (--- розрахунок, без врахування температурної залежності A ; — експериментальні дані)

1 - $W_p \sim 10^7 \text{ Вт/см}^2$; 2 - $W_p \sim 10^5 \text{ Вт/см}^2$; 3 - $W_p \sim 10^4 \text{ Вт/см}^2$

Тема 2. Фізичні основи ЛРО

2.2. Види впливу лазерного опромінення на матеріал заготовки

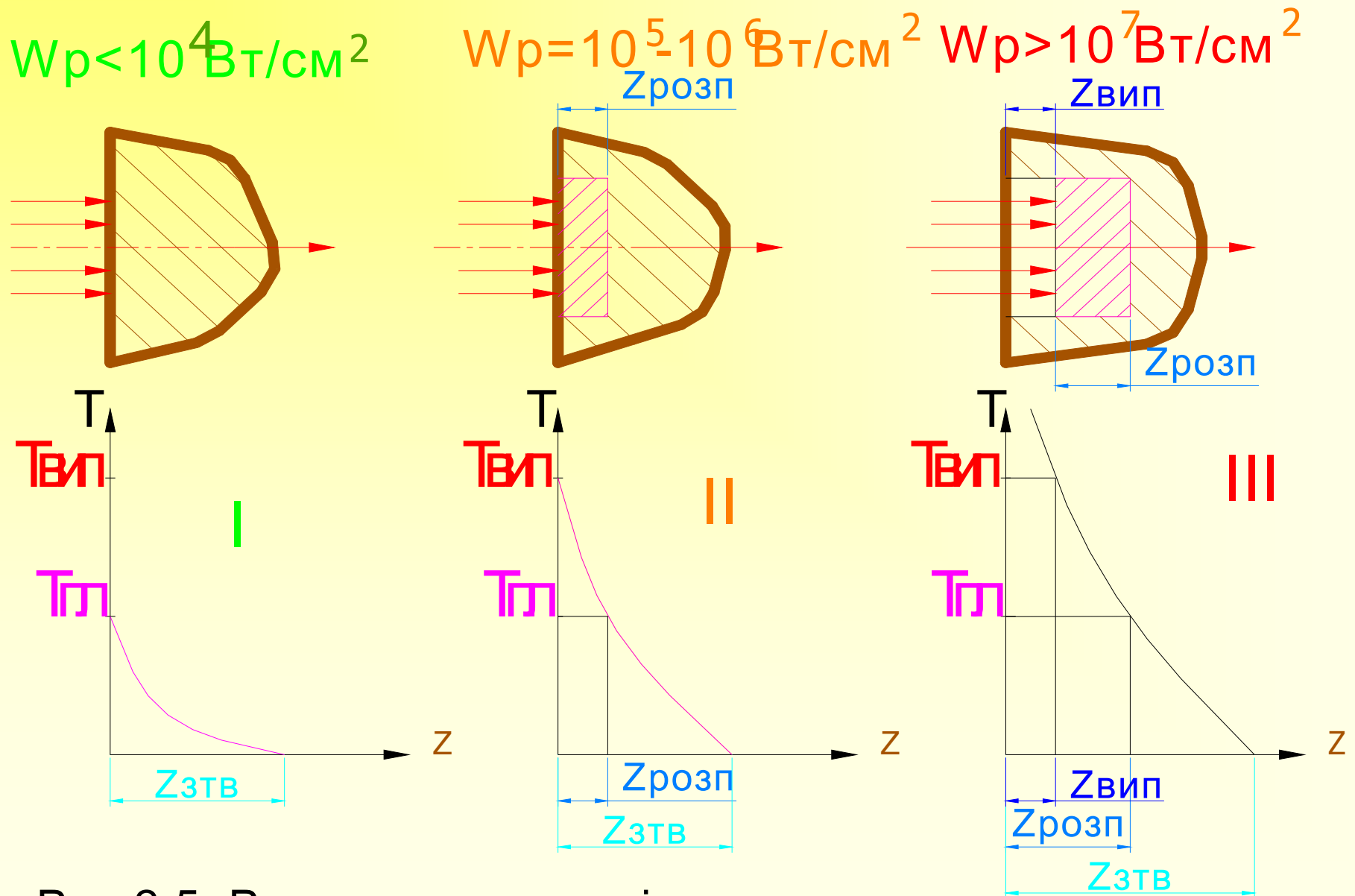


Рис.2.5. Результати опромінення заготовки

Тема 2. Фізичні основи ЛРО

2.3. Шляхи керування результатами лазерного опромінення

1. Параметри пучка випромінювання:

- енергетичні: імпульсна енергія E , Дж, потужність P , Вт;

- часові:

– тривалість імпульсу $t = \tau$, с (імпульсне опромінення)

– тривалість опромінення $t = d_0 / V$ рухомим із швидкістю V пучком $\varnothing d_0$;

- просторові:

– кут розбіжності θ , радіан $d_0 \approx F\theta + \Delta FD / F$

– діаметр пучка випромінювання D , см

– розподіл потужності у попереку пучка випромінювання;

- комплексні:

– діаметр пучка на поверхні заготовки d_0

– інтенсивність випромінювання в пучку $I_p = P / S_0 = E / \tau S_0$, Вт/см²

– густина потужності (енергії в зоні опромінення): $W_p \approx AI_p = AP / S_0$ ($W_E \approx AE / S_0$), Вт/см²

Тема 2. Фізичні основи ЛРО

2.3. Шляхи керування результатами лазерного опромінення (подовження)

2. Параметри заготовки:

- оптичні властивості поверхні: A
 - (шорсткість $R_z (R_a)$, мкм, нахил, температура)
- властивості матеріалу:
 - оптичні α та A (для довжини хвилі обраного лазера λ , мкм) (табл.2.1)
 - теплофізичні (c (Дж/кг.град), k (Вт/см.град), a (см²/с) ($a = k / c\rho$), $L_{пл}$, L_v (Дж/кг), $T_{пл}$, T_v (°К, °С)

Тема 2. Фізичні основи ЛРО

2.3. Шляхи керування результатами лазерного опромінення (подовження)

3. Режим опромінення

3.1. Пічковий (імпульсний) режим опромінення:

- імпульси подаються з перервами;
- продукти лазерної ерозії мають можливість покинути зону обробки, не заважаючи опроміненню;
- допускається високий рівень інтенсивності на поверхні руйнування без лякання екранування пучка випромінювання плазмою ерозійного факелу;
- локалізується теплова зона, що підвищує якість результатів та ефективність використання лазерної енергії;

3.2. Безперервний режим опромінення:

- складові ерозійного факелу рухаються з високою швидкістю назустріч променю, що ускладнює доставку енергії до дна лунки (пазу);
- потрібно обмежувати інтенсивність опромінювання для виключення можливості формування високо іонізованої плазми в ерозійному факелі, яка поглинає енергію випромінювання, що заважає обробці та змінює результати обробки;
- безперервний ввід енергії в зону обробки перегріває матеріал навколо елемента, що формується (отвір, лунка, тощо) і створює зону термічного впливу, що надає неочікуємі властивості матеріалу заготовки, та впливає на якість та розмір елемента.

Контрольні запитання та завдання

- 2.1. Запишіть рівняння для визначення ККД процесу поглинання енергії випромінювання поверхнею заготовки в енергетичних показниках та в коефіцієнтах A та R .
- 2.2. Від чого залежить глибина проникнення випромінювання в матеріал заготовки та яким коефіцієнтом вона визначається?
- 2.3. Який механізм перетворення енергії електромагнітного поля в теплову в електропровідних матеріалах (наприклад, металах та сплавах)?
- 2.4. Якими незалежними параметрами пучка випромінювання визначається темп вводу енергії в заготовку?
- 2.5. На яку комплексну характеристику процесу обробки пучком лазерного випромінювання оказують дію умови опромінювання?
- 2.6. Які властивості матеріалу заготовки відповідають за формування в ній теплового потоку при лазерному опромінюванні та на результат останнього?

Контрольні запитання та завдання (подовження)

- 2.7. Яким чином можна впливати на ККД етапу поглинання енергії випромінювання поверхнею заготовки?
- 2.8. Які варіанти дії пучка випромінювання на матеріал заготовки можна створити, змінюючи інтенсивність опромінення в зоні обробки, і при яких її рівнях (для металів)?
- 2.9. Які варіанти дії пучка випромінювання на матеріал заготовки можна використати в технологічних операціях лазерної розмірної обробки і за яких умов?
- 2.10. Які особливості руйнування матеріалу заготовки з безперервним режимом опромінення і що обмежує рівень інтенсивності в зоні обробки?
- 2.11. Що є чинником в імпульсному режимі опромінення, який дозволяє не обмежувати інтенсивність вводу енергії в зону обробки?
- 2.12. Чим визначається товщина шару матеріалу біля стінок порожнини із зміненою структурою?

Бібліографічний опис до Теми 2

Основна:

1. Котляров В.П. Технологія лазерної обробки (операції розмірної обробки). Ніжин: НДУ ім. М. Гоголя, - 2010. – 308с. стор. 12-22.
2. Справочник по технологии лазерной обработки / В.С.Коваленко, В.П.Котляров, В.П.Дятел и др. Киев.: Техніка, - 1985. с 167. стор. 35.

Додаткова:

1. Вейко В.П. Лазерная микрообработка. - Санкт-Петербург: ГУ ИТМО, 2005. – 110с., стор. 15.
2. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюра Н.И. Технологические процессы лазерной обработки. – М: МГТУ им. Баумана, 2008. – 664с. с. 50-62.

Додаток до теми 2: завдання на СРС

1. Навести незалежні та комплексні параметри пучка випромінювання та зв'язок між ними. Які теплофізичні властивості матеріалу заготовки впливають на характер та результати діяння променя на заготовку. Визначити засоби параметричного керування пучком випромінювання.
2. Навести етапи взаємодії, які характерні для високих рівнів інтенсивності (більше, ніж 10^6 Вт/см²). Відбиття та поглинання променевої енергії поверхнею заготовки. Чим визначається рівень коефіцієнту поглинання? Закон поглинання Бугера: об'ємний та поверхневий характер поглинання та зв'язаний з цим вид руйнування матеріалу за рахунок його перегріву.
3. Які з трьох видів нагріву матеріалу пучком лазерного випромінювання можна використовувати для розмірного формоутворення?
4. Вибрати та обґрунтувати тип лазера, випромінювання якого може бути ефективно використано для якісної обробки отворів $\varnothing 0,05$ мм глибиною 1мм в заготовці з конструкційної кераміки 22ХС. На внутрішній поверхні отвору не допускається шар застиглої розплаву. Порівняння провести з використанням рівнів нормованого коефіцієнту поглинання B (для кераміки: $k = 0,09$ кал/(см.с.град), $c_p = 0,37$ кал/(г.град), $T_u = 3500^\circ\text{C}$, $L_u = 2,6 \cdot 10^3$ кал/г, $\alpha_\lambda = 1,06 = 30\text{см}^{-1}$, $\alpha_\lambda = 10,6 = 10^4\text{см}^{-1}$).