

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ**  
**«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ**  
**ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**  
**Механіко-машинобудівний інститут**  
**Кафедра Лазерної техніки та фізико-технічних технологій**

**Фізика взаємодії**  
**концентрованих потоків енергії з речовиною**

Методичні вказівки до практичних занять  
для студентів спеціалізації  
«Лазерна техніка та комп'ютеризовані процеси фізико-технічної обробки»  
спеціальності 131 Прикладна механіка

*Рекомендовано вченою радою Механіко-машинобудівного інституту НТУУ  
«КПІ ім. І.Сікорського»*

Київ  
НТУУ «КПІ ім. І.Сікорського»  
2017

Фізика взаємодії концентрованих потоків енергії з речовиною: Методичні вказівки до практичних занять для студентів спеціалізації «Лазерна техніка та комп'ютеризовані процеси фізико-технічної обробки» спеціальності 131 Прикладна механіка / Уклад. В.В. Романенко, О.С. Козирєв, – К.: НТУУ «КПІ», 2017. – 28 с.

*Гриф надано вченою радою  
ВПІ НТУУ «КПІ»  
(протокол №\_\_ від \_\_\_\_\_ р.)*

*Ухвалено на засіданні кафедри графіки ВПІ НТУУ «КПІ»  
(протокол №\_\_ від \_\_\_\_\_ р.)*

**Фізика взаємодії  
концентрованих потоків енергії з речовиною**

**Методичні вказівки до практичних занять  
для студентів спеціалізації  
«Лазерна техніка та комп'ютеризовані процеси фізико-технічної обробки»  
спеціальності 131 Прикладна механіка**

Укладачі	Романенко В.В., к.т.н., доц. Козирєв О.С., ст. викл.
Відповідальний редактор	Котляров В.П., д.т.н., проф.
Рецензент	Малафєєв Ю.М. , к.т.н., доц.

## Зміст

Вступ.....	2
Тема №1. Властивості лазерного випромінювання.....	3
Тема №2. Фокусування лазерного випромінювання.....	5
Тема №3. Поглинання випромінювання металами та напівпровідниками.....	7
Тема №4. Нагрівання лазерним випромінюванням. Одномірна модель. Просторова модель. Тонка пластина.....	10
Тема №5. Нагрівання лазерним випромінюванням. Критична густина потужності.....	13
Тема №6. Рухоме лазерне джерело, швидко рухоме лазерне джерело.....	15
Тема №7. Плавлення металів під дією лазерного випромінювання.....	17
Тема №8. Тепловий механізм руйнування.....	18
Тема №9. Феноменологічна модель процесу руйнування.....	20
Тема №10. Лазерне різання металів безперервним випромінюванням.....	22
Тема №11. Лазерне різання металів імпульсно-періодичним випромінюванням.....	25
Тема №12. Вплив параметрів випромінювання на розмірні характеристики різку.....	26

## **Вступ**

Навчальна дисципліна «Фізика взаємодії концентрованих потоків енергії з речовиною» належить до циклу дисциплін професійної та практичної підготовки. Навчальна дисципліна є базовою для професійних курсів, таких, як «Технологія лазерної розмірної обробки», «Технологія лазерної поверхневої обробки», «Лазерне технологічне обладнання», «Спеціальні елементи та оснащення лазерних технологічних комплексів».

Основні завдання циклу практичних занять: засвоєння конкретних питань, отримання навичок та умінь у фізичних та інженерних розрахунках. Метою проведення практичних занять є закріплення теоретичних знань та основних теоретичних принципів взаємодії лазерного випромінювання з речовиною та використання набутих практичних навичок у вивченні практичних курсів спеціалізації «Лазерна техніка та комп'ютеризовані процеси фізико-технічної обробки». Крім того, матеріали методичних вказівок можуть бути використані при дипломному проектуванні.

## Тема №1. Властивості лазерного випромінювання

### Короткі теоретичні відомості

Основними властивостями, які відрізняють лазерне випромінювання від випромінювання звичайних світлових джерел, є:

- Інтенсивність - кількість енергії, що знімається з одиниці площі за одиницю часу. Її не потрібно плутати з густиною потужності,  $W_p = \frac{P}{S}$ , яка, хоча і має таку саму одиницю виміру, Вт/см<sup>2</sup>, але, на відміну від інтенсивності, є характеристикою не випромінювання, а джерела теплоти
- Спрямованість, характеризується кутом розбіжності  $\Theta$
- Монохроматичність, характеризується показником монохроматичності  $\Delta\nu/\nu$ , тобто відношенням коливань частоти електромагнітної хвилі до робочої частоти
- Когерентність - властивість хвилі зберігати свої частотні, поляризаційні та фазові характеристики протягом часу (часова когерентність) та/або протягом відстані (просторова когерентність)

Параметри лазерного випромінювання поділяють на

- Часові: тривалість імпульсу  $\tau$ , частота імпульсів  $f$
- Енергетичні: енергія імпульсу  $E$ , потужність випромінювання  $P$ , середня потужність  $\bar{p}$
- Просторові: характеризують розподіл інтенсивності за перерізом лазерного променя. Інтенсивність в основній моді TEM<sub>00</sub>, як і в деяких багатомодових променях, описується розподілом Гауса:

$$I(r) = I_0 \exp\left(-\frac{r^2}{r_0^2}\right) \quad (1.1)$$

де  $I_0$  – максимальна інтенсивність в центрі променя,  $r_0$  – т.зв. ефективний, або гаусівський радіус, на якому інтенсивність зменшується в  $e$  разів у порівнянні з максимальною в центрі.

### Задача 1.

Довжина хвилі неодимового лазеру  $\lambda = 1.064 \pm 0.001$  мкм. Знайти показник монохроматичності  $\frac{\Delta\nu}{\nu}$

### Рішення:

Беручи до уваги, що параметри електромагнітної хвилі пов'язані співвідношенням  $c = \nu\lambda$ :

$$\lambda_1 = 1.064 - 0.001 = 1.063 \text{ мкм} \qquad \lambda_1 = 1.063 \cdot 10^{-4} \text{ см}$$

$$\lambda_2 = 1.064 + 0.001 = 1.065 \text{ мкм} \qquad \lambda_2 = 1.065 \cdot 10^{-4} \text{ см}$$

$$\nu_1 = \frac{c}{\lambda_1} = \frac{3 \cdot 10^{10}}{1.063 \cdot 10^{-4}} = 2.822 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$$

$$\nu_2 = \frac{c}{\lambda_2} = \frac{3 \cdot 10^{10}}{1.065 \cdot 10^{-4}} = 2.817 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$$

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^{10}}{1.064 \cdot 10^{-4}} = 2.8195 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$$

$$\Delta\nu = \nu_2 - \nu_1 = 5 \cdot 10^{11} \text{ Гц}$$

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{5 \cdot 10^{11}}{2.8195 \cdot 10^{14}} = 1.77 \cdot 10^{-3}$$

### Задача 2.

Інтенсивність випромінювання на відстані гаусівського радіусу складає  $10^3 \text{ Вт/см}^2$ . Знайти максимальну інтенсивність.

### Рішення:

$$I(r) = I_0 \exp\left(-\frac{r^2}{r_0^2}\right)$$

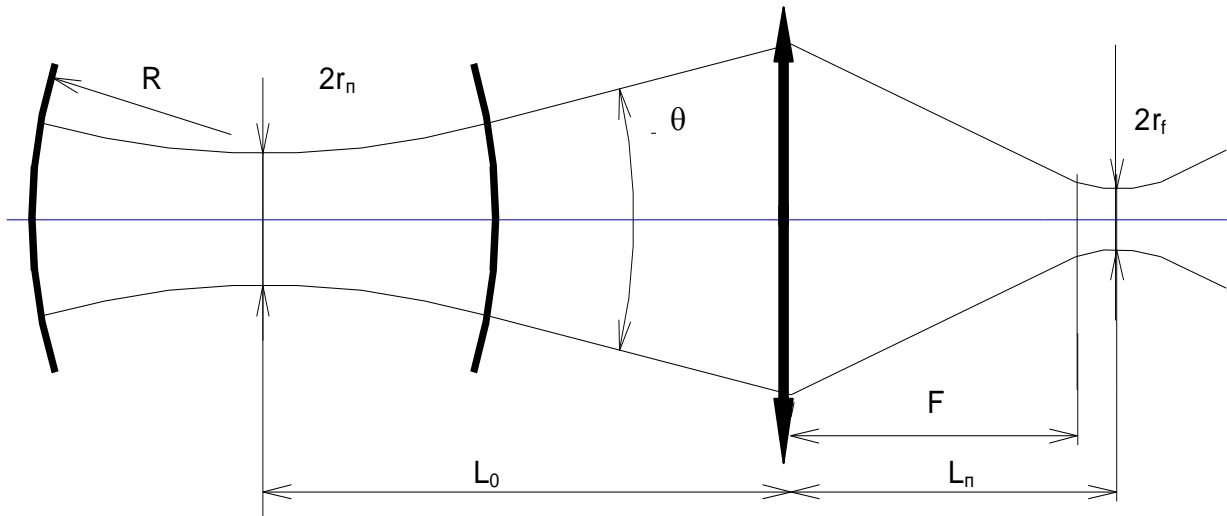
$$I(r_0) = I_0 \exp(-1) = \frac{I_0}{e}$$

$$I_0 = I(r_0)e = 2.71 \cdot 10^3 \text{ Вт/см}^2$$

## Тема №2. Фокусування лазерного випромінювання

### Короткі теоретичні відомості

Узагальнена схема фокусування лазерного випромінювання має вигляд:



Хід променів, які виходять з сферичного конфокального резонатора та фокусуються тонкою лінзою, можна описати, як

$$\frac{1}{r_f^2} = \frac{1}{r_n^2} \left( 1 - \frac{L_n}{F} \right)^2 + \frac{1}{(F\theta)^2} \quad (2.1)$$

Зважаючи на те, що, через малий кут розбіжності,  $L_n \approx F$ , можна записати:

$$r_f = F\theta. \quad (2.2)$$

Присутність сферичної аберації призводить до того, що розміри сфокусованого променя, розраховані за (2.2), збільшуються на величину

$$\delta_{сф.аб.} = K \frac{r_n^2}{F^2} \quad (2.3)$$

де  $K$  – коефіцієнт, який залежить від форми та матеріалу лінзи.

### Задача 3.

Знайдіть значення сферичної аберації лінзи з **КСІ** ( $K=0,235$ ) фокусною відстанню 100 мм. Лінза розташована на відстані 1 метр від вихідного дзеркала резонатора. Діаметр променя на вихідному дзеркалі 10 мм. Половинний кут розбіжності 5 мрад.

$$\delta_{сф.аб.} = K \frac{r_n^2}{F^2}$$

$$r_n = \frac{d}{2} + \theta L = 0.5 + 5 \cdot 10^{-3} \cdot 100 = 1 \text{ см.}$$

$$\delta_{сф.аб.} = 0.235/100 = 2.35 \cdot 10^{-3} \text{ см.}$$

#### Задача 4.

Знайдіть значення сферичної аберації лінзи з **ZnSe** ( $K=0,0312$ ) фокусною відстанню 100 мм. Лінза розташована на відстані 1 метр від вихідного дзеркала резонатора. Діаметр променя на вихідному дзеркалі 12 мм. Половинний кут розбіжності 4 мрад.

#### Рішення:

$$\delta_{\text{сф.аб.}} = K \frac{r_l^2}{F^2}$$

$$r_l = \frac{d}{2} + \Theta L = 0.6 + 4 \cdot 10^{-3} \cdot 100 = 1 \text{ см.}$$

$$\delta_{\text{сф.аб.}} = 0.0312 / 100 = 3.12 \cdot 10^{-4} \text{ см.}$$

#### Задача 5.

Знайдіть значення сферичної аберації лінзи з **KCl** ( $K=0,235$ ) фокусною відстанню 250 мм. Лінза розташована на відстані 1.5 метри від вихідного дзеркала резонатора. Діаметр променя на вихідному дзеркалі 20 мм. Половинний кут розбіжності 5 мрад.

#### Рішення:

$$\delta_{\text{сф.аб.}} = K \frac{r_l^2}{F^2}$$

$$r_l = \frac{d}{2} + \Theta L = 1 + 5 \cdot 10^{-3} \cdot 150 = 1.75 \text{ см.}$$

$$\delta_{\text{сф.аб.}} = 0.235 \cdot 1.75^2 / 25^2 = 1.15 \cdot 10^{-3} \text{ см.}$$



## **Тема №3. Поглинання випромінювання металами та напівпровідниками**

### **Короткі теоретичні відомості**

Для визначення оптичних характеристик металу можна не враховувати складної структури атомів, а обмежитися класичною моделлю Лоренца. У моделі Лоренца атом уявляється системою, що складається з атомного ядра, оточеного хмарою внутрішніх електронів, і зовнішнього (оптичного) електрона, пов'язаного з ядром атома менш жорстко, здатного під дією зовнішньої електромагнітної хвилі зміщуватися відносно центру атома (модель гармонійного осцилятора). Такий електрон називається вільним.

Відповідно до моделі вільних електронів світловий потік, за вирахуванням відбитої частини, повністю поглинається при взаємодії з електронами провідності в тонкому поверхневому шарі (т.зв. скін-шар  $10^{-5}..10^{-4}$  см. завтовшки).

Поглинання світла призводить до підвищення енергії електронів. Частина поглиненої енергії електрони передають решітці, однак ефективність передачі не велика внаслідок великої різниці мас електронів та іонів. Тому електронний газ значно перегрівається в порівнянні з кристалічною решіткою.

Підсистеми електронний газ та решітка в металі взаємодіють слабо. Частота релаксації для електронного газу і іонів і відповідно істотно більше частоти релаксації для обміну енергією між ними:

$$v_{ee} \gg v_{ef} \quad (3.1)$$

$$v_{ii} \gg v_{ei} \quad (3.2)$$

Виконання умови (3.1) означає швидкий перерозподіл поглиненої лазерної енергії між електронами провідності. Умова (3.2) - енергія, що передається решітці електронами, швидко перерозподіляється між іонами.

Частота електрон-фотонної релаксації:

$$\nu_{ef} = \frac{AW_{ps}}{h\nu n'}$$

де  $A$  - коефіцієнт поглинання;  $W_{ps}$  - густина потужності на поверхні;  $h\nu$  - енергія кванта,  $n'$  - число електронів, які поглинули випромінювання ( $\text{см}^{-3}$ ),  $n' \approx nh\nu/\varepsilon_F$ , де  $n \approx 5 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$  - концентрація електронів провідності,  $\varepsilon_F$  - енергія Фермі,  $\varepsilon_F = \frac{(3\pi^2)^{1/3} \hbar n^{2/3}}{8\pi^2 m_e}$ .

Частота електрон-електронної релаксації:

$$\nu_{ee} = V_f \sigma_{ee} n \left( \frac{kT_e}{\varepsilon_f} \right)^2$$

де  $n$  - число електронів провідності всередині поверхні Фермі;  $V_f$  - швидкість електронів на поверхні Фермі;  $\sigma_{ee}$  - резерфордівський перетин взаємодії електрон-електрон  $\approx 5 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$ ;  $kT_e$  - область розмитості Фермі;  $T_e$  - температура електронного газу;  $\varepsilon_f$  - енергія Фермі.

Частота електрон-іонної релаксації:

$$\nu_{ei} = \frac{\alpha_L}{\rho_i c_i} = \frac{\pi}{30} \cdot \frac{m_e V_f n k S^2}{\rho_i c_i d_0 \varepsilon_f}$$

де  $m_e$  - маса електрона;  $\rho_i c_i$  - об'ємна теплоємність решітки,  $\frac{\text{Дж}}{\text{см}^3 \text{К}}$ ;  $d_0$  - стала решітки;  $\alpha_L$  - коефіцієнт теплообміну між електронами та решіткою  $\approx 10^7 \frac{\text{Вт}}{\text{см}^3 \text{К}}$ ;  $S$  - швидкість звука в металі ( $\approx 10^5 \text{ см/с}$ ).

Частота іон-іонної релаксації:

$$\nu_{ii} = \frac{kY_0 T_i}{d_0 \mu_i S}$$

де  $Y_0$  - параметр Грюнайзена ( $\sim 2$ ),  $\mu_i$  - маса іона.

### Задача 6.

Знайдіть частоту електрон-фотонної релаксації, якщо на метал діє імпульс YAG-лазера з такими параметрами:  $E = 5$  Дж,  $\tau = 1$  мсек,  $\Theta = 2$  мрад. Лінза з  $F = 50$  мм, Коефіцієнт поглинання = 0.5. Кількість електронів, що поглинають  $n' = 10^{22}$  на  $1 \text{ см}^3$

### Рішення:

$$v_{ef} = \frac{AW_{ps}}{h\nu n'}$$

$$AW_{ps} = \frac{AE}{\tau\pi(F\Theta)^2} = \frac{0.5 \cdot 5}{10^{-3} \pi(5 \cdot 2 \cdot 10^{-3})^2} = 8 \cdot 10^4 \text{ Вт/см}^2$$

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^{10}}{1.064 \cdot 10^{-4}} = 2.82 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$$

$$v_{ef} = \frac{AW_{ps}}{h\nu n'} = \frac{8 \cdot 10^4}{6.63 \cdot 10^{-34} \cdot 10^{22}} \approx 10^{16} \text{ Гц}$$

### Задача 7.

Знайдіть частоту електрон-фотонної релаксації, якщо на метал діє імпульс лазера на склі з неодимом з такими параметрами:  $E = 6$  Дж,  $\tau = 5$  мсек,  $\Theta = 4$  мрад. Лінза з  $F = 75$  мм, Коефіцієнт поглинання = 0.5. Кількість електронів, що поглинають  $n' = 10^{22}$  на  $1 \text{ см}^3$ .

### Рішення:

$$v_{ef} = \frac{AW_{ps}}{h\nu n'}$$

$$AW_{ps} = \frac{AE}{\tau\pi(F\Theta)^2} = \frac{0.5 \cdot 6}{5 \cdot 10^{-3} \pi(7.5 \cdot 4 \cdot 10^{-3})^2} = 2 \cdot 10^5 \text{ Вт/см}^2$$

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^{10}}{1.064 \cdot 10^{-4}} = 2.82 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$$

$$v_{ef} = \frac{AW_{ps}}{h\nu n'} = \frac{2 \cdot 10^5}{6.63 \cdot 10^{-34} \cdot 10^{22}} \approx 3 \cdot 10^{16} \text{ Гц}$$

**Тема №4. Нагрівання лазерним випромінюванням. Одномірна модель. Просторова модель. Тонка пластина.**

**Короткі теоретичні відомості**

За умови нерухомості середовища завдання про нагрівання напівбезкінечного тіла має вигляд:

$$\frac{1}{a} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (4.1)$$

Для тіла певної геометричної форми з відомими фізичними властивостями умови однозначності зводяться до завдання початкового і граничних умов.

При граничних умовах II роду задаються значення щільності теплового потоку для кожної точки поверхні тіла як функції координат і часу

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} = AW_p \quad (4.2)$$

Вся теплота, поглинена на поверхні, відводиться всередину матеріалу механізмом теплопровідності.

Саме крайові теплові завдання з граничними умовами II роду становлять найбільший інтерес для процесів взаємодії лазерного випромінювання з матеріалами.

Окремі рішення задачі теплопровідності.

Одномірні моделі.

З'ясування основних закономірностей нагріву матеріалу лазерним випромінюванням найпростіше проводити на одновимірних моделях, справедливих за умови:  $r_0 \gg \sqrt{at_i}$ . Ця умова, очевидно, виконується не у всіх випадках впливу джерела теплоти на матеріали, але суттєво, що початкові стадії нагріву як імпульсним, так і безперервним джерелами теплоти можна розглядати в одновимірній постановці.

Рівняння теплопровідності і його граничні умови в одновимірній постановці для напівбезкінечного тіла мають вигляд:

$$\frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}, \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = W_{p0} \quad \text{при } z=0; \quad (4.3)$$

$$T=0 \quad \text{при } z, r \rightarrow \infty; \quad T=0 \quad \text{при } t=0$$

Для квазістаціонарного режиму генерації імпульсного лазера при  $t < \tau_i$ :

$$T(z, t) = \frac{2W_{p0}\sqrt{at}}{\lambda} \operatorname{ierfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{at}}\right) \quad (4.4)$$

де  $\text{ierfc} = \int_x^\infty \text{erfc}(x)dx$  - додаткова функція інтеграла ймовірності,

$\text{erfc} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty \exp(-x^2)dx$  - інтеграл ймовірності.

Ці функції можуть бути приблизно виражені, як:

$$\text{erfc}(x) \approx \sqrt{1 - \exp(-1.26x^2)} \quad (4.5)$$

$$\text{ierfc}(x) \approx x \cdot \text{erfc}(x) + \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-x^2) \quad (4.6)$$

Просторова модель.

Оскільки для обробки матеріалів використовується "гостре" фокусування, то значну роль починає грати тепловідвід в сторони від місця впливу випромінювання, що уповільнює темп нагріву металу.

Зміна температури на осі кругового поверхневого джерела тепла радіусом  $r$  з рівномірно розподіленою густиною потужності має вигляд:

$$T(z, t) = \frac{2W_{p0}\sqrt{at}}{\lambda} \left[ \text{ierfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{at}}\right) - \text{ierfc}\left(\frac{\sqrt{z^2 + r_f^2}}{2\sqrt{at}}\right) \right] \quad (4.7)$$

На поверхні:

$$T(0, t) = \frac{2W_{p0}\sqrt{at}}{\lambda} \left[ \frac{1}{\sqrt{\pi}} - \text{ierfc}\left(\frac{r_f}{2\sqrt{at}}\right) \right] \quad (4.8)$$

У граничному стані виникає стаціонарний режим нагрівання:

$$T_{ст}(z) = \frac{W_p}{\lambda} \left( \sqrt{r_f^2 + z^2} - z \right) \quad (4.9)$$

Нагрівання тонкої пластини.

Тонка пластинка - це поняття не геометричне, а теплофізичне. Якщо товщина зразка набагато менше його радіальних розмірів, а розмір джерела теплоти на поверхні набагато більше товщини, то градієнтом температури по глибині можна знехтувати і вважати, що розподіл температури залежить тільки від радіуса джерела теплоти і часу впливу.

Вважаючи пластину тонкою, можна припустити, що градієнт температури по глибині незначний. Тому найбільший інтерес представляє розподіл температури на поверхні для центра джерела:

$$T(0, t) = \frac{W_{p0}t}{c\delta} \left\{ \left[ 1 - \exp\left(-\frac{r_0^2}{4at}\right) \right] - \left[ \frac{r_0^2}{4at} E_i\left(-\frac{r_0^2}{4at}\right) \right] \right\} \quad (4.10)$$

$E_i(x) = \int_x^{\infty} \exp(-u) \cdot u^{-1} du$ ; ( $u > 0$ ) - функція Ейлера

Для малих часів  $t \leq \frac{0.2r_0^2}{a}$ , розклавши функцію Ейлера в ряд, отримаємо:

$$T(0, t) = \frac{W_{p0}t}{c\delta} \frac{1 - 4at}{r_0^2} \exp\left(-\frac{r_0^2}{4at}\right) \quad (4.11)$$

### Задача 8.

Срібна мішень ( $\lambda=4,2$ ;  $a=1,71$ ), що має форму напівбескінечного тіла, нагрівається імпульсом з параметрами:  $E=10$  Дж,  $\tau=4$  мсек,  $\Theta=2$  мрад. Лінза з  $F=100$  мм. Коефіцієнт поглинання  $A=0.25$ . Знайдіть температуру, до якої нагріється поверхня тіла через 0.2 мсек.

### Рішення:

$$T(z, t) = \frac{2W_{p0}\sqrt{at}}{\lambda} \operatorname{ierfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{at}}\right)$$

$$T(0, t) = \frac{2W_{p0}\sqrt{at}}{\lambda\sqrt{\pi}}$$

$$W_{p0} = \frac{AE}{\tau\pi(F\Theta)^2} = \frac{0.25 \cdot 10}{4 \cdot 10^{-3} \pi (10 \cdot 2 \cdot 10^{-3})^2} = 4.97 \cdot 10^5 \text{ Вт/см}^2$$

$$T(0, t) = \frac{2 \cdot 4.97 \cdot 10^5 \cdot \sqrt{1.71 \cdot 0.2 \cdot 10^{-3}}}{4.2 \cdot \sqrt{\pi}} = 2469 \text{ } ^\circ\text{C}$$

### Задача 9.

Тонка пластина з алюмінію ( $\lambda=2,09$ ;  $a=0,87$ ;  $c=0,89$ ) товщиною 1 мм нагрівається імпульсом з параметрами:  $E=10$  Дж,  $\tau=2$  мсек,  $\Theta=6$  мрад. Лінза з  $F=100$  мм. Коефіцієнт поглинання  $A=0.3$ . Знайдіть температуру, до якої нагріється поверхня пластини через 0.2 мсек.

### Рішення:

$$W_{p0} = \frac{AE}{\tau\pi(F\Theta)^2} = \frac{0.3 \cdot 10}{2 \cdot 10^{-3} \pi (10 \cdot 6 \cdot 10^{-3})^2} = 1.3 \cdot 10^5$$

$$T(0, t) = \frac{W_{p0}t}{c\delta} \frac{1 - 4at}{r_0^2} \exp\left(-\frac{r_0^2}{4at}\right)$$

$$T(0, t) = \frac{1.3 \cdot 10^5 \cdot 0.2 \cdot 10^{-3}}{0.89 \cdot 0.1} \cdot \frac{1 - 4 \cdot 0.87 \cdot 0.2 \cdot 10^{-3}}{(10 \cdot 6 \cdot 10^{-3})^2} \exp\left(-\frac{(10 \cdot 6 \cdot 10^{-3})^2}{4 \cdot 0.87 \cdot 0.2 \cdot 10^{-3}}\right)$$

$$T(0, t) = 460 \text{ } ^\circ\text{C}$$

## Тема №5. Нагрівання лазерним випромінюванням. Критична густина потужності.

### Короткі теоретичні відомості

Знання температурного поля матеріалу за впливу лазерного випромінювання дозволяє визначити критичну густину потоку, необхідну для досягнення заданої температури за даний проміжок часу в певній точці поверхні або обсягу матеріалу. Зокрема, може бути визначена густина потоку, яка призводить до плавлення поверхні оброблюваного матеріалу або випаровуванню цієї поверхні. Використовуючи одновимірну модель, отримуємо:

$$W_{p0}^{(m)} = \frac{0.885T_m\lambda}{\sqrt{a\tau}} \quad (5.1)$$

$$W_{p0}^{(b)} = \frac{0.885T_b\lambda}{\sqrt{a\tau}} \quad (5.2)$$

За допомогою одновимірної моделі нагріву напівбезкінечного тіла джерелом теплоти постійної інтенсивності можна знайти час досягнення на поверхні матеріалу необхідної температури:

$$\tau_{m(b)} = \frac{0.79T_{m(b)}^2\lambda^2}{aW_{p0}^2} \quad (5.3)$$

### Задача 10.

Знайдіть критичні густини потужності по плавленню для заліза ( $\lambda=0,51$ ;  $a=0,15$ ;  $T_m=1535$ ). Довжина імпульсу 1 мсек.

### Рішення:

$$W_{p0}^m = \frac{0.885T_m\lambda}{\sqrt{a\tau}} = \frac{0.885 \cdot 1535 \cdot 0.51}{\sqrt{0.15 \cdot 0.001}} = 5.66 \cdot 10^4 \text{ Вт/см}^2$$

### Задача 11.

Знайдіть критичні густини потужності по випаровуванню для заліза( $\lambda=0,51$ ;  $a=0,15$ ;  $T_b=2900$ ). Довжина імпульсу 1 мсек.

### Рішення:

$$W_{p0}^b = \frac{0.885T_b\lambda}{\sqrt{a\tau}} = \frac{0.885 \cdot 2900 \cdot 0.51}{\sqrt{0.15 \cdot 0.001}} = 1.07 \cdot 10^5 \text{ Вт/см}^2$$

### Задача 12.

Знайдіть час нагрівання міді ( $\lambda=3,89$ ;  $a=1,12$ ;  $T_m=1083$ ) до температури плавлення, якщо імпульс має такі параметри:  $E = 5$  Дж,  $\tau = 10$  мсек,  $\Theta = 2$  мрад. Лінза з  $F = 50$  мм

#### Рішення:

$$\tau_m = \frac{0.79 T_m^2 \lambda^2}{a W_{p0}^2}$$

$$W_{ps} = \frac{E}{\tau \pi (F\Theta)^2} = \frac{5}{10^{-2} \pi (5 \cdot 2 \cdot 10^{-3})^2} = 1.6 \cdot 10^6$$

$$\tau_m = \frac{0.79 \cdot 1083^2 \cdot 3.89^2}{1.12 \cdot 1.6^2 \cdot 10^{12}} = 0.49 \cdot 10^{-6} \text{ сек.}$$

### Задача 13.

Знайдіть час нагрівання міді ( $\lambda=3,89$ ;  $a=1,12$ ;  $T_b=2580$ ) до температури випаровування, якщо імпульс має такі параметри:  $E = 5$  Дж,  $\tau = 10$  мсек,  $\Theta = 2$  мрад. Лінза з  $F = 50$  мм

#### Рішення:

$$\tau_b = \frac{0.79 T_b^2 \lambda^2}{a W_{p0}^2}$$

$$W_{ps} = \frac{E}{\tau \pi (F\Theta)^2} = \frac{5}{10^{-2} \pi (5 \cdot 2 \cdot 10^{-3})^2} = 1.6 \cdot 10^6$$

$$\tau_b = \frac{0.79 \cdot 2580 \cdot 2580 \cdot 3.89^2}{1.12 \cdot 1.6^2 \cdot 10^{12}} = 2.77 \cdot 10^{-5} \text{ сек.}$$

### Задача 14.

Знайдіть час, за який поверхня золотої пластини ( $\lambda=2,98$ ;  $a=1,18$ ;  $c=0,13$ ;  $\rho=19,32$ ) досягне температури кипіння ( $T_b=2807$ ), якщо вона опромінюється імпульсом з такими параметрами:  $E = 12$  Дж,  $\tau = 1$  мсек,  $\Theta = 2$  мрад. Лінза з  $F = 50$  мм. Коефіцієнт поглинання  $A=0.23$ .

#### Рішення:

$$W_{p0} = \frac{AE}{\tau \pi (F\Theta)^2} = \frac{0.23 \cdot 12}{10^{-3} \pi (5 \cdot 2 \cdot 10^{-3})^2} = 8,785 \cdot 10^7 \text{ Вт/см}^2$$

$$t_b = \frac{\pi \lambda \rho c}{4 W_p^2} (T_b - T_0)^2 = \frac{\pi \cdot 2.98 \cdot 19.32 \cdot 0.13}{4 \cdot 8.785^2 \cdot 10^{14}} 2807^2 = 6 \cdot 10^{-9} \text{ с.}$$



## Тема №6. Рухоме лазерне джерело, швидко рухоме лазерне джерело

### Короткі теоретичні відомості

Якщо пляма нагріву радіусом  $r_0$  переміщається поверхнею з постійною швидкістю  $V$ , то дія джерела теплоти буде призводити до підвищення температури. Після деякого періоду часу, тривалість якого залежить від властивостей матеріалу, встановлюється квазістаціонарний стан, при якому нагріта зона постійних форми та розміру переміщається разом з джерелом теплоти.

Для розрахунку температури найчастіше використовують схему нормально-кругового джерела теплоти з ефективною потужністю  $P_0$ , що переміщується з постійною швидкістю  $V$  в напрямку осі  $X$  по поверхні або напівбескінечного тіла, або пластини товщиною  $\delta$ . Коефіцієнт зосередженості  $k$  і швидкість  $V$  залишаються постійними протягом всього часу переміщення джерела тепла.

Рівняння для температури:

$$T(x, y, z, t) = \frac{2P_0 \exp\left(-\frac{Vx}{a}\right)}{c\rho\sqrt{(4\pi a)^3}} \int_0^t \exp\left[\left(-\frac{z^2}{4au}\right) + \frac{r^2}{4a(t_0+u)} - \frac{V^2(t_0+u)}{4a}\right] \frac{du}{(t_0+u)\sqrt{u}} \quad (6.1)$$

де  $t_0 = \frac{1}{4ak}$  - стала часу,  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$

температуру в центрі можна розглядати, як температуру нерухомого джерела теплоти:

$$T(0,0,0,t) = \frac{P_0}{2\sqrt{\pi at_0}} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{t}{t_0}} \quad (6.2)$$

При збільшенні швидкості переміщення джерела теплоти і пропорційному збільшенні його потужності температурне поле граничного стану в рухливих координатах прагне до простої граничної форми. Швидко рухоме кругове джерело з гаусівським розподілом теплоти можна без великої похибки вважати нормально-смуговим, тобто повністю зосередженим в напрямку руху. При швидкому переміщенні нормально-смугового джерела теплота буде поширюватися тільки в напрямку, перпендикулярному напрямку руху джерела, і розподіл температури має вигляд:

$$T(y, z, t) = \frac{2P_0}{Vc\rho} \frac{\exp\left(-\frac{z^2}{4at}\right)}{2\sqrt{\pi at}} \frac{\exp\left(-\frac{y^2}{4a(t+t_0)}\right)}{2\sqrt{\pi a(t+t_0)}} \quad (6.3)$$

Найбільша температура буде на вісі джерела:

$$T(0,0,t) = \frac{P_0}{2\pi\lambda V \sqrt{t(t+t_0)}} \quad (6.4)$$

### Задача 15.

Поверхнею сталі ( $\lambda=0,51$ ;  $a=0,15$ ;  $c=0,43$ ;  $\rho=7,87$ ;  $T_m=1535$ ;  $L_m=275$ ) зі швидкістю 1 м/хв рухається джерело теплоти потужністю 1000 Вт і діаметром 1 см. Знайти максимальну температуру у наближенні рухомого та швидкорухомого джерела теплоти якщо:

1. Джерело теплоти має рівномірний розподіл
2. Джерело теплоти має нормальний розподіл з ефективним радіусом  $r_0=0.6r$

### Рішення:

Коефіцієнт зосередженості джерела  $k = \frac{1}{r_0^2}$  буде у першому випадку дорівнювати одиниці, у другому 2,78.

Для першого випадку стала часу буде  $t_0 = \frac{1}{4ak} = \frac{1}{4a} = \frac{1}{0.6} = 1.67$

Для другого випадку стала часу буде  $t_0 = \frac{1}{4ak} = \frac{1}{4 \cdot 0.15 \cdot 2.78} = 0.6$

Максимальна температура буде спостерігатися на вісі джерела теплоти, тому час дії джерела дорівнюватиме  $t = \frac{d}{V} = \frac{1}{100/60} = 0.6$  секунди.

Беручи до уваги, що для малих кутів у радіанах справедливо  $\text{arctg} \sqrt{\frac{t}{t_0}} \approx \sqrt{\frac{t}{t_0}}$ , отримуємо:

Для рухомого джерела:

$$\text{перший випадок: } T(0,0,0,t) = \frac{1000}{2\sqrt{\pi \cdot 0.15 \cdot 1.67}} \text{arctg} \sqrt{\frac{0.6}{1.67}} = 338$$

$$\text{другий випадок: } T(0,0,0,t) = \frac{1000}{2\sqrt{\pi \cdot 0.15 \cdot 0.6}} \text{arctg} \sqrt{\frac{0.6}{0.6}} = 738$$

Для швидкорухомого джерела:

$$\text{перший випадок: } T(0,0,t) = \frac{P_0}{2\pi\lambda V \sqrt{t(t+t_0)}} = \frac{1000 \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot 0.51 \cdot 100 \cdot \sqrt{0.6 \cdot (0.6 + 1.67)}} = 160$$

$$\text{другий випадок: } T(0,0,t) = \frac{P_0}{2\pi\lambda V \sqrt{t(t+t_0)}} = \frac{1000 \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot 0.51 \cdot 100 \cdot \sqrt{0.6 \cdot (0.6 + 0.6)}} = 221$$

## Тема №7. Плавлення металів під дією лазерного випромінювання

### Короткі теоретичні відомості

Якщо густина потоку перевищує значення, необхідне для досягнення температури плавлення на поверхні матеріалу, то поверхня починає плавитися. При цьому роль прихованої теплоти плавлення, тобто теплоти, необхідної для руйнування кристалічної решітки тіла, тим більше, чим нижче температура плавлення.

Врахування тепла фазового переходу призводить до необхідності вирішення нелінійної крайової задачі теплопровідності, яка називається задачею Стефана:

$$-\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial n} = -\lambda_L \frac{\partial T_L}{\partial n} + \rho L_m \frac{\partial S(t)}{\partial t} \quad (7.1)$$

Фронт плавлення переміщається вглиб тіла до тих пір, доки кількість теплоти, що підводиться в одиницю часу з ванни розплаву до границі розділу фаз "розплав - тверде тіло" не зрівняється з кількістю теплоти, що відводиться в одиницю часу в тверду фазу і витрачається на фазовий перехід. Ця умова називається умовою Стефана.

Визначимо максимальну глибину проплавлення металу при зварюванні без виплеску розплаву з ванни. Температура поверхні не повинна перевищувати температуру випаровування.

З формули для стаціонарної температури:

$$T_{cm}(z) = \frac{W_p}{\lambda} \left( \sqrt{z^2 + r_0^2} - z \right) \quad (7.2)$$

Вважаємо, що температура на поверхні дорівнює температурі випаровування, а на глибині - температурі плавлення. тоді:

$$l_{\max} = \frac{r_0}{2} \left( \frac{T_b}{T_m} - \frac{T_m}{T_b} \right) \quad (7.3)$$

### Задача 16.

Знайти максимальну глибину зварювання сталі ( $T_m=1535$ ;  $T_b=2900$ ) джерелом теплоти радіусом 3 мм.

$$l_{\max} = \frac{r_0}{2} \left( \frac{T_b}{T_m} - \frac{T_m}{T_b} \right) = \frac{0.3}{2} \left( \frac{2900}{1535} - \frac{1535}{2900} \right) = 0.204 \text{ см.}$$

Знайти максимальну глибину зварювання молібдену ( $T_m=2600$ ;  $T_b=4612$ ) джерелом теплоти радіусом 1 мм.

### Рішення:

$$l_{\max} = \frac{r_0}{2} \left( \frac{T_b}{T_m} - \frac{T_m}{T_b} \right) = \frac{0.1}{2} \left( \frac{4612}{2600} - \frac{2600}{4612} \right) = 0.06 \text{ см.}$$

## Тема №8. Тепловий механізм руйнування

### Короткі теоретичні відомості

Основні характеристики процесу руйнування металу в області дії теплового механізму можна визначити з рішення задачі теплопровідності для металів. Задача теплопровідності в системі координат, пов'язаних з рухомим кордоном фаз, має вигляд:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{V_0}{a} \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = W_p - V_0 \rho \Delta H|_{z=0} \\ T(z, 0) = T(\infty, t) = 0 \end{cases} \quad (8.1)$$

де  $\Delta H = L_m - RT/2$  - різниця питомих ентальпій твердої та газоподібної фаз

Стационарному руху границі між твердою і газоподібною фазами передують перехідний режим: нагрів до температури  $T_0$  та прискорення швидкості руху границі до  $V_0$ . Теоретично доведено, що внаслідок дуже сильної залежності від температури швидкість фронту випаровування залишається малою в порівнянні з  $V_0$  аж до досягнення температур, близьких до  $T_0$ . Поблизу квазістационарних температур швидкість фронту різко зростає. Таким чином, зміна швидкості границі розділу фаз в процесі встановлення квазістационарного руху носить ступінчастий характер: після деякого запізнення, межа різко прискорюється до стационарної швидкості руху. Протягом часу запізнювання границя практично не переміщається, так що для руйнування цей час є втраченим. Тому час запізнювання можна визначити з виразу для нерухомої границі, тобто коли руйнування відсутнє:

$$T(0, t) = \frac{2}{3\sqrt{\pi}} \frac{W_{p0}}{R\rho} \sqrt{\frac{t}{a}} \quad (8.2)$$

Прирівнявши  $T(0, t) = T_0$ , визначимо час затримки:

$$\Delta t = \frac{a}{V_0^2} \frac{9\pi}{4(p+2.5)^2} \quad (8.3)$$

де  $p = \frac{L_b}{RT_0}$

### Задача 17.

Знайти час затримки квазистаціонарного руйнування в рамках теплової моделі руйнування, якщо на мідну мішень ( $\rho=8,96$ ;  $L_b=4813$ ;  $a=1,12$ ) діє лазерний імпульс:  $E = 4$  Дж,  $\tau = 1$  мсек,  $\Theta = 2$  мрад. Лінза з  $F = 50$  мм. Коефіцієнт поглинання  $A=0.39$ . Температуру поверхні руйнування прийняти рівній температурі випаровування ( $T_0=2580$ )

#### Рішення:

$$W_{p0} = \frac{AE}{\tau\pi(F\Theta)^2} = \frac{0.39 \cdot 4}{10^{-3} \pi (5 \cdot 2 \cdot 10^{-3})^2} = 5 \cdot 10^6$$

$$V_0 = \frac{W_p}{\rho L_b} = \frac{5 \cdot 10^6}{8.96 \cdot 4813} = 115.94 \text{ см/сек}$$

$$\Delta t = \frac{a}{V_0^2} \frac{9\pi}{4 \left( \frac{L_b}{RT_0} + 2.5 \right)^2} = \frac{9 \cdot \pi \cdot 1.12}{115.94^2 \cdot 4 \cdot \left( \frac{4813}{2580 \cdot 8.31} + 2.5 \right)^2} = 2.16 \cdot 10^{-4} \text{ сек.}$$

### Задача 18.

Знайти час затримки квазистаціонарного руйнування в рамках теплової моделі руйнування, якщо на срібну мішень ( $\rho=10,49$ ;  $L_b=2335$ ;  $a=1,71$ ) діє лазерний імпульс:  $E = 12$  Дж,  $\tau = 0.1$  мсек,  $\Theta = 4$  мрад. Лінза з  $F = 100$  мм. Коефіцієнт поглинання  $A=0.29$ . Температуру поверхні руйнування прийняти рівній температурі випаровування ( $T_0=2212$ )

#### Рішення:

$$W_{p0} = \frac{AE}{\tau\pi(F\Theta)^2} = \frac{0.29 \cdot 12}{10^{-4} \pi (10 \cdot 4 \cdot 10^{-3})^2} = 6.9 \cdot 10^6$$

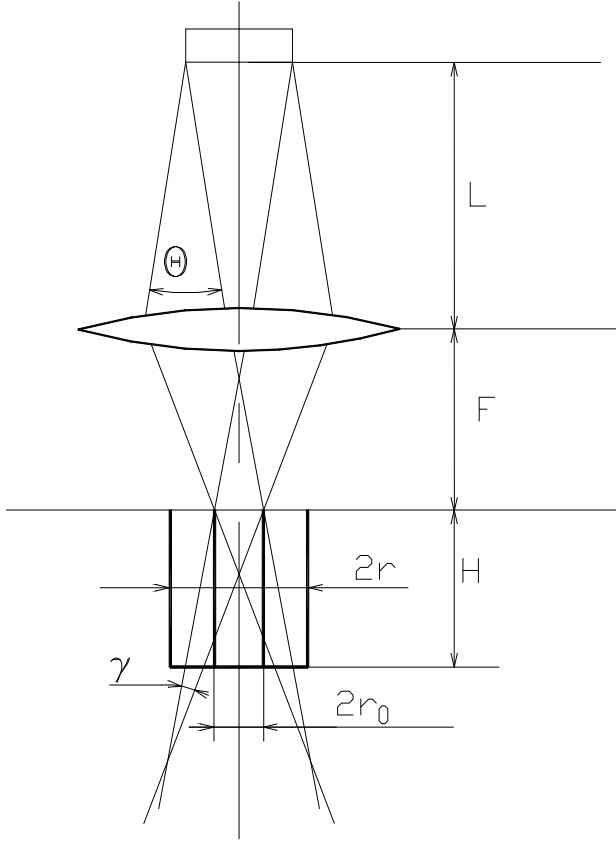
$$V_0 = \frac{W_p}{\rho L_b} = \frac{6.9 \cdot 10^6}{10.49 \cdot 2335} = 283 \text{ см/сек}$$

$$\Delta t = \frac{a}{V_0^2} \frac{9\pi}{4 \left( \frac{L_b}{RT_0} + 2.5 \right)^2} = \frac{9 \cdot \pi \cdot 1.71}{283^2 \cdot 4 \cdot \left( \frac{2335}{2212 \cdot 8.31} + 2.5 \right)^2} = 2.2 \cdot 10^{-5} \text{ сек.}$$

## Тема №9. Феноменологічна модель процесу руйнування

### Короткі теоретичні відомості

При фокусуванні лазерного випромінювання на поверхні мішені в пляму діаметром  $2r_0$  в матеріалі утворюється лунка, профіль якої близький до циліндричного. Зміна розмірів цієї лунки в часі така, що поточний радіус  $r(t)$  і



глибина лунки  $h(t)$  пов'язані між собою рівнянням світлового конуса:

$$r(t) = r_0 + tg \gamma \cdot h(t) \quad (9.1)$$

де  $\gamma \approx \arctg \frac{D}{2F}$  - половина кута

світлового конуса,  $D$  - діаметр пучка в площині лінзи,  $F$  - фокусна відстань лінзи. При цьому маєється на увазі, що матеріал з дна лунки випаровується, а зі стінок виносьється у вигляді розплаву, причому обидва процеси є квазістаціонарними. Тоді рівняння енергетичного балансу має вигляд:

$$P(t)dt = \rho L_b \pi r^2(t) dh + \rho L_m 2\pi r(t) h(t) dr$$

(9.2)

Вирішуючи ці два рівняння і припускаючи, що  $P(t) = const$ ,  $L_b \gg L_m$ , а  $h(t) \gg r_0$ , маємо:

$$d = 2 \left[ r_0^2 + \frac{3E \cdot tg \gamma}{\pi L_b \rho} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (9.3)$$

$$h = \left[ \left( \frac{r_0}{tg \gamma} \right)^3 + \frac{3E}{\pi g^2 \gamma \rho L_b} \right]^{\frac{1}{3}} - \frac{r_0}{tg \gamma} \quad (9.4)$$

**Задача 19.**

Знайти діаметр отвору, якщо на сталю мішень ( $\rho=7,87$ ;  $L_m=275$ ;  $L_b=7140$ ) діє лазерний імпульс:  $E=6$  Дж,  $\tau=1$  мсек,  $\Theta=2$  мрад. Лінза з  $F=150$  мм. Коефіцієнт поглинання  $A=0.5$ . Діаметр випромінювання на лінзі – 12 мм.

**Рішення:**  $r_0 = F\Theta = 15 \cdot 2 \cdot 10^{-3} = 3 \cdot 10^{-2}$  см.

$$\operatorname{tg} \gamma \approx \frac{D}{2F} = \frac{1.2}{2 \cdot 15} = 0.04$$

$$d = 2 \left[ r_0^3 + \frac{3E \cdot \operatorname{tg} \gamma}{\pi L_b \rho} \right]^{\frac{1}{3}} = 2 \left[ 2.7 \cdot 10^{-5} + \frac{3 \cdot 6 \cdot 0.04}{\pi \cdot 7140 \cdot 7.87} \right]^{\frac{1}{3}} = 0,06 \text{ см.}$$

**Задача 20.**

Знайти діаметр отвору, якщо на сталю мішень ( $\rho=7,87$ ;  $L_m=275$ ;  $L_b=7140$ ) діє лазерний імпульс:  $E=4$  Дж,  $\tau=0.7$  мсек,  $\Theta=3$  мрад. Лінза з  $F=70$  мм. Коефіцієнт поглинання  $A=0.5$ . Діаметр випромінювання на лінзі – 12 мм.

**Рішення:**

$$r_f = F\Theta = 7 \cdot 3 \cdot 10^{-3} = 2.1 \cdot 10^{-2} \text{ см.}$$

$$\operatorname{tg} \gamma \approx \frac{D}{2F} = \frac{1.2}{2 \cdot 7} = 0.086$$

$$d = 2 \left[ r_0^3 + \frac{3E \cdot \operatorname{tg} \gamma}{\pi L_b \rho} \right]^{\frac{1}{3}} = 2 \left[ 9.26 \cdot 10^{-6} + \frac{3 \cdot 4 \cdot 0.086}{\pi \cdot 7140 \cdot 7.87} \right]^{\frac{1}{3}} = 0,05 \text{ см.}$$

## Тема №10. Лазерне різання металів безперервним випромінюванням

### Короткі теоретичні відомості

Аналіз моделі ГЛР призводить до висновку, що механізм і кінетика утворення різку при низьких і високих швидкостях різання виявляються різними. Час встановлення стаціонарного руйнування для малих швидкостей нагріву можна визначити з рішення задачі теплопровідності, враховуючи, що нагрівання металу відбувається при русі з постійною швидкістю теплового джерела з радіусом  $r_f$ :

$$t_0 = \frac{2a}{V_p^2} \left[ 1 - \sqrt{1 - \lambda_t V_p \frac{(T_0 - T_H)}{aW_p}} \right] \quad (10.1)$$

Протягом часу  $t_0$  лазерне джерело переміститься верхньою кромкою металу на відстань:

$$x_0 = V_p t_0 = t_0 = \frac{2a}{V_p} \left[ 1 - \sqrt{1 - \lambda_t V_p \frac{(T_0 - T_H)}{aW_p}} \right] \quad (10.2)$$

Крім того, за цей же час на верхній кромці утворюється зона рідкого металу і його оксидів розміром:

$$x_s = \sqrt{a(t_0 - t_m)} \quad (10.3)$$

де  $t_m$  - час, необхідний для досягнення температури плавлення металу.

При цьому:

$$t_m = \frac{2a}{V_p^2} \left[ 1 - \sqrt{1 - \lambda_t V_p \frac{(T_m - T_H)}{aW_p}} \right] \quad (10.4)$$

Якщо за час  $t_0$  зона рідкого металу пошириться в напрямку різання на більшу відстань, ніж переміститься лазерний промінь, тобто  $x_s > x_0$ , що характерно для низьких швидкостей різання, то перед рухомим променем на верхній кромці утворюється розплавлена ділянка. Струмінь кисню потім видаляє розплав що утворився, і, при подальшому русі обробка відбувається тільки вглиб, до тих пір, доки промінь лазера не досягне верхньої кромки металу. Потім знову відбувається нагрівання верхньої кромки до температури  $T_0$  передньою частиною лазерного променя при нерухомій границі руйнування, тоді як за рахунок решти променя руйнування поширюється вглиб металу. Процес повторюється періодично.



В результаті періодичного характеру руйнування поблизу верхньої кромки металу при низьких швидкостях на поверхні різку утворюються окремі борозни шириною  $x_s$ .

Розрахункове значення шорсткості поверхні при низьких швидкостях, коли рельєф поверхні утворюється в результаті накладення борозен шириною  $x_s$ , визначається за формулою:

$$R_z = 0.134x_s \quad (10.5)$$

### Задача 21.

Сталь ( $\lambda=0,51$ ;  $a=0,15$ ;  $T_m=1535$ ) різуть безперервним лазерним випромінюванням з густиною потужності  $W_p = 5 \cdot 10^5$  Вт/см<sup>2</sup> із швидкістю 1 м/хв. Знайти шорсткість бокової поверхні різку. Температуру поверхні прийняти  $T_0=1,2 \cdot T_m=1842$ . Початкову температуру не враховувати.

### Рішення:

$$R_z = 0.134x_s$$

$$x_s = \sqrt{a(t_0 - t_m)}$$

$$t_0 = \frac{2a}{V_p^2} \left[ 1 - \sqrt{1 - \lambda_t V_p \frac{(T_0 - T_H)}{aW_p}} \right] = \frac{2 \cdot 0,15 \cdot 3600}{10000} \left[ 1 - \sqrt{1 - 0,51 \cdot \frac{100 \cdot 1842}{60 \cdot 0,15 \cdot 5 \cdot 10^5}} \right] = 1,13 \cdot 10^{-3}$$

$$t_m = \frac{2a}{V_p^2} \left[ 1 - \sqrt{1 - \lambda_t V_p \frac{(T_m - T_H)}{aW_p}} \right] = \frac{2 \cdot 0,15 \cdot 3600}{10000} \left[ 1 - \sqrt{1 - 0,51 \cdot \frac{100 \cdot 1535}{60 \cdot 0,15 \cdot 5 \cdot 10^5}} \right] = 0,94 \cdot 10^{-3}$$

$$x_s = \sqrt{0,15 \cdot 10^{-3} (1,13 - 0,94)} = 53 \text{ мкм.}$$

$$R_z = 0.134x_s \approx 7 \text{ мкм}$$

**Задача 22.**

Сталь ( $\lambda=0,51$ ;  $a=0,15$ ;  $T_m=1535$ ) ріжуть безперервним лазерним випромінюванням з густиною потужності  $W_p = 4 \cdot 10^5$  Вт/см<sup>2</sup> із швидкістю 1.2 м/хв. Знайти шорсткість бокової поверхні різа. Температуру поверхні прийняти  $T_0=1,2 \cdot T_m=1842$ . Початкову температуру не враховувати.

**Рішення:**

$$R_z = 0.134x_s$$

$$x_s = \sqrt{a(t_0 - t_m)}$$

$$t_0 = \frac{2a}{V_p^2} \left[ 1 - \sqrt{1 - \lambda_t V_p \frac{(T_0 - T_H)}{aW_p}} \right] = \frac{2 \cdot 0,15 \cdot 3600}{14400} \left[ 1 - \sqrt{1 - 0,51 \cdot \frac{120 \cdot 1842}{60 \cdot 0,15 \cdot 4 \cdot 10^5}} \right] = 1,18 \cdot 10^{-3}$$

$$t_m = \frac{2a}{V_p^2} \left[ 1 - \sqrt{1 - \lambda_t V_p \frac{(T_m - T_H)}{aW_p}} \right] = \frac{2 \cdot 0,15 \cdot 3600}{14400} \left[ 1 - \sqrt{1 - 0,51 \cdot \frac{120 \cdot 1535}{60 \cdot 0,15 \cdot 4 \cdot 10^5}} \right] = 0,985 \cdot 10^{-4}$$

$$x_s = \sqrt{0,15 \cdot 10^{-4} (1,18 - 0,98)} = 127 \text{ мкм.}$$

$$R_z = 0.134x_s \approx 17 \text{ мкм}$$

## Тема №11. Лазерне різання металів імпульсно-періодичним випромінюванням

### Короткі теоретичні відомості

Швидкість різання, крок обробки на частота імпульсів пов'язані співвідношенням  $V = S \cdot f$ . Коефіцієнт перекриття імпульсів  $k_n = 1 - \frac{S}{2r_f}$ .

Оскільки в основі процесу імпульсного лазерного різання матеріалів лежить процес утворення отвору, для опису розрахункових залежностей, що пов'язують розмірні параметри різів з основними технологічними чинниками, за основу можна вибрати феноменологічну модель утворення отворів під дією лазерного випромінювання. Відповідно до цієї моделі співвідношення для знаходження глибини і ширини різі при використанні імпульсно-періодичного лазерного випромінювання мають вигляд:

$$h = \sqrt[3]{\left(\frac{r_f}{2tg\varphi}\right)^3 + \frac{3E}{\pi k_n L_b tg^2\varphi}} - \frac{r_f}{tg\varphi} \quad (11.1)$$

$$b = 2 \cdot \sqrt[3]{r_f^3 + \frac{3E tg\varphi}{\pi L_b}} \quad (11.2)$$

Максимально можлива швидкість обробки, при якій ще буде відбуватися формування різі:  $V_{\max} = 2 \left[ r_f^2 + 3E tg\varphi (\pi L_b)^{\frac{1}{3}} \right]^{\frac{1}{3}} f$  (11.3)

### Задача 23.

Стальний зразок ( $\rho=7,87$ ;  $L_m=275$ ;  $L_b=7140$ ) ріжеться імпульсно-періодичним лазерним випромінюванням частотою 1 кГц з енергією імпульсу  $E=1$  Дж,  $\tau=0,5$  мсек,  $\Theta=2$  мрад зі швидкістю  $V=2$  см/сек. Лінза з  $F=150$  мм. Коефіцієнт поглинання  $A=0,5$ . Діаметр випромінювання на лінзі – 12 мм.

Знайти: коефіцієнт перекриття, крок обробки, ширину та глибину різі.

**Рішення:**  $r_0 = F\Theta = 15 \cdot 2 \cdot 10^{-3} = 3 \cdot 10^{-2}$  см.  $tg\gamma \approx \frac{D}{2F} = \frac{1,2}{2 \cdot 15} = 0,04$

Крок обробки  $S = V/f = 0,002$ , звідки  $k_n = 1 - \frac{S}{2r_0} = \frac{0,002}{0,03} = 0,067$

$$h = \sqrt[3]{\left(\frac{r_f}{2tg\gamma}\right)^3 + \frac{3E}{\pi k_n L_b tg^2\gamma}} - \frac{r_f}{tg\gamma} = \sqrt[3]{\left(\frac{0,03}{0,08}\right)^3 + \frac{3}{\pi \cdot 0,067 \cdot 7140 \cdot 0,0016}} - \frac{0,03}{0,08} = 0,7 \text{ см} = 7 \text{ мм}$$

$$b = 2 \cdot \sqrt[3]{r_f^3 + \frac{3E tg\gamma}{\pi L_b}} = 2 \cdot \sqrt[3]{0,000027 + \frac{0,12}{\pi 7140}} = 0,063 \text{ см} = 630 \text{ мкм}$$

## Тема №12. Вплив параметрів випромінювання на розмірні характеристики різку

### Короткі теоретичні відомості

Технологічні параметри, що впливають на розмірні характеристики різку, поділяються на три категорії:

- Енергетичні
- Оптичні
- Газодинамічні

До енергетичних параметрів належать потужність і густина потужності.

Основні закономірності лазерного різання якісно описуються теорією Свіфта-Хука-Джінкса. Відповідно до неї, коли втрати на теплопровідність малі у порівнянні з витратами енергії на нагрів і плавлення матеріалу, співвідношення балансу енергії має вигляд:

$$hV_p b(c\rho T_m + L_m) = \eta P_\Sigma \quad (12.1)$$

де  $P_\Sigma$  - сумарна потужність випромінювання і реакції окислення;  
 $\eta = \eta_{\text{п}}\eta_{\text{т}}$  - ефективність процесу (ККД поглинання на термічний ККД);

До оптичних параметрів належать фокусна відстань, величина розфокусування, діаметр променя на лінзі, модовий склад, глибина фокусу, поляризація.

Обов'язковою умовою ГЛР є видалення розплаву і рідких оксидів із зони різку. Ця умова досягається створенням уздовж передньої стінки різку градієнта тиску. Від величини надлишкового тиску залежить глибина різку.

Мінімальний тиск газу, при перевищенні якого глибина різку не росте, може бути оцінений виразом:

$$P_{\min} = \frac{1}{2} \frac{P^2 V_p^2}{b^2 \rho (ca)^2 \left( T_{nl} + \frac{L_{nl}}{c} \right)^2} \quad (12.2)$$

#### Задача 24.

При газолазерному різанні сталі лазером потужністю 1000 Вт на швидкості 1,2 м/хв. у зразку товщиною 2 мм отримано різ шириною 300 мкм. Оцінити сумарний ККД процесу. Оцінити швидкість, при якій сумарний ККД був би максимальним. Масовий ККД горіння взяти 0,5.

#### Рішення:

За теорією Свіфта-Хука-Джикса маємо:  $hV_p b(c\rho T_m + L_m) = \eta P_\Sigma$ , де  $P_\Sigma$  - сумарна потужність лазерного випромінювання та реакції окислення. На швидкості 1,2 м/хв. Промінь проходить 2 см за секунду, тобто за секунду видаляється  $2 \cdot 0,2 \cdot 0,03 = 0,012 \text{ см}^3$  або 0,1 грам сталі, з яких враховуючи масовий ККД=0,5 згоряє 0,05 грам сталі. Знаючи, що основним оксидом при ГЛР є FeO з теплою горіння 269 кДж/моль, знаходимо потужність реакції окислення:

$$P_o = \frac{269000}{56 + 16} \cdot 0,05 = 187 \frac{\text{Дж}}{\text{сек}} = 187 \text{ Вт}$$

звідси сумарний ККД:

$$\eta = \frac{hV_p b(c\rho T_m + L_m)}{P_\Sigma} = \frac{0,2 \cdot 2 \cdot 0,03 \cdot (0,43 \cdot 7,87 \cdot 1842 + 275)}{1187} = 0,066$$

При  $\eta = 1$  швидкість мала би бути:

$$V_p = \frac{P_\Sigma}{hb(c\rho T_m + L_m)} = \frac{1187}{0,2 \cdot 0,03 \cdot (0,43 \cdot 7,87 \cdot 1842 + 275)} = 30 \text{ см/сек або } 18 \text{ м/хв.}$$

#### Задача 25.

Потужність безперервного випромінювання при газолазерній різці сталі ( $\lambda=0,51$ ;  $a=0,15$ ;  $c=0,43$ ;  $\rho=7,87$ ;  $T_m=1535$ ;  $L_m=275$ ) є 1000 Вт. Ширина різку складає 150 мкм. Швидкість різання – 1,2 м/хв. Знайти тиск кисню, за якого глибина різки перестане зростати.

#### Рішення:

$$p_{\min} = \frac{1}{2} \frac{P^2 V_p^2}{b^2 \rho (ca)^2 \left( T_{nl} + \frac{L_{nl}}{c} \right)^2} = \frac{1}{2} \frac{1000^2 \cdot 2^2}{0,015^2 \cdot 7,87 \cdot (0,43 \cdot 0,15)^2 \left( 1535 + \frac{275}{0,43} \right)^2} = 0,57 \text{ МПа}$$

**Задача 26.**

Потужність безперервного випромінювання при газолазерній різці сталі ( $\lambda=0,51$ ;  $a=0,15$ ;  $c=0,43$ ;  $\rho=7,87$ ;  $T_m=1535$ ;  $L_m=275$ ) є 1200 Вт. Ширина різку складає 200 мкм. Швидкість різання – 1,8 м/хв. Знайти тиск кисню, за якого глибина різки перестане зростати.

**Рішення:**

$$P_{\min} = \frac{1}{2} \frac{P^2 V_p^2}{b^2 \rho (ca)^2 \left( T_{nl} + \frac{L_{nl}}{c} \right)^2} = \frac{1}{2} \frac{1200^2 \cdot 3^2}{0,02^2 \cdot 7,87 \cdot (0,43 \cdot 0,15)^2 \left( 1535 + \frac{275}{0,43} \right)^2} = 0,1 \text{ МПа}$$