

**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**

## **Технологія лазерної розмірної обробки**

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт  
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

Технологія лазерної розмірної обробки: Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт для студентів спеціалізації «Лазерна техніка та комп'ютеризовані процеси фізико-технічної обробки» спеціальності 131 Прикладна механіка / Уклад. В.П. Котляров, О.С. Козирев, – К.: НТУУ «КПІ», 2017. – 22 с.

*Гриф надано вченою радою  
Механіко-машинобудівного інституту  
НТУУ «КПІ ім. І.Сікорського»  
(протокол №11 від 23 червня 2017 р.)*

*Ухвалено на засіданні кафедри ЛТФТ, ММІ  
(протокол №8 від 24 травня 2017 р.)*

Електронне навчальне видання

Технологія лазерної розмірної обробки

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

Укладачі	В.П. Котляров, д.т.н., проф.. О.С. Козирев, ст.. викл.
Відповідальний редактор	М.І. Анякін, д.т.н., доц..
Рецензент	Малафєєв Ю.М. , к.т.н., доцент кафедри Технології машинобудування

## Лабораторна робота №1

### Проектування режимів лазерної розмірної обробки

**Мета роботи:** Ознайомитися з аналітичними залежностями результатів лазерної розмірної обробки (ЛРО) від керованих параметрів процесу; виконати перевірочний розрахунок режимів обробки отворів по аналітичним моделям; провести обробку отворів; оцінити відповідність результатів.

**Обладнання та матеріали:** лазерна технологічна установка "Квант-15"; вимірювач енергії ІЕ-3А; лазер газовий ЛГ-105; осцилограф СІ-93; фотодатчик; блок живлення до 30 В.

#### Теоретичні відомості

Прийняті позначення:

$W_p^u$  - порогова густина потужності,  $\frac{Вт}{см^2}$

$a$  - температуропровідність,  $\frac{см^2}{с}$

$\rho$  - щільність,  $\frac{г}{см^3}$

$T_u$  - температура випаровування,  $К$

$c$  - теплоємність твердої фази,  $\frac{Дж}{г \cdot К}$

$T_{пл}$  - температура плавлення,  $К$

$\lambda$  - теплопровідність,  $\frac{Вт}{см \cdot К}$

$L_{пл}$  - питома теплота плавлення,  $\frac{Дж}{г}$

$P$  - потужність імпульсу,  $Вт$

$E$  - енергія імпульсу,  $Дж$

$c'$  - теплоємність рідкої фази,  $\frac{Дж}{г \cdot К}$

$L_u$  - питома теплота випаровування,  $\frac{Дж}{г}$

$d_0(r_0)$  - діаметр (радіус) випромінювання на поверхні,  $см$

$\tau$  - тривалість імпульсу,  $сек$

$\Theta$  - кут розбіжності,  $рад$

Для визначення режимів лазерної розмірної обробки (ЛРО) використовують розрахунки за аналітичними (функціональними) залежностям, які розроблено в результаті кількісного аналізу фізичних, хімічних явищ, що відповідають за процес формування порожнини концентрованим пучком лазерного випромінювання, тому вони можуть вважатися моделями, які пов'язують результати (кількісні та якісні) процесу обробки з параметрами його виконання (режимами обробки).

Для розрахунку результатів ЛРО застосовуються такі моделі:

**Модель Сатоши.** При обробці отворів в заготовках невеликої товщини діаметр отворів визначається розміром сфокусованого випромінювання і товщиною розплаву, який утворюється навколо отвору, що обробляється, причому кількість розплаву ставиться в залежність від ступеня перевищення критичної густини потужності по випаровуванню світлового потоку для матеріалу заготовки. Залежність для визначення поперечного розміру обробки має вигляд:

$$d = d_0 \sqrt{\frac{1}{2} \ln \left( \frac{2P}{\pi W_p^u d_0^2} \right)} \quad (1)$$

Тут  $W_p^u = \frac{0.885 T_u \lambda}{\sqrt{a \tau}}$  - критична густина потужності.

**Модель Коваленко.** У припущенні повного використання енергії випромінювання для руйнування матеріалу заготовки отримані наступні моделі для опису поздовжніх і поперечних розмірів порожнини в залежності від деяких параметрів процесу. У припущенні зростання лунки за рахунок випаровування матеріалу заготовки з її дна, глибина порожнини може бути визначена по залежності:

$$h = \frac{W_p \tau}{\rho(cT_u + L_u)} \quad (1.2)$$

При розрахунку поперечних розмірів порожнини необхідно враховувати її конічної форми, а також плавлення стінок механізмом теплопровідності і розсіяним в порожнині випромінюванням:

$$d = \sqrt{\frac{12E}{\pi \rho h [cT_u + L_u + L_{nl} - c'(T_u - T_{nl})]}} \quad (1.3)$$

**Модель Вейко-Лібенсона** (феноменологічна модель). Для виведення розрахункових залежностей результатів лазерної розмірної обробки можна використовувати спостереження за динамікою формоутворення порожнини, виконані швидкісною фотореєструючою апаратурою.

При фокусуванні лазерного випромінювання на верхній поверхні мішені в пляму діаметра  $2r_0$  в матеріалі утворюється лунка, профіль якої близький до циліндричного. Зміна розмірів цієї лунки в часі така, що поточний радіус  $r(t)$  і глибина  $h(t)$  пов'язані між собою рівнянням світлового конуса:

$$r(t) = r_0 + \operatorname{tg}\gamma \cdot h(t) \quad (1.4)$$

де  $\gamma \approx \operatorname{arctg} \frac{D}{2F}$  - половина кута світлового конуса,  $D$  - діаметр пучка в площині лінзи,  $F$  - фокусна відстань лінзи.

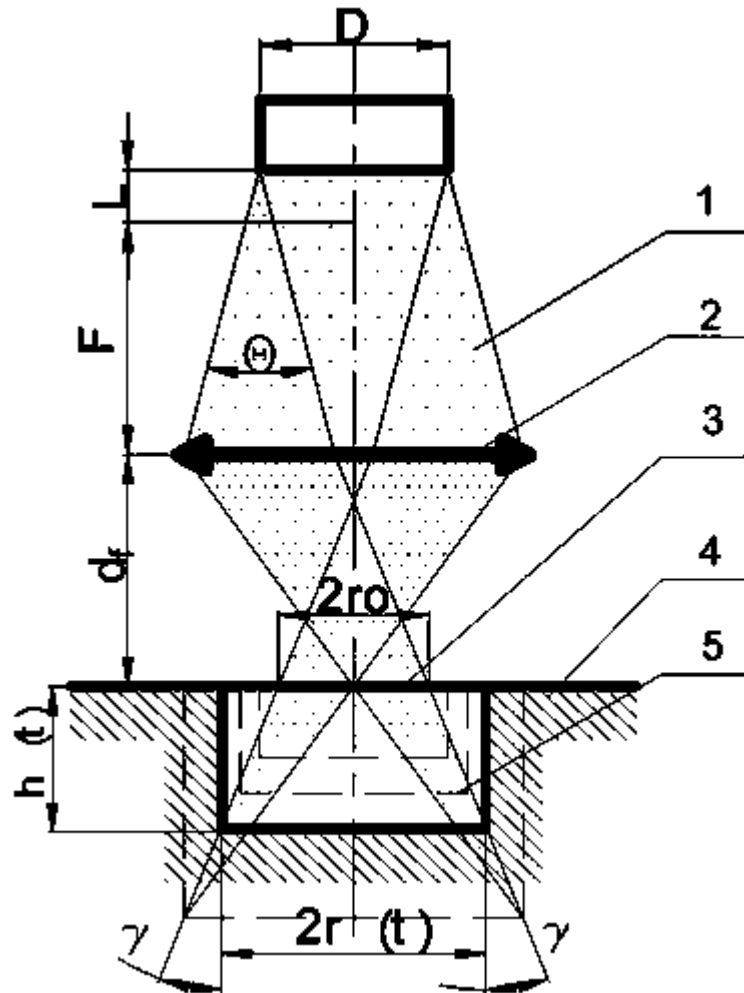


Рис.1 Схема формування профілю отвору вздовж світлового конусу

При цьому передбачається, що матеріал з дна лунки випаровується, а зі стінок несеться у вигляді розплаву, причому обидва процеси є квазістаціонарними:

$$d = 2 \left[ r_0^2 + \frac{3E \cdot \operatorname{tg}\gamma}{\pi L_{\text{в}} \rho} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (1.5)$$

$$h = \left[ \left( \frac{r_0}{\operatorname{tg}\gamma} \right)^3 + \frac{3E}{\pi \operatorname{tg}^2 \gamma \rho L_{\text{в}}} \right]^{\frac{1}{3}} - \frac{r_0}{\operatorname{tg}\gamma} \quad (1.6)$$

Модель (1.1) призначена для прогнозування розміру наскрізного отвору у металевих плівках, фользі, тобто у заготівках малої товщини, і дозволяє не враховувати відтік тепла із зони обробки через стінки порожнини, тобто для порожнин з співвідношенням  $h \ll d/4$ . В якості головного механізму формоутворення отвору в цих умовах є дія сил поверхневого натягнення, які переформують розплавлений матеріал в межах зони опромінення. Механізм руйнування – плавлення матеріалу по товщині заготівки в зоні опромінення  $d_0 \gg d$  та його часткове випаровування.

Моделі (1.2)-( 1.6) побудовані на базі закону збереження енергії в зоні обробки при введенні енергії випромінювання  $E$  за час  $\tau$  та формування не наскрізного отвору (лунки) конічної форми діаметром  $d$  та глибиною  $h$  за рахунок плавлення та випаровування матеріалу всередині лунки.

### Порядок проведення роботи.



Рис 2. Система керування модулятора установки «Квант-15»

1. Ознайомитися з правилами техніки безпеки в лабораторії
2. Ознайомитися з теоретичними відомостями до лабораторної роботи
3. Увімкнути установку Квант-15.

Початкове положення органів управління перед включенням установки:

Перед включенням установки перевести всі тумблери, кнопки і лімби в положення ВКЛ. і «0».

- Верньєр НАПРУГА - в положенні «0».
- Перемикач ЧАСТОТА - в положенні «0».
- Натиснути кнопку СУМ перемикача УПРАВЛІННЯ.
- Натиснути кнопку «X1» або «X10».
- Установити кнопку ЖИВЛЕННЯ на блоці вимірювача енергії у віджатє положення.

Алгоритм включення установки.

- Перед включенням перевірити, чи відкритий кран подачі холодної води в зовнішній контур охолодження установки.
- Натиснути кнопку ВКЛ на панелі пульта управління верстатом, при цьому повинен включитися насос системи охолодження і загорітися лампочки МЕРЕЖА і ОХОЛОДЖЕННЯ на панелі пульта управління верстатом.
- Встановити автоматичний вимикач системи СПК-3 в нижній задній частині в положення ВКЛ, при цьому повинні працювати вентилятори і горіти лампочки ЖИВЛЕННЯ і РУ на панелі СУМ-10А.
- На панелі блоку СУМ-10А натиснути кнопку режиму роботи з одиночним запуском СЗ - синхронний запуск (або СР - синхронний розряд).
- Кнопку ЧЕРГОВА ДУГА системи СПК-3.
- Декілька разів натиснути кнопку ПУСК на блоці СУМ-10А, при цьому повинна загорітися лампочка ЧЕРГОВА ДУГА. Відпустити кнопку ЧЕРГОВА ДУГА і ЗАПУСК на блоці СУМ-10А.
- Натиснути кнопку ЖИВЛЕННЯ на панелі індикатора енергії ІЕ-3А системи СПК-3, при цьому загоріться сигнальна лампочка. Натисканням відповідної кнопки встановити необхідний діапазон вимірювання.
- Натиснути кнопку ВКЛ. СИЛОВА.
- Ручкою верньєра НАПРУГА накопичувача блоку СУМ-10А встановити необхідну величину напруги на накопичувальних конденсаторах.

Зняти з установки предметний трьохкоординатний столик і на його місце вертикально встановити вимірювальну головку, щоб виходячи з об'єктиву лазерне випромінювання потрапляло безпосередньо в її вхідне вікно. При цьому головку виставляють так, щоб вісь лазерного променя проходила через центр вхідного вікна.

Тумблером "Мережа" включити прилад. Після прогріву приладу в продовж 10 хвилин поставити перемикач діапазонів в положення "0,05-5", Включити тумблер 7 і ручками 8 і 9 ("Грубо" і "Точно") виставити нуль приладу.

Відкалібрувати прилад, натиснувши кнопку "Калібрування". У разі зашкалювання або відхилення не на повну шкалу, обертанням осі потенціометра "ПОСИЛЕННЯ" виставити 100% шкали.

Поставити перемикач піддіапазонів в положення 3 "15-50", перемикач діапазонів - в положення "15-150". Зняти кришку з вікна вимірювальної головки. Прилад готовий до роботи.



Рис 3. Вимірювач енергії ІЕ-3А

4. Встановити індуктивність ланцюга розряду 2000 мкГн. Виміряти рівень енергії по вимірникові установки ІЕ-3А для наступних значень напруги накачування: 500, 600, 700, 800 і 900 В. На основі даних вимірювань побудувати залежність  $E = f(U_n)$ .



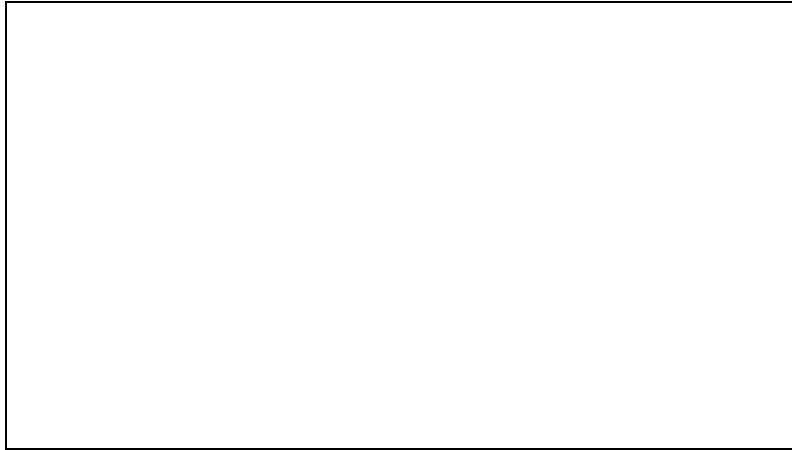
5. Ввімкнути джерело живлення ТЕС-9 фотодатчика і осцилограф СІ-93. При чому ручки керування повинні знаходитися в наступних положеннях: «Канал І» - «~»; «V/дел.» - «1» або «0.5»; «Час/дел.» - «1 ms»; «Синхронізація» - «Зовн. 1:1»; «Стаб.ВЧ» - «Ø»; «Рівень» - «Авт.»
6. Через 1...2 хв після ввімкнення ручками «☀» і «□» установити чітку лінію розгортки. Ручку керування «Рівень» переключити в положення «Очік.»
7. Подаючи лазерні імпульси з періодом не менше 15 с, ручкою «☀» досягти на екрані осцилографа стійкого засвічення лазерного імпульсу. Визначити ширину лазерного імпульсу в сантиметрах і встановити його тривалість, перемноживши його ширину на ціну поділки розгортки. Побудувати залежність  $\tau = f(U_n)$ .
8. Отримати від викладача заготовку, занести параметри матеріала до Таблиці 1. Провести експерименти відповідно до плану експерименту (Таблиця 2).
9. Виміряти отримані діаметри і заповнити Таблицю 3.
10. За запропонованими моделями 1.1, 1.3 та 1.5 отримати розрахункові діаметри і заповнити Таблицю 4.
11. Побудувати графіки залежності діаметра отвору від енергії імпульсу і фокусної відстані лінзи для експериментальних даних та для моделей 1.1, 1.3 та 1.5
12. За результатами розрахунків та експериментів зробити висновки про адекватність запропонованих фізичних моделей отриманим експериментальним даним.

## Рекомендований звіт по роботі

Параметри лазерного імпульса.

Залежність енергії від напруження накачки:

$E, Дж$



$U_H, В$

Залежність тривалості імпульса від напруження накачки:

$\tau, сек \cdot 10^{-3}$



$U_H, В$

Таблиця 1. Параметри матеріалу

Матеріал: \_\_\_\_\_

$W_p^u(\tau_1) =$	$a =$
$W_p^u(\tau_2) =$	
$W_p^u(\tau_3) =$	
$\rho =$	$T_u =$
$c =$	$T_{nl} =$
$c' =$	$L_u =$
$\lambda =$	$L_{nl} =$

Таблиця 2. Рівні факторів та план експеримента

$x_i$	$E, Дж$	$F, мм$
-1	$E_{(-1)} =$	$F_{(-1)} =$
0	$E_{(0)} =$	$F_{(0)} =$
1	$E_{(+1)} =$	$F_{(+1)} =$

№	$x_1$	$x_2$
1	-1	-1
2	0	-1
3	1	-1
4	-1	0
5	0	0
6	1	0
7	-1	1
8	0	1
9	1	1

Таблиця 3. Результати експерименту

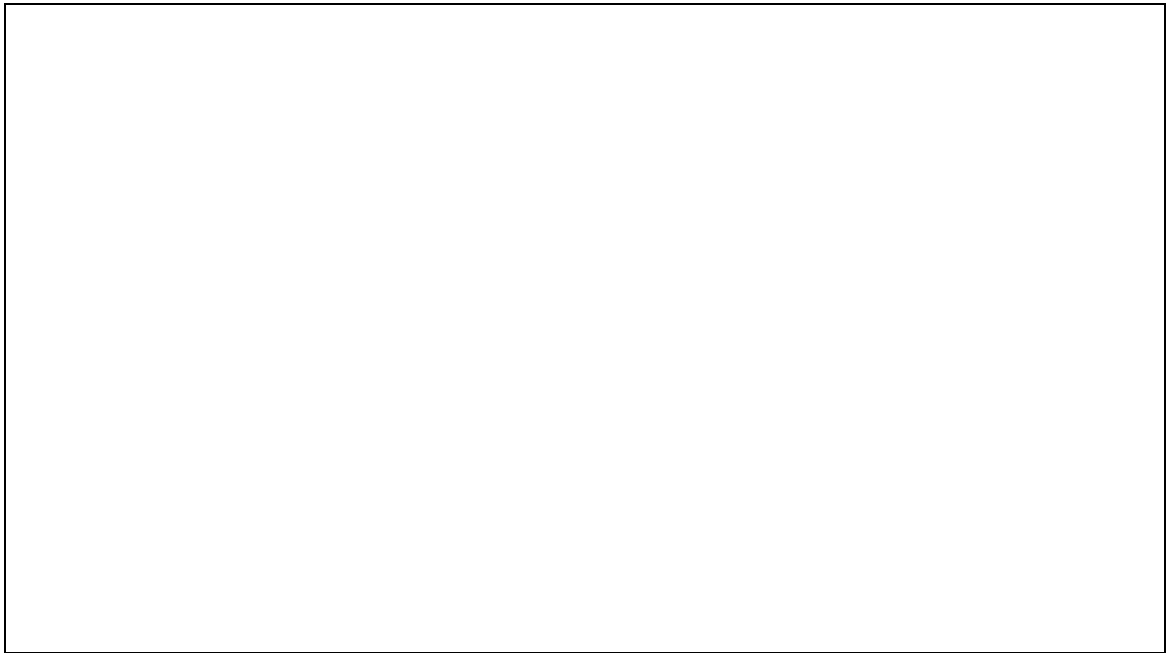
№	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$\bar{d}$
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				

Таблиця 4. Порівняння експериментальних даних з результатами розрахунків за аналітичними моделями

		$E_1 =$	$E_2 =$	$E_3 =$
$F_1 =$	$d (1.1)$			
	$d (1.3)$			
	$d (1.5)$			
	$\bar{d}$			
$F_2 =$	$d (1.1)$			
	$d (1.3)$			
	$d (1.5)$			
	$\bar{d}$			
$F_3 =$	$d (1.1)$			
	$d (1.3)$			
	$d (1.5)$			
	$\bar{d}$			

Залежність діаметра отвору від енергії імпульсу ( $F = F_{(0)} = const$ ):

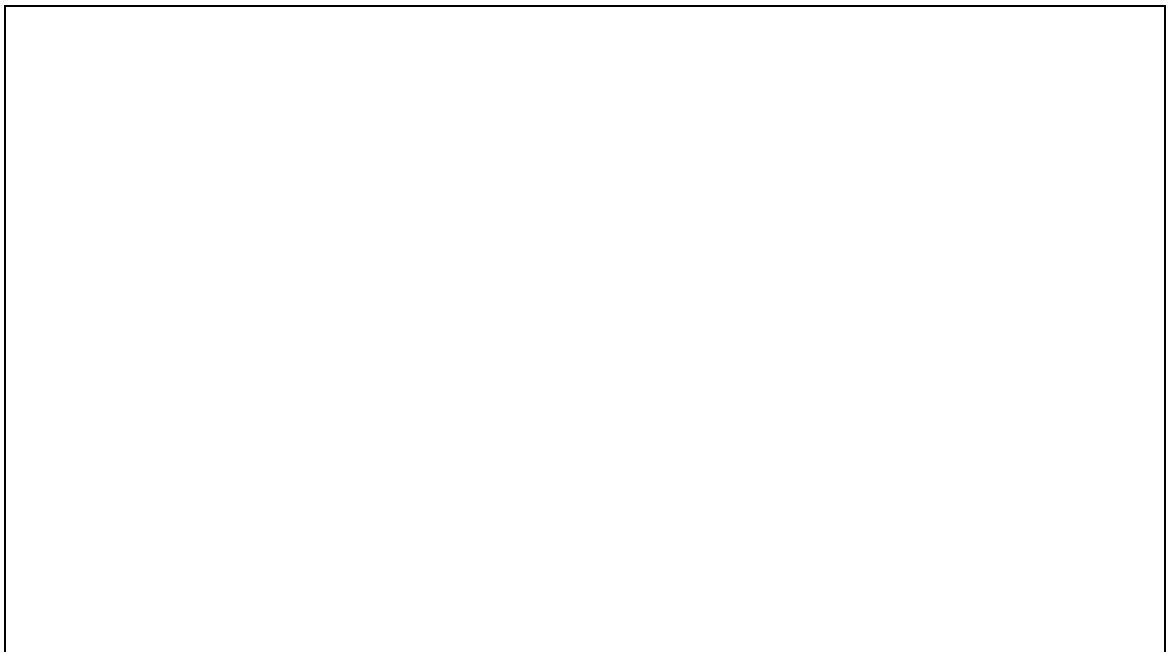
$d, см$



$E, Дж$

Залежність діаметра отвору від фокусної відстані ( $E = E_{(0)} = const$ ):

$d, см$



$F, мм$

Висновки по роботі:

## Лабораторна робота №2

### Проектування режимів лазерної розмірної обробки експериментальними методами на базі моделювання процесу обробки

**Мета роботи:** Оволодіти методикою проектування режимів лазерної розмірної обробки експериментальними методами за допомогою побудови та реалізації повного факторного плану.

**Обладнання та матеріали:** лазерна технологічна установка "Квант-15"; вимірювач енергії ІЕ-3А; лазер газовий ЛГ-105

#### Короткі теоретичні відомості

Сфокусоване лазерне випромінювання використовується для формування наскрізних отворів діаметром 50 ... 1500 мкм в деталях з різних матеріалів товщиною до 10 ... 12 мм. В механізм формування отвори сфокусованим лазерним випромінюванням входять:

1. Поглинання випромінювання оброблюваних матеріалом.
2. Формування теплового джерела в межах плями фокусування лазерного випромінювання, а також конкуренція між припливом енергії і її витратою через теплопровідність.
3. Фазові перетворення в обсягах матеріалу, прогрітих вище критичних температур.
4. Евакуація продуктів лазерної ерозії у вигляді пари і розплаву.
5. Перефокусування чергової порції енергії факелом.
6. Плавлення стінок отвору при впливі на нього розфокусованого випромінювання зниженої густини потужності.
7. Загасання процесу при поступовому зниженні потужності випромінювання на задній ділянці імпульсу.
8. Формування остаточного отвору, включаючи в себе перерозподіл і фіксацію розплаву, а також структурні перетворення у приповерхневому шарі матеріалу.

Задача адекватного опису процесу обробки отвору лазерним випромінюванням досить складна через різноманіття процесів і фізичних явищ, що відбуваються при цьому. Розроблені для цього фізичні моделі, які описують з теплових позицій деякі стадії руйнування, обмежені. Кожна з найбільш відомих моделей (Сатоши, Коваленко, Вейко-Лібенсона, Стефана,

Улякова і т.д.) не враховує ряд факторів або процесів, які є вельми значущими при формуванні отвору.

З огляду на значний обсяг наближень і обмежень, що вводяться при теоретичному аналізі процесу лазерної обробки отворів і його кількісному опису, а також вузький і різний для кожної моделі набір керованих факторів, фізичні моделі можна рекомендувати лише для орієнтовного визначення діапазону режимів обробки. Для уточнення технологічного режиму необхідно провести експериментальне дослідження процесу.

Відповідно до відомих фізичних моделей слід очікувати нелінійну залежність розміру отворів від досліджуваних параметрів обробки. У зв'язку з цим будемо таку залежність у вигляді полінома другого порядку:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{\substack{i=1 \\ j=1 \\ i \neq j}}^k b_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

де  $y$ -вихідний параметр,  $b_0$ ,  $b_i$ ,  $b_{ii}$ ,  $b_{ij}$  – коефіцієнти моделі,  $x_i$ - керовані параметри процесу.

В якості керованих параметрів процесу виберемо два: енергію імпульсу  $E$  і фокусну відстань лінзи  $F$ . Обробка отворів буде проводитися без розфокусування ( $\Delta F = 0$ ). Кожен фактор матиме три рівні.

Для побудови залежності можна використати методи повнофакторного експерименту (ПФЕ). При одночасному варіюванні керованих факторів за певним планом скорочується число необхідних експериментів.

У факторному просторі необхідно відповідно до плану експерименту встановити необхідні значення напруги накачки і фокусної відстані. У кожній точці експерименту необхідно провести три досліди ( $n_u = 3$ ). Дослід проводиться наступним чином: імпульси подаються до тих пір, поки не сформується отвір. Ознакою цього є слід He-Ne лазера під заготівлею або виражений факел при обробці отвору знизу заготовки. Після цього подається ще один імпульс (калібрувальний), щоб прибрати розплав з нижньої частини отвору. Якщо в результаті каліброваного імпульсу отвір заплавився, обробку слід продовжувати і закінчити знову калібрувальним імпульсом.

### Порядок проведення роботи.

1. Ознайомитися з правилами техніки безпеки в лабораторії
2. Ознайомитися з теоретичними відомостями до лабораторної роботи
3. Увімкнути установку Квант-15.
4. Встановити індуктивність ланцюга розряду 2000 мкГн. Виміряти рівень енергії по вимірникові установки ІЕ-3А для наступних значень напруги накачування: 500, 700 і 900 В. Занести результати на графік та до Таблиці 1. Внести надані викладачем значення фокусної відстані до Таблиці 1.
5. Виконати експерименти у відповідності до плану (Таблиця 2) у порядку, зазначеному у стовпчику «№ експер.» (за рандомізованою схемою).
6. Виміряти результати та занести їх до Таблиці 3.
7. Обробити результати експериментів у відповідності до методики нижче.
8. Отримати від викладача значення діаметру, для якого необхідно підібрати режим обробки. Розрахувати параметри обробки та прогнозовану точність обробки.
9. Виконати обробку на підбраному у п.8 режимі, виміряти результати обробки, занести результати виконання пунктів 8-9 до Таблиці 6.
10. Побудувати отримані залежності  $d(E)$ ,  $d(F)$ ,  $v(E)$ ,  $v(F)$
11. Зробити висновок по роботі.

### Обробка експериментальних даних

Розрахувати дисперсію і стандартне відхилення діаметральні розмірів отворів в кожній  $u$ -ій серії дослідів:

$$S_u^2 = \frac{1}{n_u - 1} \sum_{i=1}^{n_u} (d_{ui} - \bar{d}_u)^2$$

$$\bar{d}_u = \frac{1}{n_u} \sum_{i=1}^{n_u} d_{ui}$$

Розрахувати показник точності процесу - коефіцієнт варіації діаметральні розмірів:

$$v = \frac{S_u}{\bar{d}_u} 100\%$$



Перевірити для дослідів в центрі плану (досліди 9 ... 11) гіпотезу про нормальність розподілу повторностей для діаметральні розмірів отворів:

$$w_u = \frac{\{0.7071[d_{u,3} - d_{u,1}]\}}{\sum_{i=1}^{n_u} d_{u,i}^2 - \frac{1}{3} \left( \sum_{i=1}^{n_u} d_{u,i} \right)^2}$$

де  $d_{u,i}$  - величини з ранжированої вибірки значень кожного параметра для 9, 10 і 11 дослідів:  $d_{u,1} \leq d_{u,2} \leq d_{u,3}$ . Гіпотеза приймається, якщо  $w_u \leq w_{\text{ТАБЛ}}$ . У нашому випадку  $w_{\text{ТАБЛ}} = 0.753$ . Значення занести до Табл. 4 звіту. Якщо параметр розподілений ненормально, необхідно перейти до нової випадкової величини перетворенням вихідної.

Розрахувати дисперсію коефіцієнтів варіації в дослідях 9..11:

$$S_v^2 = \frac{1}{2} \sum_{u'=7}^9 (v_{u'} - \bar{v})^2, \quad \bar{v} = \frac{1}{3} \sum_{u'=7}^9 v_{u'}$$

Перевірити гіпотезу про однорідність дисперсії по  $G$ -критерію Кохрена:

$$G = \frac{S_u^2 \max}{\sum_{u=1}^N S_u^2} < G_{\text{табл}}$$

де  $u = 1 .. 8$  - число серій дослідів;  $G_{\text{табл}} = 0.573$ ; Значення  $G$  - критерію занести до Таблиці 4 звіту. Якщо дисперсії неоднорідні, необхідно перетворити залежні змінні;

Розрахувати по дослідом 1..8 коефіцієнти регресії моделі (1) для розмірів отворів і коефіцієнта варіації за формулами:

$$b_0 = \frac{\sum_{u=1}^N x_{0u} \bar{Y}_u}{\sum_{u=1}^N x_{0u}^2}, \quad b_i = \frac{\sum_{u=1}^N x_{iu} \bar{Y}_u}{\sum_{u=1}^N x_{iu}^2}$$

$$b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^N x_{iu} x_{ju} \bar{Y}_u}{\sum_{u=1}^N (x_{iu} x_{ju})^2}, \quad b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^N x_{iu}^2 \bar{Y}_u}{\sum_{u=1}^N (x_{iu}^2)^2}$$

Визначити значимість коефіцієнтів регресії, порівнюючи їх значення з довірчим інтервалом:

$$\Delta b = \frac{t S_{\text{ош}}^2}{\sqrt{N n_u}}$$

де  $S_{\text{ош}}^2$  - дисперсія похибки дослідів:

$$S_{\text{ош}}^2(d) = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N S_u^2 \quad S_{\text{ош}}^2(v) = S_v^2$$

$t$  - критерій Стьюдента;  $t = 3.36$ . Занести значущі коефіцієнти до Таблиці 5 звіту.

Перевірити гіпотезу про адекватність представлення результатів експерименту отриманими рівняннями регресії за  $F$  - критерієм Фішера:

$$F = \frac{S_{\text{НА}}^2}{S_{\text{ош}}^2} \leq F_{\text{табл}}$$

де  $S_{\text{НА}}^2$  - дисперсія неадекватності:

$$S_{\text{НА}}^2 = \frac{\sum_{u=1}^N n_u \left( \bar{Y}_u - \hat{Y}_u \right)^2}{f_{\text{НА}}}$$

$f_{\text{НА}}$  - різниця між числом серій дослідів і числом значущих коефіцієнтів.

Значення  $F_{\text{табл}}$  наведені в таблиці:

$f_{\text{НА}}$	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
$F_{\text{табл}}(d)$	8,4	6,05	5,14	4,63	4,3	4,07	3,91
$F_{\text{табл}}(v)$	98,48	99,01	99,17	99,25	99,30	99,33	99,94

Непідтвердження гіпотези свідчить про те, що досліджувані залежності мають більш високий порядок, ніж другий. Для отримання точного опису експерименту необхідно перейти до планів з більшим числом рівнів.

## Рекомендований звіт по роботі

Залежність енергії імпульсу від напруги накачки:

$E$ , Дж


500

700

900

$U_{НАК}$ , В

Таблиця 1. Факторний простір експерименту.

$x_i$	Фактори	
	Е, Дж	F, мм
-1		
0		
1		

Таблиця 2. План експерименту

№	№ експер.	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_1x_2$	$x_1^2$	$x_2^2$
1	5	1	-1	-1	1	1	1
2	9	1	1	-1	0	0	1
3	4	1	-1	1	0	1	0
4	6	1	1	1	0	1	0
5	2	1	0	1	0	0	1
6	11	1	0	1	1	1	1
7	8	1	1	0	0	0	0
8	1	1	1	0	0	0	0
9	10	1	0	0	0	0	0
10	7	1	0	0	0	0	0
11	3	1	0	0	0	0	0

Таблиця 3. Результати експерименту

№	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$\bar{d}$	$\hat{d}$	$\bar{d} - \hat{d}$	$S_u^2$	$v$	$\hat{v}$	$v - \hat{v}$
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										
11										
$\Sigma$										

Таблиця 4. Результати статистичного аналізу

	$w_u$	$w_u$ табл	$G$	$G_{\text{табл}}$	$t$	$\pm \Delta b$	$S_{\text{ош}}^2$	$S_{\text{НА}}^2$	$F$	$F_{\text{табл}}$
$d$		0.753		0.573	3.36					
$v$	-	-	-	-	9.93					

Таблиця 5. Значення коефіцієнтів рівняння регресії

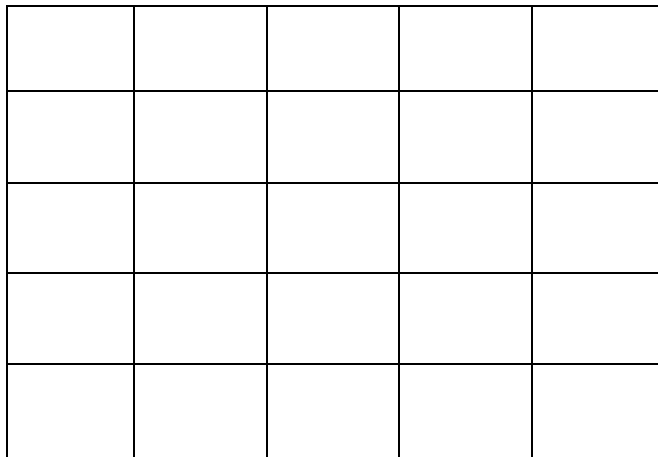
	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_{11}$	$b_{22}$	$b_{12}$
$d$						
$v$						

Таблиця 6. Результати проектування режиму обробки

Діаметр отвору	Енергія імпульсу	Фокусна відстань	Прогнозована похибка	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$\bar{d}$

Графіки залежності результатів обробки від вхідних параметрів

$d, \text{мм}$



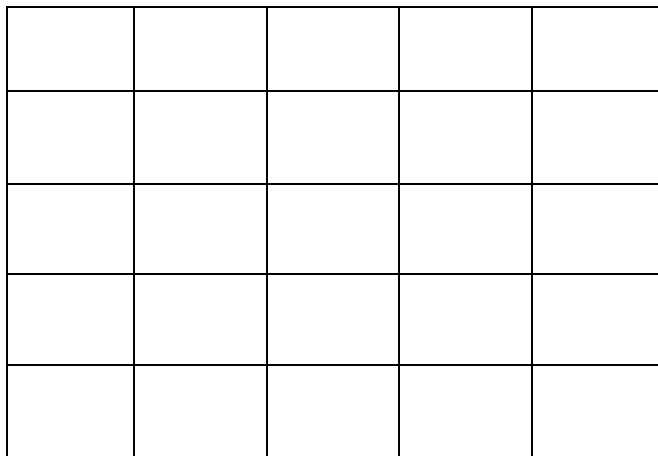
-1

0

+1

$E, \text{Дж}$

$d, \text{мм}$

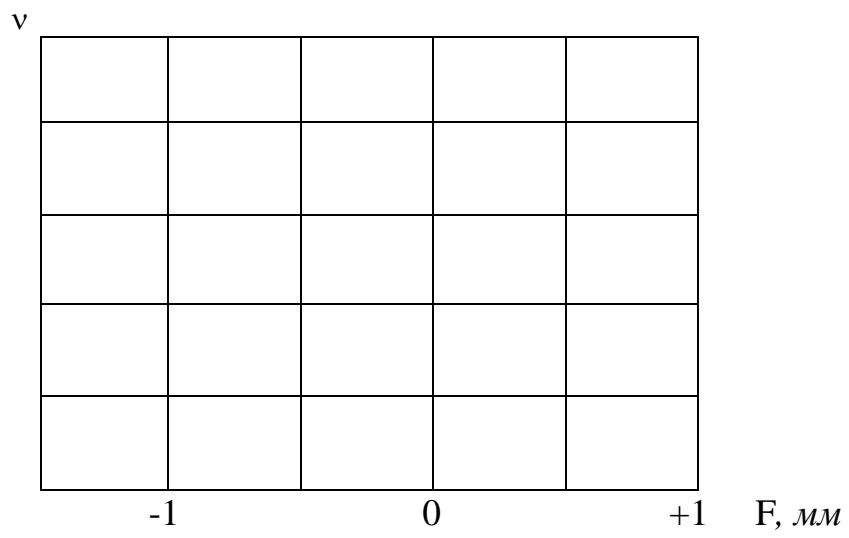
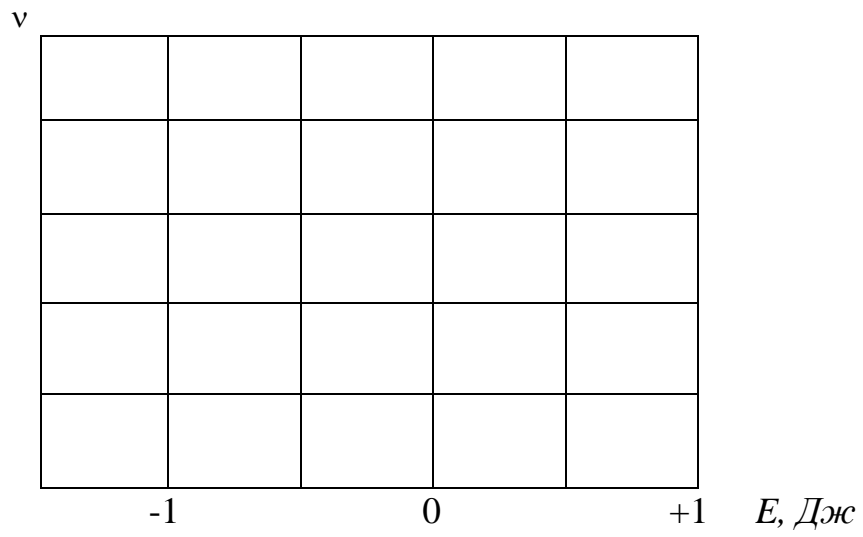


-1

0

+1

$F, \text{мм}$



Висновки: