

# Технологія лазерної розмірної обробки

Презентація 7 (лекції 15-16)  
**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 №7 від 27 березня 2014 р.) (свідоцтво НМУ № Е13/14-061)**

**Автор: проф. Котляров В.П.**

# Лекція 15. **Тема 5.** Методи визначення режиму лазерної обробки порожнини (подовження)

## 5.4. Проектування режимів ЛРО. Одно критеріальні задачі

### 5.4.2. Проектування операції ЛРО з нормованою якістю отвору

#### в). Проектування операції обробки конічних отворів

Згідно з порядком проектування технологічної операції експериментальним методом (слайд 3) виконаємо пошук режимів обробки умовної операції – виготовлення отворів заданої конусоподібності  $k \leq 400$  мкм відповідно до ТЗ (слайд 2).

а). Формування координат та меж досліджень (факторного простору).

На підставі аналізу рангової діаграми для конусоподібності  $k$  отвору в корпусах ін'єкційних голок (рис. 5.13) визначимо склад керуємих факторів, які необхідно використати в експерименті. По-перше, це найбільш впливові фактори  $F$ ,  $\Delta F$ ,  $\theta$ ,  $E$ , вдруге, до них також бажано додати додатковий фактор керування подовжньою формою отвору – закон розподілу інтенсивності поперек променя (діаметром діафрагми  $D_o$ ). Факторний простір експерименту з межовими рівнями факторів наведено в табл. 5.7.

д). Пошук режимів обробки.

Коефіцієнти моделі приведені в таблиці. 5.9. Використаємо другий метод пошуку рішення рівняння з багатьма невідомими  $x_i$  – перетворення моделі в рівняння з одним невідомим (найбільш впливовий та плавно керуємих фактор) шляхом фіксування інших факторів на рівнях, які сприяють досягненню потрібного результату.

Найбільш впливовий фактор  $F$  та відносимо до тих, що фіксуються, внаслідок ступеневого керування, фактор  $D_o$  - маловпливовий, а рівень енергії  $E$  - внаслідок складності параметричного змінення рівнів. Таким чином, пошук режиму виконуємо плавним зміненням (по черзі) факторів  $\Delta F$  та  $\theta$  (зовнішнім керуванням телескопом Галілея). На рис. 5.16 показані одномірні перетини поверхні відгуку обраними рівнями фіксованих факторів, при пересіченні яких заданим рівнем аргументу  $k = 400$  мкм визначається рівень фактора, що змінюється ( $\theta$  або  $\Delta F$ ).

# Тема 5. Методи визначення режиму лазерної обробки порожнини (подовження)

## 5.4. Проектування режимів ЛРО. Одно критеріальні задачі 5.4.2. Приклад проектування операції ЛРО за показниками повздожньої форми отвору

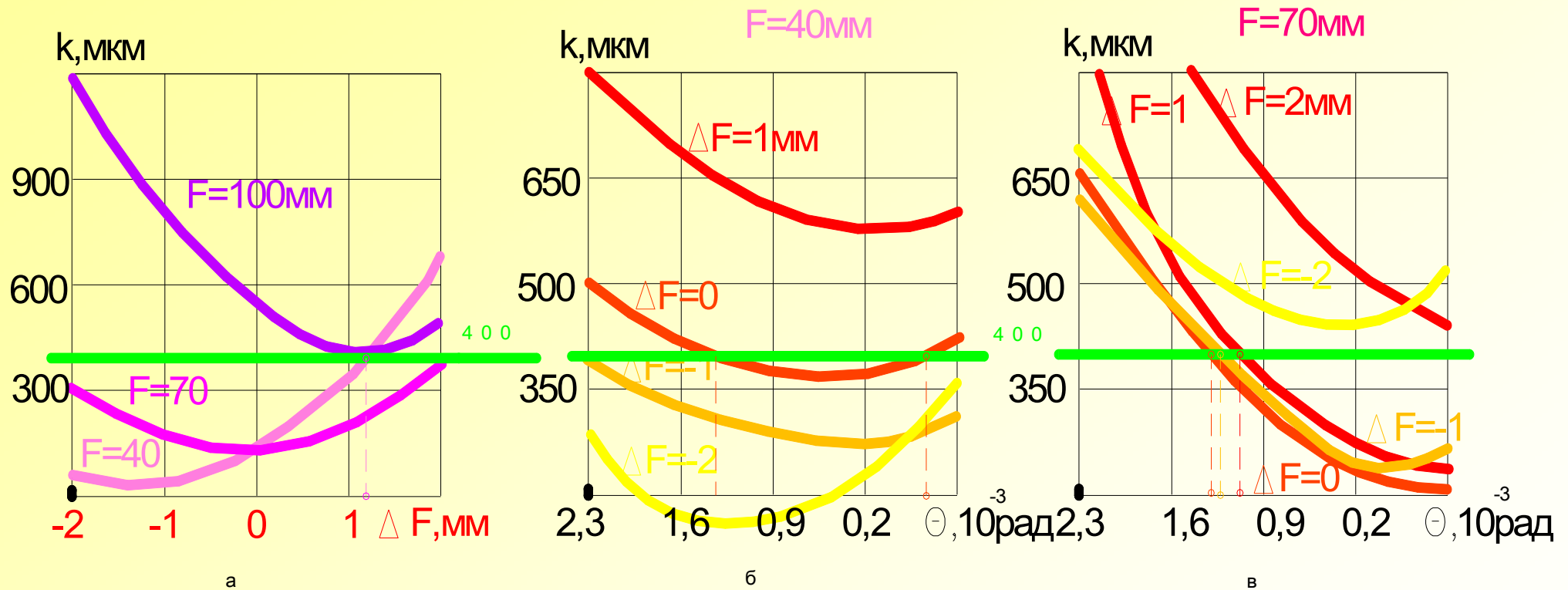


Рис.5.17. Одномірні перетини поверхні відгуку вздовж фактору  $\Delta F$  (а) та кута розбіжності  $\Theta$  (б, в) з фіксацією факторів  $D \text{ д} = 9 \text{ мм}$ ,  $E = 13 \text{ Дж}$ ,  $\Theta = 8 \cdot 10 \text{ рад}$  (а);  $D \text{ д} = 9 \text{ мм}$ ,  $E = 13 \text{ Дж}$  (б, в)

## Тема 5. Методи визначення режиму лазерної обробки порожнини (подовження)

### 5.4. Проектування режимів ЛРО. Одно критеріальні задачі

#### 5.4.2. Проектування операції ЛРО з нормованою якістю отвору

Із залежностей рис. 5.16 можна визначити декілька наборів параметрів технологічної операції (режимів обробки), при реалізації яких на відповідній ЛТУ одержимо отвори із заданими результатами, тобто конусоподібні з величиною  $k = 400$  мкм, причому можливо керування різними факторами.

Відповідно до поставленого завдання – отвори в корпусах ін'єкційних голок повинні мати конусоподібність  $k = 400$  мкм для полегшення автоматичної збірки з голкою. Отвори з такою конусоподібністю можна отримати різними комплексами параметрів обробки; наприклад, при:

а). керуванні показником  $k$  змінення рівня фактора  $\Delta F$  (рис. 5.16а):

- фіксовані фактори:  $E = 13$  Дж;  $D_{\phi} = 9$  мм;  $\theta = 8 \times 10^{-4}$  рад;  $F = 40$  мм;
- фактор, що керується:  $\Delta F = 1,3$  мм

б). керуванні показником  $k$  змінення рівня фактора  $\theta$  (рис. 5.16б):

- режим №1: фіксовані фактори:  $E = 13$  Дж;  $D_{\phi} = 9$  мм;  $F = 40$  мм;  $\Delta F = 0$ ;  
фактор, що керується:  $\theta = -0,3 \times 10^{-3}$  рад;
- режим №2: фіксовані фактори:  $E = 13$  Дж;  $D_{\phi} = 9$  мм;  $F = 40$  мм;  $\Delta F = 0$ ;  
фактор, що керується:  $\theta = 1,3 \times 10^{-3}$  рад;
- режим №3: фіксовані фактори:  $E = 13$  Дж;  $D_{\phi} = 9$  мм;  $F = 70$  мм;  $\Delta F = -1$  мм;  
фактор, що керується:  $\theta = 1,2 \cdot 10^{-3}$  рад.

Ця задача має безліч рішень відносно режимів обробки отворів із заданою конусоподібністю, однак, за іншими показниками вони будуть відрізнятися один від одного.

## Тема 5. Методи визначення режиму лазерної обробки порожнини (подовження)

### 5.4. Проектування режимів ЛРО. Одно критеріальні задачі 5.4.2. Проектування операції ЛРО з нормованою якістю отвору

#### г). Проектування операції обробки отворів із складним профілем

Виконаємо спробу визначення режиму обробки отвору із заданими відхиленнями радіусів його перетинів вздовж осі  $\Delta r_{i,u}$  від циліндричної форми з усередненим по перетинам радіусом:

$$\bar{r}_{.j} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_{ij}$$

Слідуючи алгоритму проектування режимів обробки експериментальними методами (сл. 4, През.№2) і використовуючи рангові діаграми факторів відносно розмірів отвору в його перетинах вздовж осі (рис. 5.16 сл.20, През. №6), виконаємо моделювання процесу обробки з подальшим рішенням рівнянь з багатьма аргументами графічним методом з їх перетворенням в одномірні наданням деяким факторам ( $n - 1$  штук) фіксованих рівнів. Відмінність використання цієї методики в задачі пошуку режиму обробки є в тому, що він повинен бути **єдиним** для усіх моделей, тобто для **усіх показників відмінностей** форми реальних (експериментальних) отворів від ідеальних.

Із графіків одномірних перетинів цих регресійних залежностей, приведених на рис. 5.17, витікає, що для заданої набором  $i \Delta r_{i,u}$  подовжньої форми порожнини (комбінації відхилень радіусів ( $i \Delta r_{i,u} \ 1...n$ )) **неможливо**, перетинаючи їх набором із  $n$  горизонтальних ліній, **випадково** отримати єдине значення абсциси (тобто значення керуемого фактору) для точок їх пересічення з  $n$  функціями. В таких випадках задача вибору технологічного режиму є завданням **багатокритеріальної оптимізації**.

# Тема 5. Методи визначення режиму лазерної обробки порожнини (подовження)

## 5.4. Проектування режимів ЛРО. Одно критеріальні задачі

### 5.4.2. Проектування операції ЛРО з нормованою якістю отвору

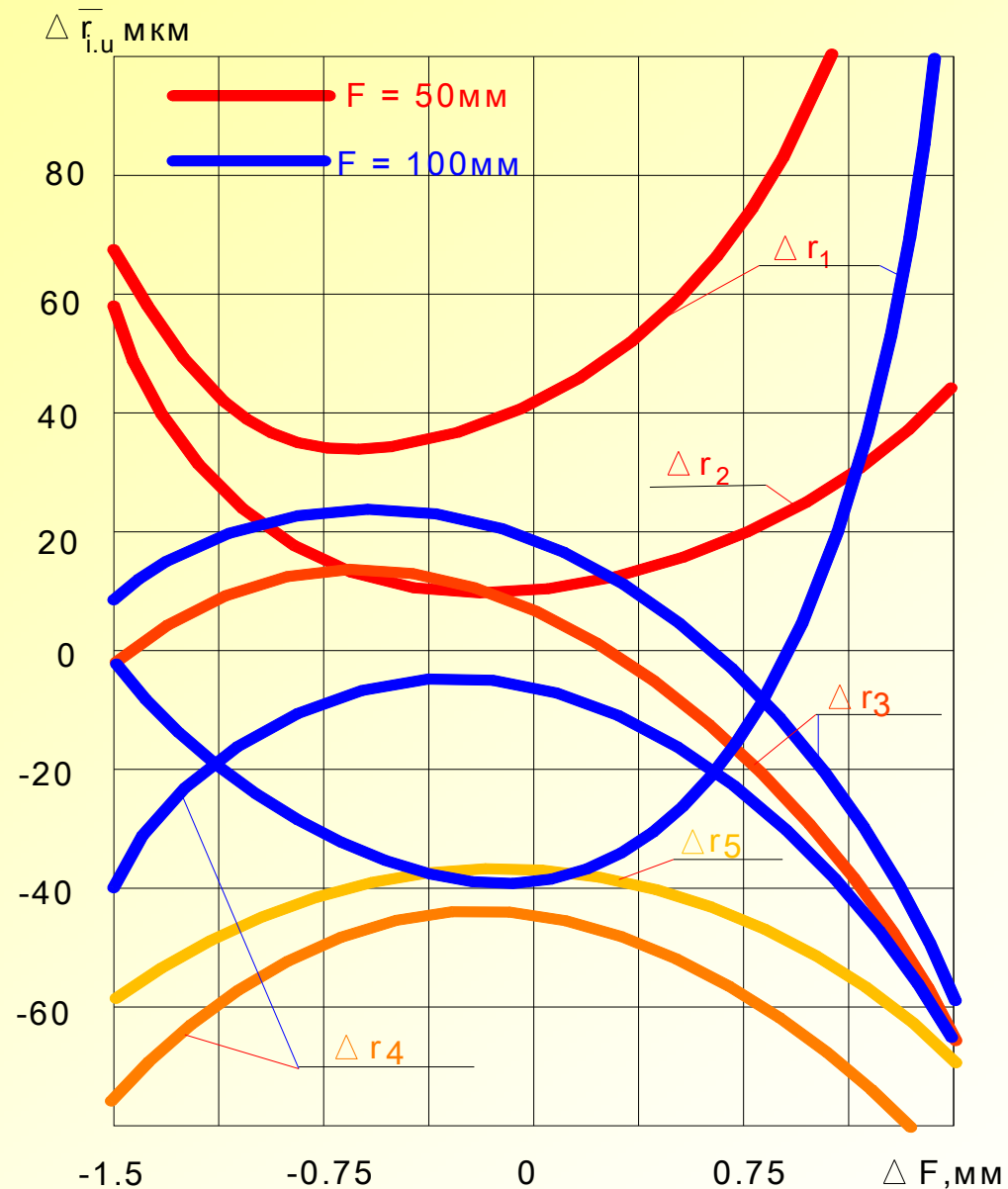


Рис.5.18. Одномірні перетини поверхні відгуку вздовж фактору  $\Delta F$  з фіксацією факторів  $F=50$  (100) мм,  $\delta = 0,5$  мм,  $D=16$  А,  $E=9$  Дж,  $\tau=660$  мкс,  $D_{\Gamma}=9$  мм



## Тема 5. Методи визначення режиму лазерної обробки порожнини (подовження)

### 5.4. Проектування режимів ЛРО. Одно критеріальні задачі

#### 5.4.2. Проектування операції ЛРО з нормованою якістю отвору

Невдала спроба проектування процесу обробки порожнини заданої форми внаслідок багатокритеріальності опису її подовжньої форми, викладена вище (сл. 5, През.№7), може бути успішною, якщо цю задачу трансформувати в задачу оптимізації режиму обробки порожнини з найменшими відхиленнями від заданої форми. За цим методом при описі процесу регресійною моделлю в якості залежних показників операції приймаються відхилення усереднених по партії виробів поперечних розмірів профілю порожнини від розміру, заданого кресленням в тому ж (з  $n$  штук) контрольному перетині:

$$\Delta r_{iu} = (r_i^K - \bar{r}_{i.u}),$$

де:  $r_i^K$  - розмір заданого профілю у  $i$  - перетині ( $i = 1 \dots n$ );  $r_{i.u}$  - розмір профілю у  $i$  - перетині, усереднений за вимірами  $j$  - порожнин ( $j = 1 \dots m$ ), які оброблено в  $u$  іспиті.

Таким чином, в кожному іспиті (з набором певних рівнів керуємих факторів) показник якості виражається системою відхилень у оброблених порожнин від заданих відповідних розмірів із креслення виробу. Для спрощення завдання вибору режиму обробки, при якому величини відхилень  $\Delta r_{iu}$  мінімальні, їх зручно об'єднати в узагальнений показник відхилення форми від нормованої  $\Delta \bar{r}_{.u}^2$  за методом усереднювання квадратів показників якості:

$$\Delta \bar{r}_{.u}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta r_{iu}^2$$

При використанні залежності узагальненого показника якості форми від рівня керуємих чинників з метою ранжирування останніх отримана рангова діаграма – рис. 5.19 (умови експерименту – табл. 5.7 (сл. 6, През.№6)). В умовах експерименту відхилення  $\Delta \bar{r}_{.u}^2$  розраховувалися по відношенню до циліндричної порожнини, розмір якої усереднено за перетинами  $i = 1 \dots n$ :

$$\bar{r}_{.j} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_{ij}$$

# Тема 5. Методи визначення режиму лазерної обробки порожнини (подовження)

## 5.4. Проектування режимів ЛРО. Одно критеріальні задачі

### 5.4.2. Проектування операції ЛРО з нормованою якістю отвору

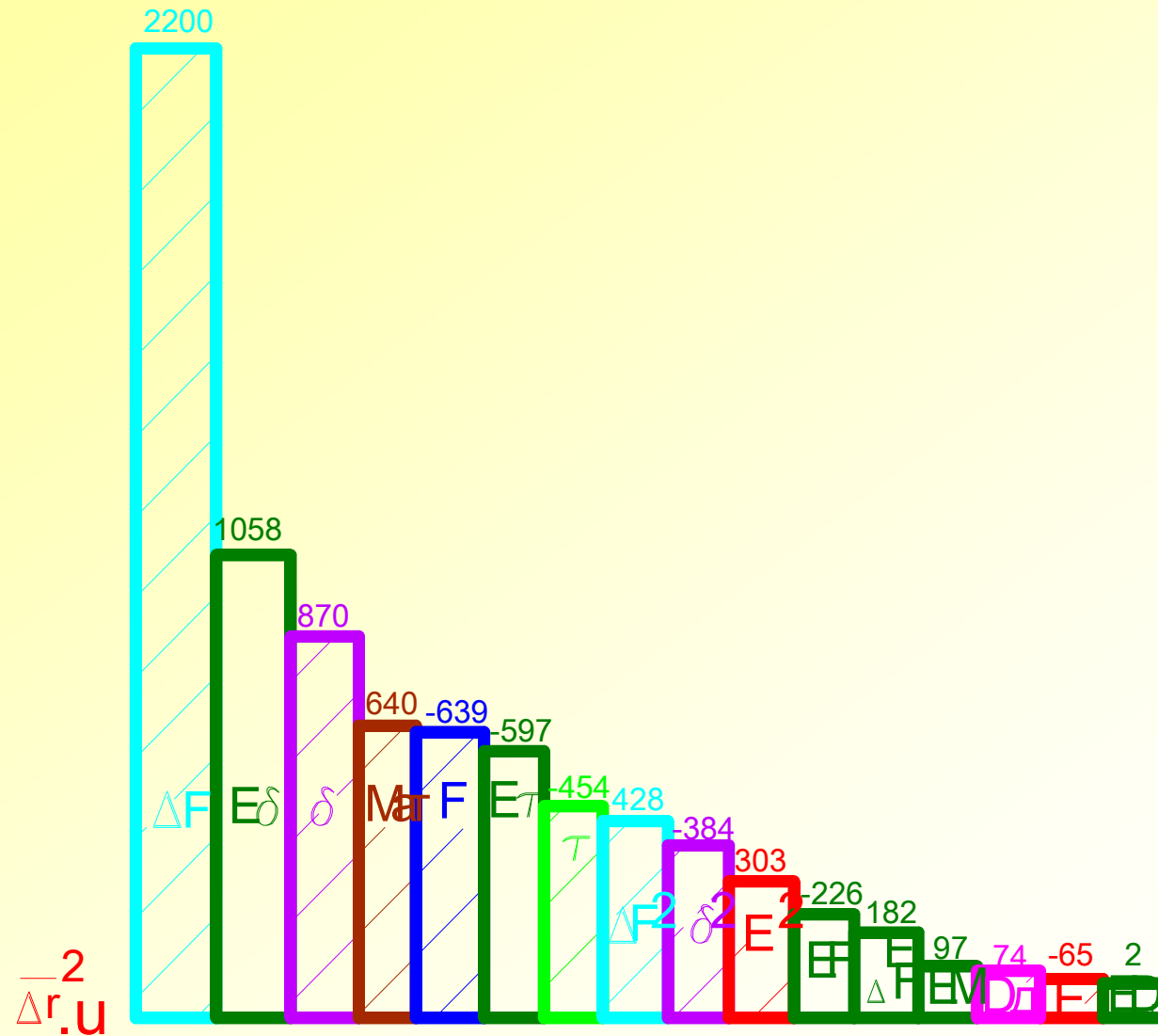


Рис. 5.19. Рангова діаграма впливу керуваних факторів процесу обробки порожнини на узагальнений показник якості подовжньої форми



## Тема 5. Методи визначення режиму лазерної обробки порожнини (подовження)

### 5.4. Проектування режимів ЛРО. Одно критеріальні задачі

#### 5.4.2. Проектування операції ЛРО з нормованою якістю отвору

При виборі режиму обробки порожнини заданого профілю режим опромінення має бути скоректований на мінімум величини узагальненого показника якості при дії на найбільш значимі фактори (за рис. 5.19). Це виконується шляхом визначення координат екстремуму моделі процесу, або при розрахунку розмірів на ПК, переводячи моделі в канонічну форму, а також за **одномірними перетинами** поверхні відгуку – рис. 5.20: наприклад, із похибкою узагальненого показника

$$\Delta \bar{r}_{.u}^2 = 35^2 \text{ мкм}^2$$

можна обробити порожнину з наступними рівнями факторів:  $E = 9 \text{ Дж}$ ,  $D\delta = 9 \text{ мм}$ ,  $F = 100 \text{ мм}$ ,  $\delta = 0,5 \text{ мм}$ ,  $D16A$ ,  $\tau = 660 \text{ мкс}$ ,  $\Delta F = -1,5 \text{ мм}$ .

Таким чином, технологічну задачу проектування операції обробки отворів складної подовжньої форми, яку описано **декількома показниками**  $\Delta r_{iu}$ , і з цієї причини не вдається вирішити методами проектування однокритеріальних задач внаслідок необхідності знаходження єдиного рішення для ряду математичних залежностей за наведеним алгоритмом за умови перетворення її в **одне критеріальну** шляхом створення **єдиного комплексного показника**:

$$\Delta \bar{r}_{.u}^2$$

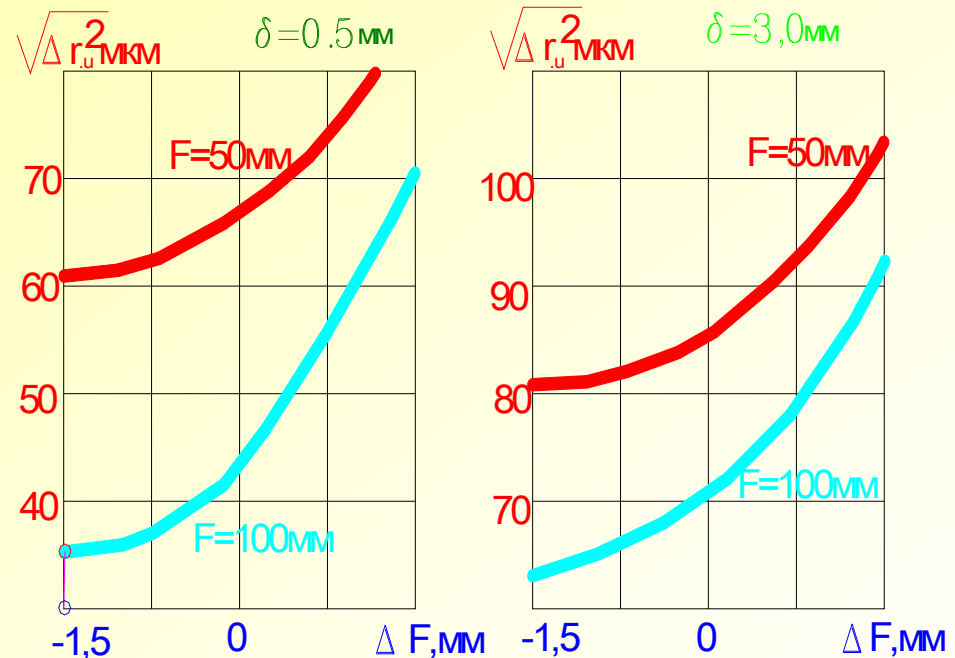


Рис.5.20. Одномірні перетини поверхні відгуку вздовж фактору

$\Delta F$  з фіксацією факторів  $D = 9 \text{ мм}$ ,  $E = 9 \text{ Дж}$ ,  $\tau = 660 \text{ мкс}$ ,  $F = 50$  (100) мм,

$\delta = 0,5$  (3,0) мм, D16A

# Лекція 16. **Тема 5. Методи визначення режиму лазерної обробки порожнини (подовження)**

## 5.4. Проектування режимів ЛРО. Одно критеріальні задачі

### 5.4.2. Проектування операції ЛРО з нормованою якістю отвору

#### д). Проектування операції ЛРО з нормованою точністю розміру отвору

Точність обробки, що досягається, характеризується величиною поля розсіювання розмірів порожнин в партії оброблених заготовок. Серед багатьох числових характеристик поля розсіювання випадкової величини (розмах, медіана, середньоарифметична величина, математичне очікування, дисперсія і ін.) критеріям спроможності, незміщеності і статистичній ефективності задовольняють: дисперсія розміру порожнини:

$$\sigma_d^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{d}_i - d_i)^2$$

(її вибіркова оцінка  $S_d^2$ ), або величина середньоквадратичного відхилення  $\sigma_d$  (вибіркова оцінка  $S_d$ ), які розраховуються за результатами вимірів порожнин (отворів) в партії заготовок.

Внаслідок того, що при змінні умов обробки (режиму опромінення) одночасно змінюються розмір отворів та їх показник точності, необхідно використати відносну характеристику точності – коефіцієнт варіації:

$$\bar{v}_d = \frac{S_{d..}}{\bar{d}_{..}} \times 100\%$$

де:  $\bar{d}_{..} = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m d_{ji}$  - середнє значення розміру порожнин в партії  $m$  заготовок, обмірених в  $n$  перетинах;  $S_{d..} = \left\{ \frac{1}{n} \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (d_{ji} - \bar{d}_{.i})^2 \right\}^{1/2}$  - середньоквадратичне

відхилення розмірів порожнин  $d_{ji}$  в партії з  $m$  ( $j$ ) штук, усереднене за  $n$  вимірювальними перетинами,  $i = 1, \dots, n$  – кількість вимірювальних перетинів,  $d_{ji}$  – розмір  $j$ -ої порожнини в  $i$ -ому перетині.

## Тема 5. Методи визначення режиму лазерної обробки порожнини (подовження)

### 5.4. Проектування режимів ЛРО. Одно критеріальні задачі 5.4.2. Проектування операції ЛРО з нормованою якістю отвору

При ранжируванні чинників на етапі предпланування експерименту (табл. 5.7) розроблені і проаналізовані математичні моделі процесу для критеріїв точності: вихідного розміру ( $d$ )  $\nu_d$  і для усередненого показнику для  $i$  перетинів  $\bar{\nu}$ .

Аналізуючи змальовані на рис. 5.21 рангові діаграми керуємих факторів, можна відзначити, що найбільший вплив на характеристики точності роблять енергетичні параметри пучка лазерного випромінювання, товщина і властивості матеріалу заготовки, причому значимість впливу підкреслюється істотністю їх парних ефектів. Ці висновки підтверджуються отриманими раніше даними, проте, є відмінності:

1. Підвищення загальної точності (за усередненим коефіцієнтом варіації) при збільшенні фокусної відстані  $F$  лінзи можна пояснити зменшенням варіації інтенсивності випромінювання в межах товщини заготовки, що в умовах достатнього її рівня сприяє стабільному видаленню матеріалу.
2. Підвищення точності при переході від жароміцної сталі до алюмінієвого сплаву можна пояснити значно меншою питомою енергією випари останнього (у 5 разів), що наводить до більшого перегріву пари в зоні обробки і інтенсивнішому виносу рідкої фази.
3. Характерним є зниження погрішності обробки у всьому розглянутому діапазоні зміщення  $\Delta F$  при збільшенні енергії до деякого значення  $E_0$  (рис. 5.22), достатнього для обробки заготовок даної товщини  $\delta$  в оптимальному режимі,

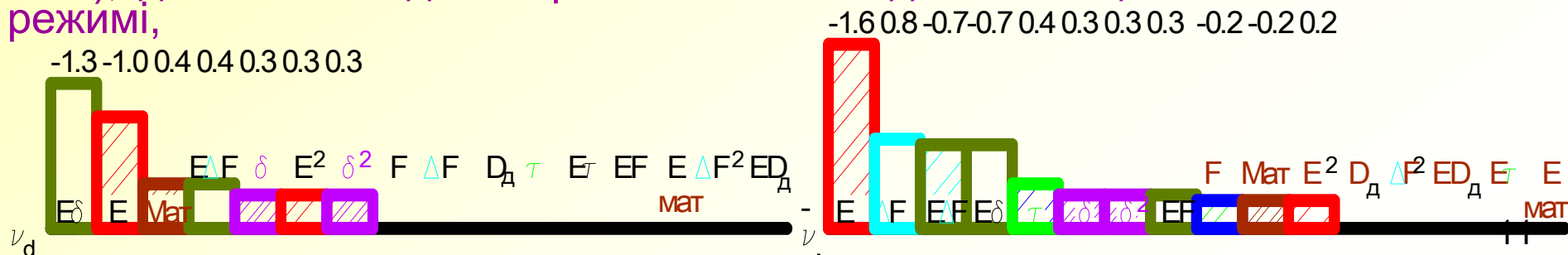


Рис.5.21. Рангові діаграми впливу керуємих факторів на показники точності поперечних розмірів порожнин

## Тема 5. Методи визначення режиму лазерної обробки порожнини (подовження)

### 5.4. Проектування режимів ЛРО. Одно критеріальні задачі 5.4.2. Проектування операції ЛРО з нормованою якістю отвору

причому при обробці тонких деталей в області  $\Delta F < 0$  подальше зростання енергії викликає сильну іонізацію ерозійного факелу і із-за переломлення в ньому випромінювання, знижується якість обробки. Цим можна пояснити зменшення ефекту товщини деталі в області високих енергій і зміну його знаку після рівня  $E_0$ , який зменшується у міру зсуву в область позитивних величин  $\Delta F$  (лінія А на рис. 5.22).

Отримані вище результати (рангові діаграми – рис. 5.21) призначені для використання при розробці технологічної операції прошивки отворів з обмеженим полем розсіяння їх діаметральних розмірів.

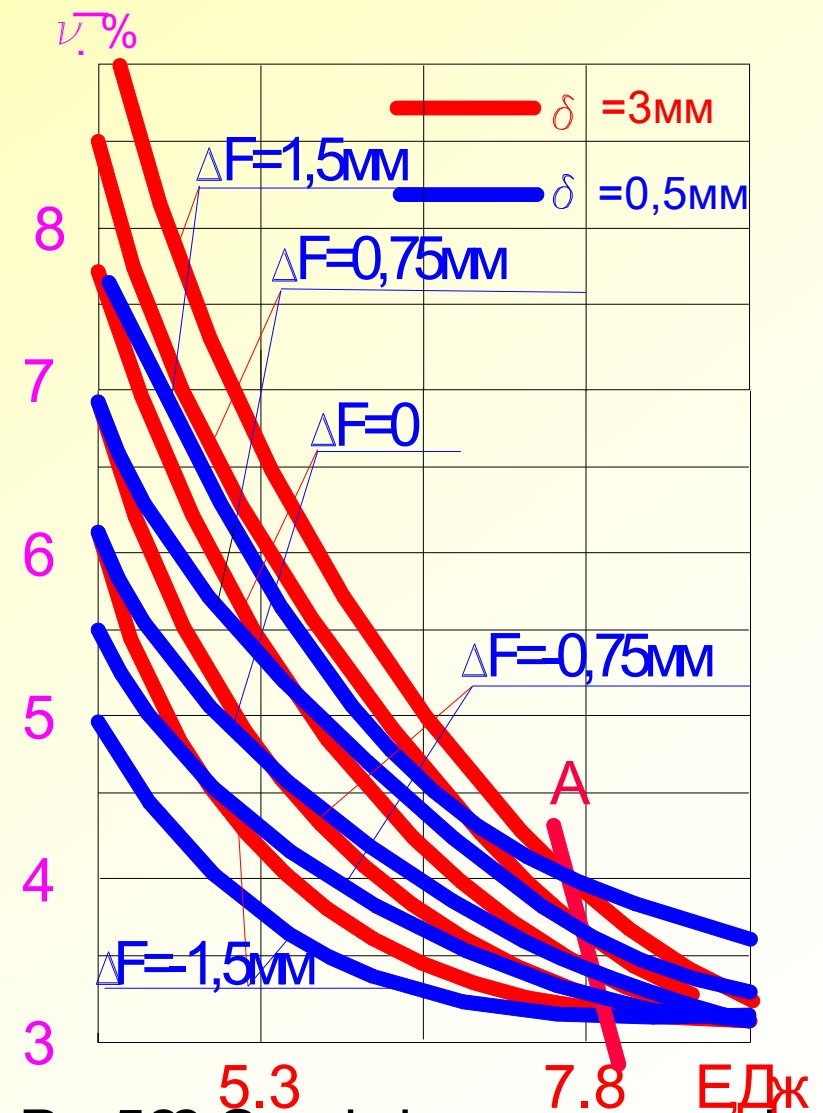


Рис. 5.22. Однімірні перетини поверхні відгуку вздовж фактору  $E$  з фіксацією факторів  $D = 9 мм$ ,  $F = 100 мм$ ,  $\delta = 0,5$  (32 мм  $\tau = 440 мкс$ , Д16А)

## Тема 5. Методи визначення режиму лазерної обробки порожнини (подовження)

### 5.4. Проектування режимів ЛРО. Одно критеріальні задачі

#### 5.4.2. Проектування операції ЛРО з нормованою якістю отвору

**Технічне завдання:** вибрати режими обробки отворів з полем розсіяння розмірів  $d_{ном}$  (H12) (рис. 5.11, сл. 2, През.№6), що не перевищує відносної величини 8-12% від розміру. Матеріал заготовки: латунь ЛС-59, товщина стінки  $\delta = 4 \pm 0,1$  мм.

**а).** Формування координат та меж досліджень (факторного простору).

Із рангових діаграм вибрані наступні керуємі фактори:

- імпульсна енергія випромінювання  $E$  ( $x_1$ );
- фокусна відстань лінзи  $F$  ( $x_2$ );
- положення заготовки в пучку випромінювання  $\Delta F$  ( $x_3$ );
- діаметр діафрагми в пучку випромінювання  $D\delta$  ( $x_4$ );
- кут розбіжності пучка випромінювання  $\theta$  ( $x_5$ ).

**б).** Постулювання моделі процесу.

Враховуючи характер залежностей діаметру отвору від параметрів обробки (рис. 5.8, сл. 4, През.№5) за результатами одно факторних експериментів, припускається квадратична модель процесу у вигляді:

$$v_d = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2 + \sum_{\substack{i=1 \\ j=1 \\ i \neq j}}^n x_i x_j b_{ij},$$

**в).** Обрання експериментального плану.

При проектуванні нових об'єктів (технологічних операцій) рекомендується використання планів гнучкого типу, які дозволяють покрокове дослідження процесу. До таких планів відносяться **D-оптимальні** композиційні плани: план **Бокса** на кубі з ядром ДФЕ  $2^{5-1}$  та із зірковими точками  $\pm\alpha, 0 \dots 0, \pm\alpha$  із загальною кількістю іспитів  $N = 2^n + 2n + n_0$ .



## Тема 5. Методи визначення режиму лазерної обробки порожнини (подовження)

### 5.4. Проектування режимів ЛРО. Одно критеріальні задачі

#### 5.4.2. Проектування операції ЛРО з нормованою якістю отвору

#### г). Перевірка сумісності рівнів факторів.

Перевірка повинна підтвердити формування в межах факторного простору наскрізного отвору, тобто ідентичність технологічного результату. Можна використовувати експериментальну перевірку із сполученням факторів на рівнях, які створюють найменший рівень інтенсивності та найвищий градієнт його змінення в межах товщини заготовки. Також можливе використання аналітичної перевірки сумісності за рівняннями, які дозволяють передбачити результат обробки (наприклад, за рівнянням 5.7 табл.5.2, сл. 6, През.№4) . Для факторного простору табл. 5.7 (сл.6 През.№6) це дослід на режимах  $E = 4\text{Дж}$  ( $x_1 = -2$ ),  $F = 100\text{мм}$  ( $x_2 = +2$ ),  $\Delta F = +2\text{мм}$  ( $x_3 = 2$ ),  $D_o = 6\text{мм}$  ( $x_4 = -2$ ),  $\theta = 0,0023\text{рад}$  ( $x_5 = -2$ ), коли густина потужності дорівнює  $W_p = 4,16 \cdot 10^6 \text{Вт/см}^2$ .

#### д). Виконання експерименту та статистична обробка його результатів.

Коефіцієнти моделі для відносного показника точності діаметральних розмірів оброблених отворів, який усереднено за рядом перетинів вздовж осі отворів  $v$ ., приведені в таблиці. 5.11.

Таблиця 5.11

$b_i$	$b_o$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$	$b_{12}$	$b_{13}$	$b_{14}$	$b_{15}$
$\bar{v}, \%$	2,8	-1,4	0,9	0,3	0,2	-	-0,2	-1,0	1,2	-0,4
$b_{23}$	$b_{24}$	$b_{25}$	$b_{34}$	$b_{35}$	$b_{45}$	$b_{11}$	$b_{22}$	$b_{33}$	$b_{44}$	$b_{55}$
-0,9	-0,7	-	-	1,2	-0,4	0,9	0,4	0,2	0,7	-



## Тема 5. Методи визначення режиму лазерної обробки порожнини (подовження)

### 5.4. Проектування режимів ЛРО. Одно критеріальні задачі

#### 5.4.2. Проектування операції ЛРО з нормованою якістю отвору

е). Визначення режимів ЛРО точних отворів.

В таблиці рис.5. 11 (сл. 2, През.№6) норму точності отворів в корпусах ін'єкційних голок задано полем допуску на розмір:  $dH12$  або в цифровому вигляді  $0,4^{+0,12}$ ;  $0,6^{+0,15}$ ;  $0,8^{+0,18}$ . Вважаючи розподіл розмірів отвору нормальним (гаусовим), можна записати вимогу до його точності через відносну величину – коефіцієнт варіації, тобто через:

$$v_j = \frac{S_{d_j}}{d_j} \cdot 100\%$$

прирівнюючи ширину поля розсіювання  $6S_d$  величині поля допуску  $It(d)$ :

$$It(d) = (8 - 10)\% d_{ном} \leq 6S_d$$

З останнього рівняння можна визначити нормований рівень коефіцієнта варіації для  $d_{ном} = 0,4$ ;  $0,6$ ;  $0,8$  мм:

$$[v_d] = \frac{1}{6} \frac{(8 - 10)\% d_{ном}}{d_{ном}} = (1,33 - 1,66)\%$$

За **одномірними перетинами** поверхні відгуку визначається режим обробки для досягнення заданого рівня точності (12 квалітет) за рахунок варіювання найбільш чутливих чинників: енергії випромінювання  $E$  або фокусної відстані лінзи  $F$ . На рис. 5.23 змальовано сімейство одномірних перетинів вздовж фактору  $E$  для фіксованих значень  $\Delta F = -1$  мм,  $D_o = 9$  мм,  $\theta = 0,002$  рад,  $F = \text{var}$ . Для обробки системи отворів з нормованою точністю може бути рекомендовано один з наступних режимів, які складаються із рівнів фіксованих факторів ( $\Delta F = -1$  мм;  $\theta = 2$  мрад;  $D_o = 9$  мм) та варійованих: з кроком  $F$ , та **безперервно**  $E$ . Останні є абсцисами пересічення ліній виду  $Y(\bar{v}_d) = [v_d]$  з одномірними перетинам поверхні відгуку:

- $F = 40$  мм;  $E = 4 \div 10$  Дж;  $\Delta F = -1$  мм;  $\theta = 2$  мрад;  $D_o = 9$  мм: крапки 1 - 1;
- $F = 55$  мм;  $E = 5,3 \div 11,3$  Дж;  $\Delta F = -1$  мм;  $\theta = 2$  мрад;  $D_o = 9$  мм: крапки 2-2,15
- $F = 70$  мм;  $E = 8,7 \div 9,5$  Дж;  $\Delta F = -1$  мм;  $\theta = 2$  мрад;  $D_o = 9$  мм: крапки 3-3.

## Тема 5. Методи визначення режиму лазерної обробки порожнини (подовження)

### 5.4. Проектування режимів ЛРО. Одно критеріальні задачі

#### 5.4.2. Проектування операції ЛРО з нормованою якістю отвору

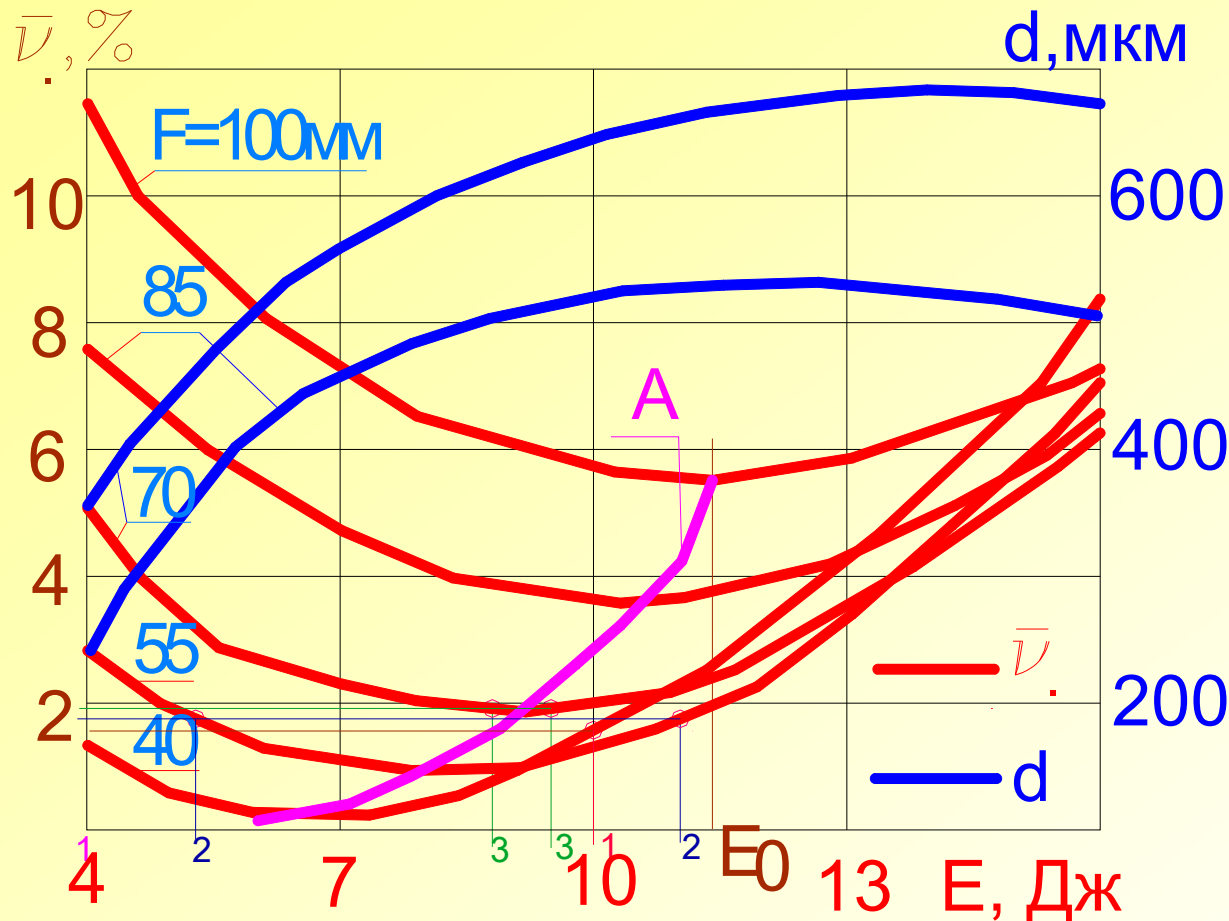


Рис. 5.23. Одномірні перетини поверхні відгуку вздовж фактору  $E$  з фіксацією факторів  $D_{\phi}=9\text{мм}$ ,  $\Delta F=-1\text{мм}$ ,  $\Theta=2\text{мрад}$ ,  $F=40\dots 100\text{мм}$

Координати екстремум кривих на рис.5.23 можна вважати оптимальними рівнями енергії для досягнення найвищої точності у даних умовах опромінення ( $E$ ,  $F$ ,  $\theta$ ,  $D_{\phi}$ ,  $\Delta F$ ). Лінія  $A$  — об'єднує ці точки для сімейства кривих  $F = \text{vary}$ .

Запропонований метод технологічного забезпечення заданої точності отворів (відтворюваності розмірних результатів обробки) не виключає застосування інших додаткових методів вдосконалення процесу, таких як скорочення вхідної кількості нестабільностей Технологічної Оброблювальної Системи (ТОС), автоматизація контрольних операцій із зворотним зв'язком, використання активних засобів контролю і управління, а також адаптивна організація процесу обробки.

## Тема 5. Методи визначення режиму лазерної обробки порожнини (подовження)

### 5.4. Проектування режимів ЛРО. Одно критеріальні задачі

#### 5.4.2. Проектування операції ЛРО з нормованою якістю отвору

##### д). Урахування особливих якостей отворів після ЛРО

Переваги ЛРО - її висока продуктивність, нечутливість до властивостей оброблюваного матеріалу, відсутність деформуючих зусиль, супроводжуючих процес руйнування та інші, поєднуються з особливостями якісних результатів обробки, які вважаються недоліками подовжньої форми:

- хвилястість поверхні стінок порожнини;
- наявність на них застиглої розплаву матеріалу;
- зміна властивостей поверхневого шару матеріалу заготовки.

Тому вважається, що перераховані недоліки обмежують область застосування процесу невідповідальними операціями (попередня обробка, прошивка системи неточних отворів в ситах, решетах), тому завдання дослідження і вдосконалення процесу ЛРО має метою також підвищення конкурентної спроможності та застосовності методу. Однак, останні технологічні дослідження лазерного методу обробки довели, що руйнування матеріалу заготовки його розплавленням, тобто за другим режимом нагріву матеріалу під час обробки (рис. 2.5, сл. 18, През.№1), може бути успішним і для ЛРО за умови забезпечення ефективного видалення розплаву із об'єму порожнини. Так, фірмою LASAG AG застосовується режим БІО отворів циліндричної форми з відносною глибиною більше 100 при незмінних початкових умов опромінення ( $\Delta F = 0$ ), а також газолазерного різання імпульсами тривалістю  $\tau = 0,1 - 0,3$ мс з інтенсивністю, що не перевищує  $10^7$ Вт/см<sup>2</sup>, причому для видалення розплавленого матеріалу з порожнини одиничних отворів, з яких формується різ, опромінення супроводиться продуванням останнього струменем стислого газу (частіше повітрям) з тиском до 2МПа. Така тривалість сприяє зниженню шорсткості стінок отвору за рахунок «залікування» мікро нерівностей розплавом, що переміщується. Крім того, слабо іонізовані продукти ерозійного факела не впливають на пучок випромінювання, що дозволяє зберегти незмінною форму його каустики під час обробки отвору.

## Тема 5. Методи визначення режиму лазерної обробки порожнини (подовження)

### 5.4. Проектування режимів ЛРО. Одно критеріальні задачі

#### 5.4.2. Проектування операції ЛРО з нормованою якістю отвору

##### д-1. Особливості подовжнього профілю порожнини

При обробці порожнин складної подовжньої форми, хоча в основі формоутворення лежить залежність її профілю від положення оброблюваної заготовки в каустиці лазерного пучка випромінювання (рис. 4.12, сл.22, През.№3), це визначає лише загальну форму порожнини: прямий або зворотний конус, циліндрична форма, бочкоподібна або іншу. Проте, детальний аналіз оброблених порожнин на різних режимах опромінення показує, що в утворенні більш складного профілю порожнини бере участь частина розплаву матеріалу на її дні та стінках, яка переміщується його паром та отвердіває в кінці дії випромінювання, формуючи кінцевий профіль. Ці явища, які вважалися донедавна чинниками названих вище недоліків, створюють можливість придання порожнині складної подовжньої форми шляхом мінімізації узагальненої характеристики її профілю (рис.5.20, сл.9, През.№7) при проектуванні операції і є наслідком їх дії.

Таким чином, досліджуючи вплив тих же параметрів процесу, що і на розміри оброблювального елемента і його загальну форму, та використовуючи методику БФЕ можна ефективніше керувати формоутворенням складних за формою порожнин.. Враховуючи складність та трудомісткість такої методики необхідно також виконати етап предпланування досліджень для рангування керуємих факторів процесу.

Характерні особливості подовжнього профілю порожнини, виготовленого лазерним випромінюванням, зображені на рис.5.24 і зводяться до такого:



## Тема 5. Методи визначення режиму лазерної обробки порожнини (подовження)

### 5.4. Проектування режимів ЛРО. Одно критеріальні задачі

#### 5.4.2. Проектування операції ЛРО з нормованою якістю отвору

- а)  $K$  – загальна конусоподібність – загальна вага 1,0;
- б)  $V_x$  – вхідний конус ( $0...360^\circ$ :  $0...10$ балів) – вага 0,5;
- в)  $V_v$  – вихідний конус – вага 0,33;
- г)  $\Gamma$  – грат – застиглий розплав на поверхні заготовки біля входу в порожнину – вага 0,2;
- д)  $P$  – застиглий розплав на поверхні стінки порожнини – вага 1,0;
- е)  $B$  – хвилястість поверхні стінок порожнини – вага 0,5
- ж)  $ЗЯ$  – загальна якість профілю порожнини.

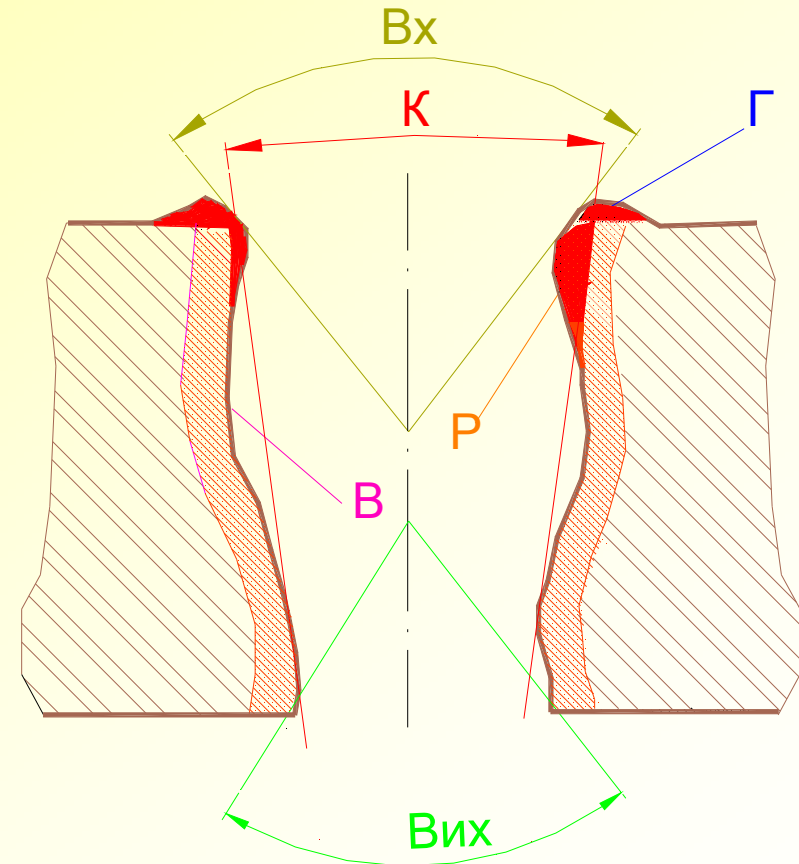


Рис. 5.24. Особливості подовжнього профілю порожнини після лазерної обробки

## Тема 5. Методи визначення режиму лазерної обробки порожнини (подовження)

### 5.4. Проектування режимів ЛРО. Одно критеріальні задачі

#### 5.4.2. Проектування операції ЛРО з нормованою якістю отвору

За такою деталізацією погрешностей повздожньої форми метою вдосконалення процесу є або їх мінімізація, як недоліків, критичних для працездатності даної деталі, або визначення шляхів впливу на їх рівні, для чого необхідно встановити залежність від керованих факторів процесу.

При експериментальних дослідженнях процесу в якості керованих чинників приймалися такі параметри обробки: імпульсна енергія –  $E$  (12,5÷27,5Дж); тривалість імпульсу –  $\tau$  (1,7÷3,0мс); положення заготовки відносно перетину каустики -  $\Delta F$  (1,0÷2,0мм); товщина заготовки -  $\delta$  (0,5÷1,25мм).

Для кількісної оцінки величин окремих погрешностей профілів, отриманих при різних поєднаннях чинників, їх значення можна порівняти за порядковими шкалами:

- для вхідного конусу ( $Bx$ ) – кут набуває значень  $0 \div 180^\circ$ , а відповідні умовні оцінки приймають рівними  $0 \div 10$  балів при Для обліку того або іншого показника по важливості вводиться зважування оцінок: так, розплав ( $P$ ) і загальна конусоподібність ( $K$ ) оцінюються удвічі вище, ніж хвилястість поверхні стінок ( $B$ ) і наявність вхідного конуса ( $Bx$ ); втричі, чим вихідний конус ( $Bu$ ) і в п'ять разів, чим наявність ґрату біля вхідної частини порожнини ( $\Gamma$ ). Це дозволяє внаслідок обробки експериментальних даних отримати значимість дії кожного чинника на окремі погрешності профілю, а об'єднуючи окремі безрозмірні показники, також можна отримати оцінку загальної якості ( $ЗЯ$ ). (рис. 5.25).



## Тема 5. Методи визначення режиму лазерної обробки порожнини (подовження)

### 5.4. Проектування режимів ЛРО. Одно критеріальні задачі

#### 5.4.2. Проектування операції ЛРО з нормованою якістю отвору

- Аналізуючи отримані діаграми для досліджуваних матеріалів (Та, Ті, Ні, нержавіюча сталь), можна відмітити, що подібність структур значимості ефектів показує важливість матеріалу як параметру.
- Товщина заготовки у зоні обробки значима з найвищим рівнем практично для всіх елементів профілю з тенденцією до його зменшення із ростом товщини заготовки (рис. 5.26а).
- Від положення заготовки відносно перетяжки каустики пучка випромінювання залежить кількість розплаву в порожнині, її загальна конусоподібність  $K$ , величина вхідного конуса  $Vx$  (рис.5.26б), а також хвилястість поверхні стінок  $B$  (рис. 5.26в). Порівнюючи два останні графіки, видно, що неможливо одночасно мінімізувати загальну конусоподібність порожнини ( $K$ ) і хвилястість ( $B$ ) поверхні стінок профілю шляхом зміни положення заготовки у каустиці сфокусованого пучка лазерного випромінювання із-за суперечливого характеру цих залежностей.

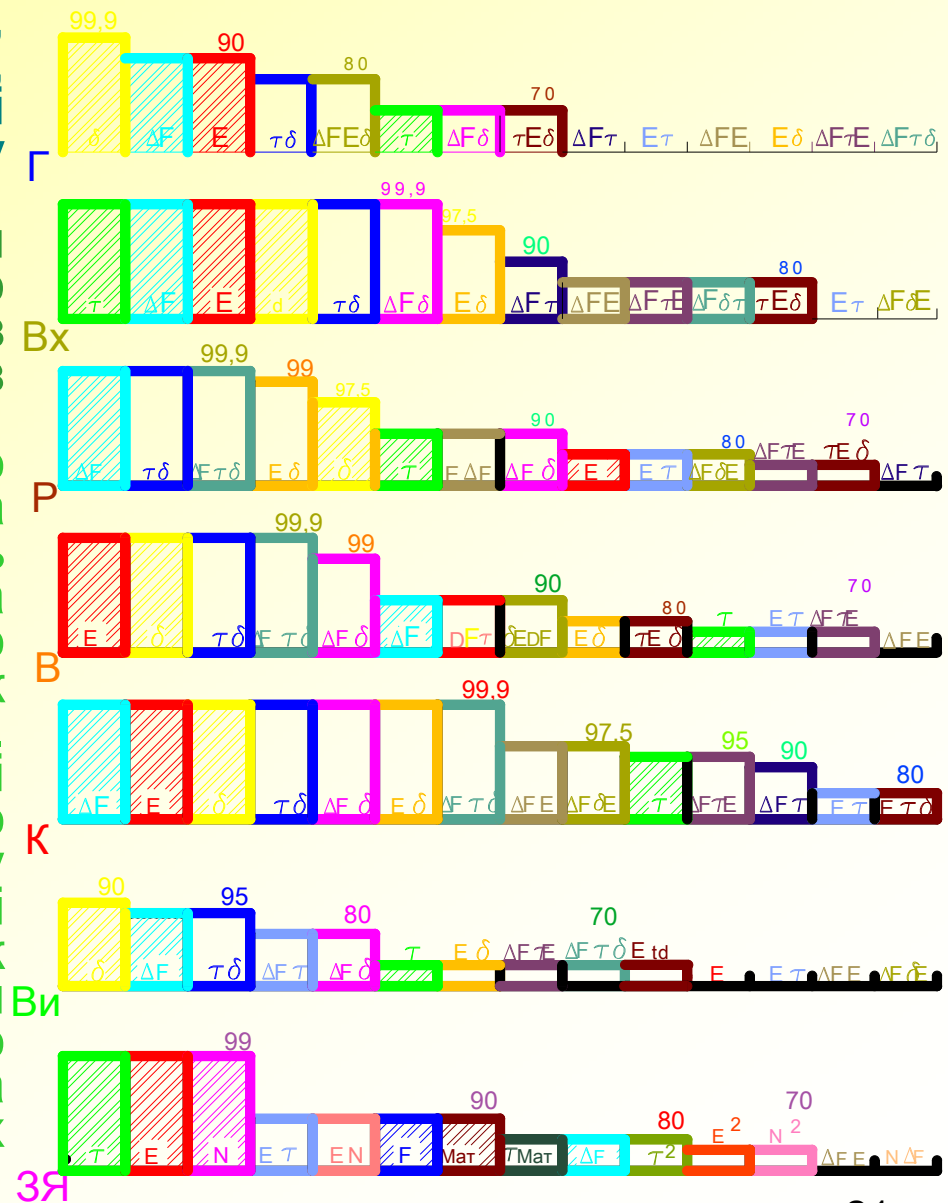


Рис.5.25. Рангові діаграми керуємих факторів лазерної обробки по впливу на показники якості порожнин

# Тема 5. Методи визначення режиму лазерної обробки порожнини (подовження)

## 5.4. Проектування режимів ЛРО. Одно критеріальні задачі

### 5.4.2. Проектування операції ЛРО з нормованою якістю отвору

- Величина грату ( $\Gamma$ ) біля вхідної ділянки порожнини добре співвідноситься з температурою плавлення  $T_{пл}$  матеріалу (рис. 5.26г) і практично не керується іншими факторами при обробці легкоплавкого, схильного до гратоутворенню матеріалу.
- Окрім розглянутих лінійних ефектів, деякі взаємодії факторів першого порядку також істотно впливають на якість форми порожнини:

- поєднання тривалості імпульсу  $t$  з товщиною заготовки  $\delta$  значимо для всіх матеріалів;
- поєднання товщини деталі  $\delta$  із положенням заготовки в каустиці пучка  $\Delta F$ .

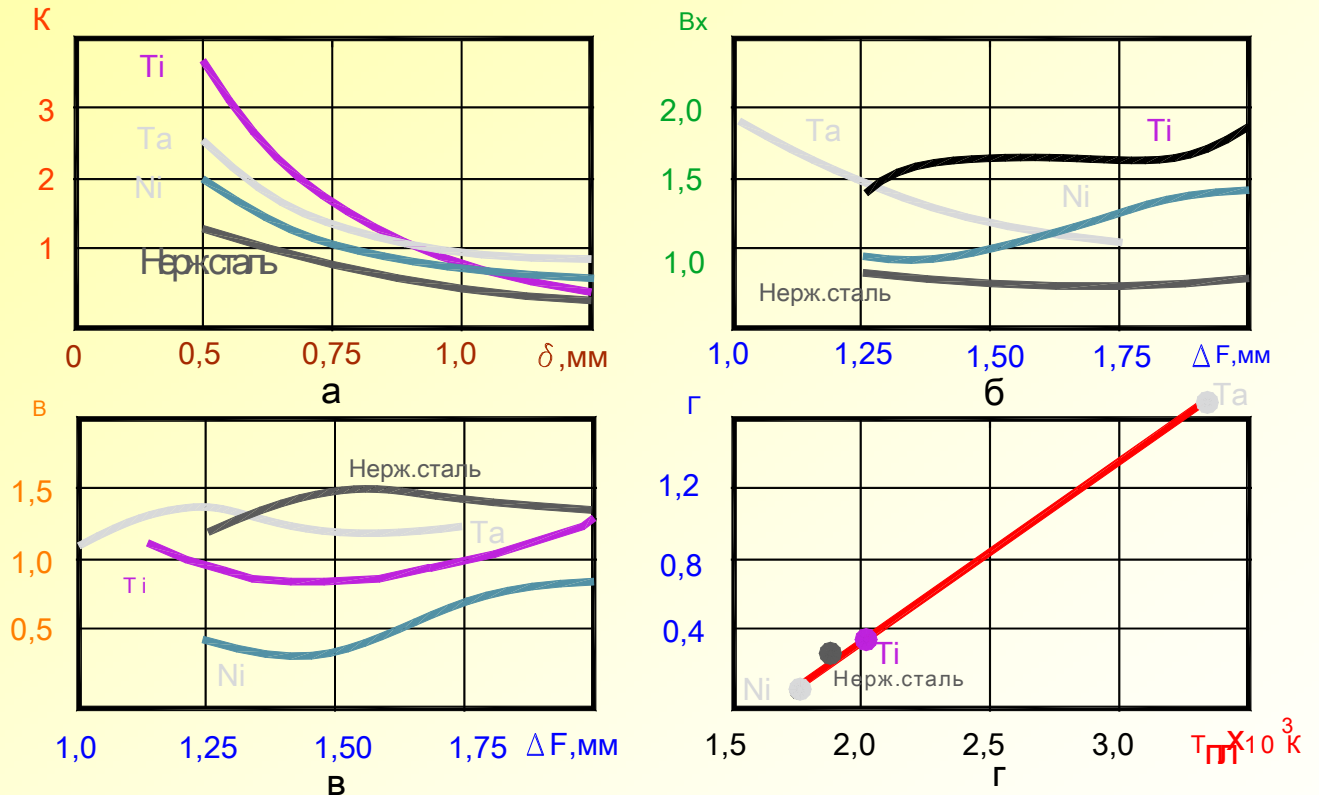


Рис.5.26. Вплив деяких параметрів процесу обробки порожнини на якість елементів її подовжнього профілю

Отримані в результаті цього експерименту дані дозволяють обирати параметри, що ефективно впливають на той або інший елемент профілю, або на його загальну якість, для включення в схему режимного управління процесом. Проте, із-за одночасного і різного по характеру впливу одних і тих же факторів на елементарні складові профілю, а також на розмірні показники оброблених порожнин ймовірність істотного задоволення якісних і кількісних вимог одночасно невисока.