

Технологія лазерної розмірної обробки

Презентація 6 (лекції 13-14)
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.

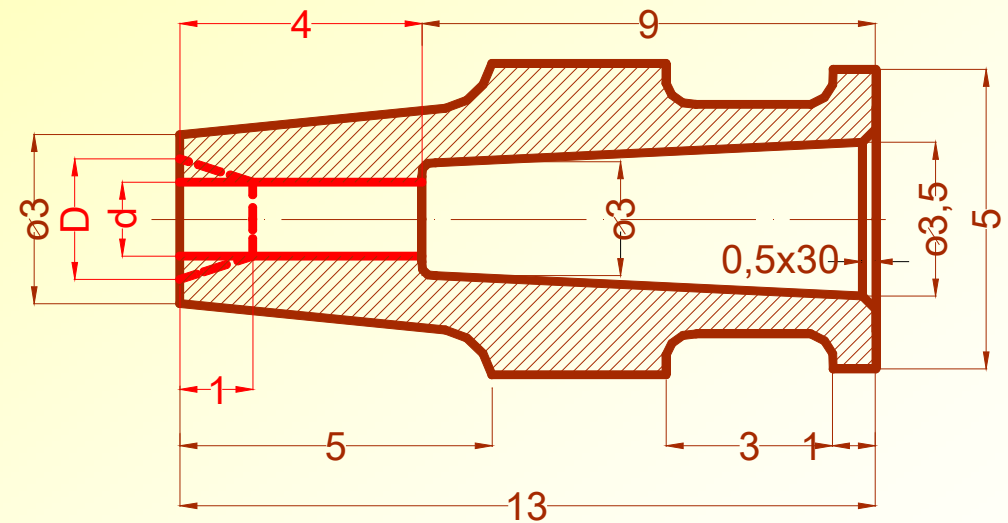
Лекція 13. Тема 5. Методи визначення режиму лазерної обробки порожнини (подовження)

5.4. Проектування режимів ЛРО. Одно критеріальні задачі

5.4.1. Приклад проектування операції ЛРО за розмірними показниками

Технічне завдання (ТЗ): спроектувати технологічну операцію виготовлення *отворів трьох типорозмірів* (дивись таблицю на рис. 5.11) в деталі «корпус ін'єкційної голки» з додатковим побажанням придання отворам *конусоподібності* $k \leq 0,4\text{мм}$. Матеріал заготовки - латунь ЛС59, товщина стінки 4мм. Програма випуску 0,5 млн.штук в рік. Технологічна установка, яку планується використати для впровадження операції на виробництві – «Квант-10». Основні технічні характеристики: імпульсна енергія $E \in 2 \div 30$ Дж; тривалість імпульсу* $\tau = 2, 4, 6, 8$ мс; діаметр променя після випромінювача $D = 12\text{мм}$; кут розбіжності* пучка випромінювання $\theta \leq 6\text{мрад}$; частота надходження імпульсів $f \leq 1\text{Гц}$.

Примітка: * - параметри можуть бути змінені в результаті модернізації установки.



N пп	dном	lt (d)	k	D
1	0,4H12	0,12	0,40	0,80
2	0,6H12	0,15	0,40	1,00
3	0,8H12	0,18	0,40	1,20

Рис.5.11. Корпус ін'єкційної голки

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

5.4. Проектування режимів ЛРО. Одно критеріальні задачі

5.4.1. Приклад проектування операції ЛРО за розмірними показниками

Порядок проектування технологічної операції (режимів обробки).

1. Обґрунтування вибору методу обробки заданого елемента виробу: згідно з даними табл. 1.1 найбільшу лінійну швидкість обробки отворів має ЛРО (1000 мм/с), що може дозволити забезпечити річну програму випуску виробів 0,5 млн. шт. однією ЛТУ. Конкурентні методи (ЕЕО, ЕХРО, УЗО та ЕО) мають суттєво меншу швидкість обробки (15мм/с для ЕО), тому реалізація операції потребує створення дільниці для обробки планової партії виробів. Відносна точність обробки згідно з технічним завданням складає (22,5÷30)%, дозволяє використовувати ЛРО, точність якої досягає (5-20)%.
2. Найбільш продуктивною є технологічна схеми формування порожнини з випаровуванням матеріалу одночасно з усього її попереку (рис. 4.1а) при розташуванні поверхні заготовки у перетині перетвореної каустики пучка випромінювання (обробка в «дальній зоні»). Підставою цього є проста форма попереку порожнини (кругла) та невисокі вимоги до точності розмірів та похибки форми. До того ж енергетичні можливості ЛТУ дозволяють забезпечити випар матеріалу заготовки одночасно з усієї поверхні отвору:

$$E = \pi \frac{d_0^2}{4A} W_{pa} \tau,$$

що для $W_{pa} = 5 \cdot 10^6$ Вт/см² (режим ВГ), $A = 0,8$ та $\tau = 10^{-3}$ с дорівнює $E_{0,4} = 6,75$ Дж, $E_{0,6} = 17,3$ Дж та $E_{0,8} = 31,4$ Дж.

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

5.4. Проектування режимів ЛРО. Одно критеріальні задачі

5.4.1. Приклад проектування операції ЛРО за розмірними показниками

3. Для визначення режимів виконання технологічної операції ЛРО замість реальної технологічної задачі вирішимо умовну – одно критеріальну – проектування режиму обробки отворів діаметром $d = 0,4; 0,6$ та $0,8$ мм.

Використаємо експериментальний метод проектування на підставі багатофакторних досліджень процесу:

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

На підставі аналізу рангової діаграми для діаметру отвору d (рис. 5.10) визначимо склад керуємих факторів, які необхідно використати в експерименті. По-перше, це найбільш впливові фактори E , ΔF , F та D_θ , вдруге, до них також бажано додати додатковий фактор – кут розбіжності пучка випромінювання θ , в зв'язку з необхідністю (дивись ТЗ) отримання режимів для обробки отворів трьох типорозмірів – від $0,4$ до $0,8$ мм.

Для формування факторного простору у вибраних координатах необхідно використати дані однофакторних експериментів (рис. 5.8) та врахувати можливість ЛТУ, яку планується долучити до впровадження технологічної операції після модернізації (Квант 10).

В табл. 5.8 приведені склад та межі варіювання факторів в експерименті.

б). Враховуючи характер залежностей діаметру отвору від параметрів обробки (рис. 5.8) за результатами одно факторних експериментів, припускається квадратична модель процесу у вигляді:

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

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

5.4. Проектування режимів ЛРО. Одно критеріальні задачі

5.4.1. Приклад проектування операції ЛРО за розмірними показниками

- в). Вибір експериментального плану досліджень. При проектуванні нових об'єктів (технологічних операцій) рекомендується використання планів гнучкого типу, які дозволяють покрокове дослідження процесу. До таких планів відносяться квазі D -оптимальні композиційні плани, при якому розташування експериментальних точок забезпечує мінімальну похибку визначення коефіцієнтів моделі. Експеримент виконується в 2 етапи. Спочатку у припущенні лінійності моделі, виконується експеримент за планом 2^n з повним циклом статистичної обробки результатів. В разі адекватності (правильності) отриманої моделі мету моделювання вважають досягнутою. Інакше виконаний експеримент добудовують до можливості розширення лінійної моделі до квадратичної за рахунок додаткових дослідів у $2n$ «зіркових» точках з координатами $\pm\alpha, 0 \dots 0, \pm\alpha$, та в центрі плану n_0 [4]. Таким чином зменшується загальна кількість дослідів з $N = 3^n$ – для багаторівневих планів до $N = 2^n + 2n + n_0$ – для композиційних (порівняйте 243 та 44).
- г). В кожній експериментальній точці факторного простору після виконання досліджень повинна бути оброблена наскрізна порожнина любого розміру, тому перед початком експерименту необхідно перевірити сумісність рівнів факторів на межах факторного простору. Ця перевірка може бути експериментальною - шляхом виконання обробки на режимі, який вважається сумнівним для розмірної обробки отвору у заготівці заданих властивостей (матеріалу та товщини стінки, шорсткості поверхні), тобто з таким поєднанням рівнів факторів, за яким на поверхні заготовки формується теплове джерело із найменшою щільністю потужності. Для факторного простору табл. 5.7 це дослід на режимах $E = 4 \text{ Дж}$ ($x_1 = -2$), $F = 100 \text{ мм}$ ($x_2 = +2$), $\Delta F = +2 \text{ мм}$ ($x_3 = 2$), $D_0 = 6 \text{ мм}$ ($x_4 = -2$), $\theta = 0,0023 \text{ рад}$ ($x_5 = -2$), коли густина потужності дорівнює $W_p = 4,16 \cdot 10^6 \text{ Вт/см}^2$.

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

5.4. Проектування режимів ЛРО. Одно критеріальні задачі

5.4.1. Приклад проектування операції ЛРО за розмірними показниками

Таблиця 5.7

При рішенні задачі проектування режимів обробки отворів в корпусі ін'єкційної голки на підставі передбачуваної слабкої значимості взаємодій факторів високих порядків застосовується як ядро плану дрібнофакторний експеримент (ДФЕ) 2^{5-1} [4], з визначальним контрастом:

$$X_5 = X_1 X_2 X_3 X_4$$

При цьому ефекти лінійних коефіцієнтів змішуються з коефіцієнтами при взаємодіях факторів 4 порядку, парних – з ефектами 3 порядку.

д). Коефіцієнти моделі приведені в таблиці. 5.8. При виборі режимів обробки отворів діаметром d за отриманою моделлю, яка є рівнянням з п'ятьма незалежними невідомими, можна використати 2 методи.

№ пп	Найменування фактору	Рівень		№ пп	Найменування фактору	Рівень	
		натурал	код			натурал	код
1	Імпульсна енергія, E , (Дж) Кодове позначення X_1	16	2	4	Діаметр діафрагми D_d (мм) Кодове позначення X_4	10	2
		13	1			9	1
		10	0			8	0
		7	-1			7	-1
		4	-2			6	-2
2	Фокусна відстань об'єктиву, F , (мм) Кодове позначення X_2	100	2	5	Кут розбіжності пучка випромінювання θ (мрад). Кодове позначення X_5	-0,5	2
		85	1			-0,2	1
		70	0			0,9	0
		55	-1			1,6	-1
		40	-2			2,3	-2
3	Положення заготовки в каустиці пучка випромінювання, ΔF (мм) Кодове позначення X_3	+2	2				
		+1	1				
		0	0				
		-1	-1				
		-2	-2				

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

5.4. Проектування режимів ЛРО. Одно критеріальні задачі 5.4.1. Приклад проектування операції ЛРО за розмірними показниками

Таблиця 5.8

y	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_{11}	b_{22}	b_{33}	b_{44}
$D, \text{мкм}$	862	134	63	54	18	-14	23	23	37	24
$d, \text{мкм}$	605	117	-34	-32	20	52	-41	-32	-18	-20
b_{55}	b_{12}	b_{13}	b_{14}	b_{15}	b_{23}	b_{24}	b_{25}	b_{34}	b_{35}	b_{45}
15	25	19	-38	-23	-41	-	-	11	-14	12
-17	15	43	-26	27	25	-33	44	34	-18	23

е). Визначення режимів обробки.

- використанням методу підбору рівнів факторів, прирівнюючи значення функції y (d) відповідному заданому розміру (0,4 мм, 0,6 мм та 0,8 мм): для цього необхідно встановити межі та інтервали змінення рівнів факторів, тоді отримані їх комбінації, які відповідають умові $y = d_{\text{ном}}$, складуть групу режимів, обробка за кожним з яких дозволить отримати отвір відповідного (заданого) розміру. Для спрощення цієї процедури необхідно використовувати можливості обчислювальної техніки;

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

5.4. Проектування режимів ЛРО. Одно критеріальні задачі

5.4.1. Приклад проектування операції ЛРО за розмірними показниками

- перетворенням отриманої моделі в одновірну шляхом перетину поверхні відгуку вздовж однієї з координат (одного з факторів), фіксуючи при цьому інші на рівнях, які сприяють досягненню заданого розміру у оброблювальних отворів: ці рівні складають основу режиму обробки, рівень керуемого фактору $x_{кер}$ визначається при рішенні одновірного рівняння, в яке перетворена модель підстановкою фіксованих рівнів інших факторів (CONST) та потрібне значення функції $d_{ном}$:

$$d_{ном} = f(x_{кер}, CONST)$$

Останній метод може бути графічним, якщо графік одновірної залежності **перетнути лінією**: абсциса її пересічення з кривою доповнюють набір фіксованих рівнів інших факторів до режиму обробки. На рис. 5.12 зображені такі залежності для різних методів варіювання розміру вихідної ділянки отвору (для різних керуємих факторів), з яких можна вибрати ряд режимів обробки отворів заданого розміру d :

- за рахунок зміни імпульсної енергії E (рис. 5.12а):
 - для $d_{ном} = 0,4\text{мм}$: $E = 10,8\text{Дж}$ при $F = 100\text{мм}$; ($\Delta F = -1\text{мм}$; $D_{\partial} = 9\text{мм}$; $\theta = 0,2\text{мрад}$), або: $E = 6,5\text{Дж}$, при $F = 85\text{мм}$, ($\Delta F = -1\text{мм}$; $D_{\partial} = 9\text{мм}$; $\theta = 0,2\text{мрад}$);
 - для $d_{ном} = 0,6\text{мм}$: $E = 8,6\text{Дж}$ при $F = 70\text{мм}$ ($\Delta F = -1\text{мм}$; $D_{\partial} = 9\text{мм}$; $\theta = 0,2\text{мрад}$), або: $E = 11,7\text{Дж}$, при $F = 85\text{мм}$ ($\Delta F = -1\text{мм}$; $D_{\partial} = 9\text{мм}$; $\theta = 0,2\text{мрад}$);

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

5.4. Проектування режимів ЛРО. Одно критеріальні задачі

5.4.1. Приклад проектування операції ЛРО за розмірними показниками

- за рахунок зміни діаметру модової діафрагми D_θ , (яка встановлюється в середині резонатору):
 - для $d_{ном} = 0,4$ мм: $D_\theta = 7,5$ мм при $\theta = 1,6$ мрад; ($F = 70$ мм; $E = 13$ Дж; $\Delta F = -1$ мм), або $D_\theta = 9,7$ мм при $\theta = 0,9$ мрад; ($F = 70$ мм; $E = 13$ Дж; $\Delta F = -1$ мм); або $D_\theta = 8,1$ Дж при $\theta = 0,9$ мрад; ($F = 85$ мм, $E = 13$ Дж; $\Delta F = -1$ мм);
 - для $d_{ном} = 0,6$ мм: $D_\theta = 7,8$ мм при $\theta = 0,2$ мрад ($F = 85$ мм; $E = 13$ Дж; $\Delta F = -1$ мм), або $D_\theta = 9,3$ мм при $\theta = -0,5$ мрад ($F = 85$ мм; $E = 13$ Дж; $\Delta F = -1$ мм), або $D_\theta = 7$ мм при $\theta = -0,5$ мрад ($F = 70$ мм, $E = 13$ Дж; $\Delta F = -1$ мм);
 - для $d_{ном} = 0,8$ мм – не існує режимів обробки в межах кордонів іспиту.

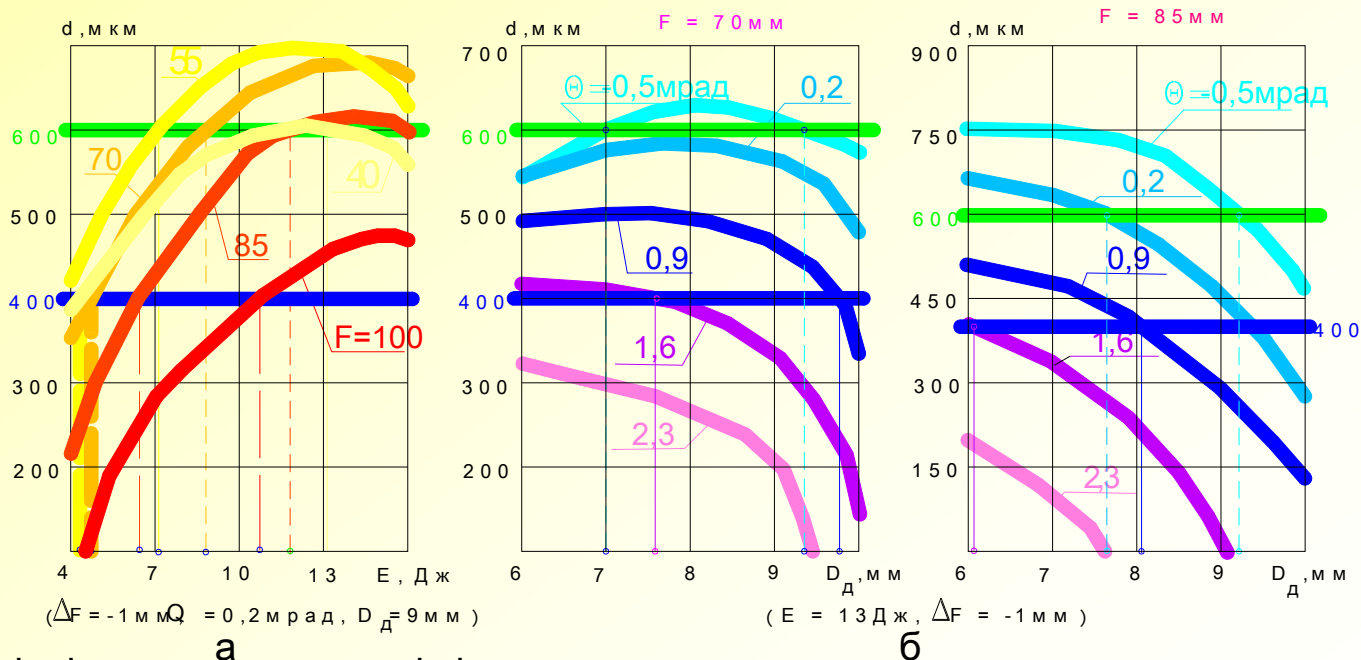


Рис.5.12. Одномірні перетини поверхні відгуку вздовж енергії випромінювання E (а) та діаметру діафрагми D_D (б)

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

5.4. Проектування режимів ЛРО. Одно критеріальні задачі

5.4.1. Приклад проектування операції ЛРО за розмірними показниками

Висновки

- Таким чином можна вибрати безліч режимів обробки отвору заданого розміру у вихідній його частині, однак, за іншими показниками вони будуть відрізнятися один від одного. Тому реальні задачі більш складні: вони потребують дотримання вимог до декількох показників. При виборі тієї або іншої комбінації керуємих параметрів (режиму обробки) необхідно досліджувати та враховувати рівні інших показників процесу, що повинні бути досягненні: наприклад – правильність подовжньої та поперечної форми, розмір вхідної ділянки отвору D , шорсткість поверхні стінки отвору, енерговитрати, продуктивність і ін.

- Ця методика проектування режимів лазерної розмірної обробки застосовуються в технологічній практиці – для підбору режимів обробки отворів в інжекторах ацетиленокисневих різаків і в охолоджуємих повітрях елементах турбін і компресорів, при чому часто розроблені моделі процесу використовують для машинної корекції режиму обробки.

Лекція 14. 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

Багаточисельні переваги ЛРО, відмічені вище, поєднуються з характерними недоліками якості її результатів. Порожнини, оброблені пучком лазерного випромінювання, характеризуються некерованою варіацією розмірів, стінки порожнини покриті нерівномірним шаром розплавленого і застиглого матеріалу, що має структуру, відмінну від початкової і часто з високою твердістю. У деяких неметалів (сапфір, кераміка, тверді сплави) за глибину цього шару поширюються мікротріщини, які можуть розвиватися внаслідок високошвидкісного термічного удару із-за залишкової усадкової напруги або механічних деформацій. Сумарна дія цих недоліків виявляється не лише в нестабільності поперечної та подовжньої форми порожнин, а також в розсіянні їх розмірів в обробленій партії заготовок. Таким чином, для підвищення якості їх обробки пучком лазерного випромінювання необхідно забезпечити:

- режимне керування поперечною та подовжньою формою порожнини, в тому числі за рахунок зменшення розмірів вхідного кратеру;
- підвищення стабільності розмірів порожнини уздовж її осі і скорочення величини їх поля розсіяння в партії заготовок;
- усунення або скорочення виплеску матеріалу біля вхідного кратера (грату);
- зниження шорсткості поверхні стінок порожнини;
- зменшення глибини зони термічного впливу.

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

Для вирішення цього комплексного завдання підвищення якості ЛРО можна сформулювати основні принципи режимного управління процесом обробки, а також визначити напрямок розробки методів і засобів додаткового вдосконалення технологічних операцій.

При визначенні режимів лазерної обробки на технологічних установках найвищий рівень якості досягається при забезпеченні належного розмірного ефекту оптимальним набором рівнів керованих чинників, що забезпечують мінімальну кількість розплаву в оброблюваній порожнині на час отвердіння матеріалу. Рішенню цієї задачі повинно служити створене технологічне оснащення операції.

Якість є комплексним критерієм технологічної операції і оцінює її результати з наступних сторін:

- мірою відповідності форми порожнини заданій;
- точністю поперечних і подовжніх розмірів;
- величиною шорсткості і хвилястості поверхні її стінок;
- властивістю і глибиною при поверхневого шару.

При проектуванні технологічних операцій велику складність складають питання управління відтворюваністю форми і розмірів порожнини. Для таких показників операції не можуть бути застосовані аналітичні методи проектування, тому що за їх появу та рівень відповідають явища випадкового характеру, які залежать від умов обробки. Таким чином, врахування якісних вимог до результатів обробки може бути здійснено лише в результаті регресійного аналізу процесу в умовах активного експерименту. Однією з основних передумов використання статистичних методів аналізу є вибір відповідних показників якості форми та точності, що володіють універсальністю та всесторонньо характеризують об'єкт досліджень.

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). Проектування операцій з врахуванням якості поперечної і подовжньої форми порожнини

Державними стандартами передбачені норми відхилень поперечної форми порожнин від круглої (отвори) у вигляді показників некруглості: овальності і ограновування. На якість поперечної форми впливає розподіл інтенсивності випромінювання в перетині пучка лазерного випромінювання і по кутах в межах діаграми спрямованості, тобто для обробки круглих отворів достатньою є вимога осьової симетрії розподілу інтенсивності в пучку випромінювання (рис. 13).

Виходячи з цієї вимоги можна стверджувати, що порожнини круглої форми (отвори) можуть бути отримані не лише при роботі випромінювача на основній моді TEM_{00} , що має круглий перетин, а також при роботі на поперечних модах досить високого порядку (m і $n \gg 1$), для яких перетин пучка близький до круглого. Це досягається при ретельному юстируванні резонатора з сферичними або з плоским і сферичним дзеркалами за рахунок формування циліндричних мод кільцевої структури. Некруглість отворів, отриманих таким променем, не перевищує 0,1 від їх радіусу. Режим TEM_{mn} переважає, оскільки при здобутті режиму генерації на основній моді істотно втрачається потужність випромінювання із-за використання модових діаграм. Так, при обмеженні перетину активного елемента діаметром 8,33мм діафрагмою до $\varnothing 1,42$ мм для надання пучку структури TEM_{00} потужність знижується з 250 Вт до 22.

У резонаторі із плоских дзеркал обидва режими недосяжні, внаслідок цього рекомендується виконувати обробку в площині зображення зовнішньої діафрагми або маски (проекційні схеми 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

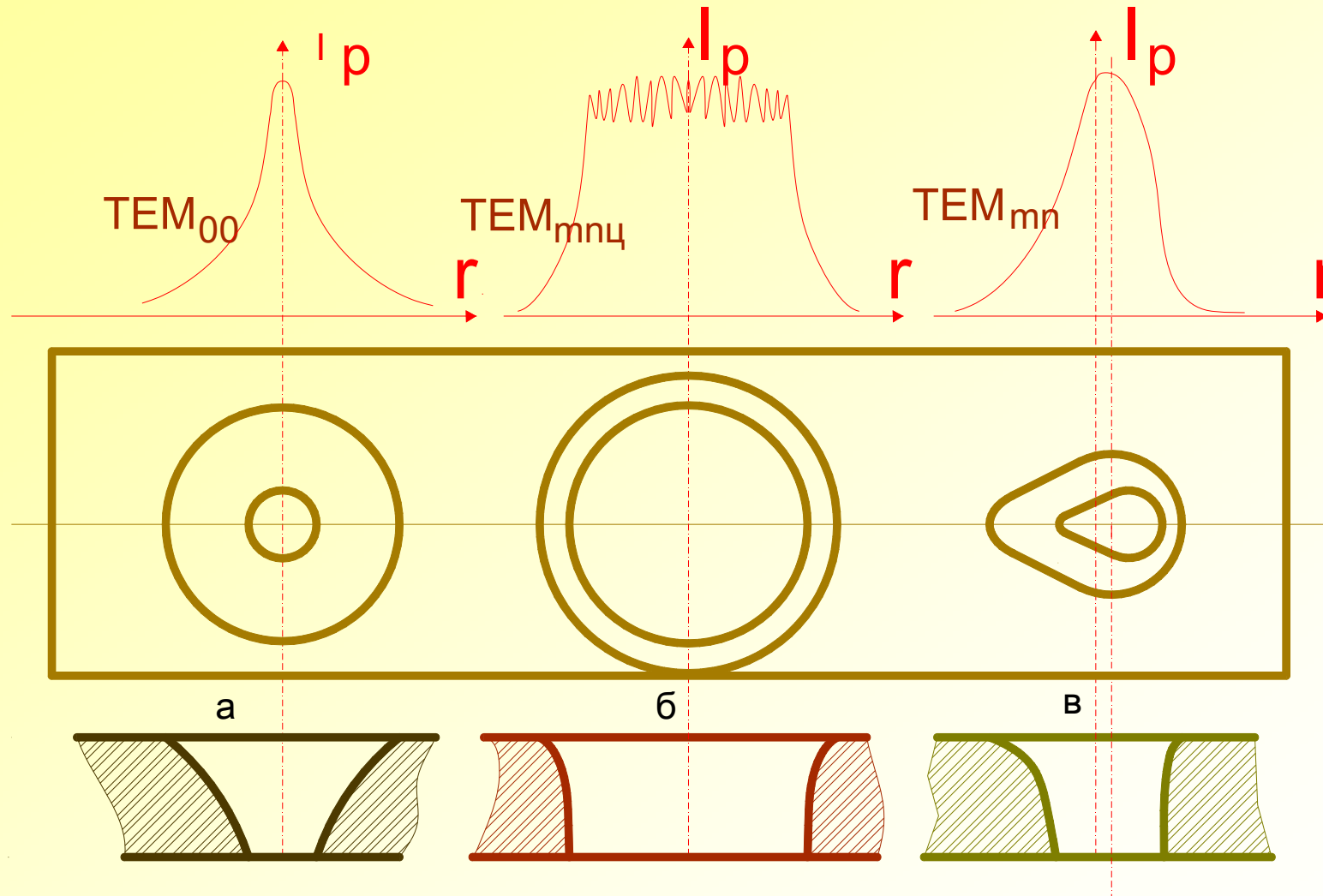


Рис. 5.13. Профілі отворів, оброблених різними пучками

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

У основі формоутворення порожнини складної подовжньої форми лежить залежність її профілю від положення оброблювальної заготовки в каустиці перетвореного пучка лазерного випромінювання, що сходиться – розходиться (рис. 4.12 сл. 22, През.№3). Такий характер зміни розміру пучка у фокальній області фокусуємого (перетворюючого) елемента (дзеркала, лінзи, фокусатора, френелівської зонної пластини і так далі) і відповідна йому непостійність інтенсивності випромінювання уздовж пучка є головними джерелами відхилення подовжнього профілю порожнини від циліндричного. При формуванні оптичними засобами невеликої за протяжністю ділянки каустики з паралельними променями, так звану ЦСТ (рис. 4.14 сл. 25, През.№3), досягається можливість обробки порожнини з невеликим відхиленням від циліндру. Проте, такий метод обробки не знайшов вживання на практиці, а серійне технологічне устаткування не забезпечується відповідними засобами фокусування із-за громіздкості оптичної системи. Умовою здобуття ЦСТ є залежність $l = D/\theta$, а її розміри визначаються за рівняннями $d = F\theta$; $x = F^2\theta/D$.

Для розробки методів керування подовжньою формою порожнини при її формоутворенні пучком лазерного випромінювання, що має реальну форму гіперболоїда обертання (рис. 4.2 сл.16, През.№2) необхідно виявити співвідношення між режимом обробки, властивостями заготовки і характеристиками профілю отвору. Враховуючи, що із-за складності фізичних явищ при лазерній розмірній обробці геометрія порожнини побічно визначається умовами обробки, для виявлення закономірностей між перерахованими параметрами необхідно використовувати експериментальні методи досліджень, застосовуючи результати теоретичних аналізів лише для цілей корекції деяких експериментальних даних.

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

б). Предпланування експерименту для операції ЛРО профільних отворів

Для вирішення другої, спрощеної (умовної) задачі – обробка **конічних** отворів с нормованою конусоподібністю $k \leq 0,4\text{мм}$ (рис.5.11) – необхідні кількісні дослідження умов їх формоутворення з метою виявлення зв'язків між параметрами обробки і характеристиками профілю. В рамках виконання етапу передпланування експерименту за умовами табл. 5.8 побудована модель, яка дозволяє прорангувати керовані фактори по мірі їх впливу на показник форми – загальну конусоподібність порожнини $k = D - d$ (D – діаметр вхідної ділянки порожнини). У табл. 5.9 приведено коефіцієнти регресії моделі процесу, а на **рис. 5.13** - рангова діаграма значимості впливу керованих чинників на подовжню форму порожнини.

Ці дані характеризують дію параметрів обробки на співвідношення розмірів вхідної і вихідної частин порожнини (конусоподібності k), причому порядок розташування параметрів по впливу на цей відгук відрізняється від закономірностей рис. 5.10.

- найбільшу дію надає форма каустики перетвореного пучка випромінювання (F) і положення в ній заготовки (ΔF);
- властивості матеріалу впливають, вочевидь, через перерозподіл розплаву в порожнині перед його твердінням;
- поперечні розміри сфокусованого пучка також значимо визначають подовжню форму порожнини.

Таблиця 5.9

b_i	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_{12}	b_{13}	b_{14}	b_{15}	b_{23}	b_{24}	b_{25}	b_{34}	b_{35}	b_{45}	b_{11}	b_{22}	b_{33}	b_{44}	b_{55}
$k, \text{МКМ}$	261	-30	97	86	-	66	10	-24	12	-50	-66	33	-44	-23	-28	-	64	61	55	44	32

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

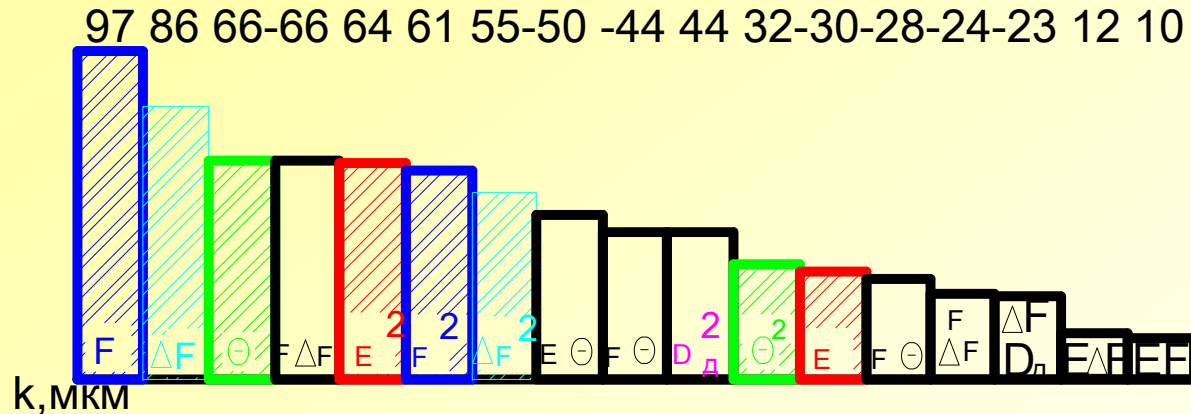


Рис.5.14. Рангові діаграми керуємих факторів лазерної обробки по впливу на конусо подібність порожнин

Використання пучка лазерного випромінювання як інструменту дозволяє отримати порожнини **любої складної форми**. Зважаючи на відсутність в стандартах інших, чим «конусоподібність, бочкоподібність і сідлообразність» критеріїв оцінки відмінності профілю отворів від циліндричної форми, будь-який вид профілю можна виразити **набором відхилень розмірів профілю** від циліндричного в декількох поперечних перетинах порожнини вздовж її глибини (рис. 5.13):

$$\Delta r_j = r_j - \bar{r}_.$$

де: r_j – радіус профілю порожнини в i -му перетині ($i = 1 \dots n$ – кількість перетинів вздовж глибини порожнини); $\bar{r}_.$ усереднений радіус порожнини, тобто, радіус циліндричної порожнини.

$$\bar{r}_. = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i$$

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

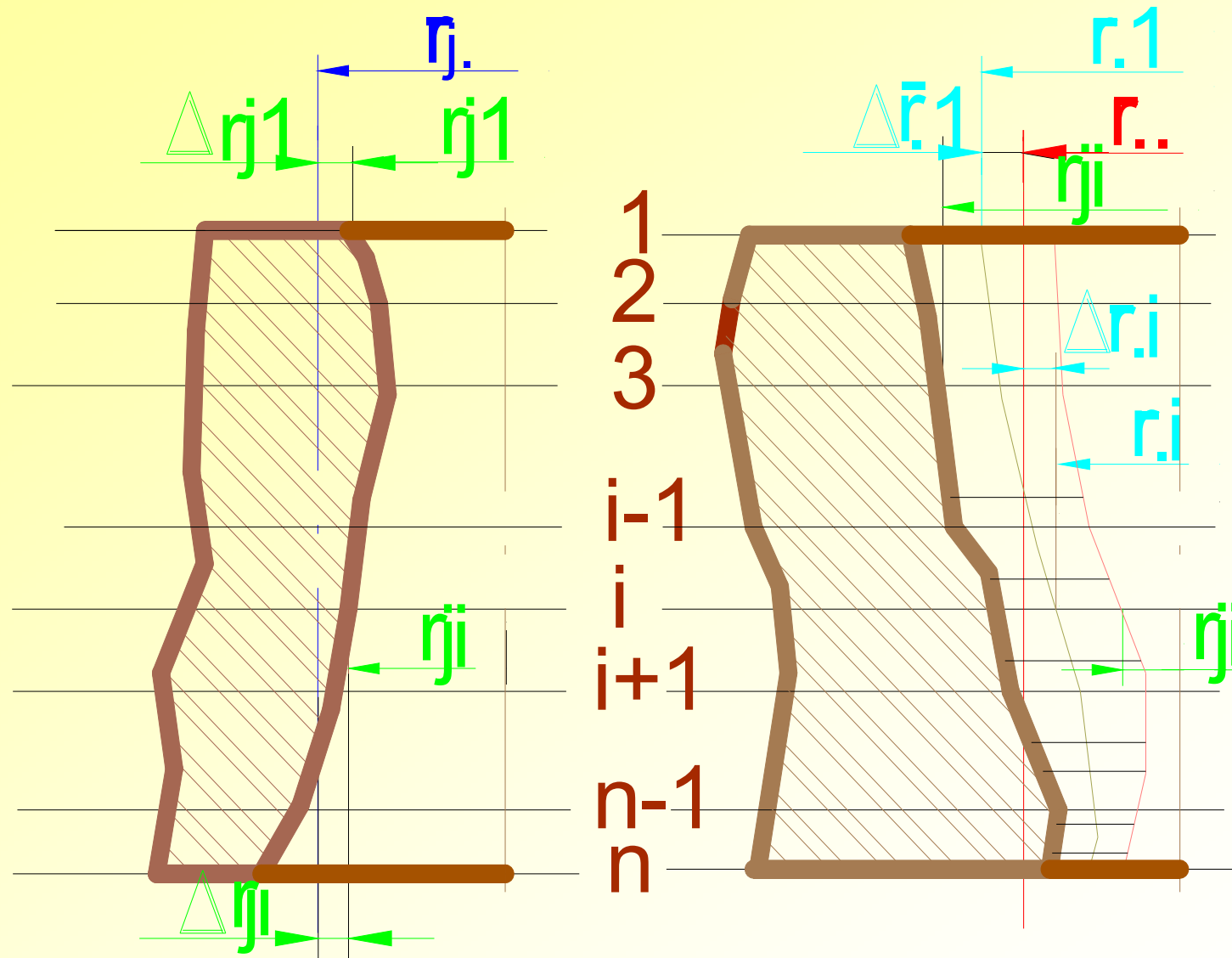


Рис.5.15. Опис складнопрофільної порожнини

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 експериментальних дослідженнях процесу методами ПФЕ розміри порожнини в контрольних перетинах i ($1 \dots n$) мають бути статистичними, тобто визначатися за даними вимірів партії заготовок, що складається з $j = 1 \dots m$ отворів, при усереднюванні вимірів за їх кількостями m (для u іспиту):

$$\Delta \bar{r}_{i.u} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \Delta r_{iju} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (r_{iju} - \bar{r}_{.ju}) = \bar{r}_{i.u} - \bar{r}_{..u}$$

де: $\Delta \bar{r}_{i.u}$ - усереднене за партією заготовок відхилення розміру порожнини в

i перетині від середнього в партії розміру профілю в цьому перетині (в іспиті u); $\bar{r}_{.j} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_{ij}$ - розмір усередненого за кількістю перетинів

профілю циліндричної порожнини в j заготівці; $\bar{r}_{i.u} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m r_{iju}$ - середній за партією заготовок розмір порожнини в i - перетині; $\bar{r}_{..u}$ - розмір

усередненого за партією заготовок профілю циліндричної порожнини.

При такому опису профілю порожнини, заданого кресленням і отриманих в експерименті, завдання проектування процесу лазерної обробки порожнини складного профілю полягає у визначенні режиму опромінення, що забезпечує здобуття порожнини, що не відрізняється за величинами $\Delta \bar{r}_{i.u}$ від заданих $[\Delta r_j]$ в кожному 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

Для побудування рангових діаграм впливу керованих факторів на характеристики повздовжнього профілю отвору ($\Delta r_{i,u}$) було використано експеримент з факторним простором рис. 5.7, тобто за квазі D -оптимальним композиційним планом *Бокса* на кубі. Коефіцієнти регресії моделей приведено в табл. 5.10.

Аналіз моделей з позиції керованості процесом обробки відносно показників $\Delta r_{i,u}$ показав складний характер залежності виду профілю від комбінації значень керованих факторів (рис. 5.15) і значимості їх впливу в кожному з n перетинів профілю. Якщо відхилення вхідної ділянки $\Delta r_{1,u}$ ($i = 1$) отвору від циліндричної форми визначається, в першу чергу, умовами опромінення (ΔF), товщиною заготовки (δ) і фокусною відстанню лінзи (F), то на нижні перетини профілю $\Delta r_{n,u}$, надають переважаючий вплив властивості матеріалу заготовки, тривалості імпульсу лазерного випромінювання (τ) і товщини заготовки (δ). Це визначає неоднозначність при виборі об'єму факторного простору, який зазвичай складається з найбільш впливових факторів, тобто доведеться враховувати інші їх властивості, наприклад, керованість.

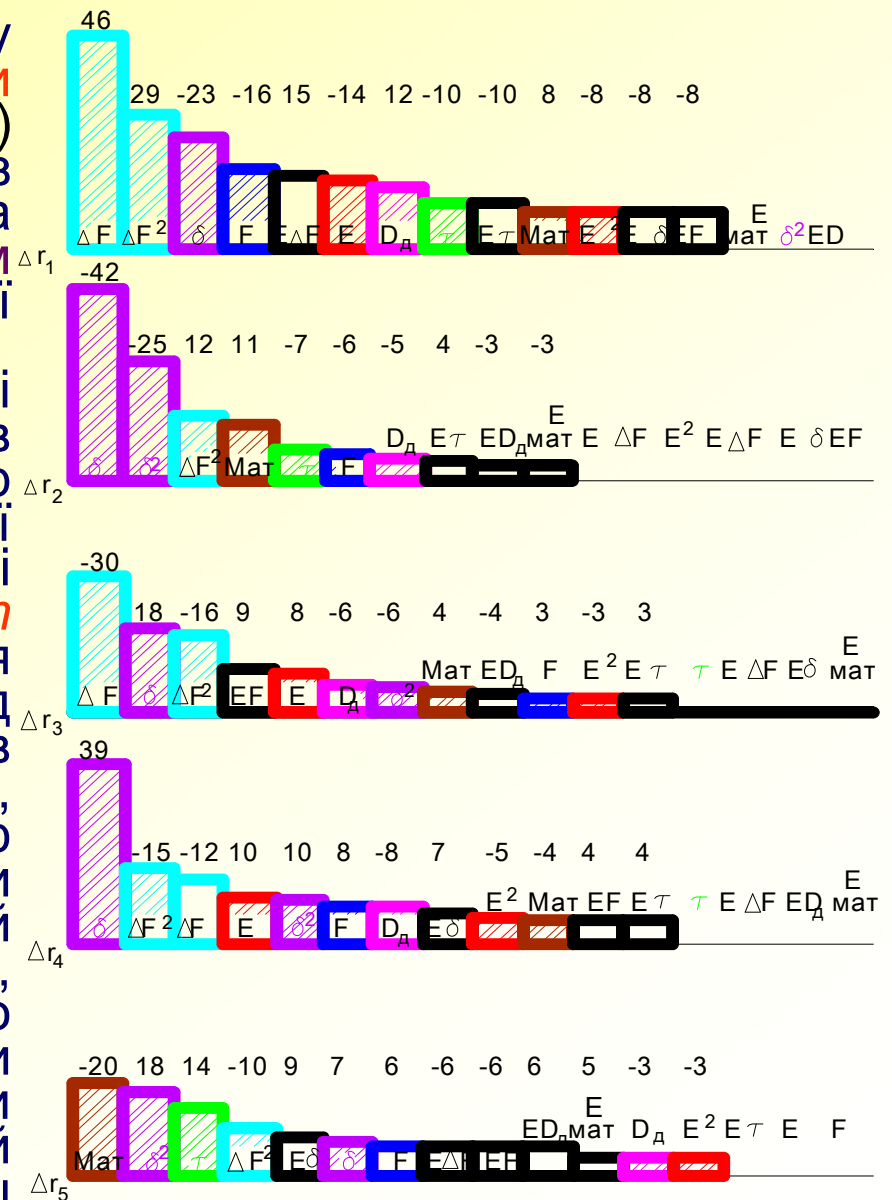


Рис. 5.16. Рангові діаграми впливу керованих факторів обробки порожнини на комплекс показників її повздовжньої форми

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

Таблиця 5.10

b_i	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_{11}	b_{22}	b_{33}	b_{12}	b_{13}	b_{14}	b_{15}	b_{16}	b_{17}
Δr_1	57	-14	46	-23	-16	12	-10	8	8	29	-	15	-8	-8	-	10	-
Δr_2	-	-	-6	-42	-	5	-7	11	-	12	-25	-	-	-	-3	4	-3
Δr_3	-4	8	-30	18	3	-6	-	4	-3	-16	-6	-	-	9	-4	3	-
Δr_4	-14	10	-12	39	8	-8	-	-4	-5	-15	10	-	7	4	-	4	-
Δr_5	-43	-	-	7	6	-3	14	-20	-3	-10	18	-6	9	-6	6	-5	5