

Технологія лазерної розмірної обробки

Презентація 8 (лекції 17-18)
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 17. Тема 5. Методи визначення режиму лазерної обробки порожнини (подовження)

5.5. Проектування режимів ЛРО. Багато критеріальні задачі

На практиці за рідким виключенням зустрічаються ТЗ на технологічну операцію з обробки отворів, які нормуються лише за рівнем одного показника. Із наведених прикладів проектування одне критеріальних задач проектування технологічної операції лазерної обробки отворів **за розміром** є найбільш реальним, тому що такі отвори можуть бути використані як кріпильні, декоративні, такі, через які охолоджують, формують контурну лінію для гравірування виробів та інші. Але і ці операції **не є повністю одне критеріальними**, тому що завжди потрібно враховувати техніко-економічні та економічні показники (продуктивність операції, її собівартість, тощо). Інші приклади проектування є зовсім умовними, тому що мало цікаві операції по виготовленню виробів з отворами, які характеризуються однією величиною конусоподібності або точністю, але мають різні розміри.

Виконаємо проектування технологічної операції лазерної обробки отворів в виробі, який зображено на рис. 5.11 з виконанням усіх вимог та норм, що наведені в ТЗ на проектування, тобто режим обробки повинен забезпечити виготовлення отворів з нестабільністю діаметру в межах поля допуску на розмір (H12), з **нормованими погрішностями поперечної** (в межах допустимої похибки розміру) і **подовжньої форми** (з **нормованою величиною конусоподібності $k = 0,4\text{мм}$**), а також з **максимальною (заданою) продуктивністю**.

Експериментальні дані, приведені в попередніх розділах, свідчать про те, що розглянуті кількісні і якісні результати обробки в тій або іншій ступені визначаються **одним і тим же обмеженим набором параметрів**, що визначають характеристики пучка випромінювання, а також властивості оброблюваної заготовки. Аналогічні залежності спостерігаються і для **тривалості операції** (рис. 5.27), яка залежить від **товщини заготовки**, її **матеріалу** (а), а також від **імпульсної енергії випромінювання** (б). Така багатопланова дія кожного фактора на результати обробки ускладнює завдання режимного забезпечення операції, перетворюючи її на **задачу багатфакторної оптимізації**, що вирішується, зазвичай, методами експериментальної або непрямой оптимізації.

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

5.5. Проектування режимів ЛРО. Багато критеріальні задачі

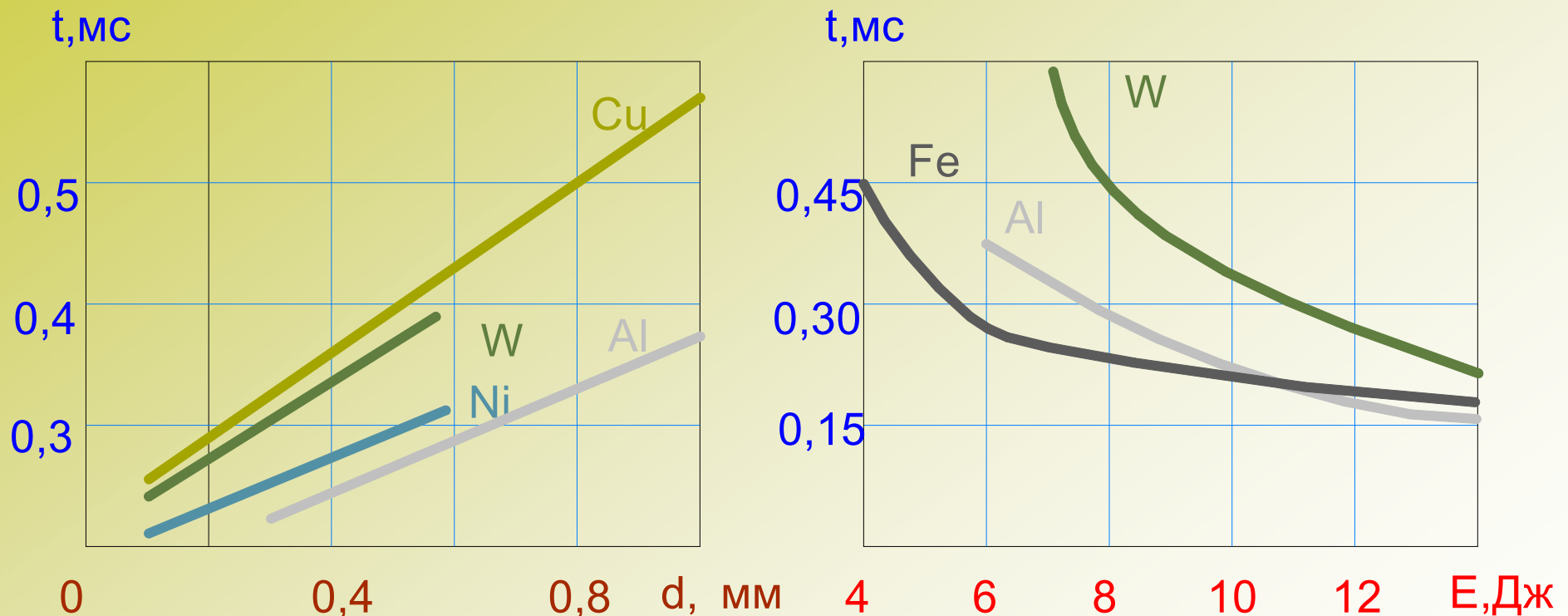


Рис. 5.28. Вплив параметрів обробки на тривалість процесу обробки порожнин

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

5.5. Проектування режимів ЛРО. Багато критеріальні задачі

5.5.1. Експериментальний метод оптимізації з допомогою узагальненої функції бажаності

Використання вдалої методики проектування операції обробки порожнин складної подовжньої форми за комплексним показником якості (сл. 7, През. №7) для визначення режимів обробки отворів в корпусах ін'єкційних голок ускладнюється різним характером (і розмірністю) показників, за якими оцінюється результати обробки, внаслідок чого безпосереднє їх об'єднання у єдиний показник є неможливим.

Методика пошуку оптимального режиму обробки для операції з багатьма показниками (відгуками), на які встановлені норми, базується на перетворення задачі в однокритеріальну.

Таким чином була вирішена технологічна задача обробки отворів складної подовжньої форми (сл. 7 – 9 През. №7).

Для об'єднання показників технологічної операції, які мають різні розмірності, використовують наступні методики:

1. Метод узагальненої бажаності.
2. Метод невизначених множників Лагранжа.
3. Метод штрафних функцій.

Для виконання практичного проектування технологічної операції на основі інженерних розрахунків використовують безрозмірну узагальнену функцію бажаності в якості її комплексного показника:

$$D = \sqrt[q]{g_1 g_2 \cdot g_1 \cdot g_q},$$

яка є середнє геометричним значенням окремих функцій бажаності для окремих показників операції обробки отворів ($l = 1 \dots q$; d, k, v_d, t та інші).

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

5.5. Проектування режимів ЛРО. Багато критеріальні задачі

5.5.1. Експериментальний метод оптимізації з допомогою узагальненої функції бажаності

При такій заміні окремих розмірних показників процесу створюється можливість їх об'єднання в єдиний узагальнений показник і оптимізаційна задача перетворюється в одне критеріальну, яка полягає в знаходженні координат факторного простору, відповідних його максимальному значенню. Така методика буде успішною, якщо безрозмірні функції адекватно оцінюватимуть розмірні результати обробки по відношенню до критеріїв на них.

З цією метою для переводу окремих натуральних відгуків процесу у окремі безрозмірні функції бажаності можна використовувати залежність:

$$g_i = \exp(-\exp(-y_i'))$$

де: y_i' - деяка безрозмірна функція, пов'язана з окремим показником y_i і яка надає пріоритети деяким його значенням (що зв'язані з нормами або критеріями на цей показник).

Аналіз функції y_i' (її графічне зображення на рис.5.29) дозволив визначити три її особливості:

- $g_i \rightarrow 0$, коли $y_i' \rightarrow -\infty$;
- $g_i \rightarrow 1$, коли $y_i' \rightarrow \infty$;
- $g_i = 0$ при $y_i' = 0,367$.

Додатково треба відмітити, що прийнятні рівні бажаності g_i досягаються при таких натуральних значень показника y_i , для яких функція $y_i' > 0$. Вони поділені на три діапазони: $g_i = 1 \div 0,8$ – високий рівень, $g_i = 0,8 \div 0,6$ – добрий та $g_i = 0,6 \div 0,4$ – допустимий рівень функції бажаності. Значення $g_i < 0,4$ – недопустимі.

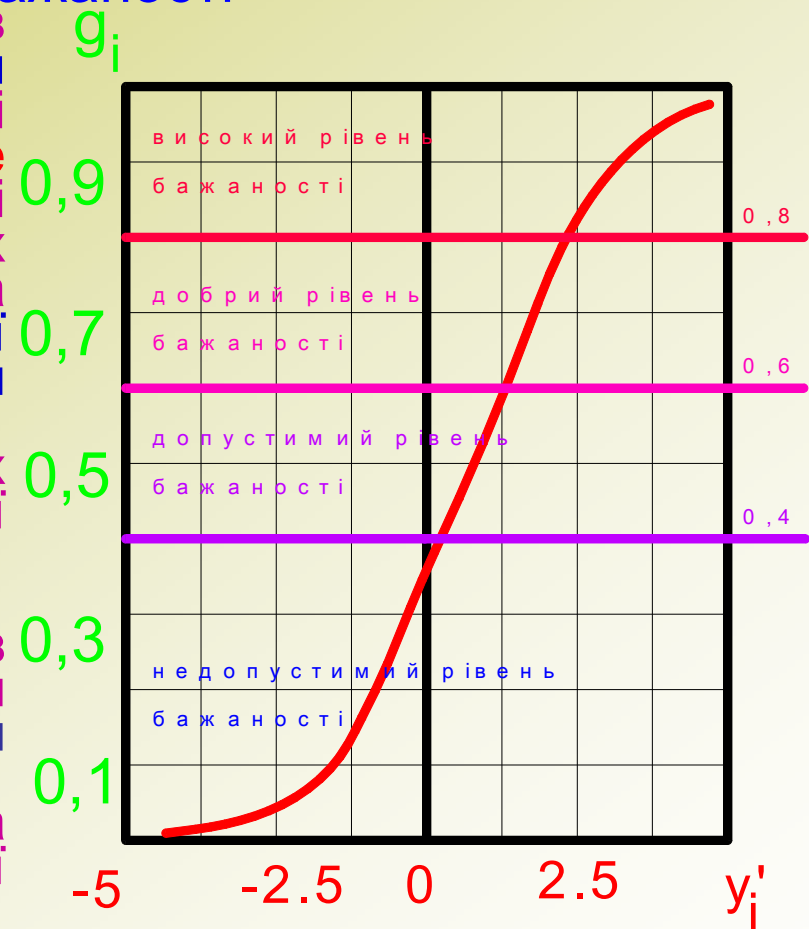


Рис.5.29 . Графічне зображення функції g_i в деякому масштабі абсциси y_i'

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

5.5. Проектування режимів ЛРО. Багато критеріальні задачі

5.5.2. Проектування операції ЛРО отворів (рис. 5.11 сл.2, През.№6)

Розглянемо цю методику на прикладі проектування операції лазерної обробки отворів в корпусах ін'єкційних голок (рис. 5.11, сл.2, През.№6). Відповідно до креслення та ТЗ необхідно спроектувати режими обробки отворів з виконанням наступних умов:

- виготовити отвори трьох діаметрів: 0,4; 0,6; 0,8 мм;
- забезпечити розміри отворів в межах, заданих полем допуску H12 тобто: $0,4^{+0,12}$; $0,6^{+0,15}$; $0,8^{+0,18}$;
- під час обробки придати отворам вхідний конус в межах конусоподібності $k = 0,4$ мм для полегшення операції збірки;

У задачах оптимізації функція цілі повинна також враховувати народногосподарські витрати, прибуток або величину, пов'язану з ними, наприклад, продуктивність, тривалість операції, тому використовуючи останню форму показника і враховуючи фактичну програму випуску ін'єкційних голок (0,5 млн. штук в рік), виконаємо мінімізацію тривалості операції обробки отвору $t \leq 20$ с (робота однієї ЛТУ у дві робочих зміни по п'ять робочих годин п'ять днів на тиждень), для цього додамо її до розмірних та якісних характеристик процесу і сформуємо наступним чином вимоги до проектуємої операції:

$$d_{min} \leq d(x_i) \leq d_{max} \quad \text{діаметр вихідної ділянки отвору;}$$

$$D_{min} \leq D(x_i) \leq D_{max} \quad \text{діаметр вхідної ділянки отвору;}$$

$$t(x_i) < t_{max} \quad \text{тривалість обробки одного отвору.}$$

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

5.5. Проектування режимів ЛРО. Багато критеріальні задачі

5.5.2. Проектування операції ЛРО отворів (рис. 5.11 сл.2, През.№6)

Два перших обмеження є умовами обробки отворів в межах поля допуску на розмір вихідної ділянки отвору і вхідного з врахуванням бажаної конусоподібності $k = 0,4$ мм (табл. 5.12). В якості пріоритетних (оптимальних) розмірів, на отримання яких повинна налаштуватися ЛТУ, прийняті значення, розташовані поблизу одного з граничних розмірів (d_{min} і D_{max}). Це забезпечить придання бажаної конусоподібності отворам зі сторони входу в них променя з одночасним захистом вихідної ділянки отвору від непоправного браку з боку граничного розміру (D_{max} – для D та d_{min} – для d). Оптимальні значення натуральних показників (d_{opt} та D_{opt}), на рівень яких налагоджується ЛТУ, бажано вибирати (якщо є така можливість) з урахуванням поля розсіяння значень натурального показника: $d_{opt} = d_{min} + 3\sigma_d$ та відповідно $D_{opt} = D_{max} - 3\sigma_D$.

Тоді логічно параметри оптимізації (показники технологічної операції (табл. 5.12) перетворювати в окремі бажаності g_j на підставі наступних міркувань:

- необхідно забезпечити максимальне значення g_j (близьке до одиниці) в області оптимальних значень параметрів d_{opt} і D_{opt} ;
- треба добитися різкого падіння рівня бажаності (зробити їх маловірогідними) при наближенні до граничних значень параметрів d_{min} і d_{max} , та D_{min} і D_{max} ;
- забезпечити плавну зміну бажаності від меж до оптимального значення області.

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

5.5. Проектування режимів ЛРО. Багато критеріальні задачі

5.5.2. Проектування операції ЛРО отворів (рис. 5.11 сл.2, През.№6)

Несиметричне розташування оптимальних значень діаметрів отворів d_{opt} і D_{opt} як центрів групування їх розмірів, відносно полів допусків викликано бажанням унеможливити (зменшити) невиправний брак виробів ($d > d_{max}$) та спонукати процес до формування отворів із бажаною конусоподібністю k .

З урахуванням того, що пріоритетні значення вхідного і вихідного розмірів отворів розташовані **несиметрично** відносно центру поля допуску на розмір (d) або допустимих його значень (D), а його межі потрібно максимально використовувати шляхом надання розмірам в діапазонах $d_{opt} > d > d_{max}$ та $D_{min} < D < D_{opt}$ пріоритетних рівнів ($> 0,8$) окремих функцій бажаності, зв'язок між натуральними параметрами (значеннями відгуків) і окремими бажаностями набуває складного вигляду (рис. 5.30), тобто записується складовими функціями:

Таблиця 5.12

Діаметр голки, мм	Граничні значення розмірів отворів, мм				Оптимальні значення розмірів отворів, мм	
	d_{min}	d_{max}	D_{min}	D_{max}	d_{opt}	D_{opt}
0,4	0,4	0,52	0,4	0,8	0,43	0,70
0,6	0,6	0,75	0,6	1,0	0,63	0,90
0,8	0,8	0,98	0,8	1,2	0,83	1,10

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

5.5. Проектування режимів ЛРО. Багато критеріальні задачі

5.5.2. Проектування операції ЛРО отворів (рис. 5.11 сл.2, През.№6)

$$y'_d = \begin{cases} a_1 d_u^2 + b_1 d_u + c_1 - \text{дільниця}(d_u \geq d_{opt}) \\ \frac{p}{(d_{opt} - d_{min})} (d_u - d_{min}) - \text{дільниця}(d_u < d_{opt}) \end{cases}$$

$$y'_D = \begin{cases} a_2 D_u^2 + b_2 D_u + c_2 - \text{дільниця}(D_u \leq D_{opt}) \\ \frac{p}{(D_{opt} - D_{max})} (D_u - D_{max}) - \text{дільниця}(D_u > D_{opt}) \end{cases}$$

де: p – деяка безрозмірна величина, що визначає масштаб перевідних функцій: визначається за реперними точками (опорними значеннями функції, що переводиться: d, D або t); D_u та d_u – поточні значення діаметрів у виході і вході променя у отвор (в u -тій точці експерименту); a, b, c – коефіцієнти відповідних перевідних функцій:

$$a_1 = -\frac{p}{(d_{max} - d_{opt})^2} \quad a_2 = -\frac{p}{(D_{min} - D_{opt})^2}$$

$$b_1 = -2d_{opt}a_1 \quad b_2 = -2D_{opt}a_2$$

$$c_1 = -a_1 d_{max}^2 - b_1 d_{max} \quad c_2 = -a_2 D_{min}^2 - b_2 D_{min}$$

За вимогами до ТЗ на операцію, що проектується, також потрібне досягнення її максимальної продуктивності. Ця умова може бути виражена у вигляді монотонної залежності окремої бажаності g_t від тривалості операції t_u з її одностороннім обмеженням максимальною тривалістю, тобто з $t_u < t_{max} = 20$ с, що відповідає найнижчій допустимій продуктивності:

$$y'_t = \frac{p}{(t_{min} - t_{max})} (t_u - t_{max})$$

де: t_u – поточне значення тривалості обробки: $t_{max} = 20$ с; t_{min} – максимальне допустиме і мінімальне (не обмежене) спостережене значення t_u в експерименті.

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

5.5. Проектування режимів ЛРО. Багато критеріальні задачі

5.5.2. Проектування операції ЛРО отворів (рис. 5.11 сл.2, През.№6)

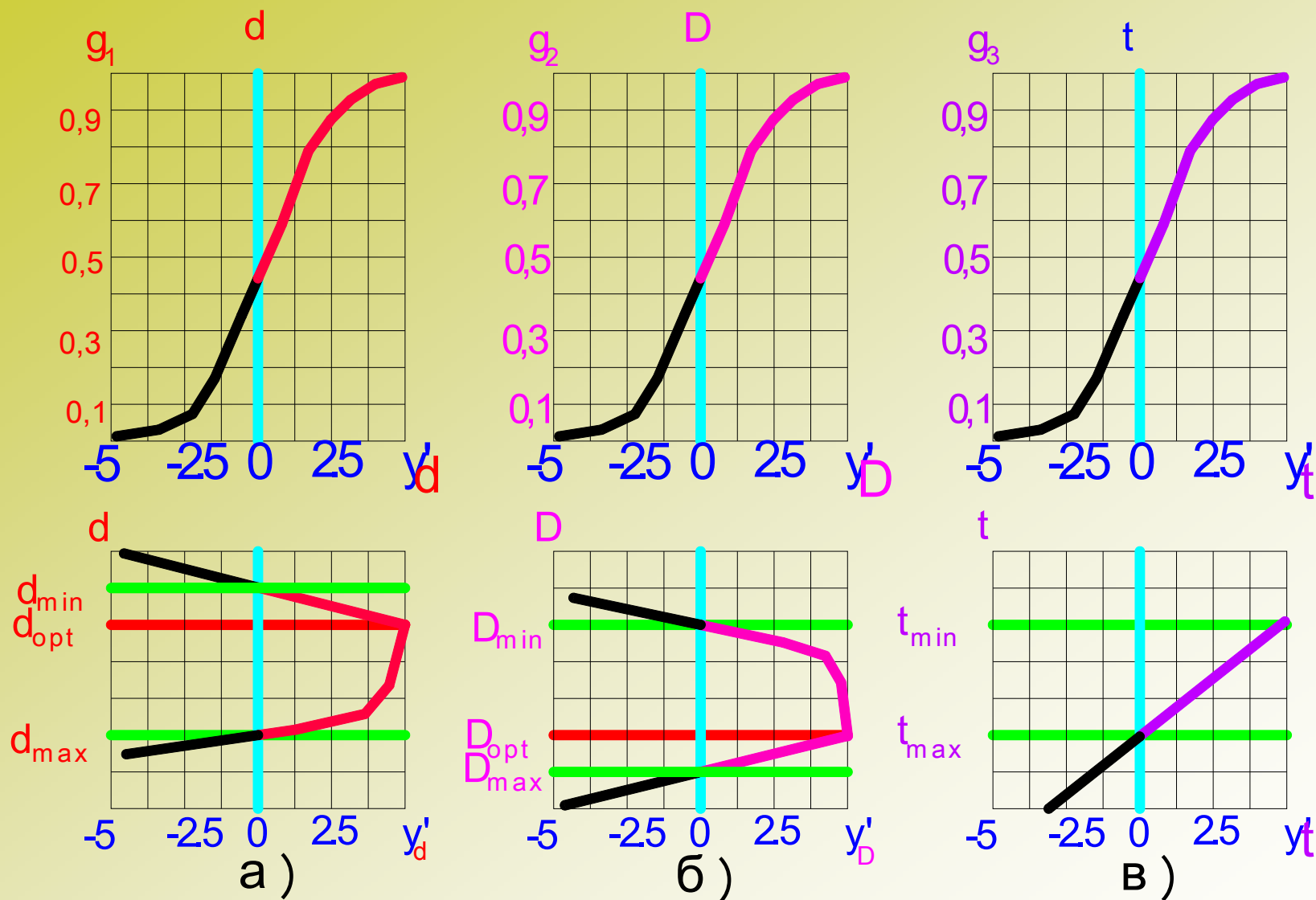


Рис.5.30. Схеми формування окремих функцій бажаності
для нормованих показників технологічної операції

Лекція 18. **Тема 5. Методи визначення режиму лазерної обробки порожнини (подовження)**

5.5. Проектування режимів ЛРО. Багато критеріальні задачі

5.5.3. Алгоритм проектування операції ЛРО отворів

Процедура оптимізації технологічної операції виконується в наступному порядку:

- 1. Моделювання процесу ЛРО отворів** відносно показників, на які встановлені граничні критерії (**сл. 6, През.№8**), для чого виконується наступне:
 - **встановлюється зміст і межі факторного простору**, вибираючи з рангових діаграм для кожного показника (D, d і t) **обмежену кількість факторів** (3-5), що найістотніше впливають на кожен показник; а також **рівні, на яких фіксуються інші фактори**; межі факторного простору можуть бути встановлені внаслідок попередньої оцінки режимів обробки отворів заданого розмірного діапазону, наприклад, за аналітичними залежностями (5.2-5.4, 5.6, 5.7), наведеними у розділі 5.1 та 5.2 (А і Б) у відповідності до обраного режиму опромінення.
 - **постулюється вид математичної моделі процесу по кожному показнику** і з урахуванням її порядку вибирається **план експериментальних досліджень** (рекомендовані плани для різних обставин проектування наведені в табл. 5.13, де: L – кількість членів моделі; B_k – план Бокса на кубі; H_c – план Хартлі на сфері; $H_{сквD}$ – насичений квазі D – оптимальний; $P_{ехтш.}$ – насичений план Рехтшафнера [4]);
 - **реалізація експерименту** за вибраним планом в рандомізованому (випадковому) порядку, **обмір** одержаного масиву отворів по тим показникам, на які встановлені норми у ТЗ, з наступною **перевіркою передумов** виконання регресійного аналізу по кожному з них;
- 2. За отриманими експериментальними даними** (j – порядковий номер повторності у кожному досліді u : $j = 1 \dots n_u$) у кожній дослідній точці визначаються **окремі бажаності** згідно з визначеними перевідними функціями, які усереднюються до величин \bar{g}_{ju} для визначення узагальненої функції бажаності D_u з наступною **статистичною обробкою результатів** (визначення **коефіцієнтів моделей**, їх **довірчих інтервалів**, **спрощення складу моделей** виключенням незначних коефіцієнтів регресії та **перевірка їх адекватності**) для кожного із $k = 3$ показників.

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

5.5. Проектування режимів ЛРО. Багато критеріальні задачі

5.5.3. Алгоритм проектування операції ЛРО отворів

Таблиця 5.13

№ пп	Модель Кількість ефектів. План	Кількість факторів n						
		2	3	4	5	6	7	8
1	Лінійна, $L_n = 1+n +0,5n(n-1)$	4	7	11	16	22	29	37
	Тип плану	2^2	2^3	2^4	2^{5-1}	2^{6-1}	2^{7-2}	2^{8-2}
	Кількість дослідів	4	8	16	16	32	32	64
2	Квадратична $L_{кв} = 0,5(n+2)(n+2)$	6	10	15	21	28	36	45
	Тип плану (композиційний)	B_k	B_k	B_k	B_k	B_k, H_c	B_k	B_k
	Кількість дослідів	8	14	24	26	44	48	80
3	Квадратична $L_{кв} = 0,5(n+2)(n+1)$	6	10	15	21	28	36	45
	Тип плану (насичений)	$H_{cквD}$	$H_{cквD}$	$P_{ехтш}$	$P_{ехтш}$	$P_{ехтш}$	$P_{ехтш}$	$P_{ехтш}$
	Кількість дослідів	6	10	15	21	28	36	45
4	Лін.(квадр.) $(n+1) \leq L \leq 0,5(n+2)(n+1)$	3-6	4-10	5-15	6-21	7-29	8-37	9-46
	Тип плану (компроміс.) $N_{оплану}$	41	45	46	56	52	31	32
	Кількість дослідів	$\geq L$	$\geq L$	$\geq L$	$\geq L$	$\geq L$	$\geq L$	$\geq L$

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

5.5. Проектування режимів ЛРО. Багато критеріальні задачі

5.5.3. Алгоритм проектування операції ЛРО отворів

На наведених на рис. 5.30 (а, б, в) залежностях для g_i останні приведені у відповідність із значеннями параметрів у реперних (опорних) точках (d_{min}, d_{max} ; D_{min}, D_{max} та t). Видно, що бажаність $D \sim 1$ відповідає режиму виготовлення отворів з параметрами d_{opt}, D_{opt} та t_{min} .

3. Отримані математичні моделі процесу $D_i = f_i(x_i)$, дозволять відомими математичними методами (пошуку координат екстремального значення величини D_i або найбільшого стаціонарного її значення в межах факторного простору) знайти комплекс рівнів керуємих факторів, який разом з рівнями фіксованих створює режим виконання технологічної операції, що забезпечує виготовлення отворів з найвищою можливою якістю. Перераховані дії одночасно або по чергово виконуються для усіх типорозмірів отворів під голки $\emptyset 0,4$; $\emptyset 0,6$ або $\emptyset 0,8$ мм.

У табл. 5.14 приведені результати експерименту, а також розраховані значення узагальненої функції бажаності D для кожного із типорозмірів виробів, причому для голки $d = 0,8$ мм в жодній експериментальній точці не було досягнуто мінімального допустимого значення $D_{0,8}$, найближчий до нього рівень **0,3215** відповідає умовам обробки **17 іспиту**, тобто $E = 16$ Дж; $F = 70$ мм; $\Delta F = 0$; $D_a = 8$ мм; $\theta = 0,9$ мрад.

Для $\emptyset 0,4$ та $\emptyset 0,6$ значення $> D = 0,4$, тобто допустимі значення, досягнуті в деяких дослідних точках факторного простору :

для $\emptyset 0,4$ мм:

дослід №8 ($D_{0,4} = 0,665$): $E = 7$ Дж; $F = 55$ мм; $\Delta F = -1$ мм, $D_a = 9$ мм, $\theta = 1,6$ мрад;

дослід №16 ($D_{0,4} = 0,8084$): $E = 7$ Дж, $F = 55$ мм; $\Delta F = -1$ мм, $D_a = 7$ мм, $\theta = -0,2$ мрад;

для $\emptyset 0,6$ мм:

дослід №7 ($D_{0,6} = 0,7479$): $E = 13$ Дж, $F = 55$ мм, $\Delta F = -1$ мм, $D_a = 9$ мм, $\theta = -0,2$ мрад;

дослід №20 ($D_{0,6} = 0,6160$): $E = 10$ Дж, $F = 40$ мм, $\Delta F = 0$, $D_a = 8$ мм, $\theta = 0,9$ мрад;

дослід №22 ($D_{0,6} = 0,6922$): $E = 10$ Дж, $F = 70$ мм, $\Delta F = 0$, $D_a = 10$ мм, $\theta = 0,9$ мрад;

дослід №23 ($D_{0,6} = 0,8815$): $E = 10$ Дж, $F = 70$ мм, $\Delta F = 0$, $D_a = 10$ мм, $\theta = 0,9$ мрад;

дослід №25 ($D_{0,6} = 0,7632$): $E = 10$ Дж, $F = 70$ мм, $\Delta F = 0$, $D_a = 8$ мм, $\theta = 0,9$ мрад.

дослід №27 ($D_{0,6} = 0,6566$): $E = 10$ Дж, $F = 70$ мм, $\Delta F = 0$, $D_a = 8$ мм, $\theta = 0,9$ мрад.

Таблиця 5.14

№ досл	Середнє значення відгуків			Окремі функції бажаності									Узагальнені функції бажаності D_d		
				$d = 0,4$			$d = 0,6$			$d = 0,8$					
	D , МКМ	d , МКМ	t , с	g_D	g_d	g_t	g_D	g_d	g_t	g_D	g_d	g_t	$D_{0,4}$	$D_{0,6}$	$D_{0,8}$
1	1205	740	44	$1,81 \cdot 10^{-25}$	$1,3 \cdot 10^{-5010}$	$5,4 \cdot 10^{-477}$	0,3495	0,4260	$5,4 \cdot 10^{-477}$	0,3494	0,00062	$5,4 \cdot 10^{-477}$	$4 \cdot 10^{-340}$	10^{-144}	10^{-144}
2	975	229	52	0,0032	$1,6 \cdot 10^{-130}$	$1,0 \cdot 10^{-687}$	0,4590	$1,1 \cdot 10^{-6307}$	$1,0 \cdot 10^{-687}$	0,6398	$2,3 \cdot 10^{-9763}$	$1,0 \cdot 10^{-687}$	$1,6 \cdot 10^{-246}$	$6,5 \cdot 10^{-879}$	$8 \cdot 10^{-1041}$
3	1208	594	47	$1,69 \cdot 10^{-33}$	$6,4 \cdot 10^{-4}$	$7,5 \cdot 10^{-2133}$	0,0003	0,2948	$7,5 \cdot 10^{-2133}$	0,3385	$9,1 \cdot 10^{-413}$	$7,5 \cdot 10^{-2133}$	$9,4 \cdot 10^{-638}$	$3,5 \cdot 10^{-642}$	10^{-188}
4	1001	429	22	0,0006	1,000	0,9818	0,3642	$1,6 \cdot 10^{-130}$	0,9818	0,6577	$1,2 \cdot 10^{-7631}$	0,9818	0,1076	$1,3 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-1390}$
5	1185	262	44	$3,9 \cdot 10^{-21}$	$6,23 \cdot 10^{-44}$	$5,4 \cdot 10^{-477}$	0,0017	$4,2 \cdot 10^{-3262}$	$5,4 \cdot 10^{-477}$	0,4229	$3,5 \cdot 10^{-9063}$	$5,4 \cdot 10^{-477}$	$1,3 \cdot 10^{-340}$	$1 \cdot 10^{-3741}$	$2 \cdot 10^{-413}$
6	971	455	22	0,0039	0,7332	0,9818	0,4590	$3,7 \cdot 10^{-33}$	0,9818	0,6366	$6,7 \cdot 10^{-6707}$	0,9818	0,1716	$3,7 \cdot 10^{-17}$	$1,5 \cdot 10^{-201}$
7	910	681	24	0,0495	$4,2 \cdot 10^{-262}$	0,9514	0,6660	0,6597	0,9514	0,5713	$1,14 \cdot 10^{-23}$	0,9514	$1,5 \cdot 10^{-79}$	0,7479	$1,9 \cdot 10^{-8}$
8	763	507	13	0,5010	0,5602	0,9998	0,6352	$2,2 \cdot 10^{-10}$	0,9998	0,2673	$6,7 \cdot 10^{-497}$	0,9998	0,655	$5,5 \cdot 10^{-4}$	$3,8 \cdot 10^{-166}$
9	1301	574	40	$7,9 \cdot 10^{-66}$	0,0310	$3,5 \cdot 10^{-63}$	$1,29 \cdot 10^{-9}$	0,0925	$3,5 \cdot 10^{-63}$	0,0642	$6,0 \cdot 10^{-786}$	$3,5 \cdot 10^{-63}$	$2,3 \cdot 10^{-44}$	$1,7 \cdot 10^{-23}$	$4,6 \cdot 10^{-284}$
10	761	269	27	0,5081	$5,95 \cdot 10^{-33}$	0,8000	0,6323	$6,1 \cdot 10^{-2821}$	0,8000	0,26210	$4,8 \cdot 10^{-8673}$	0,8000	$3 \cdot 10^{-12}$	$2,8 \cdot 10^{-94}$	$2 \cdot 10^{-289}$
11	1098	537	28	$2,81 \cdot 10^{-9}$	0,3241	0,6922	0,0696	0,0003	0,6922	0,6863	$5,7 \cdot 10^{-2769}$	0,6922	$8,6 \cdot 10^{-4}$	0,0244	$2,4 \cdot 10^{-914}$
12	827	248	27	0,2698	$1,2 \cdot 10^{-69}$	0,8000	0,6732	$3,5 \cdot 10^{-1014}$	0,8000	0,4247	$7,5 \cdot 10^{-9633}$	0,8000	$6,7 \cdot 10^{-24}$	$2,7 \cdot 10^{-338}$	$1,4 \cdot 10^{-1332}$
13	1133	722	35	$7,35 \cdot 10^{-13}$	$1,3 \cdot 10^{-4011}$	$5,1 \cdot 10^{-6}$	0,0228	0,5148	$5,1 \cdot 10^{-6}$	0,5995	$1,42 \cdot 10^{-6}$	$5,1 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-1330}$	0,0039	$1,6 \cdot 10^{-4}$
14	811	297	22	0,3275	$3,55 \cdot 10^{-14}$	0,9818	0,6686	$5,0 \cdot 10^{-774}$	0,9818	0,3883	$9,2 \cdot 10^{-6121}$	0,9818	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-238}$	$7,7 \cdot 10^{-1337}$
15	973	563	24	0,0035	0,0907	0,9514	0,4661	0,0323	0,9514	0,6381	$3,8 \cdot 10^{-917}$	0,9514	0,0673	0,2432	$5,8 \cdot 10^{-306}$
16	698	444	12	0,7096	0,7441	0,9998	0,5583	$1,88 \cdot 10^{-79}$	0,9998	0,6398	$1,2 \cdot 10^{-4631}$	0,9998	0,8084	$5 \cdot 10^{-27}$	$6,9 \cdot 10^{-1343}$
17	1157	772	27	$3,76 \cdot 10^{-16}$	$1,1 \cdot 10^{-6307}$	0,8000	0,0082	0,2257	0,8000	0,5218	0,0793	0,8000	$4 \cdot 10^{-1440}$	0,1142	0,3215
18	647	241	9	0,6845	$9,88 \cdot 10^{-88}$	0,9999	0,4696	$1,1 \cdot 10^{-3407}$	0,9999	0,0264	$2,3 \cdot 10^{-9063}$	0,9999	$9,4 \cdot 10^{-30}$	$2,4 \cdot 10^{-1463}$	$9 \cdot 10^{-1333}$
19	1060	442	29	$1,42 \cdot 10^{-6}$	0,7453	0,5452	0,1616	$6,6 \cdot 10^{-83}$	0,5452	0,6819	$2,3 \cdot 10^{-4711}$	0,5452	0,0084	$4,1 \cdot 10^{-29}$	$1,6 \cdot 10^{-1363}$
20	741	600	17	0,5744	$8,39 \cdot 10^{-3}$	0,9985	0,6146	0,3801	0,9985	0,2096	$1,1 \cdot 10^{-329}$	0,9985	0,0365	0,6160	$2,3 \cdot 10^{-330}$
21	1048	503	27	$6,5 \cdot 10^{-6}$	0,5832	0,8000	0,1987	$9,73 \cdot 10^{-12}$	0,8000	0,6787	$7,3 \cdot 10^{-311}$	0,8000	0,0145	0,0001	$1,1 \cdot 10^{-170}$
22	862	698	27	0,1558	$5,0 \cdot 10^{-774}$	0,8000	0,6871	0,6028	0,8000	0,4953	$9,6 \cdot 10^{-14}$	0,8000	$9,3 \cdot 10^{-8}$	0,6922	$3,4 \cdot 10^{-3}$
23	854	635	17	0,1798	$6,11 \cdot 10^{-21}$	0,9985	0,6858	0,9999	0,9985	0,4802	$5,4 \cdot 10^{-107}$	0,9985	$1,1 \cdot 10^{-21}$	0,8815	$3,2 \cdot 10^{-36}$
24	954	547	27	0,0094	0,2282	0,8000	0,5319	0,0029	0,8000	0,6215	$4,6 \cdot 10^{-1932}$	0,8000	0,1200	0,1075	$5,8 \cdot 10^{-644}$
25	848	649	24	0,1987	$1,81 \cdot 10^{-42}$	0,9514	0,6842	0,6823	0,9514	0,4686	$3,8 \cdot 10^{-67}$	0,9514	$7,2 \cdot 10^{-13}$	0,7632	$5,6 \cdot 10^{-68}$
26	887	561	21	0,0919	0,1053	0,9889	0,6914	0,0255	0,9889	0,5376	$2,5 \cdot 10^{-1233}$	0,9889	0,2126	0,2597	$6,2 \cdot 10^{-418}$
27	882	604	22	0,1032	$1,52 \cdot 10^{-3}$	0,9818	0,6910	0,4167	0,9818	0,5299	$1,4 \cdot 10^{-289}$	0,9818	0,0116	0,6566	$1,1 \cdot 10^{-93}$

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

5.5. Проектування режимів ЛРО. Багато критеріальні задачі

5.5.3. Алгоритм проектування операції ЛРО отворів

Будь-який з цих режимів може бути прийнятий як оптимальний, але найвищі рівні бажаності отримані в дослідях №16 ($D_{0,4} = 0,8084$) та №23 ($D_{0,6} = 0,8815$). Хоча для голки $\varnothing 0,8\text{мм}$ в межах факторного простору (табл. 5.7) не виявилось режиму, що забезпечує отримання отворів заданого рівня якості в операції встановленої тривалості, моделювання процесу та пошук екстремального значення функції $D_{0,8} = f(x_j)$ може допомогти знайти відповідний режим.

В останньому випадку за відсутності прямого рішення задачі непрямої оптимізації пропонується наступний алгоритм пошуку режиму обробки:

- спростити оптимізаційне завдання шляхом виключення з узагальненого показника найбільш проблемного (наприклад, показника точності);
- виконати проектування спрощеного технологічного завдання з використанням отриманих раніше моделей;
- вибрати з відомих або розробити метод не режимного досягнення рівня виключеного показника (тобто точності в нашому прикладі).

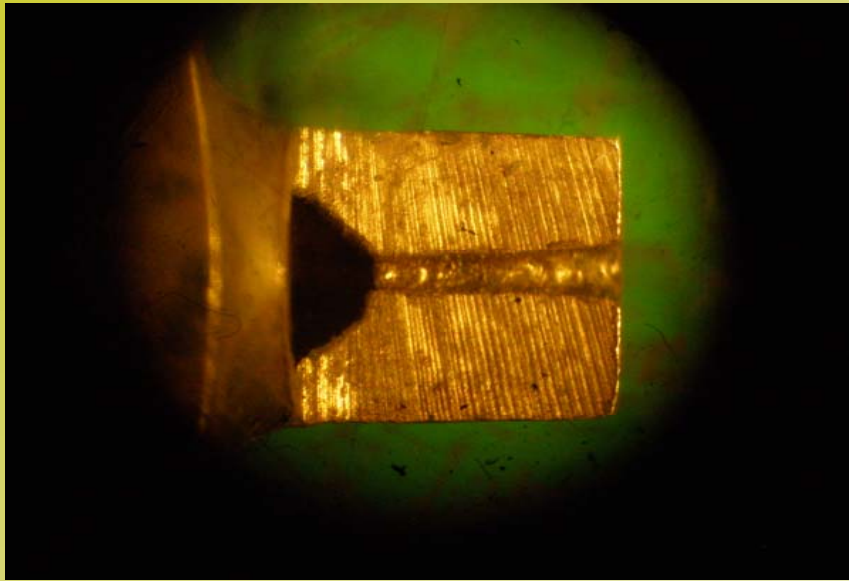
На рис. 5.31 показані приклади профілів отворів в корпусах голок різного діаметру:

- а) – іспит № 20 ($D = 741$ мкм; $d = 600$ мкм; $t = 17$ с);
- б) – іспит № 16 ($D = 698$ мкм; $d = 444$ мкм; $t = 12$ с);
- в) – вхідна ділянка отвору б).

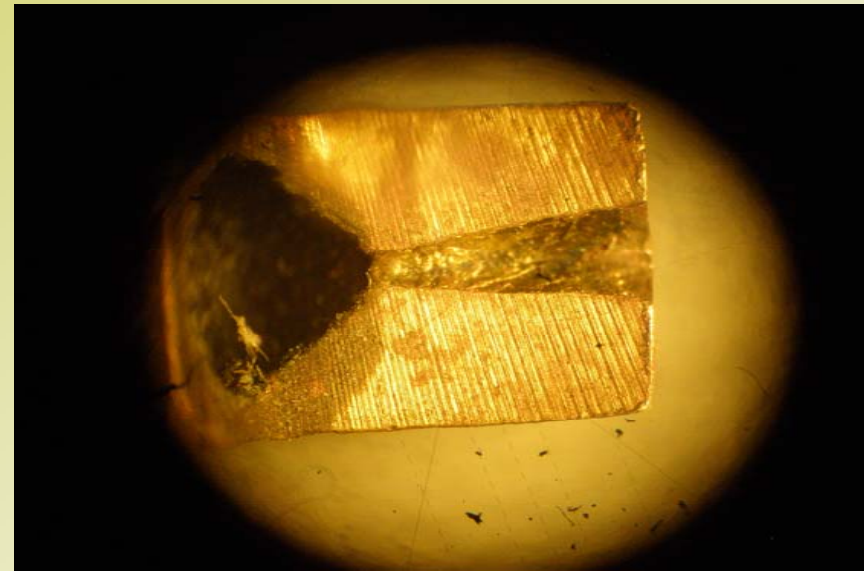
Тема 5. Методи визначення режиму лазерної обробки порожнини (подовження)

5.5. Проектування режимів ЛРО. Багато критеріальні задачі

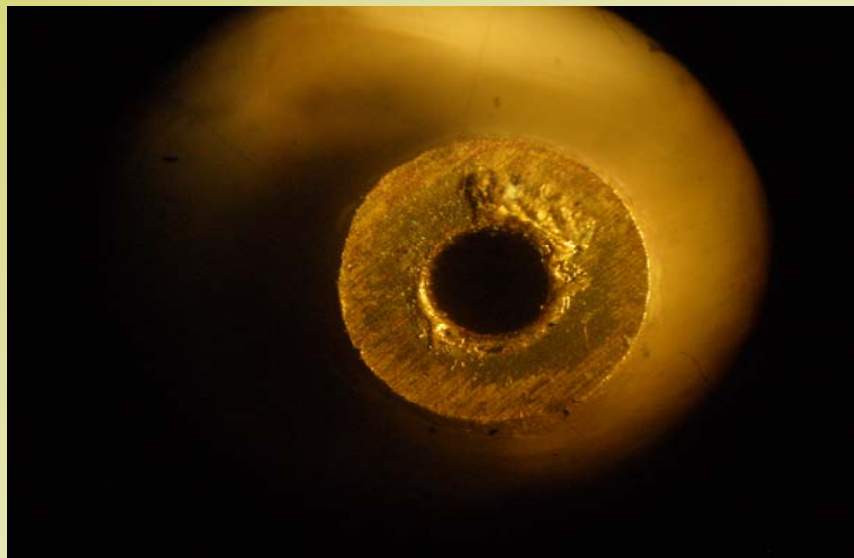
5.5.3. Алгоритм проектування операції ЛРО отворів



а)



б)



в)

Рис. 5.31. Зразки отворів в корпусах голок конічної форми діаметром 400 мкм з $k = 400$ мкм (а) та з $k = 600$ мкм (б); в – вхідна ділянка отвору.

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

- 5.1. Які переваги та недоліки мають різні методи визначення режиму ЛРО?
- 5.2. Які перспективи проектування режимів ЛРО аналітичним вирішенням рівняння теплопровідності у твердих тілах?
- 5.3. В результаті яких спрощень представлення процесу обробки порожнини пучком лазерного випромінювання одержано аналітичні моделі поперечного та повздовжнього її розмірів?
- 5.4. Чому відомі аналітичні моделі можна застосовувати лише для прогнозування результатів обробки, а не для їх проектування?
- 5.5. За яких умов були отримані феноменологічні моделі обробки порожнини?
Схема опромінення та формування профілю порожнини.
- 5.6. Який механізм утворення крізної порожнини застосовано для одержання її з розміром, меншим ніж діаметр пучка випромінювання на поверхні заготовки?
- 5.7. Внаслідок чого обчислювальні експерименти, виконані за аналітичними моделями показують дані, які відрізняються один від одного?
- 5.8. Внаслідок якого спрощення схеми опромінення визначено алгоритм та створено аналітичні залежності для проектування режимів ЛРО?
- 5.9. Технологічна схема обробки порожнин гладким імпульсом (без пічків) випромінювання: допущення та спрощення.
- 5.10. Чому та чим відрізняються режими обробки дрібних та глибоких порожнин?

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

- 5.11. Для чого потрібно додатково скоротити тривалість імпульсу випромінювання для обробки порожнини циліндричної повздовжньої форми?
- 5.12. Яка необхідність врахування збільшеної теплопровідності при проектуванні операції обробки порожнин в заготівках із теплопровідних матеріалів (мідь, алюміній, золото та ін.)?
- 5.13. Технологічна схема обробки порожнин імпульсом з регулярною пірковою структурою випромінювання:
- 5.14. Чим принципово відрізняються за структурою аналітичні моделі прогнозування результатів ЛРО та їх проектування?
- 5.15. Якою методикою досліджень користуються для вивчення фізичних явищ процесу ЛРО? Які недоліки цієї методики та її результатів її використання?
- 5.16. Які особливості впливу параметрів обробки на поперечний розмір порожнини після ЛРО?
- 5.17. Які особливості впливу параметрів обробки на глибину порожнини після ЛРО?
- 5.18. В чому головна відмінність в стратегії експерименту за одно факторною та повнофакторною методиками (ПФЕ) і до яких наслідків це приводить?
- 5.19. Наведіть алгоритм досліджень у ПФЕ. Завдяки чому ця методика не має тупикових ситуацій?
- 5.20. Які початкові передумови необхідні для застосування методики ПФЕ? Чим забезпечується виконання цих передумов?
- 5.21. Для чого необхідний етап передпланування експерименту? За якими методиками його прийнято виконувати?

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

5.22. Які параметри ЛРО можна віднести до керуємих, контрольованих та неконтрольованих факторів процесу?

Які фактору і з яких причин можуть змінюватися в експерименті на двох або кількох рівнях?

5.23. Чим визначається необхідність використання кодового представлення рівнів керуємих факторів на етапі перед планування ПФЕ?

5.24. Чим відрізняються компромісні плани Бродського від регулярних та симетричних планів?

Чому вони придатні для пристосування до досліджених раніше об'єктів?

5.25. Методика перетворення табличних регулярних планів Бродського в несиметричні та нерегулярні шляхом стискування рівнів частини факторів.

5.26. Яка необхідність в результатах передпланування експерименту – рангових діаграмах впливу чинників на окремі показники технологічної операції?

5.27. Які два шляхи використовують для проектування операцій ЛРО за допомогою ПФЕ?

5.28. Що спрощують градієнтні методи пошуку оптимальних умов обробки в порівнянні з моделюванням процесу обробки?

5.29. Який порядок експериментального проектування режиму обробки для однокритеріальної технологічної задачі

(на прикладі проектування операції обробки отворів в корпусах голок для шприців)?

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

- 5.30. Яким чином формується факторний простір з використанням рангових діаграм, та яким перевіркам піддаються граничні умови обробки?
- 5.31. Які плани експерименту бажано використовувати в разі розробки нової технологічної операції?
- 5.32. Яким чином можна визначати значення факторів (режим обробки) за моделлю у вигляді функції багатьох аргументів?
- 5.33. Визначення режиму обробки порожнин з нормованою конусоподібністю (на прикладі отворів для ін'єкційних голок).
- 5.33. Яким чином описується складний повздовжній профіль порожнин в задачах експериментального проектування технологічної операції ЛРО?
- 5.34. Чим може закінчитися спроба режимного забезпечення багатокритеріальної технологічної задачі при її вирішенні за алгоритмом для проектування однокритеріальних задач? Дайте пояснення і приклад цьому результату.
- 5.35. Які показники формують загальну характеристику якості порожнини?
- 5.36. За яких умов обробки можна одержати порожнини з заданою формою її перетину?
- 5.37. Яким чином можна описати відхилення подовжнього профілю обробленої порожнини від заданого кресленням виробу профілю?
- 5.38. В зв'язку з якою особливістю опису профілю порожнини можна сформулювати узагальнений показник її відмінності від заданого профілю?
- 5.39. За яким алгоритмом можна одержати оптимальні режими обробки порожнини заданої подовжньої форми за умови опису похибки одним показником?

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

- 5.40. Який показник характеризує точність розміру оброблених порожнин в партії заготовок в умовах одночасного впливу параметрів обробки на величину їх розмірів?
- 5.41. Наведіть приклад вибору режиму опромінення порожнин з нормованою точністю поперечних розмірів в умовах одно критеріальної задачі.
- 5.42. Чим відрізняються реальні задачі проектування технологічної операції від наведених вище прикладів проектування за різними показниками?
- 5.43. Що заважає проектуванню багато критеріальних технологічних задач наведеними раніше методами?
- 5.44. Який принцип положено у відомі методи проектування багато критеріальних технологічних задач: за узагальненою функцією бажаності, методом Лагранжа, штрафних функцій?
- 5.45. Яким чином виконується перехід від багатокритеріальних задач до однокритеріальної у методі узагальненої функції бажаності?
- 5.46. Які логічні міркування лежать в основі формування з окремих розмірних показників технологічної операції окремих та узагальненої функції бажаності?
Наведіть приклади формування окремих функцій бажаності з односторонніми та двох сторонніми обмеженнями натуральних показників.
- 5.47. Алгоритм оптимізаційного проектування технологічної операції за узагальненою функцією бажаності.
- 5.48. Яким шляхом вирішується завдання проектування технологічної операції за умови відсутності рішення задачі непрямой оптимізації?

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

- 5.49. Яку функцію відіграє штучна категорія функцій бажаності при проектуванні багатокритеріальних задач?
- 5.50. Наведіть графік окремої функції бажаності від допоміжної функції та визначте характерні її значення.
- 5.51. Приведіть приклад побудови допоміжної функції для нормованого показника шорсткості, наприклад R_z в прикладі проектування операції обробки отворів в корпусах ін'єкційних голок?
- 5.52. Яким чином проектується спрощеним методом багатокритеріальні технологічні задачі, які не мають режимного рішення?
- 5.53. Які зміни в технологічній схемі обробки якісних порожнин дали можливість покращити розмірні та якісні показники операцій ЛРО в останній час?
- 5.54. Якими якісними характеристиками можна описати стан порожнини після лазерної обробки?
- 5.55. Від чого залежить стан профілю порожнини після лазерної обробки, чи можливо параметричним впливом на процес обробки уменшити недоліки подовжнього профілю порожнини?
- 5.56. Від чого залежить стан поверхні стінок обробленої лазерним променем порожнини?
- 5.57. Яким чином зменшують рівень шорсткості стінок порожнини після лазерної обробки?
- 5.58. Від чого залежить глибина шару матеріалу, стан якого змінився внаслідок теплового діяння пучка випромінювання?
- 5.59. Які властивості вуглецевої сталі визначають розмірні та показники твердості в шарі ЗТВ?

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

- 5.60. Чим відрізняються шари зміцненого матеріалу біля поверхні порожнини у заготовок, виготовлених з легуваних сталей?
- 5.61. Які особливості шару зміненого матеріалу характерні для порожнин, оброблених в конструкційних неметалевих матеріалів: алмаз, кераміка, скло та ін..?
- 5.62. Чи є зміцнені шари в заготовках із кольорових металів та сплавів після лазерної обробки порожнин? Якщо є, то у яких?

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

Бібліографічний опис до теми 5

Основна:

1. Котляров В.П. Технологія лазерної обробки (операції розмірної обробки). Ніжин: НДУ ім. М. Гоголя, - 2010. – 308с. стор. 24 - 129.
2. Справочник по технологии лазерной обработки / В.С.Коваленко, В.П.Котляров, В.П.Дятел и др. Киев.: Техніка, - 1985. с 167. стор. 55 - 75
3. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов. М.: Мир, - 1977. с.552
4. Новик Ф.С., Арсов Я.Б. Оптимизация технологии металлов методами планирования экспериментов. М.: Машиностроение, - 1980. с.304. стор. 13 – 15, 26 – 36, 59 – 71,

Додаткова:

1. Вейко В.П. Лазерная микрообработка. - Санкт-Петербург: ГУ ИТМО, 2005. – 110с. стор. 40 -70
2. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюра Н.И. Технологические процессы лазерной обработки. – М: МГТУ им. Баумана, 2008. – 664с.
3. Новицки М. Лазеры в электронной технологии и обработке материалов. М: Машиностроение. – 1981. с.152

Додаток до теми 5: Завдання на СРС

1. Порівняйте характеристики розрахункових результатів прогнозування операцій обробки отворів за аналітичними моделями, причини недостатньої точності розрахунків.
2. Розрахувати результати обробки заготовки із сталі 18Х2Н4ВА ($L_e = 8100$ кДж/кг, $\rho = 7,8 \cdot 10^{-3}$ кг/см³, $k = 0,3$ Вт/(см.град), $c = 0,6$ кДж/(кг.град), $c' = 0,52$ кДж/(кг.град), $a = 0,07$ см²/с, $T_e = 3010^\circ\text{C}$, $T_{пл} = 1520^\circ\text{C}$, $A = 0,67$) за таких умов опромінювання: $E = 5$ Дж, $\tau = 500$ мкс, $d_0 = 10^{-2}$ см, $D = 1,6$ см, $F = 10$ см, $\Delta F = 0$. Порівняти між собою одержані результати та оцінити їх з позицій точності передвіщення.
3. Розрахункові моделі проектування режимів лазерної обробки отворів із підвищеною якістю результатів (за Steffen'ом). За рахунок яких допущень досягнуто аналітичне рішення рівняння теплопровідності нагріву заготовки лазерним опромінюванням. Чим відрізняються режими обробки "гладким" імпульсом отворів у тонких заготовок, глибоких отворів, отворів циліндричної повздовжньої форми, та отворів у теплопровідних матеріалах?
4. Визначити режими обробки лунки діаметром 10^{-2} см та глибиною $0,05$ см у заготовці із латуні ЛС59 ($L_e = 5,1$ кДж/кг, $T_e = 2500^\circ\text{C}$, $T_{пл} = 1230^\circ\text{C}$, $k = 1,17$ Вт/(см.град), $a = 0,34$ см²/с, $\rho = 6,2 \cdot 10^{-3}$ кг/см³) одним імпульсом вільної генерації (ВГ), який можна прийняти як "квазістаціонарний" при інтенсивності опромінювання $I_p \leq 10^8$ Вт/см². Що зміниться у режимах опромінювання, якщо виконати вимогу формування отвору циліндричної форми?

Додаток до теми 5: Завдання на СРС

5. Коли використовується імпульсна обробка отворів періодичною послідовністю пічків (друга задача Steffen'a). Яким чином досягається реальність такої схеми опромінювання, засоби її реалізації? За рахунок яких особливостей у режимах одержано розрахункові моделі, адекватні для рішення різних технологічних задач?
6. Визначити режими обробки лунки діаметром $2 \cdot 10^{-2}$ см та глибиною 0,15 см у заготовці із латуні ЛС59 ($L_e = 5,1$ кДж/кг, $T_e = 2500^\circ\text{C}$, $T_{пл} = 1230^\circ\text{C}$, $k = 1,17$ Вт/(см.град), $a = 0,34$ см²/с, $\rho = 6,2 \cdot 10^{-3}$ кг/см³) послідовністю пічків, які подаються у зону обробки з незмінним періодом надходження та стабільним рівнем інтенсивності ($I_{ps} \geq 10^8$ Вт/см²? Швидкість розльоту продуктів лазерної ерозії прийняти рівною 10^6 см/с.
7. Що дозволяє методика однофакторних експериментальних досліджень процесу лазерної обробки отворів. Навести (у якісному поданні) результати впливу параметрів пучка випромінювання та умов обробки на розміри отворів (діаметр та глибину). Основні висновки по результатах однофакторних досліджень: можливість вибору режимів обробки та керування процесом. Дані математичного моделювання процесу за цими результатами: їх прийнятність для проектування операцій.
8. Визначити за графіками експериментальних однофакторних досліджень режими обробки отворів діаметром 0,3 мм та глибиною 1,5 мм у заготовці із сталі 45 за умов одноімпульсного та багато імпульсного опромінювання. Чи можливо рішення багато критеріальних задач за допомогою цих даних?

Додаток до теми 5: Завдання на СРС

9. Обґрунтувати необхідність багато факторної методики досліджень процесів лазерної розмірної обробки, як єдиної в умовах складної взаємодії багатьох фізичних та хімічних явищ у зоні опромінювання. Навести етапи досліджень в умовах значущого діяння **великої кількості факторів**. Які експериментальні плани, ефективні з економічних та часових міркувань на етапі передпланування експериментів. **Умови використання компромісних планів** Бродського, методика їх побудови для одержання моделі процесу з визначеним складом. Обґрунтуйте набір факторів, які включаються до постульованої моделі процесу.
10. **Скласти план експерименту** на етапі передпланування для таких умов:
- **насичений план типу ДФЕ** для оцінки ефективності лише лінійних членів для трьох факторів: **енергії**, **кута розбіжності** та **фокусної відстані фокусуєчої системи**;
 - **компромісний план** для моделі другого порядку за умови значущої дії **лінійних**, **квадратичних** та **парних** ефектів **усіх** факторів з **першим з них**:
- $$y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n a_{ii} x_i^2 + \sum_{i=2}^n a_{1i} x_1 x_i,$$
- де: **x_1** – енергія випромінювання, **x_2** – тривалість імпульсу, **x_3** – кут розбіжності пучка випромінювання.
11. З якою метою будуються ранжировочні ряди **впливу керуємих факторів** на розмірні показники процесу лазерної обробки отворів: **діаметр** та **глибину** для ненаскрізних отворів та **діаметр вхідної** та **вихідної ділянки** – для наскрізних отворів?

Додаток до теми 5: Завдання на СРС

12. Показники якості, характерні для отворів після лазерної обробки. Якою величиною зручно та інформативно описувати нестабільність розмірів отворів в умовах дрейфу рівня настройки? Ранжировочний ряд факторів процесу по їх впливу на показник відтворюваності розмірів отворів. Як потрібно проектувати операції виготовлення серії наскрізних отворів з нормованою точністю розмірів з використанням математичної моделі процесу обробки?
13. Скласти набір (з трьох) факторів, які найбільш значуще впливають на:
 - розміри ненаскрізних отворів;
 - розміри наскрізного отвору.
14. Привести приклад повно факторного плану для цих факторів, визначити необхідну кількість експериментальних точок. На яких рівнях треба фіксувати залишки значущих факторів для одержання найменших по розмірам отворів.
15. Формування узагальненого показника відхилення дійсної повздовжньої форми отворів від заданої для його використання з метою пошуку оптимального режиму обробки. Ранжировочний ряд впливу керуємих факторів процесу на узагальнений показник якості форми.
16. Розрахувати коефіцієнт варіації розмірів отворів після лазерної обробки, якщо поле розсіяння їх діаметрів не перевищує поле допуску 9 квалітету, а номінальний розмір – 0,8мм.

Додаток до теми 5: Завдання на СРС

17. Чому багатокрітеріальність задач проектування технологічних операцій лазерної обробки спонукає до використання експериментальних методів оптимізації? Знайти шляхи подолання багатокрітеріальності для спрощення оптимізаційних задач. Поняття узагальненої функції бажаності. Алгоритм експериментального методу оптимізації з використанням функцій бажаності. Навести приклади формування цих функцій.
18. Спроекувати технологічну операцію лазерної обробки отворів $\varnothing 0,4H12$ конічної форми (з конусоподібністю 0,4мм) у заготовках корпусів ін'єкційних голок завтовшки 3 мм. Тривалість операції не повинна перевищувати 25 с. Матеріал заготовки - латунь ЛС59 ($L_e = 5,1$ кДж/кг, $T_e = 2500^\circ\text{C}$, $T_{пл} = 1230^\circ\text{C}$, $k = 1,17$ Вт/(см.град), $a = 0,34$ см²/с, $\rho = 6,2 \cdot 10^{-3}$ кг/см³). Використати дані експериментальних досліджень по моделюванню процесу обробки таких отворів.