



ТЕХНОЛОГІЯ ЛАЗЕРНОЇ РОЗМІРНОЇ ОБРОБКИ

Робоча програма навчальної дисципліни (Силлабус)

Реквізити навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти	<i>Перший (бакалаврський)</i>
Галузь знань	<i>13 Механічна інженерія</i>
Спеціальність	<i>131 Прикладна механіка</i>
Освітня програма	<i>Інжиніринг зварювання, лазерних та споріднених технологій</i>
Статус дисципліни	<i>Вибіркова</i>
Форма навчання	<i>денна (очна)</i>
Рік підготовки, семестр	<i>IV курс, 7 семестр</i>
Обсяг дисципліни	<i>120 год./4 кредити ЄКТС: лекційні заняття – 36 год., практичні заняття – 18, лабораторні заняття – 18 год., самостійна робота – 48 год.</i>
Семестровий контроль/ контрольні заходи	<i>Залік, МКР, РР</i>
Розклад занять	www.roz.kpi.ua
Мова викладання	<i>Українська</i>
Інформація про керівника курсу / викладачів	Лектор: <i>д.т.н., професор Котляров Валерій Павлович, kotlyarovv@ukr.net, +380 99 385 6117</i> Практичні: <i>Козирєв Олексій Сергійович +380 68 0710051</i> Лабораторні: <i>Козирєв Олексій Сергійович +380 68 0710051</i>
Розміщення курсу	

Програма навчальної дисципліни

1. Опис навчальної дисципліни, його мета, предмет вивчення та результати навчання

Навчальна дисципліна “Технологія лазерної розмірної обробки” подовжує загальну технологічну підготовку фахівців з урахуванням специфіки побудови технологічних операцій лазерної розмірної обробки, що пов’язано із особливостями інструменту та їх результатів. Особливість технологічних операцій лазерної обробки полягає в тому, що фахівець має справу з не матеріальним, часто-густо не видимим інструментом у вигляді згустку потужної електромагнітної енергії, який набуває експлуатаційних (режимних) властивостей лише під час виконання операції, тому процедури її проектування та практичної реалізації докорінно відрізняються від подібних завдань не тільки з механічної обробки різанням, а й для інших, нетрадиційних методів, які відносяться до класу електрофізико-хімічних видів обробки.

Викладання навчальної дисципліни надає студентам можливість оволодіння алгоритмом створення технологічної операції лазерної розмірної (або прецизійної) обробки, що включає до себе таку послідовність дій для стандартних виробничих ситуацій:

- попередня порівняльна оцінка можливостей інших нетрадиційних методів обробки, а також механічної обробки різанням, що торкається розмірних, якісних, показників продуктивності та собівартості, для обґрунтування вибору методу;
- аналіз придатних технологічних схем обробки (операційних ескізів) з цією ж метою;
- режимне забезпечення обраної схеми обробки з урахуванням вимог технічного завдання (ТЗ) та можливостей технологічного обладнання взагалі або до якого є доступ;
- складання, в разі необхідності, завдання на проектування технологічного оснащення операції додатковим пристосуванням з метою спеціалізації технологічного обладнання для забезпечення виконання критеріальних вимог ТЗ.

Навчальна дисципліна належить до переліку вибірових дисциплін першого рівня вищої освіти – бакалавра з прикладної механіки.

Предметом навчальної дисципліни є технологічне забезпечення обраного процесу формоутворення заданих елементів заготовки.

Метою навчальної дисципліни є формування у студентів компетентностей у відповідності до ОПП, а саме:

Загальні компетентності (ЗК)	
ЗК.01	Здатність до абстрактного мислення, аналізу та синтез
ЗК.02	Знання та розуміння предметної області та розуміння професійної діяльності
ЗК.03	Вміння виявляти, ставити та вирішувати проблеми
ЗК.04	Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях
Фахові компетентності спеціальності (ФК)	
ФК.01	Здатність до критичного аналізу та прогнозування характеристик нових та існуючих матеріалів, параметрів процесів їх отримання і обробки та використання у виробках (або у виробничих умовах)
ФК.03.	Здатність проводити технологічну і техніко-економічну оцінку ефективності використання нових технологій і технічних засобів
ФК.07.	Здатність застосовувати комп'ютеризовані системи проектування (CAD), виробництва (CAM), інженерних досліджень (CAE) та спеціалізоване прикладне програмне забезпечення для вирішення інженерних завдань з прикладної механіки.
ФК.09	Здатність обґрунтовано здійснювати вибір технологій виготовлення, оброблення, випробування матеріалів і виробів, для конкретних умов експлуатації
ФК.10.	Здатність описувати та класифікувати широке коло технічних об'єктів та процесів, що ґрунтуються на глибокому знанні та розумінні основних механічних теорій та практик, а також базових знаннях суміжних наук
ФК.16.	Здатність обирати оптимальні та розробляти нові технології та обладнання для лазерних та фізико-технічних процесів з метою підвищення продуктивності та контрольованості цих процесів
ФК.17.	Здатність впроваджувати та освоювати технологічні процеси виробництва нової продукції, перевіряти якість монтажу та налагодження при випробуваннях і здачі в експлуатацію нових зразків виробів, вузлів, деталей і конструкцій.

Згідно з вимогами освітньо-професійної програми студенти після засвоєння кредитного модулю мають продемонструвати такі **програмні результати навчання**:

РН 07	Застосовувати нормативні та довідкові дані для контролю відповідності технічної документації, виробів і технологій стандартам, технічним умовам та іншим нормативним документам
РН 08	Знати і розуміти основи інформаційних технологій, програмування, практично використовувати прикладне програмне забезпечення для виконання інженерних розрахунків, обробки інформації та результатів експериментальних досліджень.
РН 09	Знати та розуміти суміжні галузі (механіку рідин і газів, теплотехніку, електротехніку, електроніку) і вміти виявляти міждисциплінарні зв'язки прикладної механіки на рівні, необхідному для виконання інших вимог освітньої програми.
РН 23	Оптимально обирати, застосовувати, компонувати і перевіряти технічний стан та ресурс технологічного обладнання для лазерних та фізико-технічних технологій
РН 24	Розробляти технологічні процеси та операції лазерних та фізико-технічних технологій з використанням їх переваг та особливостей.
РН 25	Розробляти технологічні процеси та операції лазерних та фізико-технічних технологій з використанням їх переваг та особливостей

2. Пререквізити та постреквізити освітнього компоненту (місце в структурно-логічній схемі навчання за відповідною освітньою програмою)

Для успішного засвоєння матеріалу освітнього компоненту необхідні знання, які одержуються студентом у попередніх курсах: «Технологічні системи у виробництві»; «Фізика взаємодії концентрованих потоків енергії з речовиною»; «Технології та устаткування зварювання плавленням, лазерних та споріднених процесів. Частина 2»;

3. Зміст навчальної дисципліни

Вступ.

Розділ 1. Характеристики нетрадиційних методів розмірної обробки

Тема 1.1. Порівняння технологічних та техніко-економічних показників, виявлення переваг та недоліків лазерної розмірної обробки (ЛРО)

Тема 1.2. Формування обґрунтованого висновку про переваги обраного виду технології

Розділ 2. Фізичні основи лазерної розмірної обробки (ЛРО). Етапи руйнування матеріалу заготовки пучком лазерного випромінювання:

Тема 2.1. Череда етапів впливу лазерного променя на заготовку. Їх кількісна та якісна залежність від параметрів опромінення останньої.

Тема 2.2. Види впливу опромінення на матеріал заготовки в залежності від її властивостей та характеристик променя.

Тема 2.3. Шляхи керування результатами лазерного опромінення: від нагрівання поверхні заготовки до реалізації керованого термоядерного синтезу

Розділ 3. Умови та алгоритм проектування технологічної операції лазерної розмірної обробки (ЛРО)

Тема 3.1. Умови та обставини проектування технологічної операції ЛРО:

Тема 3.2. Алгоритм проектування технологічної операції ЛРО

Розділ 4. Технологічні схеми обробки порожнин (отворів, лунок, щілин, пазів) різноманітної форми та розмірів

Тема 4.1. Схеми опромінення та вид інструменту відповідно до форми та розмірів попереку елементу заготовки, що обробляється. Обробка в «ближній» та «дальній» зонах.

Тема 4.2. Методи обробки прецизійних мікро порожнин зі складною формою попереку

Тема. 4.3 Методи управління позовжньою формою оброблювальних елементів та їх глибиною

Тема 4.4. Особливості схем обробки та формування інструменту для виготовлення елементів з великим розміром їх попереку (>1 мм).

Розділ 5. Методи визначення режиму лазерної обробки порожнин

Тема 5.1. Історична довідка про авторів та їх розробок у царині визначення закономірностей та шляхів впливу на кількісні результати ЛРО.

Тема 5.2. Прогнозування результатів обробки за аналітичними моделями. Оцінка достовірності прогнозування.

Тема 5.3. Проектування режимів ЛРО за аналітичними моделями, отриманими приближеним рішенням рівняння теплопровідності твердих тіл.

Тема 5.4. Шляхи параметричного керування режимом обробки.

Тема 5.5. Експериментальні дослідження та моделювання операцій ЛРО.

Тема 5.6. Проектування режимів ЛРО. Одно критеріальні та багато критеріальні операції

Тема 5.7. Нережимні методи підвищення якості ЛРО

4. Навчальні матеріали та ресурси

Базова література

1. Технологія лазерної обробки [Текст]: підручник./ В.П. Котляров. - Ніжин: НДУ ім. М. Гоголя, - 2010. – 308 с. Доступ: НТБ НТУУ «КПІ»,
2. Технологія лазерної розмірної обробки. [Текст] наочний навчальний посібник / В.П. Котляров. - Київ: НТУУ «КПІ», - 2023. – 210 с. Доступ: НТБ НТУУ «КПІ» <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/7907>,
3. Чадюк В. О. Оптиелектроніка: від макро до нано. Передавання, перетворення та приймання оптичного випромінювання : навч. посіб. У 2-х кн. / В. О. Чадюк. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2018. – Кн. 1. – 376 с. (с. 254 – 291)
4. Методичні вказівки для виконання лабораторних робіт для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка» при їх спеціалізації «Лазерна техніка та комп'ютеризовані процеси фізико-технічної обробки матеріалів». К: НТУУ «КПІ імені І. Сікорського», - 22 с.; гриф ММІ, протокол Н.-М. Ради ММІ №11 від 26.06.2017 р.

Додаткова література

- Котляров В.П., Шкляр С.Г. // Систематизація технологічних засад прецизійної лазерної обробки. / Вісник НТУУ «КПІ» серія «Mechanics and Advanced Technologies» - 2019. - №2 (83) С. 61 – 76. Доступ: НТБ НТУУ «КПІ».
- Котляров В.П., // Інженерія оптимізації температурних джерел в лазерній прецизійній обробці /Київ. НТУУ «КПІ» Mechanics and Advanced Technologies - 2023 – 2 Том 7
- Kotlyarov V.P., Kiyaschenco O.M. // Simplified Methodology for the Design of Technological providing for Operations of Laser Treatment. / Surface Engineering and Applied Electrochemistry, 2019, Vol. 55, No. 6, pp. 692 - 717. © Allerton Press, Inc., 2019. Доступ: <http://ltft.kpi.ua/ua/login.kpi.ua>
- Котляров В.П., Сінюченко В.В. Засоби надання гнучкості інструменту з лазерного променя. Наукові вісті НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» 2018.-№3. С. 70 – 83
- Спосіб параметричного керування енергією лазерного променя. Котляров В.П., Дубнюк В.Л. Патент України №106630 В23К 26/04 по заявці № u 2015 12532 від 18.12.2015, оп. 25.04. 2016, б. №8. CAMPUS:

Навчальний контент

5. Методика опанування навчальної дисципліни

Навчальний матеріал дисципліни викладається на заняттях згідно зі наступною структурою (табл. 1).

Таблиця 1. Структура викладання навчальної дисципліни

Назви розділів та тем	Кількість годин				
	Усього	У тому числі			
		Лекції	Практ. заняття	Лаборат. роботи	СРС
Вступ					
Огляд змісту навчальної дисципліни, її структури, призначення, навчальна база та місце в системі підготовки фахівця	2	1	1	-	-
Разом	2	1	1		
Розділ 1. Характеристики фізико-технічних технологій розмірної обробки					
Тема 1.1. Порівняння технологічних та техніко-економічних показників, виявлення переваг та недоліків лазерної розмірної обробки (ЛРО)	1.5	0.5	1	-	
Тема 1.2. Формування обґрунтованого висновку про переваги обраного виду технології.	1.5	0.5	1		
Разом	3	1	1		1
Розділ 2. Фізичні основи лазерної розмірної обробки. Механізми та етапи руйнування матеріалу заготовки пучком лазерного випромінювання при формуванні елементу виробу					
Тема 2.1. Етапи діяння лазерного променя на заготовку	3	1	1	-	1
Тема 2.2. Види впливу опромінення на матеріал заготовки	3	1	1	-	1
Тема 2.3. Шляхи керування результатами лазерного опромінення від нагрівання поверхні заготовки до реалізації керованого термоядерного синтезу	4	2	1	-	1
Разом	10	4	3		3
Розділ 3. Умови та алгоритм проектування технологічної операції ЛРО					
Тема 3.1. Обставини та умови проектування	4	2	1		1
Тема 3.2. Алгоритм проектування технологічної операції ЛРО	4	2	1	-	1
Разом	8	4	2		2
Модульна контрольна робота, ч. 1	3	1			2
Розділ 4. Технологічні схеми обробки порожнин (отворів, щілин, пазів) різноманітної форми та розмірів					
Тема 4.1. Схеми опромінення та вид інструменту відповідно до форми та розмірів попереку елементу заготовки, що обробляється. Обробка в «ближній» та «дальній» зонах.	5	2	1	-	2
Тема 4.2. Методи управління поздовжньою формою оброблювальних елементів	4	2	1	-	1
Тема 4.3. Методи управління поздовжньою формою оброблювальних елементів та їх глибиною	5	2	1		2

Тема 4.4. Особливості схем обробки та формування інструменту для виготовлення елементів з великим розміром їх попереку (>1 мм).	6	2	2		2
Разом	20	8	5		7
Розділ 5. Методи визначення та реалізації режиму лазерної обробки порожнини					
Тема 5.1. Історична довідка про авторів та їх розробок у царині визначення закономірностей та шляхів впливу на кількісні результати ЛРО	86	1	-2	1	4
Тема 5.2. Прогнозування результатів обробки за аналітичними моделями. Оцінка достовірності прогнозування.	7	2	1	2	2
Тема 5.3. Проектування режимів ЛРО за аналітичними моделями, отриманими приближеним рішенням рівняння теплопровідності твердих тіл.	7	2	1	2	2
Тема 5.4. Шляхи параметричного керування режиму обробки	12	2	2	6	
Тема 5.5. Експериментальні дослідження та моделювання операцій ЛРО.	11	2	1	6	2
Тема 5.6. Проектування режимів ЛРО. Одно критеріальні та багато критеріальні операції	2618	1	41	-	1016
Тема 5.7 Нережимні методи підвищення якості операцій ЛРО	5	2	1		2
Разом за розділом 5	7766	202	141	2	2561
Модульна контрольна робота, ч. 2	3	1			2
РГР	10	-	-	-	10
Залік	8	2			6
Всього годин	120	36	18	18	48

5.1. Лекційні заняття

Таблиця 2. Темі лекційних занять

№ лек	Назва теми лекції та перелік основних питань
1	Вступ. Мета та задачі освітнього компоненту.
	Розділ 1. Характеристики нетрадиційних методів розмірної обробки
1	Тема 1.1. Місце лазерної розмірної обробки у системі електрофізичних та електрохімічних методів (ЕФХМО). Порівняння (ЕФХМО) за техніко-економічними показниками у різних умовах обробки Література: базова - [1], [2]. Завдання на СРС: Які кількісні досягнення відносно розмірних, якісних та економічних показників конкурентних методів. Навести ті, з яких лазерна розмірна обробка перевершує досягнення інших методів. Які практичні технологічні задачі обробки отворів вирішуються з меншими витратами (економічними та технічними) з використанням нетрадиційних методів обробки. Вибрати найбільш ефективний метод формування системи з чотирьох отворів діаметром 0,1 мм, які розташовано у кутах квадрату із стороною 0,5 мм. Заготовка – листовий матеріал із конструкційної кераміки 22ХС товщиною 0,5 мм. Обґрунтувати зроблений вибір шляхом аналізу можливостей кожного з методів в умовах поставленого завдання.
	Розділ 2. Фізичні основи лазерної розмірної обробки. Етапи руйнування матеріалу заготовки пучком лазерного випромінювання
2	Тема 2.1. Параметри пучка випромінювання, Які параметри променя визначають характер взаємодії випромінювання з матеріалом заготовки. Вплив теплових властивостей матеріалу заготовки на результат дії випромінювання. Методи параметричного впливу на пучок випромінювання. Література: базова - [1], [2]. Завдання на СРС: Навести незалежні та комплексні параметри пучка випромінювання та зв'язок між ними. Які теплофізичні властивості матеріалу заготовки впливають на характер та результати дії променя на заготовку. Визначити засоби параметричного керування пучком випромінювання/ Література: додаткова [5]
2.	Тема 2.2. Етапи перетворення енергії випромінювання. Види впливу опромінення на матеріал заготовки Поглинення та перетворення променистої енергії різними матеріалами. Закон Бугера. Нагрів та руйнування матеріалу заготовки за імпульсному та безперервному режимі подачі енергії випромінювання. Література: базова - [1], [2] Завдання на СРС: Навести етапи взаємодії, які характерні для високих рівнів інтенсивності (більше, ніж 10^6 Вт/см²). Ід чого залежать відбиття та поглинання променевої енергії поверхнею заготовки. Чим визначається рівень коефіцієнту поглинання? Закон поглинання Бугера: об'ємний та поверхневий характер поглинання та зв'язаний з цим вид руйнування матеріалу за рахунок його перегріву. Які з трьох видів нагріву матеріалу пучком лазерного випромінювання можна

	використовувати для розмірного формоутворення? Вибрати та обґрунтувати тип лазера, випромінювання якого може бути ефективно використано для якісної обробки отворів $\varnothing 0,05$ мм глибиною 1 мм у заготовки з конструкційної кераміки 22ХС. На внутрішній поверхні отвору не допускається шар застиглого розплаву. Порівняння провести з використанням рівнів нормованого коефіцієнту поглинання В (для кераміки: $k = 0,09$ кал/(см.с.град), $c_p = 0,37$ кал/(г.град), $T_n = 3500$ °С, $L_n = 2,6 \cdot 10^3$ кал/г, $\alpha_{\lambda=1,06} = 30$ см ⁻¹ , $\alpha_{\lambda=10,6} = 10^4$ см ⁻¹). Література: додаткова [6]
2	Тема 2.3. Шляхи керування результатами лазерного опромінення. Залежність показників операції від учасників технологічної операції Аналіз керованості розмірними та якісними характеристиками результатів обробки. Література: базова - [1; [2], <u>Завдання на СРС:</u> Навести можливості ЛРО відносно показників обробки отворів (лунок). Які параметри заготовки повинні бути враховані при проектуванні технологічної операції ЛРО. Які шляхи керування технологічною операцією необхідно використовувати для виконання ТЗ на операцію. Література: додаткова [7]
Розділ 3. Умови та алгоритм проектування технологічної операції ЛРО	
3	Тема 3.1. Обставини та умови проектування Методи керування поперечної та повздовжньої формою порожнини під час лазерної обробки. Інтелектуальне та предметне середовище при проектуванні технологічних операцій. Література базова [1] [2] <u>Завдання на СРС:</u> Визначення пріоритетних напрямків керування процесом обробки. Рангові діаграми впливу факторів. Література: додаткова [5], [7]
3	Тема 3.2. Алгоритм проектування технологічної операції ЛРО. Формування та перетворення каустики пучка випромінювання в резонаторі та оптичними елементами (лінзами). Глибина різкості оптичної системи. Подвійна довжина Релея Література: базова – [1], стор. 30-35; [2], Пр. 2, сл. № 14-25, [3], стор. <u>Завдання на СРС:</u> Технологічні схеми формування отворів пучком лазерного випромінювання. В яких умовах ефективна та чи інша схема? Які засоби концентрації променистої енергії використовуються у цих схемах. Формування пучка випромінювання у резонаторі, його перетворення тонкою сферичною лінзою. Глибина різкості оптичної системи, її вплив на повздовжній профіль отвору: за якої умови можна обробити циліндричний отвір? Література: додаткова [7]
Розділ 4. Технологічні схеми обробки порожнин (отворів, щілин, пазів) різноманітної форми та розмірів	
4	Тема 4.1. Методи управління формою попереку порожнини. Технологічні схеми формування розмірних елементів виробу. Обробка у «дальній» та «ближній» зоні. Проекційні схеми обробки: розрахунок параметрів проекційної системи, габаритний розрахунок. Приклади обробки у дальній зоні. Література: базова – [1],; [2], <u>Завдання на СРС:</u> Обробка у «дальній» зоні: які отвори за поперечним зрізом можна обробити у «дальній» зоні. Вибрати, накреслити та розрахувати оптичну систему для обробки кільцевої порожнини $\square 10$ мм шириною 0,1 мм пучком випромінювання лазера на гранаті діаметром 10 мм та з кутовим розходженням 0,005 рад. Прийняти показник переломлення матеріалу оптичних елементів рівний 1.5. Проекційна схема обробки отворів складної форми у тонких заготовках. Побудувати оптичну систему для формування пучка лазерного випромінювання складного поперечного профілю та концентрації його енергії на поверхню заготовки. Вибрати тип та накреслити оптичну схему для проекційної обробки вікна квадратної поперечної форми $50 \square 50$ мкм у плівці з хрому завтовшки 10 мкм на поверхні скляної пластинки. Випромінювач на рубіні з довжиною хвилі $\lambda = 0.6943$ мкм, діаметром пучка 5 мм з кутом розходження 0,003 рад. Скласти схему активно-проекційної оптичної системи для використання з лазером на парах міді, який має коефіцієнт підсилення активного середовища $\square = 10^2$ см ⁻¹ . Література: додаткова [7]
4, 5	Тема 4.2. Формування та перетворення каустики пучка випромінювання як робочого інструменту Надання попереку інструменту фасонної форми. Проекційна схема обробки отворів складної форми у тонких заготовках. Література: базова – [1],; [2] <u>Завдання на СРС:</u> Побудувати оптичну систему для формування пучка лазерного випромінювання складного поперечного профілю та концентрації його енергії на поверхню заготовки. Вибрати тип та накреслити оптичну схему для проекційної обробки вікна квадратної поперечної форми $50 \square 50$ мкм у плівці з хрому завтовшки 10 мкм на поверхні скляної пластинки. Література: додаткова – [5]
5, 6	Тема 4.3. Схеми обробки точних мікро отворів в тонких заготовках, нано технології. Мікро отвори найчастіше використовують для керування дозами рідини або газу в медичних системах, в авіаприладах для автоматизації роботи виконавчих елементів системи та інформативного їх забезпечення. При цьому часто нормується не його розмір, а пропускна здатність. Тому при їх виготовленні потрібно автоматизувати процес обробки з нормованою витратою газу (повітря) через отвір. Не завжди при виконанні технічного завдання та його впровадження у виробництві відсутнє технологічне обладнання, яке здатне досягти відповідних результатів. Чи є можливість модернізувати те обладнання, яке є, для використання в розробленій операції? Тут є шляхи виконання замовлення. Література базова [1] <u>Завдання на СРС:</u> Визначити шляхи керування умовами опромінення заготовки заданої товщини в

	операціях виготовлення точних мікро отворів або складного за формою попереку. Де треба розташовувати заготовку в каустиці лазерного променя? Дайте визначення «довжини Релея» та пов'яжіть її з товщиною заготовки. Яким чином розповсюджується промінь з інтенсивністю $> 10^{15}$ Вт/см ² в прозорих діелектриках ? Література додаткова [5,7]
7	Тема 4.4. Методи управління повздовжньою формою порожнини Методи керування повздовжнім профілем порожнини. Ненаскрізнi та наскрізнi порожнини. Циліндрична світлова трубка (ЦСТ). Література: базова – [1], стор. 43-50; [2], Пр. 3, сл. № 17 -23 Шляхи незалежного керування повздовжньою формою оброблюваного елемента виробу. Література: базова – [1], [2], <u>Завдання на СРС:</u> Форми подовжнього профілю отворів та лунок та вплив на нього параметрів опромінення. Формування циліндричної світлової трубки. Скласти оптичну схему для обробки циліндричного отвору діаметром $\varnothing 0,3$ мм у заготовці товщиною 3 мм у циліндричній світловій трубці для таких параметрів пучка випромінювання: діаметр 10 мм, кут розходження 0,002 рад, $\varnothing = 1,06 \cdot 10^{-3}$ мм. Література додаткова: [7]
7	Тема 4.5. Схеми формоутворення глибоких отворів з малим попереком за рахунок використання явищ нелінійної оптики при обробці отворів з аспектною глибиною $h/d > 100$ Складності обробки глибоких отворів ($l > 10 d$) свердленням (механо обробка) пов'язані як з постачанням охолоджувальної рідини в зону обробки, так і з відведенням стружки через гвинтові канавки спірального свердла. Тому свердла для глибокого свердлення виготовляють плоскими та пустотілими. При променистій обробці (лазерна або електронно променева) труднощі пов'язані зі складністю створення на дні отвору, що обробляється, теплове джерело високої густини потужності $W_p > 10^7$ Вт/см ² внаслідок явища дифракції, що надає повздовжньому профілю каустики променя форму гіперболоїда обертання з мінімальним розміром горловини у фокальній площині лінзи (об'єктиву) при нульовому значенні кута розбіжності променя θ . Способи подолання цих перешкод. Трансфокатори, Застосування високо інтенсивних променів. <u>Завдання на СРС:</u> Основи нелінійної оптики. Явище багато фотонного поглинання. Умови перетворення частоти променя (генерація 2, 3 гармоніки) Література базова [2] Література: додаткова – [7]
Розділ 5. Методи визначення та реалізації режиму лазерної обробки порожнини	
7, 8	Тема 5.1. Прогнозування результатів обробки за аналітичними моделями Методи прогнозування результатів лазерної розмірної обробки Особливості аналітичного та експериментального методів проектування. Методика розробки аналітичних (функціональних) моделей процесу лазерної обробки; теплові концепції формоутворення порожнин. Феноменологічна модель. Обмеження в використанні аналітичних моделей. Література: базова – [1], [2], <u>Завдання на СРС:</u> Порівняльні характеристики розрахункових результатів прогнозування операцій обробки отворів за аналітичними моделями, причини недостатньої точності розрахунків. Розрахувати результати обробки заготовки із сталі 18Х2Н4ВА ($L_n = 8100$ кДж/кг, $\rho = 7,8 \cdot 10^{-3}$ кг/см ³ , $k = 0,3$ Вт/(см.град), $c = 0,6$ кДж/(кг.град), $a = 0,07$ см ² /с, $T_n = 3010^\circ\text{C}$, $T_{пл} = 1520^\circ\text{C}$, $A = 0,67$) 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. Література додаткова [7]
8, 9	Тема 5.2. Проектування режимів ЛРО за аналітичними моделями Розрахунок режимів обробки квазістаціонарним імпульсом: схема формування лунки; вихідна теплова модель; часткові рішення для задачі формування неглибоких порожнин, для глибоких отворів, для глибоких циліндричних отворів, для глибоких циліндричних отворів у заготовках із теплопровідних матеріалів. Метод обробки порожнин пучками випромінювання в частотно-імпульсному режимі. Схема формування лунки. Література: базова – [1]; [2], <u>Завдання на СРС:</u> 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 заготовках, глибоких отворів, отворів циліндричної повздовжньої форми, та отворів у теплопровідних матеріалах? Визначити режими обробки лунки діаметром 10^{-2} см та глибиною 0,05 см у заготовці із латуні ЛС59 ($L_n = 5,1$ кДж/кг, $T_n = 2500^\circ\text{C}$, $T_{пл} = 1230^\circ\text{C}$, $k = 1,17$ Вт/(см.град), $a = 0,34$ см ² /с, $\rho = 6,2 \cdot 10^{-3}$ кг/см ³) одним імпульсом вільної генерації (ВГ), який можна прийняти як “квазістаціонарний” при інтенсивності опромінювання $I \leq 10^8$ Вт/см ² . Що зміниться у режимах опромінювання, якщо виконати вимогу формування отвору циліндричної форми? Література додаткова [7]
9	Тема 5.3. Дослідження та моделювання операцій ЛРО Експериментальні методи проектування операцій лазерної розмірної обробки/ Експериментальні методи вибору режимів обробки: одно факторні методи досліджень процесу; методика активного багатфакторного експерименту для визначення режимів лазерної обробки. Класифікація факторів за керованістю та мінливістю. Огляд методів ранжування керованих факторів. Література: базова – [1], [2],

	<u>Завдання на СРС:</u> 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 одно факторних досліджень: можливість вибору режимів обробки та керування процесом. Дані математичного моделювання процесу за цими результатами: їх прийнятність для проектування операцій. Визначити за графіками експериментальних одно факторних досліджень режими обробки отворів діаметром 0,3 мм та глибиною 1,5 мм у заготовці із сталі 45 за умов одно імпульсного та багато імпульсного опромінювання. Чи можливо рішення багато критеріальних задач за допомогою цих даних. Література додаткова [7]
10	Тема 5.3. Дослідження та моделювання операцій ЛРО (подовження) Експериментальні методи проектування операцій лазерної розмірної обробки (1) Експериментальні методи вибору режимів обробки: одно факторні методи досліджень процесу; методика активного багатофакторного експерименту для визначення режимів лазерної обробки. Класифікація факторів за керованістю та мінливістю. Огляд методів рангування керуємих факторів. Аналіз значності впливу факторів процесу на розмірні результати обробки. Методика, експериментальні плани, ранжировочні ряди керуємих факторів по їх впливу на поперечну та повздовжню форму порожнини, на точність обробки. Література: базова – [1], [2], <u>Завдання на СРС 1:</u> Обґрунтувати необхідність багато факторної методики досліджень процесів лазерної розмірної обробки, як єдиної в умовах складної взаємодії багатьох фізичних та хімічних явищ у зоні опромінювання. Етапи досліджень в умовах значущого діяння великої кількості факторів. Експериментальні плани, які 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. Логічне обґрунтування набору факторів, які включаються до постульованої моделі процесу. Скласти план експерименту на етапі передпланування для таких умов: - насичений план типу ДФЕ для оцінки ефективності лише лінійних членів для трьох факторів: енергії, кута розходження та фокусної відстані фокусуючої системи; - компромісний план для моделі другого порядку за умови значущої дії лінійних, квадратичних та парних ефектів всіх факторів з першим: $y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n a_{ii} x_i^2 + \sum_{i=2}^n a_{ii} x_i x_i,$ де: x_1 – енергія випромінювання, x_2 – тривалість імпульсу, x_3 – кут розходження пучка випромінювання. Ранжировочний ряд впливу керуємих факторів на розмірні показники процесу лазерної обробки отворів: діаметр та глибину для ненаскрізних отворів та діаметр вхідної та вихідної частин – для наскрізних отворів. Література: базова – [1], <u>Завдання на СРС 2:</u> 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 одно факторних досліджень: можливість вибору режимів обробки та керування процесом. Дані математичного моделювання процесу за цими результатами: їх прийнятність для проектування операцій. Визначити за графіками експериментальних одно факторних досліджень режими обробки отворів діаметром 0,3 мм та глибиною 1,5 мм у заготовці із сталі 45 за умов одно імпульсного та багато імпульсного опромінювання. Чи можливо рішення багато критеріальних задач за допомогою цих даних. Література додаткова [7]
13	Тема 5.4/ Дослідження та моделювання операцій ЛРО (подовження) Експериментальні методи проектування операцій лазерної розмірної обробки (3) Якість результатів обробки; врахування під час проектування режимів вимог до відтворюваності результатів, якості поверхні, стану прилеглого до поверхні шару матеріалу. Вимоги до кутових та просторових характеристик пучка випромінювання. Література: базова – [1], [2], <u>Завдання на СРС:</u> Показники якості 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. Приклад проектування операції виготовлення серії наскрізних отворів з нормованою точністю розмірів з використанням математичної моделі процесу обробки. Література додаткова [7]
14	Тема 5.4. Проектування режимів ЛРО. Одно критеріальні задачі/ Практика використання експериментального проектування Приклад проектування операції для лазерної розмірної обробки отворів заданого розміру. Література: базова - [1]; [2], <u>Завдання на СРС:</u> Скласти набір (з трьох) факторів, які найбільш значуще впливають на: - розміри ненаскрізних отворів; - розміри наскрізного отвору. 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. Література: базова – [1], [2],

15	Тема 5.4. Проектування режимів ЛРО. Одно критеріальні задачі (подовження). Приклад проектування операції обробки профільних отворів. Приклад вибору режимів обробки порожнин з заданою точністю. Проектування операцій з урахуванням вимог до якості поперечної та повздовжньої форми порожнин. Можливість виготовлення порожнин із заданими відхиленнями повздовжнього профілю. Література: базова - [1], [2], <u>Завдання на СРС:</u> 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. Розрахувати коефіцієнт варіації розмірів отворів після лазерної обробки, якщо поле розсіювання їх діаметрів не перевищує поле допуску 9 квалітету, а номінальний розмір – 0,08 мм. Література: базова – [1], [2],
16, 17	Тема 5.5. Проектування режимів ЛРО. Багато критеріальні задачі Оптимізація операцій лазерної розмірної обробки. Узагальнена функція бажаності. Приклад оптимізації операції лазерної обробки конічних отворів із заданою точністю та максимальною продуктивністю. Методи перетворення багатокритеріальних задач в однокритеріальні (метод невизначених множників Лагранжа, штрафних функцій). Література базова – [1], [2] <u>Завдання на СРС:</u> Чому багатокритеріальність задач проектування технологічних операцій лазерної обробки спонукає до використання експериментальних методів оптимізації? Шляхи подолання багатокритеріальності для спрощення оптимізаційних задач. Поняття узагальненої функції бажаності. Алгоритм експериментального методу оптимізації з використанням функцій бажаності. Навести приклади формування цих функцій. Спроекувати технологічну операцію лазерної обробки отворів $\square 0,4H12$ конічної форми (з конусоподібністю 0,4 мм) у заготовках корпусів ін'єкційних голок завтовшки 3 мм. Тривалість операції не повинна перевищувати 25 с. Матеріал заготовки - латунь ЛС59 ($L_n = 5,1$ кДж/кг, $T_n = 2500$ °С, $T_{пл} = 1230$ °С, $k = 1,17$ Вт/(см.град), $a = 0,34$ см²/с,) = $6,2 \cdot 10^{-3}$ кг/см³). Використати дані експериментальних досліджень по моделюванню процесу обробки таких отворів. Література додаткова [7, 8]
17	Тема 5.6. Проектування режимів технологічних операцій при їх оцінці за багатьма критеріями. Мета: Визначити та засвоїти алгоритм проектування складних технологічних задач експериментальними методами <u>Завдання на СРС:</u> Скласти план експерименту на етапі передпланування для таких умов: - насичений план типу ДФЕ для оцінки ефективності лише лінійних членів для трьох факторів: енергії, кута розходження та фокусної відстані фокусуючої системи; - компромісний план для моделі другого порядку за умови значущої дії лінійних, квадратичних та парних ефектів усіх факторів з першим: $y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n a_{ii} x_i^2 + \sum_{i=2}^n a_{1i} x_1 x_i,$ де: x_1 – енергія випромінювання, x_2 – тривалість імпульсу, x_3 – кут розходження пучка випромінювання. Ранжировочний ряд впливу керуємих факторів на розмірні показники процесу лазерної обробки отворів: діаметр та глибину для ненаскрізних отворів та діаметр вхідної та вихідної частин – для наскрізних отворів. Література: базова – [1], [2],
18	Тема 5.7. Нережимні методи підвищення якості ЛРО. Мета: Розробка додаткових методів та засобів вдосконалення ТО, особливо, у випадках відсутності рішення багатокритеріальності не режимним шляхом. Спрощення завдання шляхом виключення недосягнутого критерію з обов'язкових показників та досягнення виконання вимог цього показника технологічними «хитрощами» <u>Завдання на СРС:</u> Спробувати знайти рішення для підвищення точності обробки, розмірів оброблювального елемента, тощо. Навести приклади способів та засобів впливу на якісні результати ЛРО. Оцінити можливості та ціну кожного з них, якщо вони будуть.. Література: базова – [1], [2],.
18	Залікова контрольна робота

Практичні заняття

Основні завдання циклу практичних занять

Цикл практичних занять має ціллю закріплення головних тем освітнього компоненту, які засвоєно теоретично. В зв'язку з тим, що головним його завданням є надання знань і умінь вибору ефективного методу обробки, вдалої технологічної схеми операції та визначення необхідного за призначенням її технологічного оснащення.

Іншим завданням занять є надбання умінь захисту розробок, для чого найбільш вдалі та працездатні рішення, які створені студентами, підвергаються аналізу на патентну чистоту з метою оформлення заявки у відповідну інстанцію для оформлення документу інтелектуальної власності

(патенту на винахід або корисну модель).

Таблиця 3. Теми практичних занять

№ з/п	Назва теми практичного заняття та перелік основних питань
1	Тема 1.1 Аналіз можливостей електро-фізико-хімічних методів обробки матеріалів (ЕФХМОМ). Мета: Визначення апіорних областей використання кожного з них, межі їх розмірних, якісних та інших можливостей. Порівняння з можливостями операцій лазерної обробки за розмірними можливостями, якістю обробки, продуктивністю та собівартістю. Література: основна [1, 2] додаткова [8] Завдання на СРС: Оцінити якісно можливості кожного з методів обробки на прикладі формування системи з чотирьох отворів діаметром 0,1 мм, які розташовано у кутах квадрату із стороною 0,5 мм. Заготовка – листовий матеріал із конструкційної кераміки 22ХС товщиною 0,5 мм.
1	Тема 1.2. Формування обґрунтованого висновку про переваги обраного виду технології. Мета: Визначити рівень показників лазерної розмірної обробки, які оцінюють її можливості в порівнянні з відомими, в тому числі з механообробкою Література: основна [1, 2] додаткова [8] Завдання на СРС: Обґрунтувати зроблений вибір шляхом аналізу можливостей лазерної обробки системи з чотирьох отворів діаметром 0,1 мм, які розташовано у кутах квадрату із стороною 0,5 мм. Заготовка – листовий матеріал із конструкційної кераміки 22ХС товщиною 0,5 мм.
2	Тема 2.1. Череда етапів впливу лазерного променя на матеріал заготовки. Їх кількісна та якісна залежність від параметрів опромінення останньої Мета: Визначити можливість досягнення кожного з етапів діяння променя на матеріал заготовки керуванням процесом опромінення параметрами променя, властивостями матеріалу заготовки, умовами опромінення. Залежність виду діяння від теплофізичних властивостей матеріалу заготовки, стану її поверхні, кутом падіння променя та довжиною хвилі випромінювання. Література: основна [1, 2] додаткова [8] Завдання на СРС: : Навести незалежні та комплексні параметри пучка випромінювання та зв'язок між ними. Які теплофізичні властивості матеріалу заготовки впливають на характер та результати діяння променя на заготовку. Визначити засоби параметричного керування пучком випромінювання/
2	Тема 2.2. Види впливу опромінення на матеріал заготовки в залежності від її властивостей та характеристик променя./ Мета: Навести етапи взаємодії, які характерні для високих рівнів інтенсивності (більше, ніж 10^6 Вт/см²). Відбиття та поглинання променевої енергії поверхнею заготовки. Чим визначається рівень коефіцієнту поглинання? Закон поглинання Бугера: об'ємний та поверхневий характер поглинання та зв'язаний з цим вид руйнування матеріалу за рахунок його перегріву. Які з трьох видів нагріву матеріалу пучком лазерного випромінювання можна використовувати для розмірного формоутворення? Вибрати та обґрунтувати тип лазера, Література: основна [1, 2] додаткова [8] Завдання на СРС: Навести незалежні та комплексні параметри пучка випромінювання та зв'язок між ними. Які теплофізичні властивості матеріалу заготовки впливають на характер та результати діяння променя на заготовку при різних температурах її поверхні. Визначити засоби параметричного керування пучком випромінювання/
3	Тема 2.3. Шляхи керування результатами лазерного опромінення від нагрівання поверхні заготовки до реалізації керованого термоядерного синтезу Мета: Провести аналіз керованості розмірними та якісними характеристиками результатів обробки. Література: основна [1, 2] додаткова [5, 8] Завдання на СРС: Оцінити можливості ЛРО відносно показників обробки отворів (лунок). Які параметри заготовки повинні бути враховані при проектуванні технологічної операції ЛРО. Які шляхи керування технологічною операцією необхідно використовувати для виконання ТЗ на операцію.
3	Тема 3.1. Умови та алгоритм проектування технологічної операції лазерної розмірної обробки (ЛРО) Мета: Технологічні схеми операцій лазерної розмірної обробки мікро елементів заготовки (лунки, отвори, пази та щілини). Література: основна [1, 2] додаткова [5, 8] Тема 3.2. Алгоритм проектування технологічної операції ЛРО Засоби формування оброблювального інструменту із лазерного променя. Етапи резонаторного та поза резонаторного підготовки лазерного променя для його перетворення. Завдання на СРС: Оптичні елементи для перетворення променя в інструмент. Каустика лазерного

	променя
4	Тема 4.1 Технологічні схеми операцій формування отворів методом трепанації тіла заготовки. Схеми формоутворення глибоких отворів з малим попереком Мета: Режимы газолазерного вирізання отворів великого розміру. Реалізація газолазерного режиму у розмірній обробці глибоких отворів. Література: основна [1, 2] додаткова [5, 8] <u>Завдання на СРС:</u> Що таке обробка у “дальній” зоні: які отвори за поперечним зрізом можна обробити у “дальній” зоні. Вибрати, накреслити та розрахувати оптичну систему для обробки кільцевої порожнини Ø10 мм шириною 0,1 мм пучком випромінювання лазера на гранаті діаметром 10 мм та з кутовим розходженням 0,005 рад. Прийняти показник переломлення матеріалу оптичних елементів рівний 1.5
4	Тема 4.2. Схеми обробки точних та отворів складного профілю в тонких заготовках, нано технології. Мета: Методи управління повздовжньою формою порожнини впливом на повздовжній профіль променя. Література: основна [1, 2] додаткова [5, 8] <u>Завдання на СРС:</u> Проекційна схема обробки отворів складної форми у тонких заготовках. Побудувати оптичну систему для формування пучка лазерного випромінювання складного поперечного профілю та концентрації його енергії на поверхню заготовки. Вибрати тип та накреслити оптичну схему для проекційної обробки вікна квадратної поперечної форми 50×50 мкм у плівці з хрому завтовшки 10 мкм на поверхні скляної пластинки. Випромінювач на рубіні з довжиною хвилі $\lambda = 0.6943$ мкм, діаметром пучка 5 мм з кутом розходження 0,003 рад. Скласти схему активно-проекційної оптичної системи для використання з лазером на парах міді, який має коефіцієнт підсилення активного середовища $\alpha = 102$ см⁻¹
5	Тема 5.1. Використання аналітичних моделей формоутворення отворів лазерним променем для прогнозування результатів технологічних операцій. Мета: Порівняння результатів від різних моделей] Література: основна [1, 2] додаткова [5, 8] <u>Завдання на СРС:</u> Порівняльні характеристики розрахункових результатів прогнозування операцій обробки отворів за аналітичними моделями, причини недостатньої точності розрахунків. Розрахувати режими обробки отворів в заготовці із сталі 18Х2Н4ВА ($\text{Li} = 8100$ 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, $T_{\text{и}} = 30100\text{C}$, $T_{\text{пл}} = 15200\text{C}$, $A = 0,67$) за таких умов опромінювання: $E = 5$ Дж, $\tau = 500$ мкс, $d_0 = 10\text{-}2$ см, $D = 1,6$ см, $F = 10$ см, $\Delta F = 0$. Порівняти між собою одержані результати та оцінити їх з позицій точності передвіщення.
6	Тема 5.2. Проектування режимів формування отворів в металевих виробах за приближеними рішеннями рівняння теплопровідності. Передумови їх використання. Мета: Використання рішень рівняння теплопровідності для проектування режимів технологічних операцій Література: основна [1, 2] додаткова [5, 8] <u>Завдання на СРС:</u> Шлях рішення (приблизного) диф. рівняння теплопровідності для отримання аналітичних рівнянь для проектування режимів у випадку тонких заготовок, глибоких отворів, циліндричних отворів, обробка отворів у теплопровідних матеріалах (золото, мідь, алюміній тощо)
7	Тема 5.3. Проектування режимів ЛРО. Одно критеріальні задачі. Моделювання процесу обробки розмірних елементів за планами ПФЕ. Рангові діаграми для показників технологічних операцій. Мета: Проектування режимів технологічних операцій при їх оцінці за багатьма критеріями Література: основна [1, 2] додаткова [5, 8] <u>Завдання на СРС:</u> Етапи досліджень в умовах значущого діяння великої кількості факторів. Експериментальні плани, які ефективні з економічних та часових міркувань на етапі передпланування експериментів.
8	Тема 5.5. Дослідження та моделювання операцій ЛРО. Тема: ПФЕ – принципи діяння та місце та мета застосування. Література: основна [1, 2] додаткова [5, 8]. <u>Завдання на СРС:</u> Показники якості 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. Приклад проектування операції виготовлення серії наскрізних отворів з нормованою точністю розмірів з використанням математичної моделі процесу обробки
9	Тема 5.7. Нережимні методи підвищення якості ЛРО. Мета: Розробка додаткових методів та засобів вдосконалення ТО, особливо, у випадках відсутності рішення багатокритеріальності не режимним шляхом. Спрощення завдання шляхом виключення недосягнутого критерію з обов'язкових показників та досягнення виконання вимог цього показника технологічними «хитрощами» Література: базова – [1], [2].; <u>Завдання на СРС:</u> Спробувати знайти рішення для підвищення точності обробки, розмірів оброблювального елементу, тощо. Навести приклади способів та засобів впливу на якісні результати ЛРО. Оцінити можливості та ціну кожного з них, якщо вони будуть..

5.3. Лабораторні заняття

Основні завдання циклу лабораторних занять полягають у практичному закріпленні головних тем навчальної дисципліни, які вивчено теоретично. В зв'язку з тим, що його головним завданням є надання знань та умінь прогнозування результатів та проектування технологічної операції, то всі лабораторні роботи пов'язано з цією діяльністю фахівця.

№ з/п	Назва лабораторної роботи	Кількість ауд. годин
1	Прогнозування результатів технологічної операції та проектування режимів лазерної розмірної обробки за аналітичними методами, оцінка якості проектування. Навчальний посібник 1 до роботи:	8
2	Проектування режимів лазерної розмірної обробки експериментальними методами. Навчальний посібник 1 до роботи:	8
3	Оформлення результатів експериментів, обробка фактичного матеріалу, висновки про якість аналітичних прогнозних моделей процесу ЛРО, захист робіт	2

6. Самостійна робота студента

Самостійна робота (48 год.) студента полягає у підготовці до лекційних, практичних і лабораторних занять шляхом опрацювання рекомендованої літератури і підготовці відповідей на контрольні запитання для лекцій і лабораторних занять, підготовки до модульної контрольної роботи, виконання розрахунково-графічної роботи, а також у підготовці до заліку (6 год.).

Вид самостійної роботи студента	Кількість годин	Норма часу на підготовку, год.	Термін часу, год.
Підготовка до лекцій та засвоєння додаткових питань	36	0.3	10
Підготовка до практичних робіт	18	0.5	9
Підготовка до лабораторних робіт та опрацювання результатів	18	1	18
Підготовка до МКР	1	2	2
Підготовка до заліку	1	6	6
Підготовка РГР	1	10	10
Всього			48

Політика та контроль

7. Політика навчальної дисципліни

Правила відвідування занять

1. Пропущене лекційне заняття необхідно продивитись за допомогою запису ZOOM, законспектувати основні положення, використовуючи матеріали розміщені викладачем в Google Classroom (за посиланням <https://classroom.google.com/c/NjUzODEwMTg3MjE0?cjc=чччччччччч>).

2. Практичні заняття проводяться в комп'ютерному класі кафедри. У разі пропуску практичних занять необхідно попередити викладача і дізнатись про шляхи відпрацювання. Допускається використання власних ноутбуків. У разі дистанційного навчання, студент повинен забезпечити себе персональним комп'ютером з доступом до інтернету.

3. У разі спізнання на пару, студенту необхідно, не заважаючи іншим, зайти в клас, зайняти своє місце. Користуватись мобільним телефоном можна тільки з дозволу викладача. Звук мобільного телефона повинен бути вимкнений. У разі важливих вхідних дзвінків необхідно спитати дозволу викладача, вийти в коридор і провести розмову там.

4. Користуватись мобільними телефонами під час складання екзамену не дозволяється.

5. До екзамену допускаються студенти, які виконали усі практичні завдання та здали модульну контрольну роботу.

6. Контрольні роботи та залік проводяться за окремими правилами які викладач повинен довести до слухачів на попередньому занятті і які залежать від форми проведення навчання. До заліку допускаються студенти, які виконали усі практичні завдання та здали модульну контрольну роботу.

7. В усіх інших питаннях слухач повинен керуватися Правилами внутрішнього розпорядку КПІ ім. Ігоря Сікорського та Положенням про академічну доброчесність КПІ ім. Ігоря Сікорського

8. Види контролю та рейтингова система оцінювання результатів навчання (PCO)

Контрольні заходи:

1. Поточний контроль: виконання практичних завдань, МКР
2. Календарний контроль: проводиться двічі на семестр як моніторинг поточного стану виконання си́ллабусу.
3. Семестровий контроль: залік.

Рейтингова система оцінювання результатів навчання студентів

Вид контролю	Кількість	Максимальна кількість балів на 1	Максимальна кількість балів
Виконання практичних завдань	6	4	24
Лабораторні роботи	2	12	24
МКР	1	30	32
РР	1	20	20
Всього			100

1. Рейтинг студента з навчальної дисципліни розраховується виходячи із 100-бальної шкали. Рейтинг (протягом семестру) складається з балів, що студент отримує за:

- роботу на практичних заняттях (**18 занять**);
- виконання лабораторних робіт (**2 роботи**);
- виконання модульної контрольної роботи (**1 робота**);
- виконання розрахунково-графічної роботи (**1 робота**).

2. Критерії нарахування балів:

2.1. Робота на практичних заняттях:

- активна творча робота – **4 бали** × **6** = **24**;
- робота з позитивним результатом – **3 бал** × **6** = **18**;
- пасивна робота – **0 балів** × **0**.

2.2. Виконання лабораторних робіт:

Лаб. робота № 1:

- бездоганна робота – **12 балів**;
- є певні недоліки у підготовці та/або виконанні роботи – **9-10 балів**;
- робота не виконана або не захищена – не зараховано.

Лаб. робота № 2:

- бездоганна робота – **12 бали**;
- є певні недоліки у підготовці та/або виконанні роботи – **9-10 балів**;
- робота не виконана або не захищена – не зараховано.

2.3. Виконання модульної контрольної роботи (МКР):

- правильно виконана робота – **32 балів**;
- роботу виконано з незначними помилками – **26-28 балів**;
- роботу виконано зі значними помилками – **18-20 балів**;
- роботу не виконано або є грубі помилки – не зараховано.

2.4. Виконання розрахункової роботи (РР):

- творчо виконана робота – **20 балів**;
- роботу виконано з незначними недоліками – **16-18 балів**;
- роботу виконано з певними помилками – **12-14 балів**;
- роботу не виконано або є грубі помилки – не зараховано.

$$R = r_{np} + r_{лр} + r_{МКР} + r_{РГР} = 24 + 24 + 32 + 20 = 100 \text{ балів.}$$

3. УМОВОЮ позитивного **першого календарного контролю** (на 8 тижні) є отримання не менше **11 балів** та виконання першої лабораторної роботи (на час атестації).
4. УМОВОЮ позитивного **другого календарного контролю** (на 14 тижні) – отримання не менше **22 балів**, виконання першої лабораторної роботи та першого етапу другої роботи (на час атестації) за умови подання для контролю РГР.
5. УМОВОЮ допуску до заліку є зарахування всіх лабораторних робіт, РГР.

Студенти, які набрали протягом семестру необхідну кількість балів ($R > 60$) мають можливість:

- отримати залікову оцінку (залік) так званим «автоматом» відповідно до набраного рейтингу;
- виконувати залікову контрольну роботу з метою підвищення оцінки;
- у разі отримання оцінки більшої, ніж «автоматом» з рейтингу, студент отримує оцінку за результатами залікової контрольної роботи;
- у разі отримання оцінки меншої, ніж «автоматом» з рейтингу (< 60 балів), попередній рейтинг студента з дисципліни скасовується, і він отримує оцінку тільки за результатами залікової контрольної роботи.

Якщо рейтинг студента лежить менше за 60 балів він зобов'язаний виконувати залікову контрольну роботу.

6. На заліку студенти повинні виконати письмову контрольну роботу або дати усну відповідь.

Кожне завдання повинно утримувати три теоретичних запитання (завдання) і одне практичне. Кожне завдання складено з Переліку запитань до заліку з навчальної дисципліни. Кожне запитання оцінюється у **20 балів** за такими критеріями:

- «**відмінно**», повна відповідь, не менше **95%** потрібної інформації, що виконана згідно з вимогами до рівня «умінь», (повне, безпомилкове розв'язування завдання) – **20 балів**;
- «**дуже добре**» майже повна відповідь, не менше **85%** потрібної інформації, що виконана згідно з вимогами до рівня «умінь», (повне, безпомилкове розв'язування завдання) – **19 балів**;
- «**добре**», достатньо повна відповідь, не менше **75%** потрібної інформації, що виконана згідно з вимогами до рівня «умінь або є незначні неточності (повне розв'язування завдання з незначними неточностями) – **17-18 балів**;
- «**задовільно**», неповна відповідь, не менше **65%** потрібної інформації, що виконана згідно з вимогами до «стереотипного» рівня та деякі помилки (завдання виконане з певними недоліками) – **15-16 балів**;
- «**достатньо**», неповна відповідь, не менше **60%** потрібної інформації, що виконана згідно з вимогами до «стереотипного» рівня та деякі помилки (завдання виконане з певними недоліками) – **12-14 балів**;
- «**незадовільно**», відповідь не відповідає умовам до «достатньо», менше **60%** – **не зараховано**.

$$r_{залік} = 20 \times 4 = 80 \text{ балів}$$

7. Розрахунок шкали семестрового рейтингу:

$$RD = r_{pp} + r_{залік} = 20 + 80 = 100 \text{ балів}$$

* Для допуску до заліку студенти повинні захистити лабораторні роботи та виконати і захистити Р'Р.

8. Заохочувальні бали за (не більше 10% від r_c для кожної групи):

- участь у факультетській олімпіаді з дисципліни;
- модернізація лабораторних робіт;
- виконання завдань із удосконалення дидактичних матеріалів з дисципліни надається від 5 до 10 заохочувальних балів.

9. Сума балів за РР та балів за залікову контрольну роботу переводиться до залікової оцінки згідно з таблицею:

Бали	Оцінка
100...95	Відмінно
94...85	Дуже добре

84...75	Добре
74...65	Задовільно
64...60	Достатньо
Менше 60	Незадовільно
Стартовий рейтинг менше ніж 0,5 r_c (26 балів). Є не зараховані лабораторні роботи або не зарахована РГР	Не допущено

9. Додаткова інформація з дисципліни

- Перелік завдань до СРС видається студентам на початку семестру, чітко повідомляються вимоги до самостійної роботи, строки її виконання, правила оформлення, критерії рейтингового оцінювання.
- Всі питання, винесені для самостійного опанування, студенти мають оформлювати у вигляді стислого конспекту. Дата здачі СРС повідомляється на початку семестру.
- Бали за рейтинговою системою проставляються у Кампусі в розділі Поточний контроль, результати атестації в розділі Атестація. Екзаменаційна відомість створюється і заповнюється в Кампусі, доступ до неї існує упродовж дня екзамену (виправлення і перездача наступного дня не допускаються).
- Засоби змішаного навчання. При вивченні даної дисципліни студенти повинні самостійно пройти комп'ютерне тестування для перевірки своїх знань при підготовці до модульної контрольної роботи. При вивченні даної дисципліни використовуються навчальні посібники, друкований і електронний підручник, які розміщені в classroom.google
- Спілкування з викладачем через WhatsApp та Viber, електронну пошту.

Перелік запитань до контрольних робіт та семестрового контролю наведено в Додатках

Питання для самопідготовки до виконання РР додаток А

Питання до МКР: додаток В

Питання для самопідготовки до складання заліку: додаток С

Приклад тесту за умови складання заліку on-line: додаток D

Силлабус навчальної дисципліни:

Робочу програму навчальної дисципліни (силабусу):

Складено: професор, д.т.н., професор Котляров Валерій Павлович

Ухвалено кафедрою лазерної техніки та фізико-технічних технологій (протокол № 6 від 18.12.2024 р.)

Погоджено Методичною комісією інституту НН ІМЗ ім. Є.О. Патон (протокол №05/25 від 24.01.2025 р.)

Тематика розрахункових робіт.

Вступ

Тема. 1. Характеристики нетрадиційних методів розмірної обробки

1.1. Порівняння технологічних та техніко-економічних показників, виявлення переваг та недоліків лазерної розмірної обробки (ЛРО)

Завдання 1.1

Навести загальні характеристики електрофізико-хімічних методів розмірної обробки. Кількісні досягнення відносно розмірних, якісних та економічних показників конкурентних методів. Навести ті, з яких лазерна розмірна обробка перевершує досягнення інших методів. Які практичні технологічні задачі обробки отворів вирішуються з меншими витратами (економічними та технічними) з використанням нетрадиційних методів обробки.

Завдання 1.2

Вибрати найбільш ефективний метод формування системи з чотирьох отворів діаметром 0,1мм, які розташовано у кутах квадрату із стороною 0,5мм. Заготовка – листовий матеріал із конструкційної кераміки 22ХС товщиною 0,5мм. Обґрунтувати зроблений вибір шляхом аналізу можливостей кожного з методів в умовах поставленого завдання.

Тема 2. Фізичні основи лазерної розмірної обробки. Етапи руйнування матеріалу заготовки пучком лазерного випромінювання

2.1. Етапи діяння лазерного променя на заготовку

Завдання 2.1

Аналіз фізичних явищ, які супроводжують процес опромінювання заготовки лазерним випромінюванням. Навести етапи взаємодії, які характерні для високих рівнів інтенсивності (більше, ніж 10^6 Вт/см²). Відбиття та поглинання променевої енергії поверхнею заготовки. Чим визначається рівень коефіцієнту поглинання? Закон поглинання Бугера: об'ємний та поверхневий характер поглинання та зв'язаний з цим вид руйнування матеріалу за рахунок його перегріву. Які з трьох видів нагріву матеріалу пучком лазерного випромінювання можна використовувати для розмірного формоутворення?

Завдання 2.2.

Вибрати та обґрунтувати тип лазера, випромінювання якого може бути ефективно використано для якісної обробки отворів $\varnothing 0,05$ мм глибиною 1 мм у заготовки з конструкційної кераміці 22ХС. На внутрішній поверхні отвору не допускається шар застиглої розплаву. Порівняння провести з використанням рівнів нормованого коефіцієнту поглинання B (для кераміки: $k = 0,09$ кал/(см.с.град), $c_p = 0,37$ кал/(г.град), $T_u = 3500^\circ\text{C}$, $L_u = 2,6 \cdot 10^3$ кал/г, $\alpha_{\lambda=1,06} = 30$ см⁻¹, $\alpha_{\lambda=10,6} = 10^4$ см⁻¹).

2.2. Види впливу опромінення на матеріал заготовки

Завдання 2.3.

Описати нагрів та руйнування матеріалу заготовки за умови її опромінювання у режимах імпульсної та безперервної подачі енергії випромінювання. Кількісний склад продуктів руйнування у ерозійному факелі. Залежність оптичних характеристик факела (його густини) від інтенсивності опромінювання, та обмеження, які необхідно враховувати за умов безперервного режиму опромінювання. Які двосторонні обмеження на частоту подачі імпульсів необхідно враховувати за умов імпульсного опромінювання для підвищення ефективності операції?

2.3. Шляхи керування результатами лазерного опромінення

Завдання 2.4.

Визначити часові характеристики опромінювання у імпульсному режимі для таких умов обробки ненаскрізних отворів пучком лазерного випромінювання: матеріал заготовки – сталь 18Х2Н4ВА ($L_u = 8100$ кДж/кг, $\rho = 7,8 \cdot 10^{-3}$ кг/см³), розміри отворів $d \times h$: $0,1 \times 1$ мм (швидкість розльоту продуктів руйнування $V = 10^6$ см/с).

Тема 3. Умови та алгоритм проектування технологічної операції ЛРО

Завдання 3.1.

Навести перелік факторів, які впливають на результати розмірної обробки лазерним променем, розподіляючи їх на ті, що керують процесом взаємодії пучка та заготовки, та ті: від стану яких залежить результат. Класифікація розмірних, якісних та показників продуктивності операцій обробки отворів.

Завдання 3.2.

Виділити з наступного переліку факторів ті, що є умовами обробки, та ті, що дозволяють систематично впливати на процес обробки лазерним променем отворів (кількісні та якісні результати): енергія випромінювання, теплоємність матеріалу заготовки, питома густина матеріалу, подовженість опромінювання, діаметр та кут розходження пучка випромінювання, шорсткість поверхні заготовки, її товщина у місці обробки, розподіл інтенсивності у перерізі променю, довжина хвилі випромінювання, температура плавлення та випарування, питома енергія руйнування його, активність по відношенню до кисню, азоту, вуглецю, кут падіння променю на заготовку.

Тема 3.2. Алгоритм проектування технологічної операції ЛРО

Завдання 3.3.

Навести алгоритм проектування операції лазерної розмірної обробки. Методи встановлення режиму опромінювання на технологічному обладнанні. Засоби додаткового вдосконалення операції. Визначення економічної ефективності розробленої операції: розрахунок машинного часу для економічних оцінок.

Завдання 3.4.

Розрахувати машинний час виготовлення одного виробу з лазерною прошивкою отворів за таких умов:

- заготовка має один отвір, який обробляється одним імпульсом тривалістю $t = 300$ мкс;
- заготовка має сім отворів, кожний з котрих обробляється одним імпульсом тривалістю $t = 500$ мкс з частотою їх надходження $f = 2$ Гц;
- заготовка має один отвір, який обробляється шістьма імпульсами тривалістю $t = 300$ мкс, які подають з частотою $f = 12$ Гц;
- заготовка має сім отворів, кожний з котрих обробляється шістьма імпульсами тривалістю $t = 300$ мкс з частотою $f = 12$ Гц;

Тема 4. Технологічні схеми обробки порожнин (отворів, щілин, пазів) різноманітної форми та розмірів

4.1. Методи управління формою попереку порожнини

Завдання 4.1.

Які схеми обробки порожнин використовують в операціях ЛРО? Пов'яжіть їх використання з розмірними та з формою порожнин, а також з вимогами до їх якості. Наведіть приклади реалізації наведених схем для порожнин простої та складної форми.

4.2. Формування та перетворення каустики пучка випромінювання як інструменту

Завдання 4.2.

Опишіть формування пучка випромінювання у резонаторі, його перетворення тонкою сферичною лінзою. Глибина різкості оптичної системи, її вплив на повздовжній профіль отвору: за якої умови можна обробити циліндричний отвір? Якими засобами можна оперативно впливати на поперек та повздовжні розміри перетвореного лінзою пучка випромінювання?

Завдання 4.3.

Вибрати, накреслити та розрахувати оптичну систему для обробки кільцевої порожнини $\square 10$ мм шириною $0,1$ мм пучком випромінювання лазера на гранаті діаметром 10 мм та з кутовим розходженням $0,005$ рад. Прийняти показник переломлення матеріалу оптичних елементів рівний 1.5 .

4.3. Схеми формоутворення глибоких отворів з малим попереком

Завдання 4.4.

Навести схему обробки «у дальній» зоні. Які за характеристиками отвори обробляють за цією схемою? Чим можна впливати на поперек та профіль отвору за цією схемою опромінювання? Навести приклади реалізації обробки отворів «у дальній» зоні.

Які спеціальні оптичні елементи використовують для обробки «у дальній» зоні. Проаналізуйте,

що заважає їх широкому застосуванню.

4.4. Схеми обробки точних та отворів складного профілю

Завдання 4.5.

Чому обробка точних отворів виконується за опроміненням «у ближній» зоні? Які умови обмежують її застосування?

Коли використовується проєкційна схема обробки отворів складної форми у тонких заготовках? Побудувати оптичну систему для формування пучка лазерного випромінювання складного поперечного профілю та концентрації його енергії на поверхню заготовки. Порядок розрахунку геометричних та оптичних параметрів проєкційної системи.

Що таке контурно-проєкційна схема обробки як засіб підвищення ефективності використання енергії пучка випромінювання?

Що дав використання активної проєкційної схеми для обробки фасонних отворів без втрат енергії?

Наведіть схеми контурної обробки отворів складного перерізу розміром більшим ніж 1 мм.

Завдання 4.6.

Вибрати тип та накреслити оптичну схему для проєкційної обробки вікна квадратної поперечної форми 50×50 мкм у плівці з хрому завтовшки 10 мкм на поверхні скляної пластинки. Випромінювач на рубіні з довжиною хвилі $L = 0.6943$ мкм, діаметром пучка 5 мм з кутом розходження $0,003$ рад. Скласти схему активно-проєкційної оптичної системи для використання з лазером на парах міді, який має коефіцієнт підсилення активного середовища $(= 10^2 \text{ см}^{-1})$.

4.5. Методи управління повздовжньою формою порожнини

Завдання 4.7.

Які параметри обробки (параметри пучка випромінювання та умов опромінювання) значуще впливають на повздовжній профіль отвору після лазерної обробки? Залежність профілю від взаємного положення пучка випромінювання та заготовки. Яким чином, змінюючи умови опромінювання, впливають на повздовжній профіль отвору?

Який метод описування складного профілю системою відхилень від циліндричної форми? Моделювання процесу обробки експериментальними методами; використання моделей для проектування операції обробки отворів нециліндричної форми.

Завдання 4.8.

Як сформувати циліндричну світлову трубку? Скласти, накреслити та розрахувати геометричні співвідношення оптичної системи для обробки отворів циліндричної форми діаметром 0,2 мм пучком випромінювання незмінних розмірів у межах заготовки товщиною 3 мм. Випромінювач – лазер на рубіні ($L = 0,6943$ мкм) – з пучком діаметром 5 мм і кутом розходження $0,003$ рад. Розрахувати режими обробки систематичною послідовністю пічків, якщо заготовка виготовлена із латуні ЛС59 ($L_u = 5,1$ кДж/кг, $T_u = 2500^\circ\text{C}$, $T_{пл} = 1230^\circ\text{C}$, $k = 1,17 \text{ Вт/(см.град)}$, $a = 0,34 \text{ см}^2/\text{с}$, $\gamma = 6,2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/см}^3$).

Завдання 4.9.

Які використовуються показники якості повздовжнього профілю отвору після лазерної обробки? Які фактори визначають їх рівень? Наведіть основні параметри керування рівнем конусоподібності, кількістю розплаву, хвилястості, шорсткості та ін. Чим ускладняється одночасне скорочення основних недоліків профілю?

Завдання 4.10.

Якої тенденції треба дотримуватися, щоб зменшити рівень шорсткості поверхні стінок отвору після лазерної обробки? Чому сталь У8 має менший рівень шорсткості ніж сталь 45 за однакових режимів обробки? Складіть найбільш ефективний набір параметрів для керування якістю поверхні оброблених отворів?

Завдання 4.11.

Поясніть причини змінення властивостей при поверхового шару матеріалу заготовки в обробленому розмірному елементі (отвір, паз, щілина, тощо). У яких випадках змінений шар матеріалу біля стінок отворів після лазерної обробки вважається небажаним? Який технологічний параметр найбільш впливає на його глибину? Чим відрізняються шари зміненого матеріалу у вуглецевих та легованих сталях? Чи можна отримати ефект зміцнення кольорових сплавів? Наведіть приклади структури цих шарів для неметалів (кераміка, скло, алмаз, тощо).

Тема 5. Методи визначення режиму лазерної обробки порожнини

5.1. Прогнозування результатів обробки за аналітичними моделями

Завдання 5.1.

Навести аналітичні методи прогнозування результатів ЛРО. Переваги та недоліки їх використання. Методи їх побудови: теорія розмірностей, баланс енергії у зоні обробки, феноменологічні моделі. Порівняльні характеристики розрахункових результатів прогнозування операцій обробки отворів, причини недостатньої точності прогнозів.

Завдання 5.2

Розрахувати результати обробки заготовки із сталі 18Х2Н4ВА ($L_u = 8100$ 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, $T_u = 3010^\circ\text{C}$, $T_{пл} = 1520^\circ\text{C}$, $A = 0,67$) 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.

5.2. Проектування режимів ЛРО за аналітичними моделями

Завдання 5.3.

Навести передумови розробки розрахункових моделей 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 заготовках, глибоких отворів, отворів циліндричної повздовжньої форми, та отворів у теплопровідних матеріалах?

Завдання 5.4.

Визначити режими обробки лунки діаметром 10^{-2} см та глибиною 0,05 см у заготовці із латуні ЛС59 ($L_u = 5,1$ кДж/кг, $T_u = 2500^\circ\text{C}$, $T_{пл} = 1230^\circ\text{C}$, $k = 1,17$ Вт/(см.град), $a = 0,34$ см²/с, $\rho = 6,2 \cdot 10^{-3}$ кг/см³) одним імпульсом вільної генерації (СГ), який можна прийняти як "квазістаціонарний" при інтенсивності опромінювання $I \approx 10^8$ Вт/см². Що зміниться у режимах опромінювання, якщо виконати вимогу формування отвору циліндричної форми?

Завдання 5.5.

В яких технологічних випадках застосовується імпульсна обробка отворів періодичною послідовністю пічків (друга задача Steffen'a). Яким чином досягається реальність такої схеми опромінювання? Засоби стабілізації пічкової структури імпульсу ВГ або створення регулярної послідовності пічків при безперервній подачі енергії накачування активного середовища. За рахунок яких особливостей у режимах одержано розрахункові моделі, адекватні для рішення різних технологічних задач?

Завдання 5.6.

Визначити режими обробки лунки діаметром $2 \cdot 10^{-2}$ см та глибиною 0,15 см у заготовці із латуні ЛС59 ($L_u = 5,1$ кДж/кг, $T_u = 2500^\circ\text{C}$, $T_{пл} = 1230^\circ\text{C}$, $k = 1,17$ Вт/(см.град), $a = 0,34$ см²/с, $\rho = 6,2 \cdot 10^{-3}$ кг/см³) регулярною послідовністю пічків, які подаються у зону обробки з незмінним періодом надходження та стабільним рівнем інтенсивності ($I_s \in 10^8$ Вт/см²). Швидкість розльоту продуктів лазерної ерозії прийняти рівною 10^6 см/с.

5.3. Дослідження та моделювання операцій ЛРО

Завдання 5.7.

В яких випадках застосовується методика одно факторних 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 одно факторних досліджень: можливість вибору режимів обробки та керування процесом. Дані математичного моделювання процесу за цими результатами: їх прийнятність для проектування операцій.

Завдання 5.8.

Визначити за графіками експериментальних одно факторних досліджень режими обробки отворів діаметром 0,3 мм та глибиною 1,5 мм у заготовці із сталі 45 за умов одно імпульсного та

багато імпульсного опромінювання. Чи можливо рішення багато критеріальних задач за допомогою цих даних.

Завдання 5.9.

Обґрунтувати необхідність багато факторної методики досліджень процесів лазерної розмірної обробки, як єдиної в умовах складної взаємодії багатьох фізичних та хімічних явищ у зоні опромінювання. Етапи досліджень в умовах значущого діяння великої кількості факторів. Експериментальні плани, які ефективні з економічних та часових міркувань на етапі перед планування експериментів. Умови використання компромісних планів Бродського, методика їх побудови для одержання моделі процесу з визначеним складом. Логічне обґрунтування набору факторів, які включаються до постульованої моделі процесу.

Завдання 5.10.

Скласти план експерименту на етапі перед планування для таких умов:

- насичений план типу ДФЕ для оцінки ефективності лише лінійних членів для трьох факторів: енергії, кута розходження та фокусної відстані фокуруючої системи;
- компромісний план для моделі другого порядку за умови значущої дії лінійних, квадратичних та парних ефектів усіх факторів з першим:

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n a_{ii} x_i^2 + \sum_{i=2}^n a_{1i} x_1 x_i,$$

де: x_1 – енергія випромінювання, x_2 – тривалість імпульсу, x_3 – кут розходження пучка випромінювання.

Завдання 5.11.

Для якої цілі будують рейтингові ряди (ряд, побудований за рівнем рангу впливу фактору на відповідний показник) впливу керуємих факторів на розмірні показники процесу лазерної обробки отворів: діаметр та глибину для ненаскрізних отворів та діаметр вхідної та вихідної частин – для наскрізних отворів. Навести приклад його використання для підготовки експерименту для моделювання процесу виготовлення порожнин.

Завдання 5.12.

Скласти набір (з трьох) факторів, які найбільш значуще впливають на:

- розміри не наскрізного отвору;
- розміри наскрізного отвору.

Привести приклад багато факторного плану для цих факторів, визначити необхідну кількість експериментальних точок. На яких рівнях треба фіксувати залишки значущих факторів для одержання найменших по розмірам отворів.

5.4. Проектування режимів ЛРО. Одно критеріальні задачі

Завдання 5.13.

Якими показниками якості описують отвори після лазерної обробки. Якою величиною зручно та інформативно описувати нестабільність розмірів отворів в умовах дрейфу рівня настройки? Рейтинговий ряд факторів процесу по їх впливу на показник відтворюваності розмірів отворів. Приклад проектування операції виготовлення серії наскрізних отворів з нормованою точністю розмірів з використанням математичної моделі процесу обробки.

Завдання 5.14.

Здійснити спробу спроектувати операцію отвору складної повздожньої форми експериментальним методом за відповідною методикою з БФЕ. Чи одержано задовільні результати проектування? Як пояснити отриманий результат? Формування узагальненого показника відхилення дійсної повздожньої форми отворів від заданої для його використання з метою пошуку оптимального режиму обробки. Для чого використовується створення узагальненого показника якості отвору? Рейтинговий ряд впливу керуємих факторів процесу на узагальнений показник якості форми. Виконати пошук оптимального режиму обробки за цим показником.

Завдання 5.15.

Розрахувати коефіцієнт варіації розмірів отворів після лазерної обробки, якщо поле розсіяння їх діаметрів не перевищує поле допуску 9 квалітету, а номінальний розмір – 0,08 мм. Визначити режим обробки таких отворів експериментальним методом.

5.5. Проектування режимів ЛРО. Багато критеріальні задачі.

Завдання 5.16.

Поясніть, чому багатокритеріальна оцінка результату обробки ускладнює рішення задачі проектування технологічної операції лазерної обробки і спонукає до використання експериментальних методів оптимізації? Які відомі шляхи подолання багатокритеріальності для спрощення оптимізаційних задач. Поняття узагальненої функції бажаності. Алгоритм експериментального методу оптимізації з використанням функцій бажаності. Навести приклади формування цих функцій.

Завдання 5.17.

Спроекувати технологічну операцію лазерної обробки отворів $\square 0,4H12$ конічної форми (з конусоподібністю $k = 0,4$ мм) у заготовках корпусів ін'єкційних голок завтовшки 3 мм. Тривалість операції не повинна перевищувати 25 с. Матеріал заготовки - латунь ЛС59 ($L_u = 5,1$ кДж/кг, $T_u = 2500^\circ\text{C}$, $T_{пл} = 1230^\circ\text{C}$, $k = 1,17$ Вт/(см. град), $a = 0,34$ см²/с,) $= 6,2 \cdot 10^3$ кг/см³). Використати дані експериментальних досліджень по моделюванню процесу обробки таких отворів.

Завдання на модульні контрольні роботи

Тема 1. Характеристики нетрадиційних методів розмірної обробки.

1.1. Порівняння технологічних та техніко-економічних показників, виявлення переваг та недоліків лазерної розмірної обробки (ЛРО)

Контрольне завдання № 1.1

1. Проаналізувати загальні характеристики електрофізико-хімічних методів розмірної обробки.
2. Навести кількісні досягнення відносно розмірних, якісних та економічних показників конкурентних методів.
3. Виділити ті, з яких лазерна розмірна обробка перевершує досягнення інших методів.
4. Які практичні технологічні задачі обробки отворів вирішуються з меншими витратами (економічними та технічними) з використанням нетрадиційних методів обробки?

Контрольне завдання № 1.2

1. Вибрати найбільш ефективний метод формування системи з чотирьох отворів діаметром 0,1мм, які розташовано у кутах квадрату із стороною 0,5мм. Заготовка – листовий матеріал із конструкційної кераміки 22ХС товщиною 0,5мм.
2. Обґрунтувати зроблений вибір шляхом аналізу можливостей кожного з методів в умовах поставленого завдання.

Тема 2. Фізичні основи лазерної розмірної обробки. Етапи руйнування матеріалу заготовки пучком лазерного випромінювання.

2.1. Етапи діяння лазерного променя на заготовку

Контрольне завдання № 2.1

1. Проаналізувати фізичні явища, які супроводжують процес опромінювання заготовки лазерним випромінюванням.
2. Навести етапи взаємодії, які характерні для високих рівнів інтенсивності (більше, ніж 10^6 Вт/см²).
3. Оцінити роль відбиття та поглинання променевої енергії поверхнею заготовки. Чим визначається рівень коефіцієнту поглинання? Закон поглинання Бугера: об'ємний та поверхневий характер поглинання та зв'язаний з цим вид руйнування матеріалу за рахунок його перегріву.
4. Обґрунтувати: які з трьох видів нагріву матеріалу пучком лазерного випромінювання можна використовувати для розмірного формоутворення?

Контрольне завдання № 2.2

1. Вибрати та обґрунтувати тип лазера, випромінювання якого може бути ефективно використано для якісної обробки отворів $\varnothing 0,05$ мм глибиною 1мм у заготовки з конструкційної кераміки 22ХС. На внутрішній поверхні отвору не допускається шар застиглого розплаву.
2. Порівняння провести з використанням рівнів нормованого коефіцієнту поглинання В (для кераміки: $k =$
3. $0,09$ кал/(см.с.град), $c_p = 0,37$ кал/(г.град), $T_{ли} = 35000$ С, $L_{ли} = 2,6 \cdot 10^3$ кал/г, $\alpha\lambda = 1,06 = 30$ см-1, $\alpha\lambda = 10,6 = 104$ см-1).

2.2. Види впливу опромінення на матеріал заготовки

Контрольне завдання № 2.3

1. Визначити етапи нагріву та руйнування матеріалу заготовки за умови її опромінювання у режимах імпульсної та безперервної подачі енергії випромінювання.
2. Виконати аналіз кількісного складу продуктів руйнування у ерозійному факелі.
3. Навести залежність оптичних характеристик факелу (його густини) від інтенсивності опромінювання.
4. Які обмеження необхідно враховувати за умов безперервного режиму опромінювання та які двосторонні обмеження на частоту подачі імпульсів необхідно враховувати за умов імпульсного опромінювання для підвищення ефективності операції?

Контрольне завдання № 2.4

Визначити часові характеристики опромінювання у імпульсному режимі для таких умов обробки ненаскрізних отворів пучком лазерного випромінювання:

- матеріал заготовки – сталь 18Х2Н4ВА ($L_n = 8100$ кДж/кг, $\rho = 7,8 \cdot 10^{-3}$ кг/см³),
- розміри отворів $d \times h$: $0,1 \times 1$ мм (швидкість розльоту продуктів руйнування $V = 10^6$ см/с).

2.3. Шляхи керування результатами лазерного опромінення

Контрольне завдання № 2.5

Навести перелік факторів, які впливають на результати розмірної обробки лазерним променем, розподіляючи їх на ті, що керують процесом взаємодії пучка та заготовки, та ті, від стану яких залежить результат.

1. Зробити класифікацію розмірних, якісних та показників продуктивності операцій обробки отворів.
2. Дати оцінку можливості керування показниками за допомогою керуємих факторів.

Контрольне завдання № 2.6

Виділити з наступного переліку факторів ті, що є умовами обробки, та ті, що дозволяють систематично впливати на процес обробки лазерним променем отворів (кількісні та якісні результати):

- енергія випромінювання;
- теплоємність матеріалу заготовки;
- питома густина матеріалу, подовженість опромінювання;
- діаметр та кут розходження пучка випромінювання;
- шорсткість поверхні заготовки;
- товщина заготовки у місці обробки;
- розподіл інтенсивності у перерізі променя;
- довжина хвилі випромінювання;
- температура плавлення та випарування матеріалу заготовки;
- питома енергія руйнування матеріалу заготовки;
- активність по відношенню до кисню, азоту, вуглецю;
- кут падіння променя на заготовку.

Тема 3. Умови та алгоритм проектування технологічної операції ЛРО

3.1. Обставини та умови проектування

Контрольне завдання № 3.1

1. Що мається на увазі при врахуванні обставин та умов проектування технологічної операції?
2. Які обставини враховуються при розробці технологічної схеми операції?
3. Чиї умови визначають зміст та результати технологічної операції?

3.2. Алгоритм проектування технологічної операції ЛРО

Контрольне завдання № 3.2

1. Проаналізувати алгоритм проектування операції лазерної розмірної обробки.
2. Навести методи встановлення режиму опромінювання на технологічному обладнанні. Засоби додаткового вдосконалення операції.
3. Визначити показники економічної ефективності для розробленої операції: розрахунки машинного часу для економічних оцінок різних за змістом операцій.

Контрольне завдання № 3.3

1. Розрахувати техніко-економічний показник операції - машинний час виготовлення одного виробу з лазерною прошивкою отворів за таких умов:
 - заготовка має один отвір, який обробляється одним імпульсом тривалістю $t = 300$ мкс з енергією $E = 2$ Дж;

- заготовка має сім отворів, кожний з котрих обробляється одним імпульсом тривалістю $t = 500$ мкс, енергією 5 Дж з частотою їх надходження $f = 2$ Гц;
 - заготовка має один отвір, який обробляється шістьма імпульсами тривалістю 300 мкс, енергією 1 Дж, які подають з частотою $\nu = 12$ Гц;
 - заготовка має сім отворів, кожний з котрих обробляється шістьма імпульсами тривалістю 300 мкс, енергією 0,5 Дж, які подають з частотою $f = 10$ Гц.
2. Яка операція найбільш ефективна? Що є показником ефективності операції?

Тема 4. Технологічні схеми обробки порожнин (отворів, щілин, пазів) різноманітної форми та розмірів.

4.1. Методи управління формою поперек порожнини

Контрольне завдання № 4.1

1. Навести технологічні схеми формування отворів пучком лазерного випромінювання. В яких умовах ефективна та чи інша схема?
2. Визначити, які засоби концентрації променистої енергії використовуються у схемах обробки у “дальній” чи “ближній” зонах?

4.2. Формування та перетворення каустики пучка випромінювання як інструменту

Контрольне завдання № 4.2

1. Проаналізувати можливості формування пучка випромінювання у резонаторі та його перетворення тонкою сферичною лінзою.
2. Обґрунтувати вплив глибини різкості оптичної системи на повздовжній профіль отвору: за якої умови можна обробити циліндричний отвір?

4.3. Схеми формоутворення глибоких отворів з малим поперечком

Контрольне завдання № 4.3

1. Які отвори за поперечним зрізом можна обробити у “дальній” зоні.
2. Вибрати, накреслити та розрахувати оптичну систему для обробки кільцевої порожнини:
 - розміри: $\square 10$ мм шириною 0,1 мм;
 - пучок випромінювання лазера на гранаті має діаметр 10 мм та кут розходження 0,005 рад;
 - показник переломлення матеріалу оптичних елементів $n = 1.5$.
3. Обґрунтувати схеми контурної обробки отворів складного перерізу розміром більшим ніж 1 мм.

4.4. Схеми обробки точних та отворів складного профілю

Контрольне завдання № 4.4

1. Навести проєкційну схему обробки отворів складної форми у тонких заготовках.
2. Побудувати оптичну систему для формування пучка лазерного випромінювання складного поперечного профілю та концентрації його енергії на поверхню заготовки.
3. Визначити порядок розрахунку геометричних та оптичних параметрів проєкційної системи.
4. За рахунок яких якостей контурно-проєкційна схема обробки підвищує ефективність використання енергії пучка випромінювання?
5. Дайте оцінку використання активної проєкційної схеми для обробки фасонних отворів без втрат енергії.

Контрольне завдання № 4.5

1. Вибрати тип та накреслити оптичну схему для проєкційної обробки вікна квадратної поперечної форми:
 - розмір - 50.50 мкм;
 - заготовка - плівка з хрому завтовшки 10 мкм на поверхні скляної пластинки;
 - випромінювач на рубіні:
 - довжина хвилі $L = 0.6943$ мк,
 - діаметр променя 5 мм;
 - кут розходження 0,003 рад.
2. Скласти схему активно-проєкційної оптичної системи для використання з лазером на парах

міді, який має коефіцієнт підсилення активного середовища ($= 10^2 \text{ см}^{-1}$).

4.5. Методи управління повздожньою формою порожнини

Контрольне завдання № 4.6

1. Навести параметри обробки (параметри пучка випромінювання та умов опромінювання), які значуще впливають на повздожній профіль отвору після лазерної обробки.
2. Оцінити вплив взаємного положення пучка випромінювання та заготовки на повздожній профіль отвору. Яким чином, змінюючи умови опромінювання, впливають на повздожній профіль отвору?
3. Визначити метод описування складного профілю системою відхилень від циліндричної форми.
4. Виконати моделювання процесу обробки експериментальними методами; використати моделі для проектування операції обробки отворів нециліндричної форми.

Контрольне завдання № 4.7

1. Визначити умови формування циліндричної світлової трубки.
2. Скласти оптичну схему з циліндричною світловою трубкою для обробки циліндричного отвору:
 - діаметр $0,3 \text{ мм}$;
 - товщина заготовки 3 мм ;
 - параметри пучка випромінювання: діаметр $D = 10 \text{ мм}$, кут розходження ($= 0,002 \text{ рад}$, довжина хвилі $L = 1,06 \cdot 10^{-3} \text{ мм}$.

Контрольне завдання № 4.8

1. Скласти та розрахувати геометричні співвідношення оптичної системи для обробки отворів циліндричної форми:
 - діаметр отвору $d = 0,2 \text{ мм}$;
 - товщина заготовки 1 мм .
 - пучок випромінювання має незмінні розміри у межах заготовки;
 - випромінювач – лазер на рубіні:
 - довжина хвилі $L = 0,6943 \text{ мкм}$;
 - діаметр пучка $D = 5 \text{ мм}$;
 - кут розходження ($= 0,003 \text{ рад}$.
2. Розрахувати режими обробки систематичною послідовністю пічків, якщо заготовка виготовлена із латуні ЛС59 ($L_u = 5,1 \text{ кДж/кг}$, $T_u = 2500^0 \text{ C}$, $T_{пл} = 1230^0 \text{ C}$, $k = 1,17 \text{ Вт/(см град)}$, $a = 0,34 \text{ см}^2/\text{с}$, $\rho = 6,2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/см}^3$).

Тема 5. Методи визначення режиму лазерної обробки порожнини

5.1. Прогнозування результатів обробки за аналітичними моделями

Контрольне завдання №5.1

1. Дати оцінку аналітичним методам проектування режимів лазерного опромінювання. Навести переваги та недоліки їх використання.
2. Проаналізувати методи їх побудови: теорія розмірностей, баланс енергії у зоні обробки, феноменологічні моделі.
3. Порівняти характеристики розрахункових результатів прогнозування операцій обробки отворів та обґрунтувати причини недостатньої точності розрахунків.

Контрольне завдання № 5.2

1. Розрахувати результати обробки отвору за таких умов:
 - заготовка із сталі 18Х2Н4ВА ($L_u = 8100 \text{ кДж/кг}$, $\rho = 7,8 \cdot 10^{-3} \text{ кг/см}^3$, $k = 0,3 \text{ Вт/(см.град)}$, $c = 0,6 \text{ кДж/(кг.град)}$, $c' = 0,52 \text{ кДж/(кг.град)}$, $a = 0,07 \text{ см}^2/\text{с}$, $T_u = 3010^0 \text{ C}$, $T_{пл} = 1520^0 \text{ C}$, $A = 0,67$);
 - умови опромінювання: $E = 5 \text{ Дж}$, $\tau = 500 \text{ мкс}$, $d_0 = 10^{-2} \text{ см}$, $D = 1,6 \text{ см}$, $F = 10 \text{ см}$, $\Delta F = 0$.
2. Порівняти між собою одержані результати та оцінити їх з позицій точності передвіщення.

5.2. Проектування режимів ЛРО за аналітичними моделями

Контрольне завдання № 5.3

1. Дати оцінку розрахунковій моделі проектування режимів лазерної обробки отворів із підвищеною якістю результатів (за Steffen'ом).
2. За рахунок яких допущень досягнуто аналітичне рішення рівняння теплопровідності нагріву заготовки лазерним опромінюванням?
3. Чим відрізняються режими обробки "гладким" імпульсом отворів у тонких заготовках, глибоких отворів, отворів циліндричної повздожньої форми, та отворів у теплопровідних матеріалах?

Контрольне завдання № 5.4

1. Визначити режими обробки лунки:
 - діаметр 10^{-2} см, глибина 0,05 см;
 - заготовка - латунь ЛС59 ($L_u = 5,1$ кДж/кг, $T_u = 2500^0$ С, $T_{пл} = 1230^0$ С, $k = 1,17$ Вт/(см.град), $a = 0,34$ см²/с, $\rho = 6,2 \cdot 10^{-3}$ кг/см³)
 - режим опромінювання - один імпульс вільної генерації (імпульс СГ можна прийняти як "квазістаціонарний" при інтенсивності опромінювання $I \approx 10^8$ Вт/см²).
2. Що зміниться у режимах опромінювання, якщо потрібно сформувати отвір циліндричної форми?

Контрольне завдання № 5.5

1. Обґрунтувати використання обробки отворів з підвищеними вимогами до їх якості імпульсом з періодичною послідовністю пічків (друга задача Steffen'a).
2. Як досягається реальність з урахуванням умовності такої схеми опромінювання, які засоби її реалізації?
3. За рахунок яких особливостей у режимах одержано розрахункові моделі, однаково адекватні для рішення різних технологічних задач?

Контрольне завдання № 5.6

Визначити режими обробки лунки:

- діаметр $2 \cdot 10^{-2}$ см та глибина 0,15 см;
- заготовка - латунь ЛС59 ($L_u = 5,1$ кДж/кг, $T_u = 2500^0$ С, $T_{пл} = 1230^0$ С, $k = 1,17$ Вт/(см. град), $a = 0,34$ см²/с, $\rho = 6,2 \cdot 10^{-3}$ кг/см³)
- умови опромінювання - послідовність пічків, які подаються у зону обробки з незмінним періодом надходження та стабільним рівнем інтенсивності ($I_s \in 10^8$ Вт/см²; швидкість розльоту продуктів лазерної ерозії прийняти рівною 10^6 см/с).

5.3. Дослідження та моделювання операцій ЛРО

Контрольне завдання № 5.7

1. Дати оцінку доцільності методики однофакторних експериментальних досліджень процесу лазерної обробки отворів.
2. Навести (у якісному поданні) результати впливу параметрів пучка випромінювання та умов обробки на розміри отворів (діаметр та глибину).
3. Зробити основні висновки по результатах однофакторних досліджень: можливість вибору режимів обробки та керування процесом.
4. Обсудити можливість математичного моделювання процесу за цими результатами: їх прийнятність для проектування операцій.

Контрольне завдання № 5.8

1. 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 одно імпульсного та багато імпульсного опромінювання.
2. Чи можливо рішення багато критеріальних задач за допомогою цих даних? Обґрунтувати відповідь.

Контрольне завдання № 5.9

1. Обґрунтувати необхідність багато факторної методики досліджень процесів лазерної розмірної обробки, як єдиної в умовах складної взаємодії багатьох фізичних та хімічних явищ у зоні

- опромінювання.
2. Скласти етапи досліджень в умовах значущого діяння великої кількості факторів.
 3. Навести приклади експериментальних планів, які ефективні з економічних та часових міркувань на етапі передпланування експериментів. Які умови використання компромісних планів Бродського, методика їх побудови для одержання моделі процесу з визначеним складом?
 4. Обґрунтуйте набір факторів, які включаються до постульованої моделі процесу.

Контрольне завдання № 5.10

1. Скласти план експерименту на етапі передпланування для таких умов:
 - насичений план типу ДФЕ для оцінки ефективності лише лінійних членів для трьох факторів: енергії, кута розходження та фокусної відстані фокуруючої системи;
 - компромісний план для моделі другого порядку за умови значущої дії лінійних, квадратичних та парних ефектів усіх факторів з першим:

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n a_{ii} x_i^2 + \sum_{i=2}^n a_{ii} x_i x_i,$$

де: x_1 – енергія випромінювання, x_2 – тривалість імпульсу, x_3 – кут розходження пучка випромінювання.

2. Який з цих планів найкоротший?

5.4. Проектування режимів ЛРО. Одно критеріальні задачі

Контрольне завдання № 5.11

1. Проаналізувати ранжировочний ряд впливу керуємих факторів на розмірні показники процесу лазерної обробки отворів:
 - діаметр та глибину - для ненаскрізних отворів;
 - діаметр вхідної та вихідної частин – для наскрізних отворів.
2. Вибрати та обґрунтувати набір керуємих факторів для створення факторного простору досліджень процесу лазерної обробки.

5.5. Проектування режимів ЛРО. Багато критеріальні задачі

Контрольне завдання № 5.12

1. Скласти набір (з трьох) факторів, які найбільш значуще впливають на:
 - розміри ненаскрізних отворів;
 - розміри наскрізного отвору.
2. Привести приклад повно факторного плану другого порядку для цих факторів, визначити необхідну кількість експериментальних точок.
3. На яких рівнях треба фіксувати залишки значущих факторів для одержання найменших по розмірам отворів?

Контрольне завдання № 5.13

1. Визначити, чому багато критеріальність задач проектування технологічних операцій лазерної обробки спонукає до використання експериментальних методів оптимізації.
2. Навести шляхи подолання багато критеріальності для спрощення оптимізаційних задач.
3. Обґрунтувати необхідність використання узагальненої функції бажаності.
4. Визначити алгоритм експериментального методу оптимізації з використанням функцій бажаності. Навести приклади формування цих функцій.

Контрольне завдання № 5.14

Спроекувати технологічну операцію лазерної обробки отворів:

- діаметр - $\square 0,4H12$ мм;
- повздовжня форма – конічна з конусоподібністю $k = 0,4$ мм;
- заготовка - корпус ін'єкційної голки завтовшки 3 мм.
- матеріал заготовки - латунь ЛС59 ($L_u = 5,1$ кДж/кг, $T_u = 2500^0$ C, $T_{пл} = 1230^0$ C, $k = 1,17$ Вт/(см.град), $a = 0,34$ см²/с,) = $6,2 \cdot 10^{-3}$ кг/см³);
- тривалість операції не повинна перевищувати 25 с.

Примітка: використати дані експериментальних досліджень по моделюванню процесу обробки таких

ομωρίε.

Перелік питань до екзамену з освітнього компоненту

1. Проаналізувати *місце лазерної обробки* у системі Електрофізичних та Електрохімічних методів обробки.
2. Навести результати однофакторних методів досліджень процесу лазерної розмірної обробки: порядок виконання, можливості, переваги та недоліки.
3. Навести порядок розрахунку параметрів елементів проекційної системи. Виконати габаритний розрахунок (на базі практичних занять)
4. Які явища виникають під час поглинання енергії лазерного випромінювання поверхнею заготовки. Використати закон Бугера-Ламберта для характеристики оброблювальних матеріалів.
5. Яким чином впливають основні параметри процесу обробки на глибину порожнини.
6. Коли застосовується контурно - проекційний метод обробки порожнин. Навести оптичну схему для його реалізації. (навести практичні результати його застосування).
7. Які механізми нагрівання та руйнування матеріалу заготовки за лазерним опромінюванням? Як впливає режим опромінювання та властивості матеріалу на характер дії пучка випромінювання?
8. Як впливають основні параметри процесу обробки на поперечні розміри порожнин? .
9. Навести оптичну схему для формування пучка лазерного випромінювання при використанні активного проекційного методу обробки порожнин. Яким співвідношенням параметрів. (приклад із практичних занять)
10. Які особливості руйнування матеріалів за імпульсним та безперервним режимами опромінювання, що додають розриви у постачанні енергії? Який рівень імпульсної (пічкової) потужності досягається?
11. Яке призначення методики та переваги мають багатфакторні методи експериментальних (БФЕ) досліджень процесів ЛРО для моделювання та оптимізації: особливості, умови застосування, інтерпретація результатів.
12. Навести схеми формування порожнин круглої форми трепанацією. (дати приклади, розглянуті на практичних заняттях).
13. Навести етапи взаємодії пучка лазерного випромінювання з матеріалом заготовки. Як залежить кількість етапів від досягнутого рівня густини потужності теплового джерела?
14. На які групи можна поділити фактори процесу лазерної обробки, від рівня яких залежить результат технологічної операції?
15. 3. Навести етапи процесу формоутворення наскрізних та ненаскрізних отворів (лунок) лазерним випромінюванням, типи повздовжніх профілів згідно з даними практичних занять за допоміжною літературою [5].
16. Навести алгоритм проектування технологічної операції лазерної розмірної обробки та визначити особливості виконання його етапів з урахуванням властивостей інструменту – пучка лазерного випромінювання.
17. Навести склад групи керуємих факторів процесу лазерної обробки, які змінюються якісно, або кількісно. Які фактори потрібно фіксувати на визначених рівнях під час обробки?
18. Як залежить повздовжня форми ненаскрізних порожнин (лунок) від взаємного положення під час обробки пучка випромінювання та заготовки? Яким чином можна впливати на форму отвору та його глибину згідно з даними практичних занять за допоміжною літературою [5].
19. Провести критичний огляд методів прогнозування результатів та проектування режимів лазерної обробки порожнин.
20. Навести ряди значущості впливу керуємих факторів на поперечні розміри порожнин (лише для лінійних факторів). Для чого та яким чином можна використовувати ряди значущості?
21. Як впливають керуємі фактори на конусоподібність отворів після лазерної розмірної обробки (результати виконання лабораторної роботи №2).
22. Проаналізувати аналітичні моделі прогнозування результатів операцій лазерної розмірної

- обробки. Навести методики їх побудування: рішення теплових задач, використання теорії розмірності, закону збереження енергії.
23. Виконати класифікацію факторів, які впливають на результати лазерної розмірної обробки, за їх керованістю та можливістю контролюватися.
 24. Навести порядок дій при проектуванні режимів обробки отворів із заданою конусоподібністю експериментальним методом. (алгоритм виконання лабораторної роботи №2).
 25. Навести умови розробки феноменологічних моделей процесу лазерної обробки ненаскрізних порожнин (лунок).
 26. Яким чином можна виконувати вибір режимів лазерної обробки за багатофакторними моделями процесу (досвід вибору режиму в лабораторній роботі №2):
 - з використанням ПЕОМ
 - графічним способом?
 27. Якими показниками виконується опис форми складних за профілем порожнин для формалізації розмірних результатів експериментальних досліджень?
 28. Навести склад поліноміальної моделі лазерної розмірної обробки, коефіцієнти регресії, їх розмірність за натурального та кодового запису рівнів факторів.
 29. Проаналізувати точність передвіщення результатів лазерної розмірної обробки за аналітичними моделями процесу обробки. Пояснити результати розрахунків.
 30. Показати, чи можливо обробити складно профільні порожнини із застосуванням системи моделей ряду перетинів профілю отвору для вибору режиму обробки. (практичне заняття № 9 [5])
 31. Які методи формування поперек порожнин пучком лазерного випромінювання застосовуються? Зв'язати технологічні схеми обробки з вимогами до оброблювальних отворів. (дані практичних занять за практичним заняттям №7 [6]).
 32. Навести технологічну та розрахункову схеми для визначення режимів обробки квазістаціонарним імпульсом лазерного випромінювання. Яку модель руйнування матеріалу заготовки використано автором J. Steffen?
 33. Навести показники якості порожнин після її лазерної обробки. Які особливості профілю характерні для порожнин, оброблених лазерним променем
 34. Навести схему формування каустики пучка лазерного випромінювання у резонаторі. Якими параметрами резонатора можна впливати на характеристики каустики?
 35. Який механізм утворення отвору застосовується для обробки над малих отворів (декілька мікрометрів)? Яким чином визначаються режими обробки отворів у заготовках із фольги, плівок? (практичне заняття № 8 [5])
 36. Який статистичний показник точності обробки порожнин застосовують при описі процесу обробки математичною моделлю? Доказати необхідність його відносного характеру
 37. Навести схему формування каустики пучка лазерного випромінювання переломлюючими оптичними елементами, її характерні перетини, розміри та властивості.
 38. Навести технологічну та розрахункову схеми для визначення режимів обробки квазістаціонарним імпульсом лазерного випромінювання глибоких отворів циліндричної форми. Яку модель руйнування матеріалу заготовки використано автором J. Steffen?
 39. Навести ряди значущості впливу керуємих факторів на показник точності обробки порожнин (лише для лінійних факторів). Для чого та яким чином можна використовувати ряди значущості? (приклади з етапу підготовки експерименту в лабораторній роботі №2)
 40. Що таке обробка у “дальній зоні”, приклади застосування особливості результатів? Які недоліки цієї схеми?
 41. Навести технологічну та розрахункову схеми для визначення режимів обробки імпульсом лазерного випромінювання з регулярно пічковою структурою Яку модель руйнування матеріалу заготовки використано автором J. Steffen?
 42. Навести порядок дій при проектуванні режимів обробки отворів із заданою точністю експериментальним методом. (лабораторна робота №2)
 43. Що таке глибина різкості (фокусу) оптичних систем із прозорих заломлюючих матеріалів? Яким чином можна впливати на її розміри?
 44. Які можливості мають експериментальні методи проектування режимів лазерної розмірної

- обробки отворів? Які передумови використання методики багатофакторних експериментів? (оцінка можливості ПФЕ при виконанні лабораторної роботи №2)
45. Навести оптичну схему та її габаритний розрахунок для обробки порожнини циліндричного профілю у циліндричній світловій трубці
 46. Які економічні та технічні переваги має лазерна обробка у порівнянні з іншими ЕФХМОМ.
 47. Навести можливі методики експериментальних досліджень процесу лазерної розмірної обробки: об'єктивна необхідність; переваги та недоліки у порівнянні між собою та з використанням теоретичних розрахунків.
 48. Проаналізувати застосовність проєкційних методів обробки у відношенні до розмірів та форми порожнини
 49. Доказати об'єктивну необхідність оптимізаційного методу рішення задачі проєктування режимів обробки реальної технологічної операції.
 50. Які фізичні обмеження на глибину порожнини має одно імпульсна лазерна обробка? Для чого застосовується багато імпульсна обробка із змінними умовами опромінювання?
 51. Навести схеми пристроїв для реалізації методу контурного вирізання для виготовлення профільних та порожнин великих розмірів. (практичне заняття №8 [5])
 52. Які застосовуються методики проєктування багатокритеріальних задач в умовах оптимізації режимів обробки? (етапи підготовки до лабораторної роботи №2)
 53. Як впливають основні параметри процесу обробки на поперечні розміри порожнини?
 54. Які елементи комп'ютерної оптики, які засновані на явищі інтерференції світла, можна використовувати для формування профільної каустики пучка лазерного випромінювання (голографічні елементи та плоскі фокусатори)
 55. Що таке поверхневий коефіцієнт поглинання енергії лазерного випромінювання і від чого залежність його рівень?
 56. Які передумови застосування багатофакторних методів дослідження для аналізу та проєктування процесів лазерної розмірної обробки?
 57. Навести схеми обробки порожнини круглої форми методом трепанації та прилади для їх реалізації. (практичне заняття №8[5])
 58. Яка є взаємозалежність між параметрами процесу, властивостями матеріалу заготовки та результатами обробки?
 59. Обґрунтувати вибір стратегії аналізу значущості впливу керуємих факторів процесу обробки на його кількісні та якісні результати.
 60. Описати метод узагальненої функції бажаності як засіб перетворення багатокритеріальних задач в однокритеріальну. Пояснити призначення часткової і узагальненої функції бажаності: необхідність їх застосування, приклад формування.
 61. Навести алгоритм проєктування технологічних операцій лазерної розмірної обробки.
 62. Навести ряди значущості впливу керуємих факторів на глибину порожнини (лише для лінійних факторів). Для чого та яким чином можна використовувати ряди значущості? (практичне заняття № 11)
 63. Для чого використовують змінні умови обробки (змінні рівні енергії, положення заготовки у каустики пучка) при лазерній обробці порожнини?
 64. Проаналізувати аналітичні та експериментальні методи визначення режимів лазерної обробки порожнини та навести їх переваги та недоліки.
 65. Навести ряди значущості впливу керуємих факторів на поперечні розміри (лише для лінійних факторів). Для чого та яким чином можна використовувати ряди значущості? (практичне заняття № 11).
 66. Який порядок оптимізації багато критеріальної технологічної задачі методом узагальненої функції бажаності
 67. За якими принципами побудовані аналітичні прогнозні моделі процесу лазерної розмірної обробки? Навести порівняльну точність передвіщення результатів.
 68. Чим принциповим відрізняються експериментальні компромісні плани Бродського; розширення та стиснення рівнів факторів? Переваги їх використання.
 69. Навести порядок дій при проєктуванні режимів обробки отворів із заданою конусоподібністю експериментальним методом
 70. Навести приклади використання закону збереження енергії для побудови моделей

розмірних показників процесу лазерної обробки порожнин. (практичне заняття №9, лабораторна робота №1)

71. Описати методику запису форми складно профільних порожнин для формалізації результатів іспитів.
72. Які можливості має методика експериментального проектування режимів лазерної розмірної обробки? Що таке пасивний та активний експерименти?
73. Для обробки яких за розміром та якістю порожнин використовують схеми проєкційного методу обробки, основні співвідношення?
74. 3. Навести оптичну схему та її габаритний розрахунок для обробки порожнин циліндричного профілю у циліндричній світловій трубці.
75. Які методи формування поперек порожнин пучком лазерного випромінювання застосовуються? Зв'язати технологічні схеми обробки з вимогами до оброблювальних отворів.
76. Навести технологічну та розрахункову схеми для визначення режимів обробки квазістаціонарним імпульсом лазерного випромінювання отворів в заготовках із теплопровідних матеріалів. Яку модель руйнування матеріалу заготовки використано автором J. Steffen?..
77. Навести показники якості порожнин після її лазерної обробки. Які особливості профілю характерні для порожнин, оброблених лазерним променем
78. Як залежить модовий склад та кут розходження пучка лазерного випромінювання від форми та розташування дзеркал резонатора?.
79. Навести технологічну та розрахункову схеми для визначення режимів обробки квазістаціонарним імпульсом лазерного випромінювання отворів великої глибини ($l/d \approx 10$). Яку модель руйнування матеріалу заготовки використано автором J. Steffen?
80. Який статистичний показник точності обробки порожнин застосовують при описі процесу обробки (навести прилад оцінювання точності операції в лабораторній роботі № 2).
81. Навести схему формування каустики пучка лазерного випромінювання переломлюючими оптичними елементами, її характерні перетини, розміри та властивості.
82. Доказати на прикладі обробки складно профільних отворів, що оптимізація є об'єктивною необхідністю при проектуванні багато критеріальних задач.
83. Навести ряди значущості впливу керуємих факторів на статистичний показник точності (лише для лінійних факторів). Для чого та яким чином можна використовувати ряди значущості (практичне заняття № 11)
84. Що таке обробка у “дальній зоні”, приклади застосування особливості результатів? Які недоліки цієї схеми?.
85. Навести технологічну та розрахункову схеми для визначення режимів обробки квазістаціонарним імпульсом лазерного випромінювання отворів малої глибини ($l/d \ll 10$). Яку модель руйнування матеріалу заготовки використано автором J. Steffen?.
86. Навести порядок дій при проектуванні режимів обробки отворів із заданою точністю поперечних розмірів експериментальним методом
87. За якими умовами є можливість обробки отворів правильної поперечної форми, які властивості пучка випромінювання визначають цей показник отвору?
88. Навести оптичну схему та її габаритний розрахунок для обробки порожнин циліндричного профілю у циліндричній світловій трубці.
89. Що таке обробка у “ближній зоні”, приклади застосування особливості результатів? Які недоліки цієї схеми?

Перелік тестів до тестового варіанту складання заліку

1. За якими ознаками відносяться методи обробки у групу Електрофізичних та електрохімічних видів обробки (ЕФХМО)?
 - A. за нематеріальністю інструменту
 - B. за властивостями матеріалу заготовки, яка обробляється
 - C. за досягнутим рівнем якості обробленого елементу заготовки
 - D. за несиловим шляхом руйнування матеріалу заготовки.
2. Чим виділяється обробка заготовок лазерним променем від інших методів ЕФХМО?
 - A. можливістю формування некруглих отворів
 - B. обробка виконується без механічного навантаження заготовки
 - C. можливість обробки надтвердих матеріалів
 - D. можливість обробки любых матеріалів.
3. За яким показником оброблених елементів лазерна обробка відрізняється від інших методів ЕФХМО?
 - A. найбільший розмір обробляемого елементу
 - B. найглибший елемент, що обробляється
 - C. найточніші розмірні результати оброблених елементів
 - D. найбільша відносна глибина обробленого елементу (аспектна глибина).
4. Яким чином витрачається енергія випромінювання при направленні лазерного променя на поверхню заготовки?
 - A. поглинається в матеріалі в поверхневому його шарі
 - B. відбивається від поверхні заготовки
 - C. проходить наскрізь тіла заготовки
 - D. відбивається, поглинається та проходить через заготовку.
5. Від яких обставин залежить баланс енергії в зоні опромінення (доля поглиненої, відбитої та, що пройшла через заготовку)?
 - A. від рівня енергії в промені
 - B. від властивостей матеріалу заготовки
 - C. від характеристики поверхні заготовки
 - D. від поєднання довжини хвилі випромінювання з властивостями заготовки та умов опромінення.
6. Яким чином можливий найпростіший вплив на баланс енергії в зоні опромінення поверхні заготовки?
 - A. зміненням матеріалу заготовки
 - B. застосуванням лазера з іншими параметрами променя
 - C. фарбуванням поверхні заготовки
 - D. нагріванням заготовки або її поверхні.
7. На що витрачається поглинута частина теплової енергії, що утворилася в заготовці в результаті її опромінення?
 - A. на руйнування матеріалу заготовки
 - B. на розмягчення матеріалу заготовки
 - C. на покращення властивостей матеріалу заготовки та її поверхні
 - D. на послідовність явищ в матеріалі заготовки.
8. Яким чином можна керувати характером та видом формування оброблювальної порожнини внаслідок теплового руйнування матеріалу заготовки в зоні дії теплового джерела, створеного в результаті лазерного опромінення?
 - A. тривалістю опромінення
 - B. інтенсивністю в зоні опромінення
 - C. умовами розташування променя та заготовки
 - D. відповідним поєднанням властивостей випромінювання та матеріалу заготовки.
9. Що характеризує коефіцієнт поглинання α Бугера – Ламберта?
 - A. кількість поглинутої енергії матеріалом заготовки від дії імпульсу

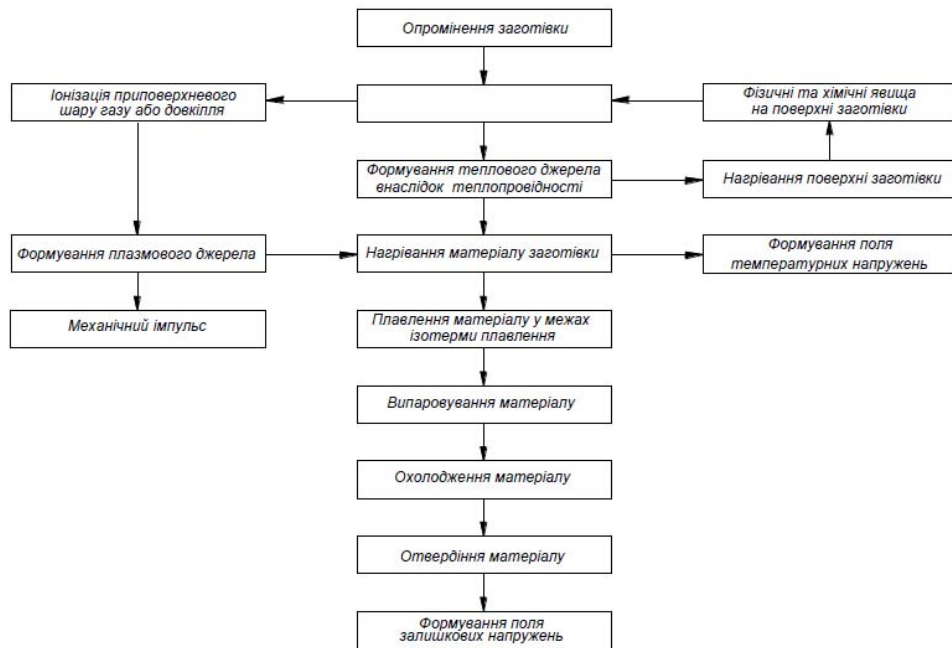
випромінювання

В. розподіл потужності випромінювання на поверхні заготовки

С. розмір попереку порожнини, що обробляється

Д. глибина порожнини, що обробляється.

10. Який етап теплового процесу, що реалізується під час опромінення заготовки, пропущено на схемі?



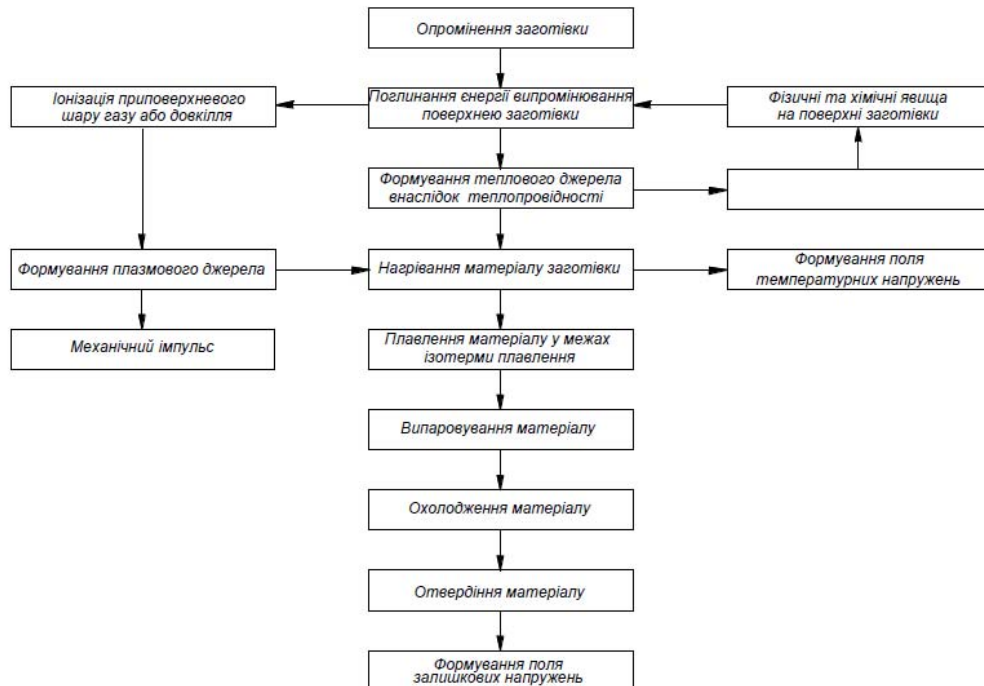
А. випаровування матеріалу заготовки

В. формування поля температурних напружень

С. нагрівання матеріалу заготовки

Д. поглинання енергії випромінювання поверхнею заготовки.

11. Який етап теплового процесу, що реалізується під час опромінення заготовки, пропущено на схемі?



А. випаровування матеріалу заготовки

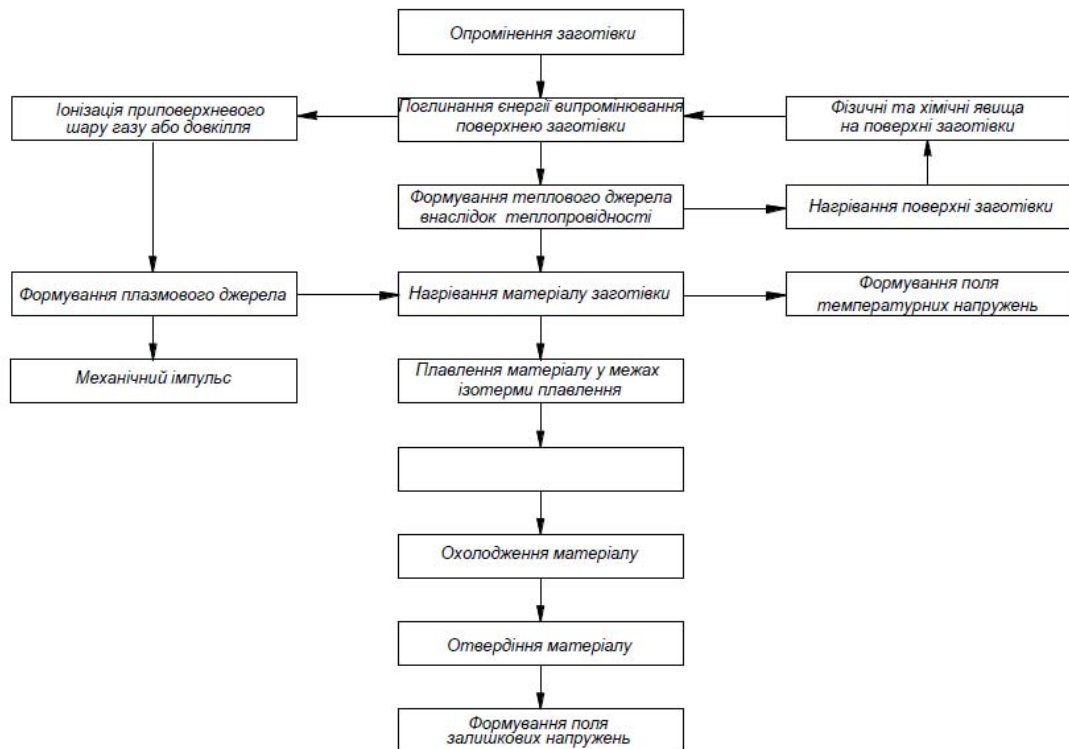
В. формування поля температурних напружень

С. нагрівання матеріалу заготовки

Д. поглинання енергії випромінювання поверхнею заготовки.

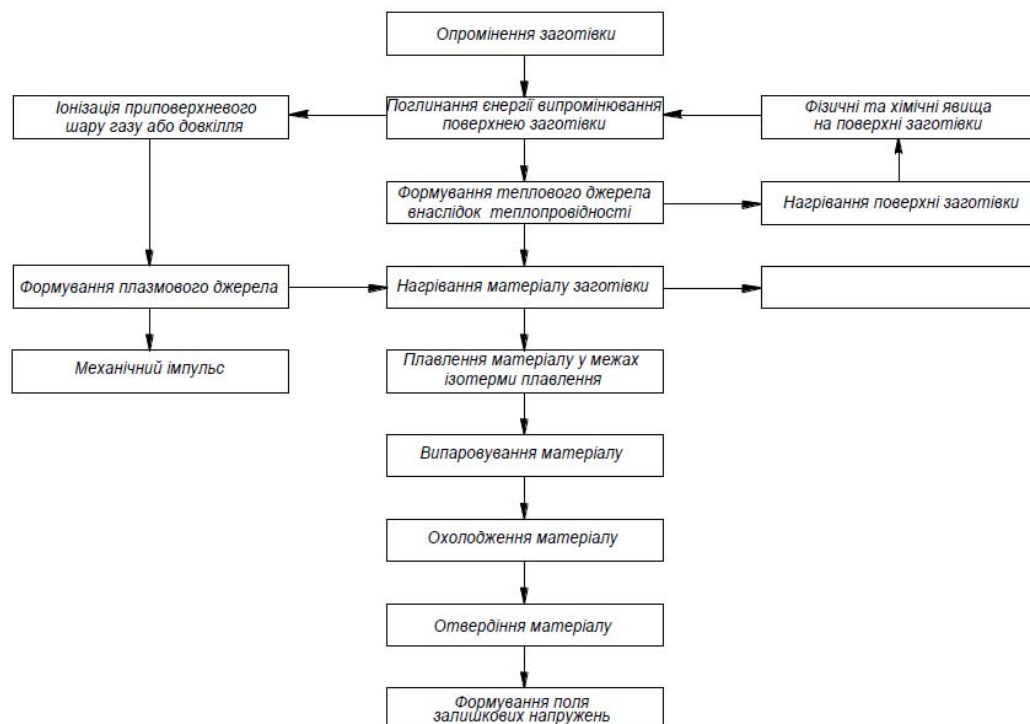
12. Який етап теплового процесу, що реалізується під час опромінення заготовки, пропущене на схемі?

- A. поглинання енергії випромінювання поверхнею заготовки
- B. випаровування матеріалу заготовки
- C. формування поля температурних напружень
- D. нагрівання поверхні заготовки.



13. Який етап теплового процесу, що реалізується під час опромінення заготовки, пропущене на схемі?

- A. нагрівання поверхні заготовки
- B. формування поля температурних напружень
- C. поглинання енергії випромінювання поверхнею заготовки
- D. випаровування матеріалу заготовки.



14. Який рівень інтенсивності лазерного променя на поверхні заготовки достатній для руйнування заготовки із металу?
- A. $I_p \sim 10^3 \text{ Вт/см}^2$
 - B. $I_p \sim 10^4 \text{ Вт/см}^2$
 - C. $I_p \sim 100 \text{ Вт/см}^2$
 - D. $I_p > 10^5 \text{ Вт/см}^2$.
15. Які технічні та ситуативні данні повинні враховуватися технологом при проектуванні технологічної операції лазерної розмірної обробки?
- A. технічне завдання (ТЗ) на операцію (характеристики оброблювального елементу та вимоги до його якості)
 - B. різноманітні властивості матеріалу заготовки (механічні, теплофізичні та хімічні)
 - C. розмірні характеристики заготовки, її об'ємна форма та якість стану поверхні, де буде оброблюватися елемент
 - D. ТЗ, природні властивості заготовки та її матеріалу.
16. Яким представляється перший етап процедури проектування технологічної операції?
- A. виконати експериментальні спроби виготовити заданий елемент заготовки за різними методами обробки
 - B. виконати пошук прикладів виконання подібних операцій за літературними даними
 - C. прийняти рішення виконання операції на тому обладнанні, яке є в наявності на виробництві
 - D. проаналізувати технічні та економічні показники конкурентних методів обробки.
17. Який етап проектування технологічної операції не є обов'язковим, а застосовується лише в екстраординарних випадках?
- A. перший – вибір методу обробки елементу заданих параметрів у обраній заготовці
 - B. шостий – обрання методів налаштування лазерної технологічної установки
 - C. восьмий – оцінка економічної ефективності розробленої технологічної операції
 - D. сьомий – розробка додаткових засобів та методів вдосконалення процесу обробки.
18. До якої кількості технологічних схем формування елементів розмірної (прецизійної) обробки можна звести усі схеми, що застосовуються у практиці?
- A. до безкінечної кількості
 - B. до однієї
 - C. до двох
 - D. до трьох.
19. За якими шляхами ”готують” лазерний промінь для виконання ним функції заготовки обробляючого інструмента технологічної операції?
- A. зміненням компоновки лазерної технологічної установки і технологічного модуля
 - B. застосуванням зовнішньої оптичної системи для надання променю потрібних властивостей
 - C. обранням відповідного типу лазера з наближеними до потреб характеристиками променя
 - D. налаштуванням резонатора лазера (його довжини та видом дзеркал) для надання променю просторових (розмірних та кутових) характеристик, потрібних для його перетворення в робочий інструмент.
20. В яких випадках використовується обробка порожнин “в ближній зоні”?
- A. для обробки порожнин складного попереку та великої глибини
 - B. для формування точних за розмірами, але простих за формою попереку порожнин
 - C. для формування порожнин циліндричної форми
 - D. в разі потреби виготовлення неглибоких порожнин точних за розмірами та правильних за поперечком простих порожнин (отворів) та складних за формою (прямокутні отвори та некруглої форми).
21. За якою технологічною схемою реалізується обробка “в ближній зоні”?

- A. за своєю схемою
 - B. за схемою контурного вирізання профілю порожнини (схема 2)
 - C. за комбінованою схемою (схема 3)
 - D. за схемою 1 з профілюванням попереку променя на рівні поверхні заготовки.
22. Які основні технологічні завдання вирішуються у активній проекційній схемі обробки у “ближній зоні”?
- A. скорочується шлях променя до заготовки
 - B. створюється можливість оперативного змінення профілю порожнини, яку треба обробляти
 - C. є можливість зменшувати кут розходження лазерного променя виключенням дифракційних явищ на вихідному дзеркалі резонатора
 - D. зменшуються витрати енергії накачування активного середовища внаслідок профілювання попереку променя в резонаторі і відсутності обрізання зайвих частин попереку.
23. Якими шляхами можна збільшити розміри попереку круглого отвору, який може бути оброблений на серійній (звичайній) лазерній установці?
- A. збільшенням попереку зони опромінення оптичними методами
 - B. трепанацією вздовж контуру порожнини перетворенням променя у пустотілий інструмент (без відносного переміщення останнього та заготовки)
 - C. скануванням променя вздовж контуру порожнини шляхом програмного переміщення столу із заготовкою або оптичної системи
 - D. використанням пристроїв додаткового переміщення променя вздовж контуру отвору (сканувальні системи).
24. Яким чином залежить повздовжній профіль ненаскрізної порожнини (отвору) від відносного положення каустики променя та заготовки?
- A. профіль отвору копіює профіль каустики променя
 - B. профіль отвору не залежить від положення каустики та заготовки в вздовж осі променя
 - C. профіль приймає форму прямого конусу при заглибленні променя в тіло заготовки та зворотній при розташуванні її поверхні за перетяжкою каустики променя
 - D. профіль отвору, починаючи з далеких зміщень поверхні заготовки з рівня перетяжки в обидві сторони, має пряму кінчну форму, яка переходить в циліндричну при приближенні поверхні до перетяжки, але найглибше утворюються отвори при деякому її заглибленні (на 2 – 3% від фокусної відстані лінзи) при формуванні у цьому.
25. За яким методом обробки досягається циліндричний профіль отвору (порожнини)?
- A. в разі обробки тонких заготовок фокусну відстань збільшують до формування у каустики подвійної довжини Релея більшої, ніж товщина заготовки
 - B. доопрацюванням отвору шляхом його калібрування пуансонами
 - C. шліфуванням порожнини вільним абразивом для зменшення різниці між входом в отвір та виходом з нього
 - D. застосуванням схеми опромінення каустикою циліндричної форми, розташовуючи фокусуючу лінзу на шляху променя на відстані $l = D/\theta$ від випромінювача.
26. Який метод визначення режиму лазерної розмірної обробки Вами вважаються кращими (точнішими в результатах, легшими та швидшими в реалізації)?
- A. аналітичний з використанням фізичних залежностей результатів обробки від набору рівнів параметрів обробки
 - B. експериментальний, в якому використовуються табличні або графічні залежності результатів обробки від рівнів параметрів обробки
 - C. комбінований, за яким користуються методом b. для визначення режиму обробки близького до заданого елементу за його розмірними і іншими показниками та уточнення цього
 - D. режиму до конкретних вимог ТЗ за методом а

- Е. експериментальний метод з математичним моделюванням процесу за зовнішніми проявленнями його течії для побудови явних моделей для кожного показника операції.

27. Який загально відомий фізичний закон(и) використовують майже всі розробники аналітичних прогнозних моделей обробки лазерним променем розмірних елементів в заготовці?

- А. феноменологічну модель утворення отвору променем з каустикою конічного профілю
- В. закон всесвітнього тяжіння
- С. закономірності теплопровідності твердих тіл
- Д. закон збереження енергії.

28. За рахунок яких поступок та зусиль від лазерних технологів вченому Steffen'у в 1979 р вдалося розробити діючу до сих пір методику проектування режимів лазерної розмірної обробки металів?

- А. спрощенням теплової моделі руйнування металів надкритичними рівнями інтенсивності в зоні опромінення
- В. урахуванням рівня поглинання енергії випромінювання поверхнею заготовки
- С. умовною незмінністю теплофізичних характеристик металів від температури
- Д. виконанням умови стабілізації часового режиму подачі енергії променя в зону обробки.

29. За яким алгоритмом (порядком) відбувається проектування режимів лазерної обробки за Steffen'ом?

- А. визначаються рівні параметрів лазерного опромінення у наступному порядку: інтенсивність в зоні опромінення I_p ; імпульсна енергія E ; тривалість імпульсу τ ; діаметр променя на поверхні заготовки d_0 ; кут розбіжності променя θ ; фокусна відстань оптичного перетворюючого елементу F ; збільшення телескопу Галілея Γ , та величина Δ його розладу
- В. імпульсна енергія E ; тривалість імпульсу τ ; діаметр променя на поверхні заготовки d_0 ; кут розбіжності променя θ ; інтенсивність в зоні опромінення I_p ; тривалість імпульсу τ ; діаметр променя на поверхні заготовки d_0 ; кут розбіжності променя θ ; фокусна відстань оптичного перетворюючого елементу F ; збільшення телескопу Галілея Γ , та величина Δ його розладу
- С. діаметр променя на поверхні заготовки d_0 ; кут розбіжності променя θ ; інтенсивність в зоні опромінення I_p ; імпульсна енергія E ; тривалість імпульсу τ ; діаметр променя на поверхні заготовки d_0 ; кут розбіжності променя θ ; фокусна відстань оптичного перетворюючого елементу F ; збільшення телескопу Галілея Γ , та величина Δ його розладу
- Д. тривалість імпульсу τ ; інтенсивність в зоні опромінення I_p ; імпульсна енергія E ; діаметр променя на поверхні заготовки d_0 ; кут розбіжності променя θ ; фокусна відстань оптичного перетворюючого елементу F ; збільшення телескопу Галілея Γ , та величина Δ його розладу.

30. Яким чином в рішеннях Steffen'а задач проектування режимів обробки враховується теплопровідність металевих заготовок та нейтралізується її вплив на повздовжню форму обробленого отвору?

- А. її впливом нехтують
- В. збільшують інтенсивність в зоні опромінення
- С. використовують багато імпульсну обробку отворів (порожнин)
- Д. скороченням тривалістю опромінення.

31. Чому для проектування складних технологічних операцій, незважаючи на вдалість методики проектування Steffen'а, пропонується використання експериментального методу проектування?

- А. недостатня точність проектування в зв'язку з деякими спрощеннями процесу руйнування матеріалу заготовки
- В. неможливість проектування режимів обробки заготовок із неметалів
- С. деякі умови функціонування методики Steffen'а, прийняті технологами з

лазерної обробки, у практиці апаратно важко або не реалізуємими зовсім

- D. в методиці Steffen'a враховуються лише розмірні показники оброблювальних елементів, показники якості та техніко-економічні не прийняті до уваги.

32. Чим принципово відрізняються методи класичного (одно факторного) експерименту та повно факторного експериментування (ПФЕ)?

- A. перший – класичний експеримент – не має практичного алгоритму для досягнення висунутої перед ним мети
- B. перший – при моделюванні в багато координатному просторі має нескінчену тривалість
- C. в результаті виконання моделювання за класичною методикою отримується багата кількість одно факторних моделей, які при об'єднанні їх в модель процесу, втрачають зрозумілість та якість
- D. кожний етап досліджень за методикою ПФЕ контролюється статистичними методами, тому фейкові данні блокуються та алгоритм виправляється, тобто тупикові ситуації виключені

33. Чому експериментальне дослідження складних процесів, які описуються багатьма показниками, в ПФЕ виконуються в два етапи: передпланування досліджень та їх виконання?

- A. що б попередньо (приблизно) виявити можливості методики
- B. для отримання частки складових загальної форми моделі процесу обробки
- C. для перевірки передумов для виконання ПФЕ
- D. для побудови за спрощеними планами рангових діаграм по впливу факторів, якими керують процесом, на його вихідні показники.

34. Якщо головною вимогою до ПФЕ є безумовна участь усіх факторів в експерименті, що робить його безкінечним за тривалістю ($N = n^k$) тому, що кількість факторів k зазвичай перевищує 20, то яким шляхом ця проблема нейтралізується?

- A. використовують методику ПФЕ в простих задачах (одно- або двох- факторні лінійні задачі)
- B. шляхом об'єднання декількох елементарних факторів у складні та варіюванням останніх
- C. зневагою чинників, які на думку дослідників, слабо впливають на процес, і обмеження факторного простору тими, які легко варіюються
- D. виконанням поставленої умови можливе обмеження кількості керованих чинників і фіксації усіх інших на постійних на час експерименту рівнях, щоб нейтралізувати їх неочікуваний вплив на процес.

35. Що відрізняє експериментальні плани Бродського за їх можливостями, універсальністю та легкістю планування за ними, тобто організації експерименту?

- A. можливістю бути застосованими для дослідження процесів будь-якої складності
- B. легкістю формувати плани в матеріальному (з розмірним складом рівнів факторів) вигляді
- C. спрощена процедура статистичного аналізу експериментальних даних
- D. можливість складати плани із факторів різного ступеня впливу на показники процесу допускаючи несиметричні інтервали їх варіювання.

36. Яка інформація про процес, який буде досліджуватися, використовується при складанні плану експерименту, в тому числі при визначенні його роздільній здатності та кількості факторів, якими він керується?

- A. результати попередніх або виконаних експериментів за класичною методикою
- B. розрахунки прогнозних даних за аналітичними моделями, які описують досліджуєми процес
- C. випадковим обранням рівнів факторів та їх кількості
- D. дані рангових діаграм для показників операції, заданих в ТЗ на останню.

37. В якому порядку розташовані фактори, якими керують процесом обробки, за впливом на діаметр отвору d ?

- A. δ , Матер, F, Дд, τ , E, ΔF

- B. $F, \delta, \Delta F, \tau, D_d, \text{Матер}, E$
- C. $F, \Delta F, D_d, \text{Матер}, \delta, E, \tau$
- D. $E, \Delta F, F, \delta, \text{Матер}, D_d, \tau$

38. В якому порядку розташовані фактори, якими керують процесом обробки, за впливом на глибину лунки (ненаскрізного отвору) h ?

- A. $F, E, N, \Delta F, \text{Матер}, D_d, \tau$
- B. $E, N, \Delta F, F, \text{Матер}, D_d, \tau$
- C. $\Delta F, F, N, E, \text{Матер}, D_d, \tau$
- D. $F, \Delta F, E, \text{Матер}, D_d, \tau$

39. В якому порядку розташовані фактори, якими керують процесом обробки, за впливом на повздожню форму лунки, наприклад, конусоподібністю k ?

- A. $\Delta F, D_d, \theta, E, F$
- B. $F, \theta, \Delta F, D_d, E$
- C. $\Delta F, E, F, D_d, \theta$
- D. $F, \Delta F, \theta, E, D_d$

40. За яким порядком повинна виконуватися процедура визначення оптимальних режимів технологічної операції лазерної обробки отворів в разі необхідності забезпечити заданий рівень лише одного їх показника (однокритеріальна задача) експериментальним методом на базі ПФЕ?

- A. постулювання виду моделі, обмежуючи кількість взаємодій здоровим глуздом; перевірка аналітичним або експериментальним шляхом гарантію створення отвору запланованого виду (отвору чи лунки) у найбільш критичних експериментальних точках; реалізація експерименту з виконанням перевірок відповідних передумов та статистичною обробкою отриманих фактичних даних; із отриманої математичної моделі виду $Y = f(X_1, X_2 \dots X_n)$ визначають сполучення рівнів факторів, яке необхідне для досягнення показника заданого рівня, тобто прирівнюючи $Y = Y_{\text{зад}}$, тим чи іншим методом
- B. формування координат та меж їх змінювання в експерименті на базі аналізу рангової діаграми для показника, який встановлено у ТЗ; встановлення роздільної здатності моделі для обраних керуючих факторів; постулювання виду моделі, обмежуючи кількість взаємодій здоровим глуздом; перевірка аналітичним або експериментальним шляхом гарантію створення отвору запланованого виду (отвору чи лунки) та розміру у деяких експериментальних точках
- C. постулювання виду моделі, обрання плану експерименту та його реалізація з виконанням перевірок відповідних передумов та статистичною обробкою отриманих фактичних даних; із отриманої математичної моделі виду $Y = f(X_1, X_2 \dots X_n)$ визначають сполучення рівнів факторів, яке необхідне для досягнення показника заданого рівня, тобто прирівнюючи $Y = Y_{\text{зад}}$, тим чи іншим методом
- D. формування координат та меж їх змінювання в експерименті на базі аналізу рангової діаграми для показника, який встановлено у ТЗ; встановлення роздільної здатності моделі для обраних керуючих факторів; постулювання виду моделі, обмежуючи кількість взаємодій здоровим глуздом; перевірка аналітичним або експериментальним шляхом гарантію створення отвору запланованого виду (отвору чи лунки) у найбільш критичних експериментальних точках; обрання плану експерименту та його реалізація з виконанням перевірок відповідних передумов та статистичною обробкою отриманих фактичних даних; із отриманої математичної моделі виду $Y = f(X_1, X_2 \dots X_n)$ визначають сполучення рівнів факторів, яке необхідне для досягнення показника заданого рівня, тобто прирівнюючи $Y = Y_{\text{зад}}$, тим чи іншим методом.

41. За яким порядком повинна виконуватися процедура визначення оптимальних режимів технологічної операції лазерної обробки отворів в разі необхідності забезпечити заданий рівень

декількох їх показників (багатокритеріальна задача) експериментальним методом на базі ПФЕ?

- А. об'єднання окремих показників в єдиний показник, визначення комплексу факторів, які впливовіші для кожного з них та реалізація експерименту з визначенням залежності загального показника від обраного переліку факторів, якими керують процесом обробки; з одержаної таким чином моделі процесу методами аналітичної геометрії визначають потрібні рівні керуючих факторів
- В. моделювання процесу обробки відносно показників, величина яких обмежена ТЗ на операцію за алгоритмом моделювання однокритеріальної задачі з обранням в якості керуючих факторів тих з відповідних рангових діаграм, які найвпливовіші для кожного з нормованих показників; використовуючи кожен модель окремо, визначають набори керуючих факторів для кожного з показників з наступним об'єднанням окремих груп режимів в один, коригуючи їх протилежні впливи на показники якимось чином
- С. для нормованих показників отворів в ТЗ на операцію обирають свій шлях досягнення її заданого рівня, в тому числі іншими методами обробки або доопрацювання оброблених отворів, тобто розбиваючи операцію на декілька складових
- Д. моделювання процесу обробки відносно показників, величина яких обмежена ТЗ на операцію за алгоритмом моделювання однокритеріальної задачі з обранням в якості керуючих факторів тих з відповідних рангових діаграм, які найвпливовіші для кожного з нормованих показників; одержані таким чином моделі процесу об'єднуються в єдину математичну модель за обраною методикою оптимізації (наприклад, з узагальненою функцією бажаності, або через штрафні функції, або з використанням множників Лагранжа); методами аналітичної геометрії з єдиної моделі процесу визначають потрібні рівні керуючих факторів.

42. Що мається на увазі в понятті якість обробленого отвору після лазерної обробки?

- А. обмеження поля розсіювання розміру отворів полем допуску на нього після обробки
- В. зовнішній вигляд отворів та місць їх розташування на заготовці з оцінкою відсутності налипання матеріалу у входу в його порожнину та виплесків застиглого матеріалу з вихідної частини отвору
- С. відповідність форми отворів (їх попереку) геометричним їх представленням (кругле, багатогранне, ін.)
- Д. комплекс показників оцінюючих точність лінійних та кутових характеристик, відповідність попереку та повздовжньої форми заданій, обмежену шорсткість стінок отвору, та наявність дроссу та ґрату на його кромках.

43. За яким показником повинна порівнюватися точність розмірів отворів, оброблених в різних експериментальних точках плану ПФЕ?

- А. за величиною поля розсіювання розмірів попереку отворів при багатократній повторності операції обробки в кожній точці експериментального плану ПФЕ
- В. за вірогідністю розташування розмірів окремих отворів на лінійній шкалі в межах поля їх розсіювання
- С. за величиною різниці між найбільшим та найменшим з розмірів отворів в обробленій партії виробів
- Д. за величиною відносного розсіювання розмірів в обробленій партії виробів (коефіцієнта варіації розміру vd), що дозволяє поле розсіювання розмірів порівнювати з номінальним (чи осередненим) розміром.

44. У чому полягають відомі принципи рішення багатокритеріальних задач оптимізації об'єктів?

- А. у пошуку координат в факторному полі екстремальних значень моделей окремих нормованих показників з наступним їх усередненням, що може приблизити проектувальника до загального рішення задачі оптимізації
- В. в розподілі процесу виготовлення заданого елемента виробу на різні операції може і інші методи обробки або доопрацювання елемента

- C. пошук режиму обробки заданого елементу як однокритеріальну задачу, наприклад, відносно розмірних характеристик елементу, що обробляється, а вимоги отримання інших показників операції забезпечуються спеціальними видами організації операції, наприклад, адаптивною формою або застосуванням додаткового технологічного оснащення
- D. всілякими зусиллями перевести задачу в однокритеріальну, об'єднуючи показники або математичні моделі їх залежностей від керуючих факторів в єдину функцію, пошук координат екстремальних значень показників може бути виконано за відомими алгоритмами, наприклад, Хука – Дживса або ін.

45. Яким чином можна об'єднати показники різносторонніх характеристик оброблених елементів в єдиний, досягнутий рівень якого буде гарантувати отримання критеріальних значень для усіх показників з ТЗ

- A. якщо різносторонні характеристики елементу мають одну розмірність, наприклад, мкм, то вони можуть бути об'єднаними в єдиний показник через геометричну залежність між ними, як це зроблено в моделі збільшення об'єму лунки при її формуванні лазерним променем через світловий конус, який пов'язує глибину та радіус лунки (феноменологічна модель Вейко, Лібенсона)
- B. різнорозмірні показники можна об'єднати в єдину арифметичну функцію, що мінімізується при оптимізації, перетворюючи їх в функціонали нев'язки між фактичним значенням показника та його критерієм як їх різницю, зведену в квадрат для виключення від'ємних значень
- C. різнорозмірні показники можна об'єднати в єдину арифметичну функцію, що мінімізується при оптимізації, перетворюючи їх в коефіцієнти варіації фактичних значень показників від їх критеріїв, зведені в квадрат для виключення від'ємних значень
- D. створюючи заміну комплексу розмірних показників обробленого елементу на систему оцінок їх наближеності до заданого рівня кожного з них (наприклад, з приватних функцій бажаності g_i) з обмеженням допустимих їх значень та з подальшим об'єднанням у узагальнену функцію бажаності **D** через функцію, що дозволяє враховувати найменші, але ще допустимі, значення приватних бажаностей.

46. Проаналізуйте умови досягнення допустимих та високих рівнів безрозмірної функції приватної бажаності $g_i = \exp(-\exp(-y'_i))$ для випадків межових значень безрозмірної функції $y'_i > 0$, пов'язаної з рівнями показника y_i , які відповідають його критерію в ТЗ.

- A. для значення безрозмірного показника $y'_i < 0$
- B. для значення безрозмірного показника $y'_i = 0$
- C. для значення безрозмірного показника $y'_i << 0$
- D. для значення безрозмірного показника $y'_i > 0$.

47. З наведеної табл. 5.14 оберіть хоча по одному режиму (№ досл.), при реалізації операції виготовлення отворів для голок в ін'єкційних шприцах, при якому (яких) оброблений отвір буде мати розмірні показники (діаметр отвору та його точність, наявність конічного входу та достатню для ТЗ продуктивність операції, достатньо малий рівень машинного часу $T_{маш}$).

- A. **№№ 4 та 20** для голки діаметром 0,4 мм; **№№ 11 та 26** для голки діаметром 0,6 мм; **№ 17** для голки діаметром 0,8 мм
- B. **№№ 15 та 26** для голки діаметром 0,4 мм; **№№ 13 та 24** для голки діаметром 0,6 мм; **№ 17** для голки діаметром 0,8 мм
- C. **№№ 1 та 18** для голки діаметром 0,4 мм; **№№ 3 та 15** для голки діаметром 0,6 мм; **№ 10** для голки діаметром 0,8 мм
- D. **№№ 8 та 16** для голки діаметром 0,4 мм; **№№ 7, 20, 22, 23, 25 та 27** для голки діаметром 0,6 мм; **немає** для голки діаметром 0,8 мм

48. Який алгоритм вимагає процедура оптимізації режимів обробки в технологічній операції при багато критеріальних вимогах до її результатів?

- A. порядок 1:

- i. об'єднання показників із ТЗ, на які в ТЗ встановлено граничні критерії, в узагальнений за тим чи іншим способом;
 - ii. моделювання процесу обробки відносно узагальненого показника;
 - iii. виконується статистичний аналіз експерименту за величинами узагальненого показника, для яких в разі позитивних результатів аналізу будується математична модель;
 - iv. методами аналітичної геометрії досліджується модель та виконується пошук координат екстремальних точок або стаціонарних для обраних рівнів узагальненого показника;
 - v. одержані координати в факторному просторі складають комплекси режимів реалізації операції
- В. порядок 2:
- i. моделювання процесу обробки відносно кожного з показників, на які в ТЗ встановлено граничні критерії;
 - ii. виконується статистичний аналіз експерименту за величинами, для яких в разі позитивних результатів аналізу будуються математичні моделі;
 - iii. об'єднання математичних моделей в єдину;
 - iv. методами аналітичної геометрії досліджується узагальнена модель та виконується пошук координат екстремальних точок або стаціонарних для обраних рівнів D_i ;
 - v. одержані координати в факторному просторі складають комплекси режимів реалізації операції
- С. порядок 3:
- i. моделювання процесу обробки відносно кожного з показників, на які в ТЗ встановлено граничні критерії;
 - ii. за даними експерименту в кожній точці експериментального плану підраховують окремі бажаності та їх середні значення за u повторністями $\bar{g}_{iu}$;
 - iii. в кожній точці експериментального плану підраховуються значення узагальненої функції бажаності D_i ;
 - iv. в якості режимів обробки обираються умови експерименту в тих точках плану, де значення узагальненої функції бажаності перевищують нижній допустимий рівень, тобто 0,4
- Д. порядок 4
- i. моделювання процесу обробки відносно кожного з показників, на які в ТЗ встановлено граничні критерії;
 - ii. за даними експерименту в кожній точці експериментального плану підраховують окремі бажаності та їх середні значення за u повторністями $\bar{g}_{iu}$;
 - iii. в кожній точці експериментального плану підраховуються значення узагальненої функції бажаності D_i ;
 - iv. виконується статистичний аналіз експерименту за величинами D_i , для яких в разі позитивних результатів аналізу будується математична модель;
 - v. методами аналітичної геометрії досліджується узагальнена модель та виконується пошук координат екстремальних точок або стаціонарних для обраних рівнів D_i ;

- ві. одержані координати в факторному просторі складають комплекси режимів реалізації операції.

Результати проектування технологічної операції обробки отворів з конічною вхідною ділянкою ліаметрами 0.4: 0.6 та 0.8 мм

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	$1,81 \cdot 10^{-23}$	$1,3 \cdot 10^{-3010}$	$5,4 \cdot 10^{-477}$	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	$1,6 \cdot 10^{-130}$	$1,0 \cdot 10^{-887}$	0,4590	$1,1 \cdot 10^{-6307}$	$1,0 \cdot 10^{-887}$	0,6398	$2,3 \cdot 10^{-9783}$	$1,0 \cdot 10^{-687}$	$1,6 \cdot 10^{-248}$	$6,5 \cdot 10^{-879}$	$8 \cdot 10^{-1041}$
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	$9,1 \cdot 10^{-413}$	$7,5 \cdot 10^{-2133}$	$9,4 \cdot 10^{-638}$	$3,5 \cdot 10^{-842}$	10^{-188}
4	1001	429	22	0,0006	1,000	0,9818	0,3642	$1,6 \cdot 10^{-130}$	0,9818	0,6577	$1,2 \cdot 10^{-7651}$	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	$4,2 \cdot 10^{-3282}$	$5,4 \cdot 10^{-477}$	0,4229	$3,5 \cdot 10^{-9083}$	$5,4 \cdot 10^{-477}$	$1,3 \cdot 10^{-340}$	$1,10^{-3741}$	$2 \cdot 10^{-413}$
6	971	455	22	0,0039	0,7332	0,9818	0,4590	$3,7 \cdot 10^{-33}$	0,9818	0,6366	$6,7 \cdot 10^{-8707}$	0,9818	0,1716	$3,7 \cdot 10^{-17}$	$1,5 \cdot 10^{-201}$
7	910	681	24	0,0495	$4,2 \cdot 10^{-282}$	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	$5,5 \cdot 10^{-4}$	$3,8 \cdot 10^{-168}$
9	1301	574	40	$7,9 \cdot 10^{-88}$	0,0310	$3,5 \cdot 10^{-83}$	$1,29 \cdot 10^{-9}$	0,0925	$3,5 \cdot 10^{-83}$	0,0642	$6,0 \cdot 10^{-788}$	$3,5 \cdot 10^{-83}$	$2,3 \cdot 10^{-44}$	$1,7 \cdot 10^{-23}$	$4,6 \cdot 10^{-284}$
10	761	269	27	0,5081	$5,95 \cdot 10^{-33}$	0,8000	0,6323	$6,1 \cdot 10^{-2821}$	0,8000	0,26210	$4,8 \cdot 10^{-8873}$	0,8000	$3 \cdot 10^{-12}$	$2,8 \cdot 10^{-34}$	$2 \cdot 10^{-289}$
11	1098	537	28	$2,81 \cdot 10^{-9}$	0,3241	0,6922	0,0696	0,0003	0,6922	0,6863	$5,7 \cdot 10^{-2789}$	0,6922	$8,6 \cdot 10^{-4}$	0,0244	$2,4 \cdot 10^{-919}$
12	827	248	27	0,2698	$1,2 \cdot 10^{-69}$	0,8000	0,6732	$3,5 \cdot 10^{-1014}$	0,8000	0,4247	$7,5 \cdot 10^{-9833}$	0,8000	$6,7 \cdot 10^{-24}$	$2,7 \cdot 10^{-338}$	$1,4 \cdot 10^{-1332}$
13	1133	722	35	$7,35 \cdot 10^{-13}$	$1,3 \cdot 10^{-4011}$	$5,1 \cdot 10^{-8}$	0,0228	0,5148	$5,1 \cdot 10^{-8}$	0,5995	$1,42 \cdot 10^{-8}$	$5,1 \cdot 10^{-8}$	$4 \cdot 10^{-13307}$	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	$9,2 \cdot 10^{-8121}$	0,9818	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-238}$	$7,7 \cdot 10^{-1331}$
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	$5,8 \cdot 10^{-308}$
16	698	444	12	0,7096	0,7441	0,9998	0,5583	$1,88 \cdot 10^{-9}$	0,9998	0,6398	$1,2 \cdot 10^{-4831}$	0,9998	0,8084	$5 \cdot 10^{-27}$	$6,9 \cdot 10^{-1343}$
17	1157	772	27	$3,76 \cdot 10^{-18}$	$1,1 \cdot 10^{-6307}$	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	$2,3 \cdot 10^{-9083}$	0,9999	$9,4 \cdot 10^{-30}$	$2,4 \cdot 10^{-1483}$	$9 \cdot 10^{-1333}$
19	1060	442	29	$1,42 \cdot 10^{-8}$	0,7453	0,5452	0,1616	$6,6 \cdot 10^{-83}$	0,5452	0,6819	$2,3 \cdot 10^{-4711}$	0,5452	0,0084	$4,1 \cdot 10^{-29}$	$1,6 \cdot 10^{-1388}$
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	$6,5 \cdot 10^{-8}$	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	$3,2 \cdot 10^{-38}$
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	$5,8 \cdot 10^{-844}$
25	848	649	24	0,1987	$1,81 \cdot 10^{-12}$	0,9514	0,6842	0,6823	0,9514	0,4686	$3,8 \cdot 10^{-87}$	0,9514	$7,2 \cdot 10^{-13}$	0,7632	$5,6 \cdot 10^{-88}$
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	$1,1 \cdot 10^{-93}$