

Лазерна розмірна обробка

Розділ 4

Презентація 8

електронний дидактичний демонстраційний
матеріал

супроводження дисципліни

Рекомендовано Методичною радою НТУУ «КПІ»
(протокол №9 від "21" ТРАВНЯ 2015 р.)

Автор: проф. Котляров В.П.

Відповідальний редактор електронного посібника
доц. Зоренко О.В. (ВПІ НТУУ «КПІ»)

Розділ 4. Точність розмірних результатів ТО ЛРО

Вступ	През. №8, сл.№3
4.1. Аналіз складу сумарної погрішності ТО ЛРО	През. №8, сл.№5
4.2. Розрахунково-аналітичний метод прогнозування точності ТО ЛРО	През. №8, сл.№9
4.3. Сумарна погрішність обробки порожнин лазерним променем	През. №8, сл.№38
Додаток до розділу 4 (завдання на СРСР)	През. №8, сл.№48
Контрольні запитання та завдання	През. №8, сл.№53
Бібліографічний опис	През. №8, сл.№57

Розділ 4. Точність розмірних результатів ТО ЛРО

Питання точності можна розглядати з трьох точок зору:

- **необхідна точність** – яка має бути досягнута для забезпечення нормальної роботи виробу (конструкторське поняття);
- **контроль точності виробу** (метрологічний напрям);
- **шляхи забезпечення точності**, яку задано конструктором (технологічне поняття).

У цьому розділі розглядаються питання **технологічної точності**.

Мета їх вивчення полягає в тому, що знання (прогноз) точності на етапі проектування технологічної операції дає можливість **аналізувати** в попередньому розгляді її **можливості** та **розробляти методи підвищення точності розмірних показників**. Необхідність в окремому розгляді одного з **якісних показників** технологічної операції ЛРО пояснюється тим, що, по-перше, **ЛРО** характеризується найбільш **низьким рівнем досягаємої точності** серед нетрадиційних методів обробки (табл. 4.1) і, по-друге, шляхи її **підвищення неочевидні** внаслідок залежності від тих же параметрів, що і інші показники технологічної операції.

Під «**точністю**» реально існуючої **деталі** або її елементу мається на увазі міра їх відповідності деякій **ідеальній деталі** (елементу), заданій конструктором. Відмінності між ними обумовлені **недосконалістю технологічного процесу** виготовлення виробу, починаючи з технологічних операцій виготовлення заготовки. Представляючи загальну поверхню виробу як **комплекс окремих елементів**, потребуючих обробки і які ототожнюються з деякими геометричними елементами, можна представити **загальну точність обробки** як:

Розділ 4. Точність розмірних результатів ТО ЛРО

- точність форми, тобто міра відповідності окремих ділянок деталі тим геометричним образам, яким вони уподібнюються;
- точність взаємного розташування тих же ділянок.

Частіше зручно розглядати не точність, а погрішність обробки, яка є мірою відмінності реальної деталі від заданої (ідеальної).

Залежно від технологічної схеми обробки форма оброблюваного елемента деталі і його розташування можуть визначатися не тільки механізмом руйнування матеріалу інструментом – пучком лазерного випромінювання, але й взаємним розташуванням заготовки і інструменту та їх відносним переміщенням.

Для дослідження точності технологічної операції і побудови її математичної моделі можуть використовуватися аналітичні і статистичні (експериментальні) методи. Останні, як ми переконалися, здатні проаналізувати конкретну операцію без можливості фізичної інтерпретації результатів і їх узагальнення на весь клас операцій. Можливість виявлення загальніших закономірностей при використанні аналітичних методів моделювання робить їх переважнішими.

4.1. Аналіз складу сумарної погрішності ТО ЛРО

Досяжна точність будь-якої технологічної операції визначається сумарною погрішністю, вклад до якої вносять різні учасники технологічної оброблювальної системи (ТОС) на всьому протязі операції. Основними складовими сумарної погрішності є погрішності, що створюються недосконалістю і нестабільністю інструменту; помилками технологічного процесу і устаткування; нестабільністю взаємодії випромінювання з матеріалом заготовки.

Для розробки та використання розрахунково-аналітичного методу дослідження питань точності обробки, заснованого за принципом суперпозиції, і визначення шляхів її підвищення сумарна погрішність обробки має бути досить детально розчленована на незалежні один від одного елементи, однозначно залежні від параметрів процесу обробки. На рис. 4.1 показана класифікація елементарних погрішностей, а також приведені джерела їх виникнення (ліва колонка). Джерела погрішностей встановлюються в результаті дослідження особливостей роботи лазерного технологічного устаткування, специфіки побудови технологічної операції ЛРО і явищ, що відповідають за ефект розмірного формоутворення порожнини. Такий аналіз має на меті пошук методів і засобів зменшення величини сумарної погрішності операції шляхом поетапного скорочення можливо більшого числа елементарних складових. В основі аналізу можуть бути результати експериментальних досліджень фізичних явищ, супроводжуваних процесом розмірного видалення матеріалу лазерним променем, а також функціональне вивчення встановлених теоретичних залежностей, що зв'язують параметри процесу і результати обробки.

4.1. Аналіз складу сумарної погрішності ТО ЛРО

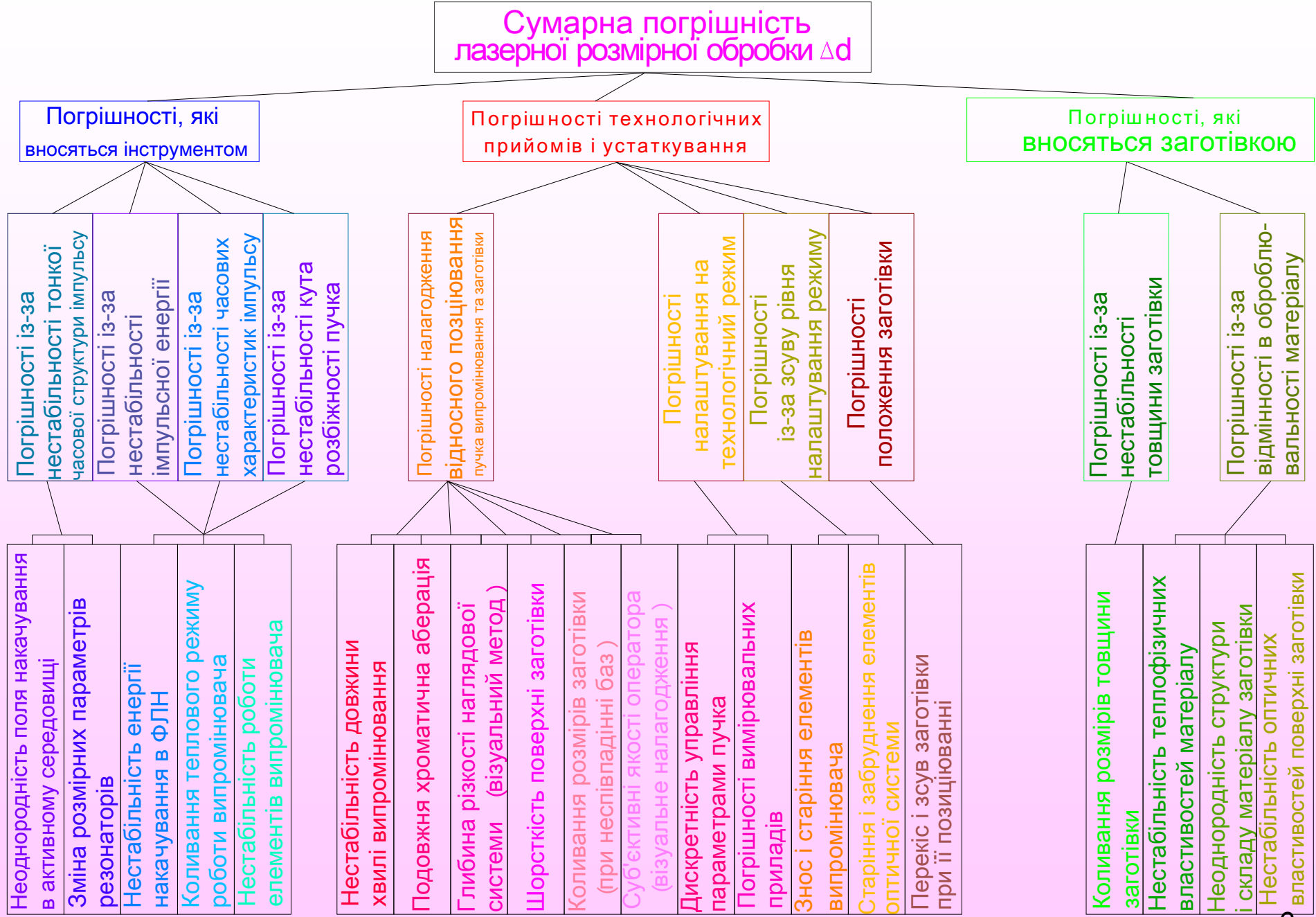


Рис. 4.1. Структура сумарної погрішності лазерної обробки порожнини

4.1. Аналіз складу сумарної погрішності ТО ЛРО

Розмірні і якісні результати обробки залежать від густини потужності теплового потоку W_p , що створюється в зоні обробки в результаті лазерного опромінення, і властивостей оброблювальної заготовки $\Delta_{заг}$ (її розмірів і характеристик матеріалу). Відповідно нестабільність цих чинників ΔW_p і $\Delta_{заг}$ приводить до виникнення погрішностей обробки.

1. Оскільки рівень ΔW_p визначається поглинальними властивостями поверхні заготовки (коефіцієнт поглинання A), імпульсною енергією E , тривалістю опромінення (імпульсу) τ і розмірами пучка випромінювання d_0 на поверхні заготовки (а миттєвий її рівень – також тонкою часовою структурою імпульсу випромінювання – тривалістю пічків τ_s та періодом їх надходження t_s), то незалежними елементарними складовими похибками, що створюються інструментом – лазерним променем - будуть:

- погрішність енергії випромінювання;
- нестабільність часових характеристик випромінювання (включаючи тонку часову структуру);
- змінність кутових характеристик променя (кута його розбіжності θ).

2. Коливання густини потужності теплового потоку в тілі заготовки викликаються також погрішностями і нестабільністю технологічних прийомів, використаних в технологічній операції обробки елемента заготовки:

4.1. Аналіз складу сумарної погрішності ТО ЛРО

- погрішності перетворення пучка випромінювання в інструмент оптичними засобами і його положення відносно поверхні заготовки (погрішність взаємного розташування пучка і заготовки, а також мінливість його каустики);
- погрішності налагодження технологічного режиму обробки (рівнів параметрів пучка випромінювання та умов опромінення: E , τ , θ , F , ΔF та ін.);
- погрішності із-за зміщення рівня налагодженого технологічного режиму обробки (часовий дрейф режиму обробки);
- погрішності в розташуванні заготовки при її установці і закріпленні на робочій позиції.

3. Характер руйнування матеріалу заготовки визначається ефектами, що супроводжують діяння випромінювання на нього. Стабільність механізмів, відповідальних за розмірне формоутворення порожнини, визначається однорідністю і стабільністю структури і складу матеріалу заготовки, її формою та розмірами за умови незмінності умов опромінення. Ці нестабільності виявляються у вигляді складових сумарної погрішності, що створюються:

- нестабільністю властивостей оброблюваного матеріалу (склад і структура);
- погрішностями розмірів заготовок в оброблювальній партії.

4.2. Розрахунково-аналітичний метод прогнозування точності ТО ЛРО

Приймаючи принцип суперпозиції (накладання) в якості механізму утворення сумарної погрішності обробки (поєднання нестабільностей учасників ТОС і технологічних прийомів), технологічну операцію можна представити у вигляді деякої перетворюючої системи (рис. 4.2), що включає сукупність засобів (устаткування, пристосування і інструмент), які потрібні для виконання технологічної операції. Тоді її вихід на підставі принципу суперпозиції представляється у вигляді лінійної (лінеаризованої) комбінації результатів дії їх початкових нестабільностей (початкових чинників). Кожен з k якісних результатів обробки може бути записаний у вигляді:

$$\tau_k = a_{k_0} + \sum_{i=1}^n a_{k_i} x_i + \sum_{j=1}^m b_{k_j} y_j + \sum_{l=1}^p c_{k_l} z_l \quad (4.1)$$

де: $x_1 \dots x_n$ - початкові нестабільності, пов'язані з недосконалістю інструменту (пучка лазерного випромінювання); $y_1 \dots y_m$ - початкові нестабільності, такі, що вносяться технологічними прийомами; $z_1 \dots z_p$ - початкові нестабільності заготовки (погрішності розмірів заготовки і нестабільність властивостей її матеріалу); $a_{k_0}, a_{k_i}, b_{k_j}, c_{k_l}$ - передавальні коефіцієнти перетворюючої системи, що відображують вплив того або іншого чинника на досліджуваний якісний показник процесу, причому a_{k_0} - постійні складові вихідних змінних τ_k , що визначають систематичні погрішності, властиві самій перетворюючій системі.

4.2. Розрахунково-аналітичний метод прогнозування точності ТО ЛРО

На підставі теореми про числові характеристики лінійної функції декількох взаємно незалежних випадкових аргументів (некеровані коливання значень чинників x_i , y_j , і z_l є випадковими) [123] можна виділити з показника нестабільності процесу його систематичну складову – математичне чекання m_{τ_k} , і характеристику розсіяння – дисперсію параметра D_{τ_k} :

$$m_{\tau_k} = a_{k_0} + \sum_{i=1}^n a_{k_i} m_{x_i} + \sum_{j=1}^m b_{k_j} m_{y_j} + \sum_{l=1}^p c_{k_l} m_{z_l} \quad (4.2)$$

$$D_{\tau_k} = \sum_{i=1}^n a_{k_i}^2 D_{x_i} + \sum_{j=1}^m b_{k_j}^2 D_{y_j} + \sum_{l=1}^p c_{k_l}^2 D_{z_l} \quad (4.3)$$

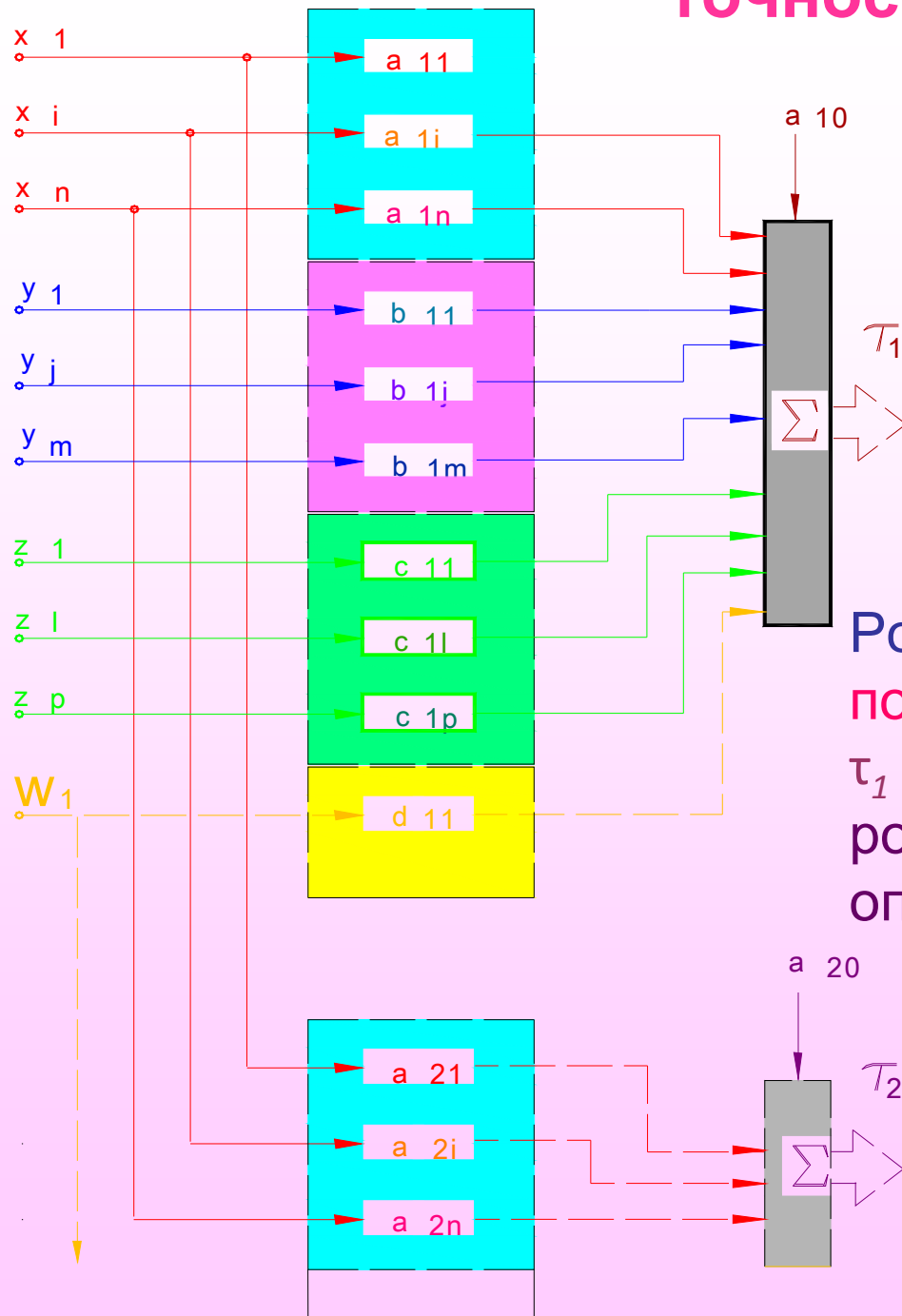
Ці параметри зв'язані співвідношенням (за нормальним законом розподілу випадкової величини, що високо ймовірно на основі наслідку до Центральної теореми теорії ймовірностей [123]):

$$\tau_k = m_{\tau_k} \pm 3\sqrt{D_{\tau_k}} \quad (4.4)$$

Для корельованих чинників процесу x_i , y_j і z_l в залежності τ_k , m_{τ_k} і D_{τ_k} вводиться група доданків, що містять коефіцієнти взаємної кореляції. Для усунення цих доданків сумарна погрішність має бути подрібнена досить детально, аби забезпечити незалежність елементарних нестабільностей системи.

Показана на рис.4.2 структурна схема технологічної операції, як перетворюючої системи, є графічним зображенням залежності τ_k для показника точності обробки Δd ($D_{\Delta d}$ і $m_{\Delta d}$) і погрішності подовжньої форми Δ_ϕ (D_{ϕ} і m_{ϕ}).

4.2. Розрахунково-аналітичний метод прогнозування точності ТО ЛРО



Розглянемо структуру сумарної погрішності оброблювального розміру $\tau_1 = \Delta d$, що визначає точність розмірних результатів технологічної операції.

Рис. 4.2. Структурна схема представлення ТОС як перетворюючої системи

4.2. Розрахунково-аналітичний метод прогнозування точності ТО ЛРО

4.2.1. Джерела нестабільностей параметрів інструменту (пучка лазерного випромінювання), які створюють погрішність поперечного розміру порожнини (x_i)

а). Пічкова структура імпульсу лазерного випромінювання (чинник x_1 на рис.4.2)

Хоча імпульсне (пічкове) введення енергії в зону обробки є сприятливим внаслідок високої миттєвої інтенсивності випромінювання, полегшення відведення продуктів руйнування матеріалу заготовки і зниження рівня накопиченого тепла в зоні опромінення, властивий імпульсу вільної генерації (ВГ) хаотичний набір пічків (рис.4.3) вносить нестабільність до процесу формування порожнин, збільшуючи розсіяння їх поперечних розмірів.

Джерелами цієї нестабільності є: нерівномірність поля накачування в тілі активного елемента як в процесі його збудження, так і в результаті нерівномірного знімання інверсії стоячою хвилею, коливання лінійних розмірів резонатора із-за теплових і вібраційних змін його довжини, каналне знімання інверсії модами різного порядку в збудженому активному середовищі, періодичні коливання температурного режиму випромінювача.

Кількісна оцінка долі погрішності, що вноситься нестабільністю пічкової структури імпульсу лазерного випромінювання, утруднена із-за складності математичного опису структури інтенсивності в імпульсі.

Істотне підвищення точності оброблених порожнин досягається при впорядковуванні пічкової структури шляхом часткової модуляції добротності резонатора тим або іншим методом [124, 125].

4.2. Розрахунково-аналітичний метод прогнозування точності ТО ЛРО

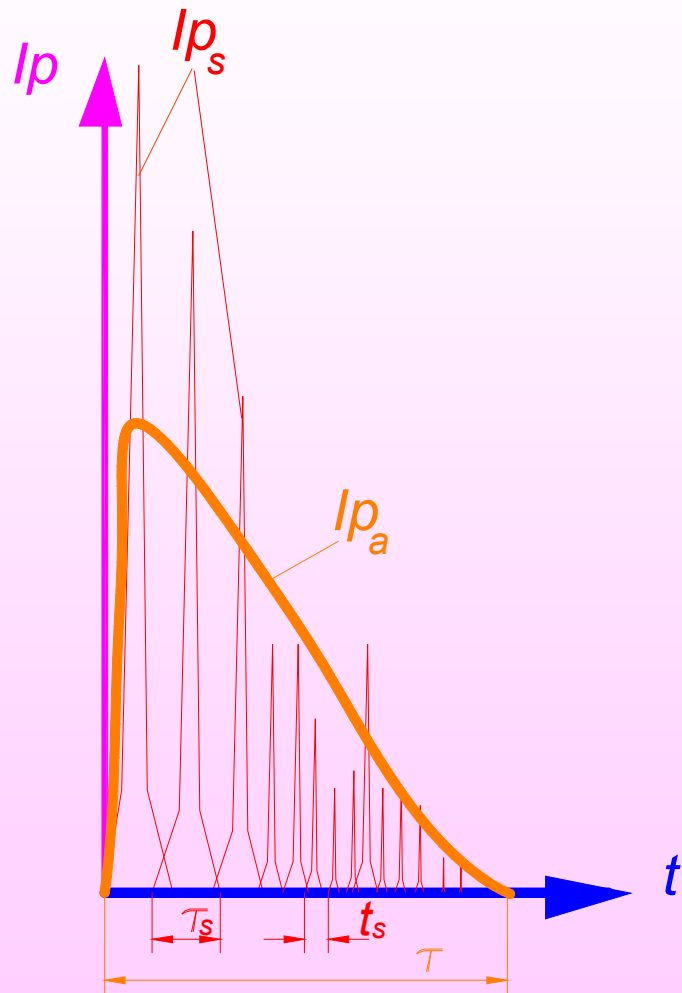


Рис.4.3. Часова структура імпульсу вільної генерації (ВГ)

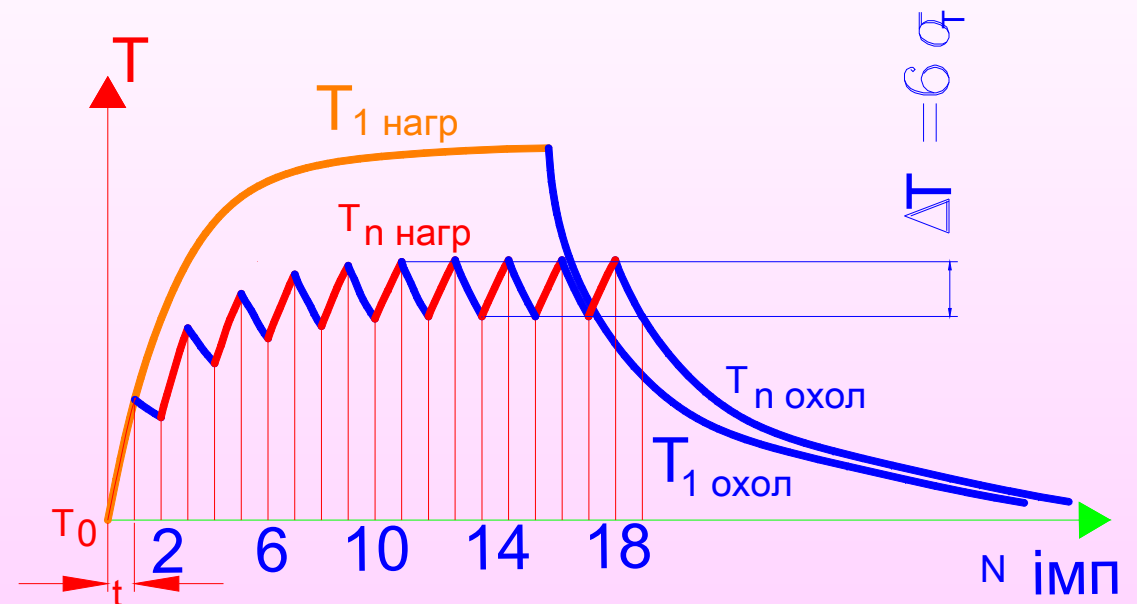


Рис.4.4. Схема нагрівання активного середовища одним імпульсом накачування —, та N імпульсами —

4.2. Розрахунково-аналітичний метод прогнозування точності ТО ЛРО

9.2.1. Джерела нестабільностей параметрів інструменту (пучка лазерного випромінювання), які створюють погрішність поперечного розміру порожнини (x_i)

б). Нестабільність енергетичних характеристик імпульсів лазерного випромінювання (чинник x_2 на рис.4.2)

Некеровані коливання рівня імпульсної енергії при одному налаштуванні режиму роботи системи накачування визначаються:

- коливаннями енергії в системі накачування;
- змінністю температури активного середовища;
- нестабільністю роботи елементів випромінювача (нестабільністю роботи квантових переходів активних домішок):

- відносна нестабільність енергії випромінювання (коефіцієнт варіації) із-за нестабільності роботи системи накачування, визначається за залежністю [126]:

$$v_E = \frac{n_E}{n_E - 1} v_{E_H}, \quad (4.5)$$

де: $n_E = E_H / E_{пор}$ (E_H - енергія накачування, $E_{пор}$ - рівень її порогового значення).

Передбачаючи (на підставі наслідку до Центральної теореми теорії імовірності), що випадкові значення енергії E_i розподілені за нормальним законом, можна записати, що їх поле розсіяння (з вірогідністю 99,87%) обмежене значенням: $\Delta E = 6\sigma_E$, (де: σ_E - середньоквадратичне відхилення рівнів енергії від її середнього значення $\sigma_E = (D_E)^{1/2} = \left\{ (n-1)^{-1} \sum_i (E_i - \bar{E})^2 \right\}^{1/2}$; $\bar{E} = 1/n \sum_i E_i$.)
Тоді рівняння (4.5) можна переписати у величинах, які

$$\sigma_{E_H} = 2 \frac{E}{U_H^2} \frac{n_E}{(n_E - 1)} (U_H \sigma_{U_H} + 3\sigma_{U_H}^2) \quad (4.6)$$

4.2. Розрахунково-аналітичний метод прогнозування точності ТО ЛРО

9.2.1. Джерела нестабільностей параметрів інструменту (пучка лазерного випромінювання), які створюють погрішність поперечного розміру порожнини (x_i)

- нестабільність імпульсної енергії із-за коливань теплового режиму активного середовища (рис.4.4), від чого змінюються його люмінесцентні властивості, якщо воно має кристалічну матрицю (рубін, гранат і інші) в залежності від її температури:

$$v_E = \frac{2v_T}{n_T^2 - 1}, \quad (4.7)$$

де: $v_m = \Delta T/T$ – відносне відхилення температури від середнього значення T ,
 $n_m = T_{max}/T$ – перевищення максимальної температури, при якій можлива генерація (для рубіну $\sim 62^\circ\text{C}$, для гранату – 58°C) над середньою T .

Враховуючи, що $\Delta T = 6\sigma_T$ і підставляючи в (4.6), отримуємо:

$$\sigma_{E_T} = \frac{\bar{E}}{T} \frac{2\sigma_T}{(n_T^2 - 1)} \quad (4.8)$$

Об'єднана характеристика енергетичної погрішності імпульсів випромінювання:

-для активних середовищ із кристалічною матрицею (рубін, гранат):

$$\sigma_{x_2} = (D_{x_2})^{1/2} = \sigma_E = (D_{x_2})^{1/2} = \frac{1}{k_E} \left[(k_{E_H} \sigma_{E_H}^2) + (k_{E_T} \sigma_{E_T}^2) \right]^{1/2} \quad (4.9)$$

-для активних елементів із аморфною матрицею (скло, кварц):

$$\sigma_{x_2} = (D_{x_2})^{0,5} = \sigma_E = \sigma_{E_H}, \quad (4.9)$$

де: k_E, k_{E_H} і k_T - коефіцієнти відносного розсіяння випадкових величин з параметрами розподілу $\sigma_E, \sigma_{E_H}, \sigma_T$.

4.2. Розрахунково-аналітичний метод прогнозування точності ТО ЛРО

в). Нестабільності часових характеристик імпульсів лазерного випромінювання (чинник x_3 на рис.4.2)

1). На стабільність розмірів оброблюваних порожнин впливає коливання інтегральної тривалості імпульсів лазерного випромінювання, а також характер їх часової макроструктури: крутість передньої і задньої ділянок.

Джерелами нестабільності загальної тривалості імпульсів є погрішності системи накачування, що викликають зміну напруги живлення імпульсних ламп накачування, а також варіації їх свічення. Непостійність енергії накачування приводить до флуктуації моменту початку генерації і, отже, тривалості імпульсу [127] (рис.4.5):

$$V_m = V_{E_H} \frac{\tau_\mu}{(n_E - 1)\tau_H}. \quad (4.10)$$

Підставляючи в (4.9) статистичні характеристики нестабільності енергії накачування (4.6), отримуємо вираження для визначення середньоквадратичного відхилення, що характеризує поле розсіяння загальної тривалості імпульсу:

$$\sigma_{x_3} = (D_{x_3})^{\frac{1}{2}} = \sigma_\tau = 2 \frac{\tau}{U_H^2} (U_H \sigma_{U_H} + 3\sigma_{U_H}^2) \frac{\tau_\mu}{n_E \tau_H} \quad (4.11)$$

де: τ - тривалість імпульсу випромінювання; τ_μ - час життя домішкових центрів активного середовища на метастабільному рівні (для іонів Nd^{+3} $\tau_\mu = 5 \cdot 10^{-4}$ с); τ_H - тривалість імпульсу накачування.

4.2. Розрахунково-аналітичний метод прогнозування точності ТО ЛРО

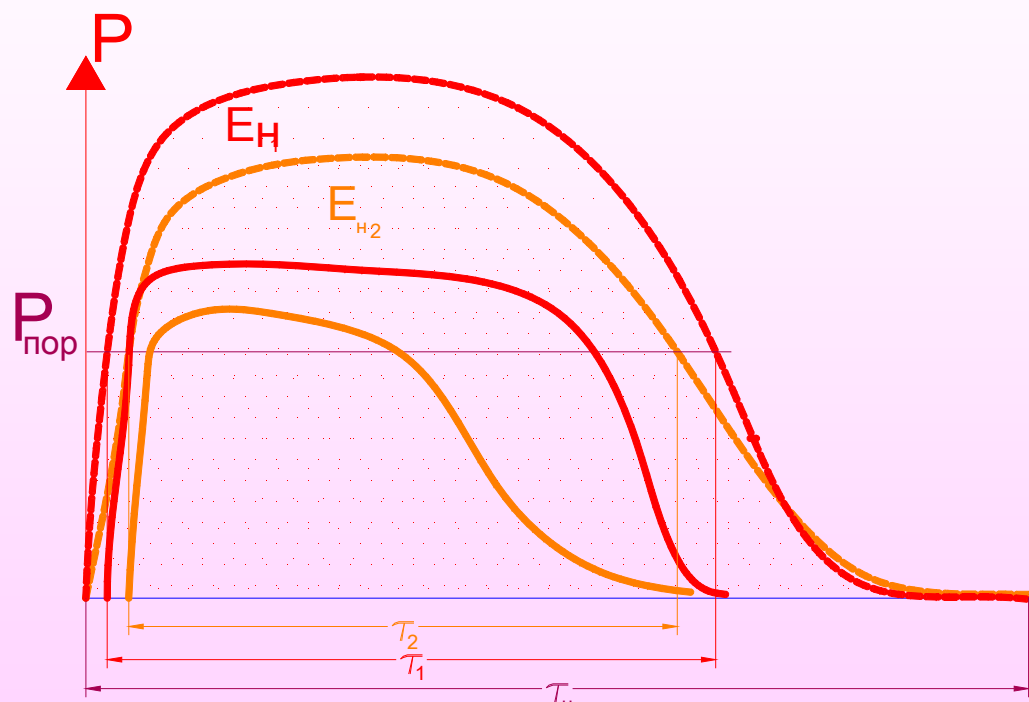


Рис.4.5. Схема впливу коливання напруги на зарядування АС на тривалість імпульсу генерації

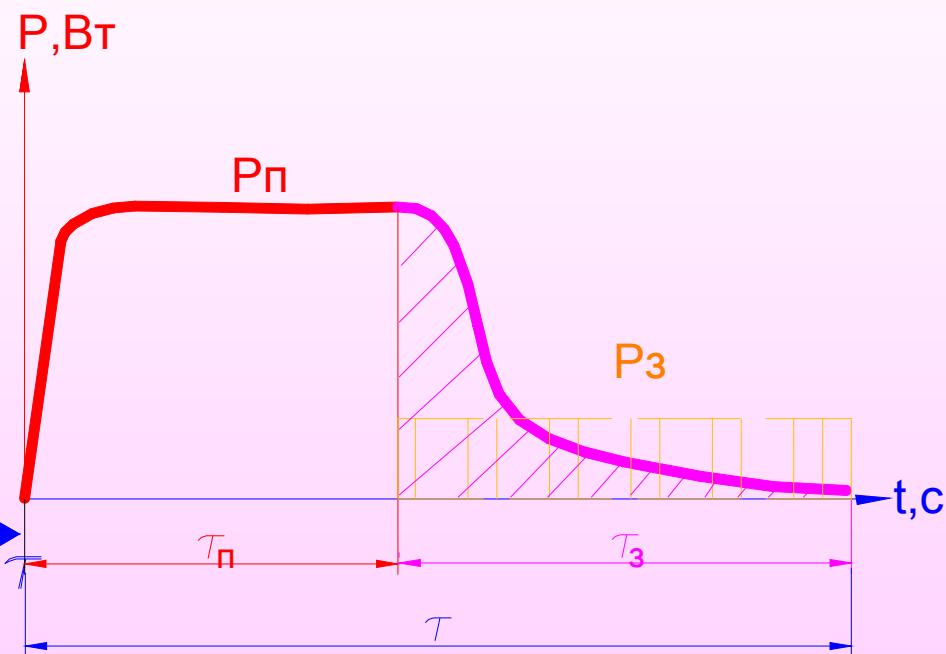


Рис.4.6. Макроструктура імпульсу ВГ

4.2. Розрахунково-аналітичний метод прогнозування точності ТО ЛРО

2). Часова макроструктура імпульсів лазерного випромінювання лише в одному задовольняє вимогам оптимального розвитку процесу руйнування – тривалість переднього фронту (5-10мкс) забезпечує швидкий початок процесу обробки, без істотного «розсіяння» тепла.

Найбільші спотворення до результату обробки вносить надмірно затягнутий спад інтенсивності в кінці імпульсу, від чого збільшується кількість розплаву в оброблювальній порожнині, а також падіння тиску пари, що видаляє його. Причиною такої макроструктури імпульсу ВГ є специфічний характер розряду розрядного контуру LC ФЛН через розрядний проміжок лампи накачування R. Тривалість загасання розряду можна оцінити за наступної залежності: $\tau_3 \approx RC \ln(U_H/U_e)$, де: U_H і U_e – напруга накачування і гасіння лампи відповідно.

Розглянемо поетапно процес опромінення і формування порожнини передньою і задньою ділянками імпульсу випромінювання (рис. 4.6). Нехтуючи тривалістю переднього фронту імпульсу ($\tau_n < 10\text{мкс}$), представимо їх діяння як стаціонарний випар на першій ділянці і загасання процесу – на другій. Відповідно до цього, інтенсивність в зоні опромінення відрізнятиметься для передньої і задньої ділянки імпульсу:

$$I_{p_n} = \frac{E_n}{\tau_n S} \approx \frac{E}{\pi r_0^2 \tau_n}; I_{p_3} = \frac{E_3}{\pi r_0^2 \tau_3}.$$

К кінцю передньої частини імпульсу в заготівці утворюється лунка (глуха порожнина) діаметром $d_0 = 2r_0$ і глибиною h . Біля її стінок температура залежатиме від відстані від поверхні стінки x :

$$T_x = T_0 e^{-\frac{V_0 x}{a}}.$$

4.2. Розрахунково-аналітичний метод прогнозування точності ТО ЛРО

Якщо прирівняти $T_x = T_{пл}$, то можна оцінити глибину розплаву біля поверхні стінки порожнини:

$$h_p = x_p = \frac{a}{V_0} \ln \frac{T_0}{T_{пл}},$$

де: a – температуропровідність матеріалу, V_0 – швидкість стаціонарного випару: (A – коефіцієнт поглинання випромінювання поверхнею заготовки; L_0 – питома теплота випари); T_0 – стаціонарна температура випари, зв'язана із швидкістю V_0 активаційною формулою [128]: $V_0 = I_{p0} A / L_0$:

$$T_0 = T^* \ln^{-1} \frac{U}{T_{пл}}; T^* = L_0 M / \rho R,$$

де: M – молекулярна вага матеріалу (речовини), ρ – його щільність, R – універсальна газова постійна, U – середня швидкість звуку в твердому тілі, $T_{пл}$ – температура плавлення матеріалу.

Тоді, остаточно товщина розплаву біля стінок порожнини після дії квазістаціонарної (передньої) частини імпульсу може бути визначена за залежністю:

$$h_{p_n} = \frac{a L_0}{I_{p_n} A} \ln \left(\frac{T^*}{T_{пл}} \ln^{-1} \frac{U L_0}{I_{p_n}} \right). \quad (4.12)$$

Дію задньої ділянки імпульсу τ_3 , протягом якої інтенсивність випромінювання поступово падає, замінимо умовною дією імпульсом прямокутної форми (рис. 4.6) з інтенсивністю $I_{p3} = (0,05-0,10) I_{pн}$. Якщо глибина лунки більше її діаметру $h > d$, то для визначення товщини розплаву на дні порожнини від дії задньої ділянки імпульсу можна використати модель напівобмеженого порожнистого циліндру глибиною h і радіусом r_0 , на поверхні дна якого створюється тепловий потік постійної густини $W_{p3} = I_{p3} A$ (рис. 4.7) [129]. Вирішення рівняння теплопровідності дає залежність для визначення товщини розплаву від дії цієї частини імпульсу:

$$h_{p_3} = \frac{4(I_{p_3} A)^2 r_0 a \tau_3}{(\pi k T_{пл})^2}. \quad (4.13)$$

4.2. Розрахунково-аналітичний метод прогнозування точності ТО ЛРО

Розплав на дні порожнини після дії всього імпульсу тривалістю τ , який складається з розплаву після дії передньої та задньої частин імпульсу $h_p = h_{pн} + h_{pз}$, в результаті дії надлишкового тиску пари в порожнині к кінцю опромінення витісняється з дна на стінки лунки і розподіляється по її поверхні, імовірно, рівномірно. Тоді, якщо об'єм розплаву в лунці: $V_p = h_p \pi r_0^2 = (h_{pн} + h_{pз}) \pi r_0^2$, а площа її внутрішньої поверхні (стінки та дна): $S = \pi r_0^2 (2h + r_0)$, то товщина розплаву по всій поверхні порожнини можна вирахувати за рівнянням: $\Delta d_r = \Delta d_\tau / 2 = V_p / S$.

Глибину отвору h можна визначити за швидкістю випари матеріалу в кінці формоутворюючої (передньої) частини імпульсу τ_n :

$$h(\tau_n) = \int_0^{\tau_n} V(t) dt = V_0 \left(\tau_n - 2 \frac{kT_0}{Al_{pн}} \sqrt{\frac{\tau_n}{a}} \right). \quad (4.14)$$

Розмірна погрішність обробки виникає із-за нестабільності перерозподілу розплаву по поверхні порожнини. Цю погрішність можна вважати систематичною і рівною товщині розплаву, який рівномірно розподілено по стінках порожнини:

$$\Delta d_{\tau_3} = a_{k_3} m_{x_3} = \frac{2r_0 h_p}{2h + r_0} = \frac{2r_0 \left[\frac{aL_0}{W_{pн}} \ln \left(\frac{T^*}{T_{пл}} \ln^{-1} \frac{UL_0}{Al_{pн}} \right) + \frac{4A^2 I_{p_3}^2 r_0 a \tau_3}{\pi^2 k^2 T_{пл}^2} \right]}{2 \frac{Al_{pн}}{L_0} \left[(\tau - \tau_3) - 2 \frac{kT^*}{Al_{pн}} \ln^{-1} \frac{UL_0}{Al_{pн}} \sqrt{\frac{\tau - \tau_3}{a}} \right] + r_0}. \quad (4.15)$$

4.2. Розрахунково-аналітичний метод прогнозування точності ТО ЛРО

г). Нестабільність кутових характеристик пучка лазерного випромінювання (x_4).

До просторових характеристик пучка випромінювання відносяться його розбіжність та розподіл інтенсивності в межах діаграми спрямованості пучка.

Перший параметр – кут розбіжності θ безпосередньо впливає на розмір зони опромінювання d_0 та повздовжню форму каустики пучка в межах товщини заготовки: $d_0 \approx F\theta$. Величина θ визначається найвищим порядком моди в пучку випромінювання [130]:

$$m = 12\sqrt{\rho} \frac{d}{\sqrt{\lambda L_{\text{екв}}}}, \quad (4.16)$$

де: $\rho = (n_p - 1)/n_p$, а $n_p = P_H / P_{\text{пор}}$. (P_H та $P_{\text{пор}}$ – потужність накачування активного середовища та її порогове значення відповідно).

При $m \gg 3$

$$\theta \approx \sqrt{\frac{n_p - 1}{n_p}} \sqrt{\frac{\lambda}{L_{\text{екв}}}}, L_{\text{екв}} = \sqrt{2RL - L^2} \quad (4.17)$$

($L_{\text{екв}}$ - довжина конфокального резонатора, еквівалентного реальному).

Внаслідок нестабільності процесу накачування змінюється перевищення рівня потужності над пороговим значенням n_p , тоді, оскільки найвищий порядок моди залежить від рівня накачування активного середовища.

Тоді середньоквадратичне відхилення кута розбіжності θ , яке пов'язане з середньоквадратичним відхиленням потужності накачування, виражається наступним співвідношенням:

$$\sigma_{x_4} = (D_{x_4})^{\frac{1}{2}} = \sigma_{\theta} = 4 \sqrt{\frac{\lambda}{L_{\text{екв}}} \frac{P_{\text{пор}}}{P_H} \frac{\sigma_{P_H}}{[P_H (P_H - P_{\text{пор}})^2]^{\frac{1}{3}}}} \quad (4.18)$$

де: L – довжина резонатора; R – радіус кривизни дзеркал.

4.2. Розрахунково-аналітичний метод прогнозування точності ТО ЛРО

г). Нестабільність кутових характеристик пучка лазерного випромінювання (χ_4).

Розподіл інтенсивності випромінювання можна характеризувати мірою осьової асиметрії лінії, що огинає її перетин і коефіцієнтом нерівномірності випромінювання в одному з них (рис.4.8в). Перше відхилення позначається на погрішності і відтворюваності форми порожнини в поперечному перетині. Друге, яке є результатом кривизни лінії, що огинає інтенсивність, може бути причиною вхідного конуса обробленої порожнини (рис.4.8а).

Одним з шляхів усунення цих погрішностей є ретельне юстирування резонатора на оптимальний модовий склад випромінювання, тобто застосовувати пучки випромінювання з циліндричними модами

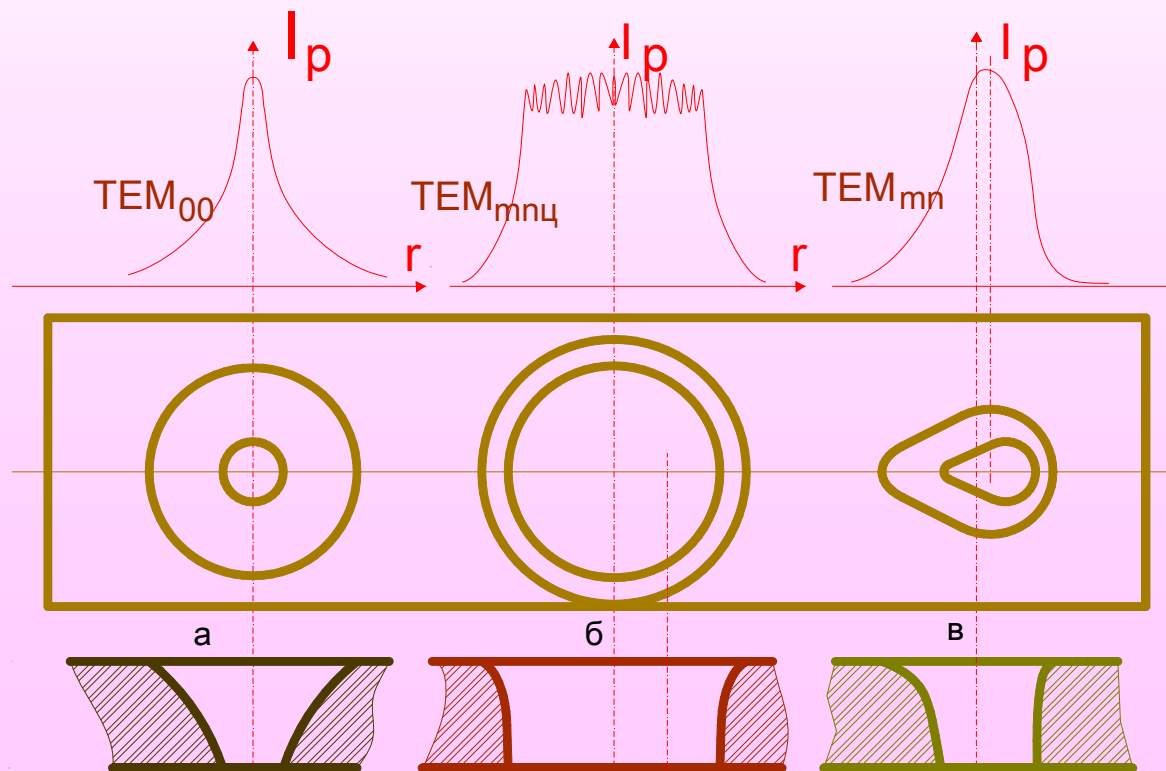


Рис. 4.8. Профілі отворів, оброблених пучками з різними розподілами інтенсивності у попереку

4.2. Розрахунково-аналітичний метод прогнозування точності ТО ЛРО

9.2.2. Джерела нестабільностей технологічних прийомів, які створюють погрішність поперечного розміру порожнини (y_j)

а). Погрішності відносного позиціювання пучка лазерного випромінювання та поверхні заготовки (y_1)

Ця нестабільність проявляється в некерованій зміні від операції до операції (від імпульсу до імпульсу) умов обробки – розміру сконцентрованого пучка лазерного випромінювання на поверхні заготовки – і закону зміни його розмірів в межах товщини заготовки. Є декілька чинників такої нестабільності:

- нестабільність перетворення пучка випромінювання фокусуючим елементом (лінзою);
- похибки візуального позиціювання заготовки у каустиці пучка, перетвореного лінзою;
- похибка деяких характеристик заготовки, які впливають на її положення в робочій зоні.

1. Нестабільність каустики перетвореного лінзою пучка випромінювання внаслідок нестабільності довжини хвилі випромінювання λ в межах імпульсу, а також від імпульсу до імпульсу, що виражається у випадковому її коливанні в межах ширини смуги генерації $\Delta\lambda$. Якщо λ_{\bullet} - середнє значення довжини хвилі випромінювання, то фокусну відстань тонкої лінзи для нього можна визначити за залежністю:

$$F_{\lambda_{\bullet}} = \frac{R}{n_{\lambda_{\bullet}} - 1} \quad (4.19)$$

де: R – радіус кривизни заломлюючої поверхні лінзи з матеріалу, який має показник заломлення $n_{\lambda_{\bullet}}$.

4.2. Розрахунково-аналітичний метод прогнозування точності ТО ЛРО

9.2.2. Джерела нестабільностей технологічних прийомів, які створюють погрішність поперечного розміру порожнини (y_j)

Зміна фокусної відстані лінзи із-за варіацій довжини хвилі в межах $\Delta\lambda$: $\Delta F_{\Delta\lambda} = F_{max} - F_{min}$:

$$F_{max} = \frac{R}{\left(n_{\bar{\lambda} + \frac{\Delta\lambda}{2}} - 1 \right)}; F_{min} = \frac{R}{\left(n_{\bar{\lambda} - \frac{\Delta\lambda}{2}} - 1 \right)}. \quad (4.20)$$

або: $\Delta F = \Delta\lambda F / \lambda$. [59].

За умови нормального розподілу випадкової величини λ_i : $\Delta F_{\Delta\lambda} = 6\sigma_{y1}'$, середньоквадратичне відхилення положень перетину каустики пучка, перетвореного лінзою, можна визначити:

$$\sigma_{y1}' = \sqrt{D_{y1}'} = \sigma_{\bar{\lambda}}' = \frac{F_{\bar{\lambda}}}{6} \left[\frac{n_{\bar{\lambda}} - 1}{n_{\left(\bar{\lambda} + \frac{\Delta\lambda}{2}\right)} - 1} - \frac{n_{\bar{\lambda}} - 1}{n_{\left(\bar{\lambda} - \frac{\Delta\lambda}{2}\right)} - 1} \right] \quad (4.21)$$

2. Погрішності візуального налаштування відносного положення лінзи та поверхні заготовки, яке виконується за допомогою мікроскопу, об'єтив якого є робочою лінзою ЛТУ.

Метод позиціювання полягає у розташуванні поверхні заготовки в площині різкого зображення мікроскопу. В результаті такої процедури створюється похибка із систематичною та випадковою складовими:

– хроматична аберація (систематична складова), яка пов'язана з відмінністю в довжинах хвиль джерела освітлення об'єкту при позиціюванні і обробці:

де: n_{λ_p} и n_{λ_b} - показники заломлення матеріалу фокусуючої лінзи

для довжини хвилі λ_p и λ_b .

$$m_1 y_1'' = F_{\lambda_b} \left[1 - \frac{n_{\lambda_p} (n_{\lambda_b} - 1)^2}{n_{\lambda_b} (n_{\lambda_p} - 1)^2} \right] \quad (4.22)$$

4.2. Розрахунково-аналітичний метод прогнозування точності ТО ЛРО

9.2.2. Джерела нестабільностей технологічних прийомів, які створюють погрішність поперечного розміру порожнини (y_j)

– внаслідок глибини різкості наглядового каналу ЛТУ (акомодації):

• акомодаційна складова:

В процесі спостереження об'ємного предмету очі постійно **акомодують** і **переглядають** різні за глибиною ділянки. Якщо око акомодує від **нескінченності** до відстані **найкращого зору** (250мм), то різко будуть видні елементи об'єкту, що знаходяться між передньою фокальною площиною і площиною, віддаленою від **фокальної площини** на відстань $T_{ак}$, яка називається **глибиною акомодації**:

$$T_{ак} = \frac{F^2}{250} = \frac{250}{\Gamma^2}, \quad (4.23)$$

де: Γ – видиме збільшення наглядової системи.

• геометрична складова:

Якщо око **акомодовано на нескінченність**, тоді на його сітківці різко видно лише ті точки об'єкту, що знаходяться в **передній фокальній площині**. Крапки, що знаходяться далі або ближче за фокальну площину, зображуються на сітківці у вигляді **кружків розсіяння**. Якщо їх **кутовий розмір** не перевищує роздільної здатності ока ξ (0,0003 рад), то відповідні точки об'єкту **здаються різкими**, а відстань між ними називають **геометричною глибиною різкості**:

$$T_r = \frac{250\xi}{A\Gamma}, \quad (4.24)$$

де: A – числова апертура лінзи: $A = n \sin \sigma_A$ (σ_A – половина апертурного кута лінзи).

4.2. Розрахунково-аналітичний метод прогнозування точності ТО ЛРО

9.2.2. Джерела нестабільностей технологічних прийомів, які створюють погрішність поперечного розміру порожнини (y_j)

- **хвилева** глибина **різкості**

Утворення зображення об'єкту світловим пучком є складним процесом інтерференції променів в деякому просторі, а не в одній площині. Причому це супроводиться обов'язковим обмеженням пучка і проявом дифракції на апертурі лінзи. Хвилевою вважають глибину:

$$T_x = \frac{\lambda}{2A^2}. \quad (4.25)$$

Остаточно повна глибина різкості зображення:

$$T = T_{ак} + T_r + T_x = \frac{250}{\Gamma^2} + \frac{250\zeta}{A\Gamma} + \frac{\lambda}{2A^2}. \quad (4.26)$$

Таким чином, характеристикою погрішності позиціювання пучка і заготовки з цієї причини можна вважати:

$$\sigma_{y_1}^I = \sqrt{D_{y_1}^I} = \sigma_n^I = \frac{T}{6} = \frac{42}{\Gamma^2} + \frac{1}{80A\Gamma} + \frac{1,1}{24000A^2}. \quad (4.26)$$

3. Погрішність базування заготовок

Похибки деяких розмірів заготовок, що впливають на їх положення в робочій зоні, за умови неспівпадання вимірних і настановних технологічних баз і відсутності додаткового налаштування перед обробкою чергової заготовки:

$$\sigma_{y_1}^{IV} = \sqrt{D_{y_1}^{IV}} = \sigma_n^{IV} = \frac{T(N)}{6} \quad (4.27)$$

де: $T(N)$ – допуск на замикаючу ланку розмірного ланцюга, що зв'язує поверхню обробки (на яку налаштовують) з поверхнею настановної бази.

Сумарна характеристика

випадкової складової погрішності позиціювання:

$$\sigma_{y_1} = (D_{y_1})^{\frac{1}{2}} = \sigma_n = \frac{1}{k_n} \left\{ [k'_n \sigma'_n]^2 + [k''_n \sigma''_n]^2 + [k'''_n \sigma'''_n]^2 + [k''''_n \sigma''''_n]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

4.2. Розрахунково-аналітичний метод прогнозування точності ТО ЛРО

9.2.2. Джерела нестабільностей технологічних прийомів, які створюють погрішність поперечного розміру порожнини (y_j)

В разі використання об'єтивів (лінз) з позитивною хроматичною аберацією величина систематичної складової погрішності позиціювання залежатиме від сполучення довжин хвиль та їх фокусної відстані (табл. 4.1), тобто фокальну площину об'єтивів в робочому випромінюванні буде віддалено від їх головної площі в світлі освітлювачів

Таблица 4.1

λ , мкм	$F = 10$ мм	$F = 30$	$F = 60$	$F = 100$
$\lambda_p = 1,06$ $\lambda_e = 0,55$	0,30мм	0,90	1,81	3,20
$\lambda_p = 1,06$ $\lambda_e = 0,6328$	0,23	0,69	1,08	2,3
$\lambda_p = 0,6943$ $\lambda_e = 0,55$	0,13	0,39	0,78	1,35
$\lambda_p = 0,6943$ $\lambda_e = 0,6328$	0,05	0,15	0,31	0,51

4.2. Розрахунково-аналітичний метод прогнозування точності ТО ЛРО

9.2.2. Джерела нестабільностей технологічних прийомів, які створюють погрішність поперечного розміру порожнини (y_j)

б). Погрішності, що виникають при налаштуванні установки на технологічний режим (y_2)

Налаштування технологічного режиму є важливим етапом технологічної операції. Значення рівня кожного параметру, який налаштовується, і величина його поля розсіяння визначають оптимальне розташування поля розсіяння розмірів порожнин в партії заготовок у межах поля допуску, що забезпечує обробку з мінімальним числом підстроювань і максимальним виходом придатних виробів.

- Певний рівень результату обробки може бути досягнутий при різних комбінаціях фіксованих значень керованих параметрів процесу. Якщо режим обробки не був оптимізований за точністю обробки, що досягається, то може спостерігатися збільшення погрішності результатів із-за невідповідності режимів обробки оптимальним. Це побічно виявляється в складових сумарної погрішності, що позначається на збільшенні поля розсіяння розмірів при одних і тих же варіаціях досліджуваного чинника - через коефіцієнти a_j , d_j , і c_j .

- Точність налаштування вибраного рівня параметру процесу визначається величиною поля розсіяння рівня налаштування і залежить від вибраного методу регулювання параметру і від використовуваної вимірювальної апаратури.

Найбільш простим способом налаштування і управління розмірним результатом обробки є вплив на параметри імпульсів лазерного випромінювання при фіксації рівня останніх. У зв'язку з тим, що регулювання тривалості і кута розбіжності пучка випромінювання у сучасних ЛТУ утруднене, таке налаштування режиму здійснюється зміною рівня імпульсній енергії випромінювання як за рахунок варіювання ємкості накопичувача C або напруги заряду на його обкладинках U_n , так і ослабленням (діафрагмуванням або атенюацією) пучка.

4.2. Розрахунково-аналітичний метод прогнозування точності ТО ЛРО

9.2.2. Джерела нестабільностей технологічних прийомів, які створюють погрішність поперечного розміру порожнини (y_j)

б). Погрішності, що виникають при налаштуванні установки на технологічний режим (y_2)

У першому випадку погрішність установки енергетичного рівня визначається точністю m (%) і ціною ділення C_d відлікового вольтметра, а також дискретністю установки напруги накачування ΔU_H (різницею між значеннями напруги, які відповідають двом найближчим положенням потенціометра). Ця погрішність є випадковою величиною, характерною для даного типу ЛТУ і діапазону режиму роботи:

$$\sigma_{U_H} = (D_{U_H})^{\frac{1}{2}} = \frac{1}{6} (0,5 \cdot C_d + \Delta U_H + m \cdot U_H)$$

При налаштуванні рівня енергії випромінювання за відліком її значення, погрішність установки енергетичного режиму оцінюється безпосередньо за залежністю:

$$\sigma_{y_2} = (D_{y_2})^{\frac{1}{2}} = \sigma_E = \frac{1}{6} (0,5 \cdot C'_d + \Delta E + m' \cdot E) \quad (4.28)$$

де: m' (%) и C'_d - точність та ціна ділення шкали вимірювального приладу; ΔE - дискретність регулювання енергії засобами блоку живлення, набором діафрагм або світлофільтрів.

в). Погрішності внаслідок дрейфу рівня налаштування технологічного режиму (y_3)

Виявляються в систематичній зміні результатів обробки із-за плавного змінення (з часом) енергетичних параметрів випромінювання. Це пов'язано із старінням оптичних елементів випромінювача, забрудненням оптичних елементів фокусуєного вузла.

4.2. Розрахунково-аналітичний метод прогнозування точності ТО ЛРО

9.2.2. Джерела нестабільностей технологічних прийомів, які створюють погрішність поперечного розміру порожнини (y_j)

в). Погрішності внаслідок дрейфу рівня налаштування технологічного режиму (y_3)

- Старіння активних елементів відбувається унаслідок дії теплового і УФ-випромінювання ламп накачування, що для скляних елементів приводить до відновлення вхідної в їх склад речовини $FeCl_3$ в $FeCl_2$, яка поглинає випромінювання довжини хвилі $\lambda = 1,06$ мкм і погіршує характеристики скла (його прозорість). Методи боротьби – оптимальне охолодження елементів квантрону і захист активного елемента від дії УФ-випромінювання. При цьому термін служби останнього зростає до декількох мільйонів імпульсів без істотного (<10 %) зниження потужності генерації.

- Зменшення енергії випромінювання викликається також зношенням лампи накачування – зростанням втрат світлової енергії накачування в її балоні із-за ерозії електродів і утворення нальотів і мікротріщин на внутрішній поверхні прозорої колби. При оптимальному узгодженні хвильового опору ФЛН ρ ($\rho \sim L/C$) і опору лампи R ($0,5\rho < R < \rho$) та достатньому її охолодженні, термін служби лампи досягає 50-100 тис. спалахів.

- Пошкодження дзеркального покриття освітлювача квантрону зменшує потік енергії накачування від лампи накачування, який віддзеркалюється від нього і досягає активного елемента: усувається при використанні “сухих” освітлювачів, тобто які мають дзеркальні покриття на поверхнях, що не піддаються дії агресивних середовищ. Практичний термін служби освітлювача декілька років експлуатації на оптимальних режимах.

- На стійкість дзеркал резонатора впливає багато чинників (його конструкція, режим генерації, умови експлуатації). Сучасні інтерференційні дзеркала при оптимальних температурі, вологості і запиленості повітряного середовища допускають мільйони імпульсів випромінювання без помітного руйнування.

4.2. Розрахунково-аналітичний метод прогнозування точності ТО ЛРО

9.2.2. Джерела нестабільностей технологічних прийомів, які створюють погрішність поперечного розміру порожнини (y_j)

в). Погрішності внаслідок дрейфу рівня налаштування технологічного режиму (y_3)

- Теплова дія невикористаної частини енергії накачування відводиться із квантрону холодоагентом контуру охолодження елементів випромінювача: тип холодоагенту, його склад і прозорість оказують істотний вплив на стабільність параметрів пучка випромінювання. Вчасна заміна холодоагенту, підтримання його прозорості добавками анти оксидантів дозволяє виключити вплив системи охолодження на стабільність параметрів випромінювання впродовж довгого часу.

- Старінням елементів фокусуєчого вузла ЛТУ в оптимальному режимі експлуатації можна нехтувати, оскільки спеціальні конструкції лінз, об'єктивів і дзеркал (відсутність склеювань, просвітлення, певне розташування елементів при їх поєднанні в об'єktiv) стійки до дії потужних пучків лазерного випромінювання. Проте, у відсутність спеціальних засобів захисту оптики від продуктів лазерної ерозії можливе зменшення від імпульсу до імпульсу енергії випромінювання із-за забруднення поверхні оптичного елемента або покривного скла. Найбільш вдалим у виробничих умовах є захист поверхні оптичної компоненти, зверненої до заготовки, плоским поперечним струменем стислого газу або прозорою основою кіноплівки, яка повільно переміщується між об'єktivом і оброблювальною поверхнею заготовки.

4.2. Розрахунково-аналітичний метод прогнозування точності ТО ЛРО

9.2.2. Джерела нестабільностей технологічних прийомів, які створюють погрішність поперечного розміру порожнини (y_j)

в). Погрішності внаслідок дрейфу рівня налаштування технологічного режиму (y_3)

Експлуатація ЛТУ виконується за одним з двох варіантів організації технологічної операції: обробка партії заготовок на налаштованому на певний рівень результату обробки устаткуванні або при постійному контролі його значення, статистичній обробці результатів виміру і видачі команд, що управляють, для корекції режиму обробки. Останній варіант здійснюється при адаптивній організації технологічної операції, що обговорювалося вище (розділ 1.3), систематична деградація режиму опромінення не впливає на результату обробки. За першою формою організації операції поступовий зсув рівня налаштування режиму обробки із-за перерахованих вище причин вимагає систематичного доналаштування режиму роботи ЛТУ з певною періодичністю, залежною від величини поля розсіяння розмірів обробки, рівня і погрішності налаштування, а також від величини допуску на розмір оброблюваного елемента.

Враховуючи фактичні значення довговічності роботи окремих елементів ЛТУ, можна стверджувати, що за умови обов'язкового однократного за зміну підналаштування режиму обробки (наприклад, внаслідок зміни оператора або завдання), доля погрішності результатів із-за зсуву рівня налаштування не значима і може бути виключенні з розгляду. Це підтверджують дані статистичної обробки точкових діаграм розмірів отворів, побудованих для декількох поперечних перетинів ($l = 1 \dots n$). Зсув рівня середнього розміру партії отворів у відповідних один одному перетинах впродовж тривалого періоду їх обробки (50 партій заготовок по 100 порожнин в кожній – неістотний (рис. 4.9) .

4.2. Розрахунково-аналітичний метод прогнозування точності ТО ЛРО

9.2.2. Джерела нестабільностей технологічних прийомів, які створюють погрішність поперечного розміру порожнини (y_j)

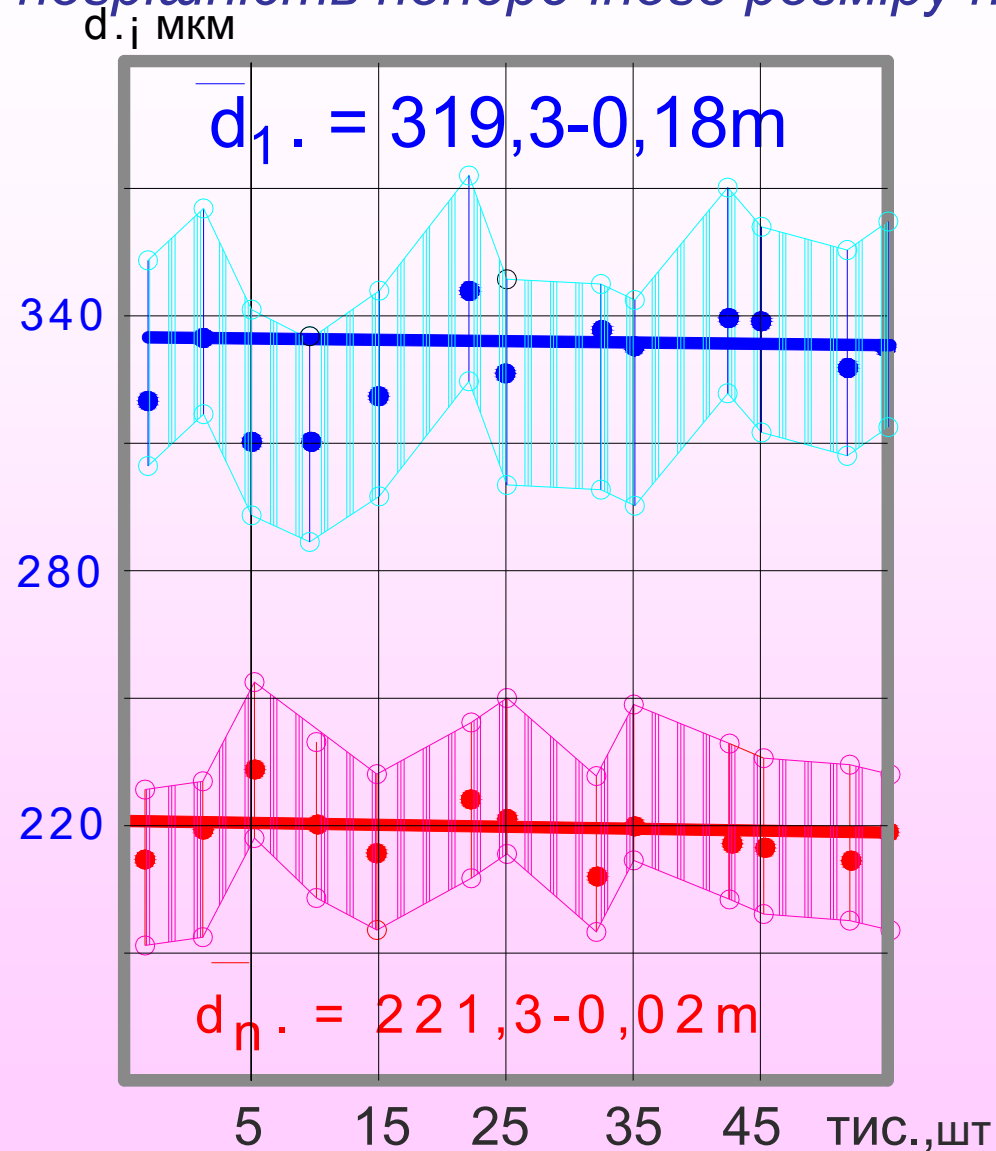


Рис. 4.9. Точкова діаграма розмірів порожнин на верхній та нижній поверхнях заготівки в т партіях

4.2. Розрахунково-аналітичний метод прогнозування точності ТО ЛРО

9.2.2. Джерела нестабільностей технологічних прийомів, які створюють погрішність поперечного розміру порожнини (y_j)

г). Погрішності розташування і закріплення заготовки (y_4).

Ці погрішності, що виникають при позиціюванні заготовки в зону для обробки, визначаються зсувом її поверхні уздовж осі пучка лазерного випромінювання і її перекосом.

Розмірна характеристика першої складової погрішності визначається за результатами статистичних досліджень вживаного способу позиціювання заготовки в конкретній технологічній операції.

При перекосі заготовки її фактична товщина в місці обробки порожнини змінюється випадковим чином (у бік збільшення або зменшення) залежно від напрямку і величини кута перекоосу $\Delta\varphi = 6\sigma_\varphi$ (рис. 4.10):

$$\sigma''_{y_4} = \sqrt{D''_{y_4}} = \sigma''_{пз} = \frac{\delta}{3} \left\{ \frac{1}{\cos[\varphi \pm 3\sigma_\varphi]} - \frac{1}{\cos \varphi} \right\} \quad (4.29)$$

де: φ - кут між віссю пучка випромінювання і нормаллю до поверхні заготовки.

По дії на результат обробки перша погрішність $\sigma_{y_4'}$ аналогічна погрішності фокусування $\sigma_{y_1} = \sigma_\varphi$, а друга – коливанню товщини заготовки $\sigma_{z_1} = \sigma_\delta$ (див. нижче).

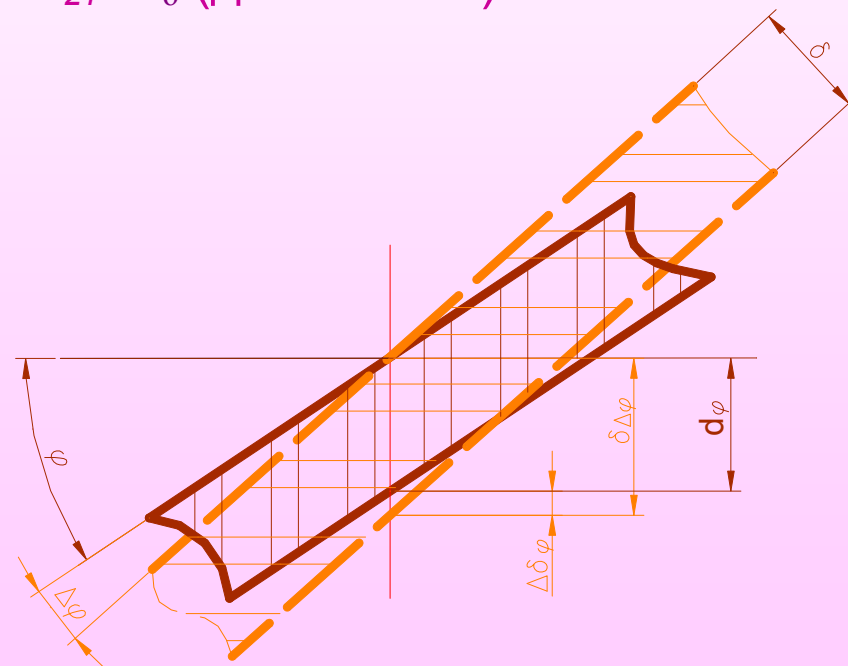


Рис.4.10. Схема формування погрішності позиціювання внаслідок перекоосу заготовки при її установці

4.2. Розрахунково-аналітичний метод прогнозування точності ТО ЛРО

9.2.3. Джерела нестабільностей параметрів заготовки, які створюють погрішність поперечного розміру порожнини

Випадкові зміни деяких розмірів заготовок в партії і властивостей їх матеріалу роблять помітний вплив на хід процесу обробки і на його результати.

а). Коливання товщини заготовки (z_1)

Причиною нестабільності товщини стінки заготовки (у якій обробляють порожнину) є наявність допусків на виготовлення різних елементів заготовки. Чисельне значення її величини дорівнює допуску на товщину, визначеного безпосередньо з креслення, або при розрахунку розмірного ланцюга, в якому в якості замикаючої ланки включено товщину оброблювальної стінки. Числова характеристика цієї випадкової величини:

$$\sigma_{z_1} = \sqrt{D_{z_1}} = \sigma_{\delta} = \frac{It(\delta)}{6} \quad (4.30)$$

б). Погрішності обробки, пов'язані з нестабільністю властивостей оброблюваного матеріалу (z_2)

Характер лазерної ерозії матеріалу заготовки і її результати залежать від умови введення енергії випромінювання в зону обробки, її поглинання поверхнею заготовки і теплофізичними властивостями її матеріалу.

4.2. Розрахунково-аналітичний метод прогнозування точності ТО ЛРО

9.2.3. Джерела нестабільностей параметрів заготовки, які створюють погрішність поперечного розміру порожнини

- Істотним є вплив нестабільності відбивних властивостей поверхні заготовки на довжині хвилі випромінювання, які визначають рівень поглиненої енергії, і залежать не лише від оптичних властивостей матеріалу заготовки і якості її поверхні, але і від температури T_0 , міри її забруднення і наявності на ній окислів або інших плівок. Облік цих нестабільностей утруднений, тому дієвим засобом їх нейтралізації є зниження або усунення відмінностей у відбивних властивостях тим або іншим способом.
- Ще трудніше виконати облік оцінки впливу нестабільності в теплофізичних, структурних і фазових властивостях оброблюваного матеріалу. Завдання ускладнюється при обліку неоднорідності розподілу складових елементів в матеріалі, пір, включень і інших [131]. Ці нестабільності також впливають на теплофізичні властивості, механічні характеристики, а значить і оброблювальність матеріалу. Так, наприклад, поле розсіяння розмірів отворів $\varnothing 0,25\text{мм}$, що обробляються в заготовках із сталі 18Х2Н4ВА при однакових режимах опромінення, складає 35 мкм для цементованих на всю глибину обробки отворів зразків і 52 мкм – для сирих [132]. Це пояснюється зменшенням розплаву в порожнині отвору унаслідок більш ефективного використання енергії випромінювання при зниженні теплопровідності матеріалу (у 1,5 – 2 рази) при збільшенні дисперсності його структури.
- Погрішності цієї групи носять випадковий характер, проте до теперішнього часу не встановлені аналітичні або експериментальні залежності між згаданими властивостями заготовки і відтвореністю результатів.

4.3. Сумарна погрішність обробки порожнин пучком лазерного випромінювання

У розрахункову залежність моделі точності (4.1) і її числові характеристики (4.2) і (4.3) входять, окрім показників вихідних нестабільностей x_j , y_j і z_j , розчленованих на систематичну складову $m_{\tau l}$ і випадкову $D_{\tau l}$, коефіцієнти a_{k1} , b_{k1} і c_{k1} , що визначають перетворювальні властивості ТОС, як системи перетворення одних явищ в інші. Значення цих коефіцієнтів можуть бути визначені з аналізу моделей процесу лазерної обробки порожнин шляхом розрахунку їх часткових похідних:

–для коефіцієнта	$a_{k_2} = \partial d / \partial E$	мкм/Дж;
–для коефіцієнта	$a_{k_3} = \partial d / \partial \tau$	мкм/с;
–для коефіцієнта	$a_{k_4} = \partial d / \partial \theta$	мкм/рад;
–для коефіцієнта	$b_{k_1} = \partial d / \partial (\Delta F)$	мкм/мм; (4.31)
–для коефіцієнта	$b_{k_2} = \partial d / \partial E$	мкм/Дж;
–для коефіцієнта	$b'_{k_4} = b_{k_1} = \partial d / \partial (\Delta F)$	мкм/мм;
–для коефіцієнта	$b''_{k_4} = \partial d / \partial \delta$	мкм/мм;
–для коефіцієнта	$c_{k_1} = c_{k_1}' + c_{k_1}'' = k / \delta + \partial d / \partial \delta$	мкм/мм

Примітка: зміна товщини заготовки позначається на розмірі порожнини двома шляхами.

По-перше, із-за властивій лазерній обробці конусоподібності порожнини k . Поле розсіяння розмірів порожнин із-за коливання товщини заготовки виникає внаслідок конусоподібності порожнини і визначається відповідним коефіцієнтом моделі (4.31)

$$c_{k_1} = \Delta d_k / l t(\delta) = k / \delta$$

По-друге, зміна товщини оброблювальної стінки заготовки позначається на механізмі формування крізного каналу, що також позначається на зміні оброблюваного отвору, що враховується передавальним коефіцієнтом:

$$c_{k_1}'' = \partial d / \partial \delta$$

Сумарна дія коливання товщини заготовки на відтворюваність розмірів отворів виражається узагальненим передавальним коефіцієнтом перетворюючої системи:

$$C_{k_1} = C_{k_1}' + C_{k_1}''$$

4.3. Сумарна погрішність обробки порожнин пучком лазерного випромінювання

Визначення передавальних коефіцієнтів

В якості моделей для визначення передавальних коефіцієнтів моделі можна використовувати аналітичні та (або) емпіричні залежності відповідних показників технологічної операції від керуємих параметрів процесу. Перші – більш універсальні, але недостатньо точні для деяких видів операції. Другі вимагають додаткових експериментальних досліджень для їх побудови за складними методиками та потребують безумовного виконання в операції, що реалізується, дотримання усіх умов проведення експериментальних досліджень.

Як можливо було переконається раніше, більшою точністю характеризуються емпіричні моделі процесу, проте для вирішення завдання прогнозування точності обробки вони мало придатні, оскільки область їх визначення обмежена факторним простором, в якому ставитися експеримент. Крім того, функціональні (аналітичні) залежності дозволяють фізично інтерпретувати отримувані результати, що необхідне для пошуку шляхів вдосконалення процесу. Виходячи з висловлених міркувань, розрахунок коефіцієнтів трансформації перетворюючої системи розрахуємо за відомими залежностями (табл. 5.1 [1]), виконуючи відповідні підстановки:

$$r_0 = \frac{1}{2} F \theta \quad E = P \tau \quad W_p = \frac{AE}{\pi \cdot r_0^2 \cdot \tau}$$

Отримані залежності для розрахунку значень коефіцієнтів зведені в табл. 4.2 (за основу прийняті залежності (5.2) і (5.4) [1]).

Відсутність кількісних зв'язків між нестабільністю мікроструктури імпульсів лазерного випромінювання, властивостями матеріалу заготовки з одного боку і погрішностями обробки, з іншого боку, не дає можливість розрахувати коефіцієнти a_{k1} , b_{k3} , і c_{k2} , що може декілька понизити вірогідність передбачення показників точності проектуємої операції. Проте, це не перешкоджає аналізу загального балансу неоднорідностей з метою виділення найбільш істотних для розробки заходів щодо їх скорочення або усунення.

4.3. Сумарна погрішність обробки порожнин пучком лазерного випромінювання

Передавальні коефіцієнти моделі точності

Таблиця 4.2

Коефіцієнти моделі (4.1)	Початкова залежність	Розрахункова залежність
$a_{k2} = \partial d / \partial E_{\text{МКМ/Дж}}$	$d = 2[r_0^3 + \frac{3E\tau\gamma}{\pi L_0}]^{1/3}; \{E = I_p \tau \pi r_0^2\}$	$\frac{2\tau\gamma}{\pi L_0 \sigma_0} [r_0(r_0 + \frac{3A I_p \tau \gamma}{L_0})^2]^{-1/3}$
$a_{k3} = \partial d / \partial \tau_{\text{МКМ/с}}$	- “ -	$\frac{2r_0 A I_p}{L_0} \tau \gamma [r_0(r_0 + \frac{3A I_p \tau \gamma}{L_0})^2]^{-1/3}$
$a_{k4} = \partial d / \partial \theta_{\text{МКМ/рад}}$	- “ - { $r_0 = 1/2F?$ }	$F^3 \theta^2 [(F\theta)^3 + \frac{24E\tau\gamma}{\pi L_0}]^{-2/3}$
$b_{k1} = \partial d / \partial (\Delta F)_{\text{МКМ/мм}}$	- “ - { $r_0 = 1/2(F? + ? FD/2)$ }	$2r_0^2 \tau \gamma [r_0^3 + \frac{3E\tau\gamma}{\pi L_0}]^{-2/3}$
$b'_{k2} = \frac{\partial d}{\partial E} = a_{k2}_{\text{МКМ/Дж}}$	- “ -	a_{k2}
$b'_{k4} = \frac{\partial d}{\partial (\Delta F)} = b_{k1}_{\text{МКМ/мм}}$	- “ -	b_{k1}
$b''_{k4} = \frac{\partial d}{\partial \delta} + \frac{k}{\delta} \text{ МКМ/мм}$	$\left\{ \frac{12E}{\pi r \delta [c T_{\text{пл}} + c'(T_B - T_{\text{пл}}) + L_B + L_{\text{пл}}]} \right\}^{1/2}$	$\frac{k}{\delta} + \frac{1}{2} \left\{ \frac{12A I_p r \sigma \tau}{\rho \delta^3 [c T_{\text{пл}} + c'(T_B - T_{\text{пл}}) + L_B + L_{\text{пл}}]} \right\}^{1/2}$
$c_{k1} = \frac{\partial d}{\partial \delta} + \frac{k}{\delta} \text{ МКМ/мм}$	- “ -	b''_{k4}

4.3. Сумарна погрішність обробки порожнин пучком лазерного випромінювання

Як приклад використання розробленої методики прогнозування точності процесу оцінимо показники точності обробки отворів $d = 0,25^{+0,01}$ мм в заготівках корпусу форсунки дизеля із сталі 18Х2Н4ВА (цементована на глибину 2 мм) з товщиною стінки $\delta = 2+0,15$ мм.

Для операції використано ЛТУ з лазером на склі типу "Кристал-6", її характеристики, а також режими обробки приведені в табл. 4.3.

Результати розрахунку, які приведено в табл. 4.4, отримані в припущенні нормального характеру розподілу випадкових складових, що виходить з наслідку додатку до Центральної теореми теорії імовірності, що підтверджується результатами багато чисельних експериментів.

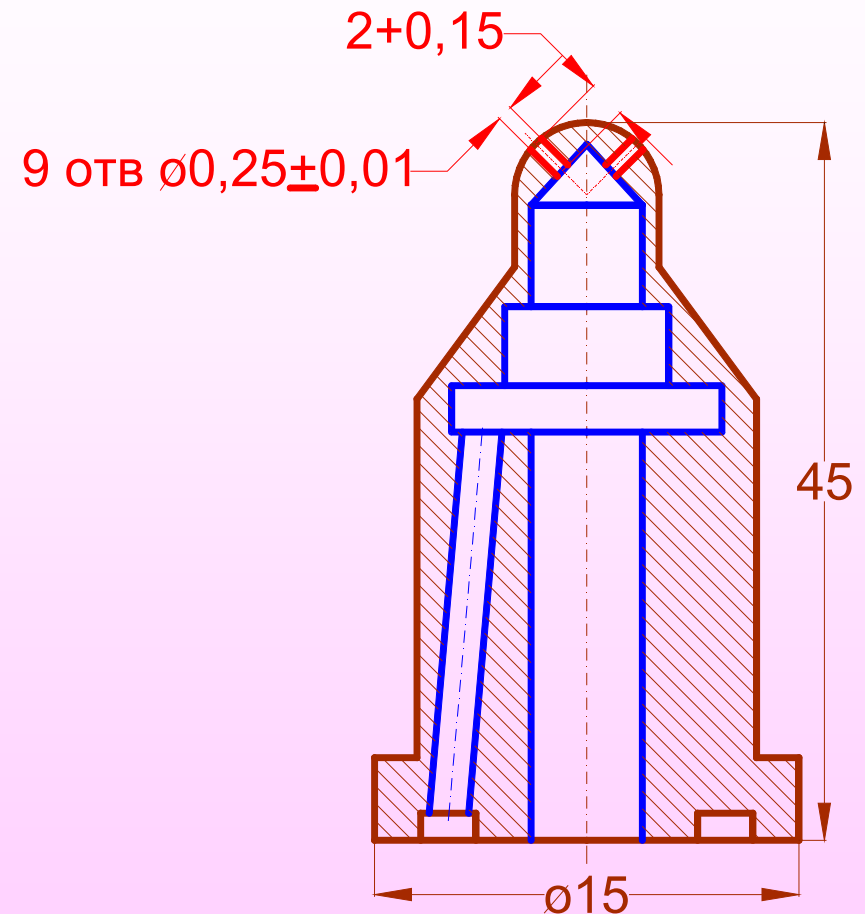


Рис.4.11. Ескіз корпусу форсунки дизеля

4.3. Сумарна погрішність обробки порожнин пучком лазерного випромінювання

Обладнання та режими обробки отворів в форсунках

Таблиця 4.3

№пп	Найменування параметру	Розмірність	Значення
1	Активний елемент (скло: Nd^{+3}) Розміри ($d \times l$)	мм	7*130
2	Резонатор: довжина L Дзеркало (напівпрозоре) (50%) глухе:	мм мм мм	1000 $R = \infty$ $R = 2000$
3	Ємкість ФЛН, C	мкФ	150
4	Напруга накачування U_n	В	1800
5	Імпульсна енергія випромінювання, E	Дж	1,8
6	Тривалість імпульсу, τ	с	$5 \cdot 10^{-4}$
7	Кут розбіжності пучка, θ	рад	$3 \cdot 10^{-3}$
8	Кількість імпульсів, N	штук	4
9	Частота надходження імпульсів, f	Гц	2
10	Телескоп, кратність, Γ	раз	1,5
11	Фокусна відстань, F	мм	100
12	Радіус зони опромінення, r_0	мм	$5 \cdot 10^{-2}$
13	Інтенсивність випромінювання в пучці, I_p	Вт/см ²	$8 \cdot 10^7$
14	Коефіцієнт поглинання випромінювання поверхнею заготовки, A	%	80
15	Окуляр наочної системи, збільшення, Γ_o	раз	15

4.3. Сумарна погрішність обробки порожнин пучком лазерного випромінювання

Табл.4.4

	Величина	Розмірність	Значення
Складові сумарної погрішності	σ_{x2}	Дж	0,04
	a_{k2}	мкм/Дж	38
	σ_{x3}	с	$7 \cdot 10^{-6}$
	a_{k3}	мкм/с	$2,3 \cdot 10^5$
	$a_{k3} m_{x3}$	мкм	11,0
	σ_{x4}	рад	$6 \cdot 10^{-4}$
	a_{k4}	мкм/рад	710
	σ_{y1}	мм	0,1
	b_{k1}	мкм/мм	15,0
	$b_{k1} m_{y1}$	мкм	34,5
	σ_{U_n}	В	19,0
	σ_{x2}	Дж	0,08
$b_{k2} = a_{k2}$	мкм/Дж	38,0	
σ'_{y4}	мм	0,12	
$b'_{k4} = b_{k1}$	мкм/мм	15,0	
σ''_{y4}	мм	0,003	
$b''_{k4} = c_{k1}$	мкм/мм	110,0	
σ_{z1}	мм	0,025	
c_{k1}	мкм/мм	110,0	
Сумарна погрішність обробки	$m\Delta d$	мкм	45,5
	$D\Delta d$	мкм ²	27,5
	Δd	мкм	$45,5 \pm 15,7$

4.3. Сумарна погрішність обробки порожнин пучком лазерного випромінювання

Сумарна розрахункова величина погрішності обробки, яка рівна $45,5 \pm 15,7$ мкм, не включає нестабільність розмірів отворів внаслідок нерегулярності часової мікроструктури імпульсів, неоднорідності матеріалу заготовки і стану їх поверхні. Цим пояснюється деяка розбіжність з результатами експериментів по обробці партії отворів в корпусах розпилювачів форсунок дизелів, що має середньоквадратичне відхилення розмірів $S_d = 8,6$ мкм, тобто поле розсіяння $\Delta d = 6S_d = 52,8$ мкм [133].

Кількісний аналіз структури сумарної погрішності дозволяє оцінити вклад кожного джерела нестабільності. На рис.4.12 зображено структурну діаграму сумарної погрішності.

По-перше, не дивлячись на значну частину її систематичної складової, вклад останньої неважко зменшити, якщо врахувати при перетворенні і позиціюванні пучка випромінювання різницю у фокусній відстані F_λ лінзи для робочого та додаткового випромінювання, а також усунути дію задньої ділянки імпульсу τ_3 .

По-друге, елементи випадкової складової сумарної погрішності обробки дозволяють оцінити якісні характеристики використовуваного устаткування і технологічних прийомів. Так, великий вклад нестабільності товщини заготовки і помилок в положенні останньою в каустиці пучка випромінювання ΔF , вимагає зменшувати допуск на товщину заготовки і застосовувати точніші методи перетворення і відносного позиціювання пучка випромінювання і заготовки.

4.3. Сумарна погрішність обробки порожнин пучком лазерного випромінювання

Істотний вклад у величину погрішності, які вносять коливання енергетичних і часових характеристик пучка випромінювання, може служити підставою для підвищення стабільності джерел живлення ЛТУ і точності їх відлікових пристроїв.

Суттєве значення для вдосконалення процесу має величина передавальних коефіцієнтів, оскільки вони виражають схильність системи до реакції на її обурення, причому незначущість деяких вхідних нестабільностей (перекіс заготівки і нестабільність кутових характеристик пучка випромінювання) не дає підстави сподіватися на збереження цього співвідношення і надалі, оскільки останні характеризують устаткування, оснащення, прийоми, заготівку, а коефіцієнти – процес. Тому навіть перехід на інші умови опромінення може викликати іншу реакцію процесу на вхідні обурення. Аналіз структури кожного коефіцієнта, пошук нових виразів для них, що точніше враховують фізичні явища, дозволять знайти шляхи скорочення не лише сумарної систематичної величини, але і її випадкових складових.

На рис. 4.13. показані перетини розпилюючого отвору в корпусі форсунки дизеля (рис.4.11). Зважаючи на те, що значення розмірних, якісних та техніко-економічних показників технологічної операції залежать від одних і тих же параметрів пучка випромінювання та умов опромінення (режиму обробки), сумарна похибка або її складові, які найбільш збурюють ТОС, можуть бути перетворені в мінімізуємі функціонали для формування узагальненої моделі процесу обробки порожнини і для її використання при рішенні оптимізаційної задачі проектування багатокритеріальної технологічної операції [1].

4.3. Сумарна погрішність обробки порожнин пучком лазерного випромінювання

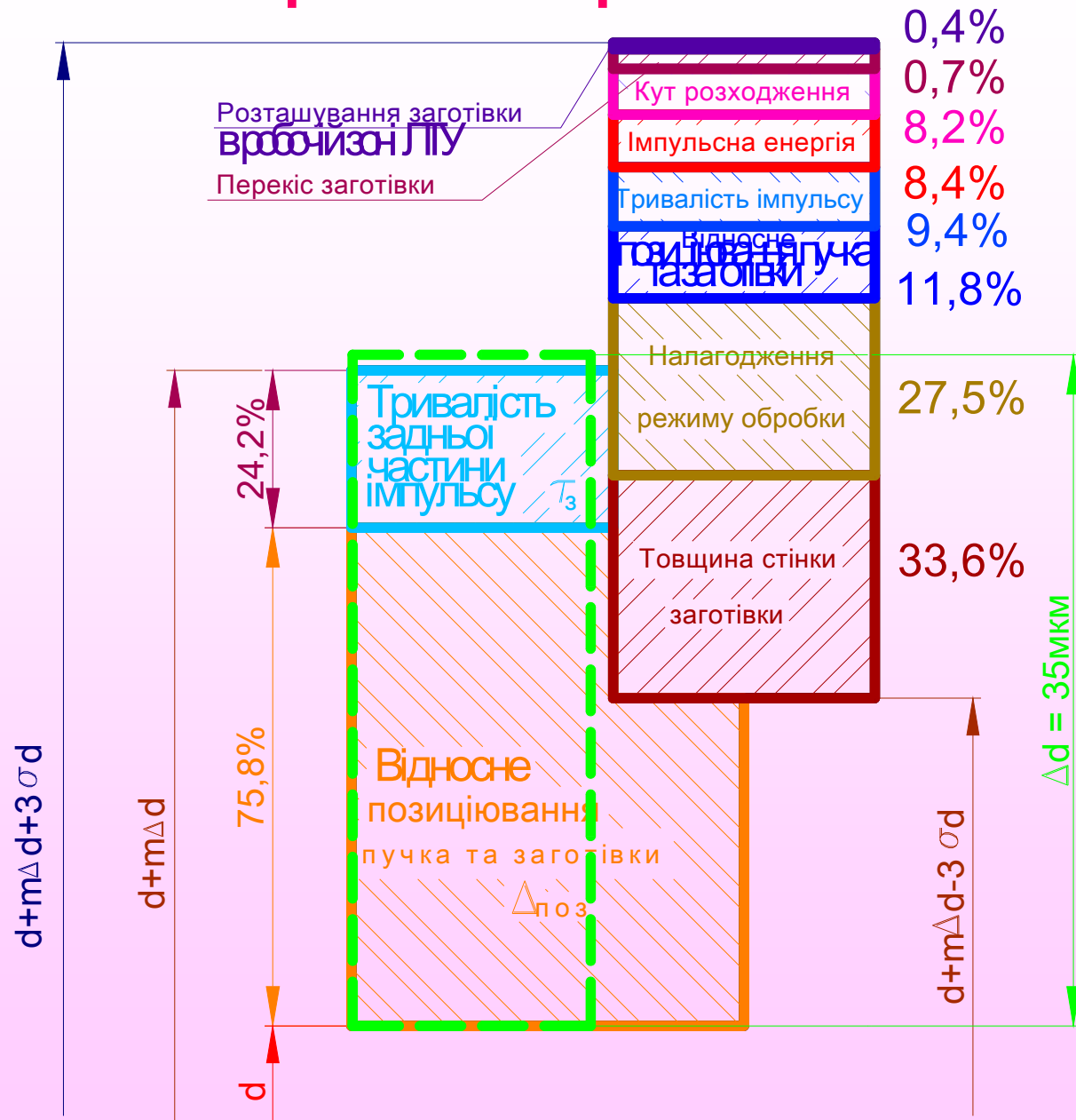


Рис.4.12. Структура сумарної погрішності розміру отворів в розпилювачах палива після ЛРО

4.3. Сумарна погрішність обробки порожнин пучком лазерного випромінювання

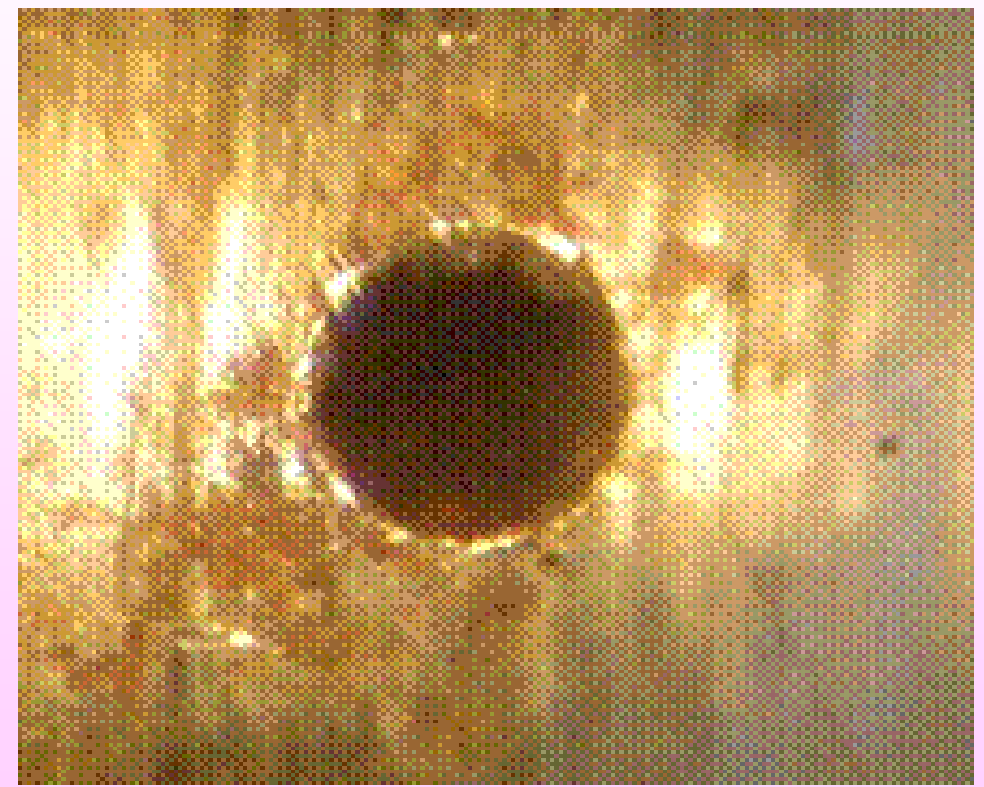
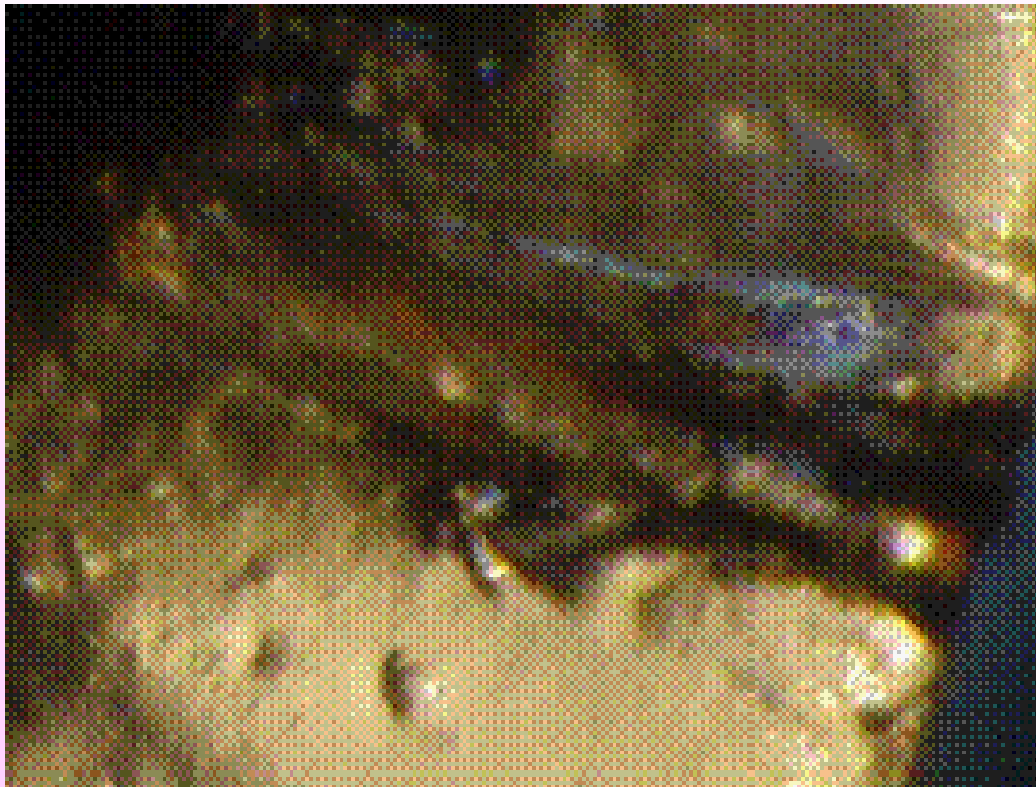


Рис. 4.13. Подовжній (а) та поперечний (б) перетини отвору в форсунці дизеля

Додаток до розділу 4 (завдання на СРС)

1. Завдання на СРС 1: Загально технологічне поняття точності обробки. Яку точність обслуговує технологія обробки. Перерахувати комплекс показників, за якими оцінюється загальна точність обробки. Навести приклади виробів з різними наборами показників точності. Порівняйте поняття точності та похибки обробки, за яким критерієм доцільніше досліджувати технологічний процес?

Наведіть підстави використання аналітичних методів дослідження точності технологічної операції. Чому для прогнозування очікуваної точності не використовують математичні моделі процесу обробки?

Принцип суперпозиції для побудови моделі точності технологічної операції. Перетворююча система як підстава для побудови постульованої моделі. Навести склад перетворюючої системи, яка повинна замінити Технологічну Систему, що Обробляє (ТСО).

Які складові частини ТСО приймають участь у формуванні похибки обробки. Яким чином початкові нестабільності процесу відбиваються у коливанні вихідних його показників? Наведіть розмірність коефіцієнтів трансформації моделі точності процесу лазерної розмірної обробки. За яких умов допустима лінеаризація моделі точності та для чого це робиться? Числові характеристики показника точності за умови його нормального розподілу. На який підставі результати обробки вважаються випадковими нормально розподіленими величинами?

Додаток до розділу 4 (завдання на СРС)

2. Завдання на СРС 2: Наведіть класифікацію сумарної похибки обробки отвору пучком лазерного випромінювання. Коливання яких загальних параметрів процесу є базовим для її побудови? До якого рівня треба деталізувати елементарні похибки, щоб мати змогу спростити вигляд моделі точності обробки?

3. Завдання на СРС 3: Проаналізуйте структуру складових частин похибки, яку вносять коливання параметрів пучка випромінювання. Визначте джерела нестабільностей параметрів інструменту для найбільш пристосованого для розмірної обробки отворів лазера на твердому тілі.

4. Завдання на СРС 4: Обґрунтуйте необхідність імпульсного режиму опромінювання для розмірної обробки з випаруванням матеріалу заготовки: докажіть необхідність високого рівня густини потужності для цього механізму руйнування та переривів для евакуації продуктів ерозії з порожнини отвору, що обробляється.

5. Завдання на СРС 5: Розрахуйте похибку імпульсної енергії випромінювання твердотільного лазера на гранаті, яку визиває коливання напруги накачки 20В за її середнім значенням $U = 1850\text{В}$ та рівнем енергії $E = 2\text{Дж}$ (ємність формуючої лінії накачки $C = 300\text{мкФ}$).

Яку похибку також потрібно враховувати для кристалічних матриць активних середовищ. Розрахуйте її величину для випадку нагріву матриці гранату до середньої температури $T = 550\text{С}$ з її коливанням у інтервалі $\Delta T = 50\text{С}$.

Додаток до розділу 4 (завдання на СРС)

6. Завдання на СРС 6: Проаналізуйте причини коливання загальної тривалості імпульсу випромінювання. Розрахуйте її чисельну характеристику для випромінювача на неодимовому склі, який працює з рівнем енергії $E = 2,5 \text{ Дж}$ (накачка до $U = 1675 \pm 10 \text{ В}$ на ємності 150 мкФ) та тривалості накачки $\tau = 1,0 \text{ мс}$, що визначає тривалість імпульсу $\tau = 300 \text{ мкс}$.

7. Завдання на СРС 7: Як впливає на похибку розмірів отворів після лазерної обробки макроструктура імпульсу випромінювання? Які вимоги до переднього фронту імпульсу ставляться у зв'язку з необхідністю енергійного початку процесу обробки; наскільки ці вимоги виконуються у реальних макроструктурах імпульсів?

8. Завдання на СРС 8: За яким законом повинна змінюватись потужність випромінювання у серединній частині імпульсу за умови підтримання енергійного характеру руйнування матеріалу заготовки? Запропонуйте засоби або способи керування інтенсивністю випромінювання на цій частині імпульсу.

9. Завдання на СРС 9: Обґрунтуйте характер впливу подовженого спаду інтенсивності у кінцевій частині імпульсу на якість обробки. За якою розрахунковою схемою можна передбачити похибку з цієї причини? Визначте її величину для випадку опромінювання зразка із сталі 45 імпульсом випромінювання тривалістю 500 мкс із задньою частиною 100 мкс за умови концентрації енергії у зону діаметром $0,01 \text{ мм}$ до інтенсивності $5 \cdot 10^7 \text{ Вт/см}^2$ у передній частині, та $6 \cdot 10^5$ – у задній. Які засоби боротьби з цим джерелом похибки можете запропонувати?

Додаток до розділу 4 (завдання на СРС)

10. Завдання на СРС 10: Поясніть причини нестабільності кута розходження пучка випромінювання. Розрахуйте її числову характеристику для випромінювача на гранаті $\text{Ø}6\text{мм}$ та довжиною $l = 100\text{мм}$ з полу конфокальним резонатором ($L = 500\text{мм}$ та $R_{100\%} = 1000\text{мм}$), який збуджується накачкою потужністю $P_n = 2000 \pm 20\text{Вт}$ (поріг генерації $P_p = 500\text{Вт}$).

11. Завдання на СРС 11: Систематизуйте технологічні прийоми, які виконуються перед та під час технологічної операції. Яку роль відіграють суб'єктивні властивості оператора під час настройки відносного положення заготовки та інструменту, режиму обробки та розташування заготовки у робочій зоні? Чим можна скоротити перелік помилок оператора? Новітні методи виконання деяких технологічних прийомів.

12. Завдання на СРС 12: Наведіть приклади розрахунків помилок позиціювання пучка випромінювання та заготовки. Які з них є систематичними та за яких умов вони можуть бути скороченими або усунутими? Проаналізуйте детально похибки візуального виконання цієї операції, докажіть, що вони є об'єктивними наслідками проявлення хвильової та корпускулярної теорії світла.

13. Завдання на СРС 13: Запропонуйте методи підвищення якості настройки за допомогою використання аналогових або автоматизованих схем. Які вимоги можна висунути до якості поверхонь заготовки щоб зменшити похибку настройки.

Похибки які з'являються під час налагодження режиму випромінювання. Від чого залежить точність настройки і як впливають параметри використаних приладів на якість виконання переходу?

Додаток до розділу 4 (завдання на СРС)

14. Завдання на СРС 14: Наведіть джерела систематичного дрейфу рівня настройки енергетичних та інших параметрів пучка випромінювання. За яких умов можна цю систематичну похибку не враховувати під час прогнозних розрахунків?

15. Завдання на СРС 15: Проаналізуйте можливі похибки у положенні заготовки під час її розташування у робочій зоні. До яких наслідків ведуть окрему види похибок? Чи можна визначити їх випадкові характеристики експериментальними методами? Пропонується вивести розрахункову залежність для урахування неточності положення заготовки у робочій позиції та зробити оціночний розрахунок очікуваної похибки відносного положення заготовки за багато кратним повторенням переходу.

16. Завдання на СРС 16: Які властивості заготовки коливаються та впливають на відтворюваність розмірних результатів обробки? Чи можна врахувати їх вплив під час проектування технологічної операції? Через які механізми впливає неточність товщини заготовки на нестабільність отворів після лазерної обробки? Які об'єктивні висновки можна зробити о якості попередньої операції що до впливу її похибок на якість лазерної обробки?

17. Завдання на СРС 17: Чи значуще впливають коливання рівня поглинання променистої енергії поверхнею заготовки на результати прошивки отворів? Запропонуйте ефективні методи стабілізації оптичних властивостей поверхні.

Які висновки можна зробити щодо впливу неоднорідності структури та складу матеріалу на його здатність до обробки та що рекомендувати для оптимальної організації операції?

Додаток до розділу 4 (завдання на СРС)

18. Завдання на СРС 18: Яким чином знаходяться коефіцієнти трансформації перетворюючої системи, яка заміняє ТСО під час аналізу точності обробки? Докажіть, що аналітичні методи біль доцільні для цього.

За якою метою величини коефіцієнтів можуть бути врахованими на етапі оптимізації технологічної операції?

19. Завдання на СРС 19: Аналіз структури сумарної похибки розмірів лазерної обробки отворів. Які складові частини перевершують інші? Приведіть приклади - яким чином можна знизити вплив початкових нестабільностей на величину похибки. Які конструктивні рішення одержують за допомогою аналізу структури похибки? Розрахуйте складові частини сумарної похибки для такого варіанту обробки:

- заготовка – сталь 18Х2Н4ВА, завтовшки $\delta = 2+0,15\text{мм}$;
- отвір – $\text{Ø}0,25\pm 0,01\text{мм}$

режими обробки розраховуються за схемою №2 Steffen'a.

20. Завдання на СРС 20: Визначити шляхи впливу на сумарну похибку на основі аналізу її кількісної структури:

- вдосконалення технологічного обладнання;
- використання методів параметричного впливу на пучок випромінювання;
- вдосконалення методів налагодження технологічної схеми опромінювання;
- підвищення вимог до якості заготовки (розмірних та до матеріалу);
- використання засобів покращання теплових властивостей матеріалу заготовки;
- використання адаптивних форм організації технологічної операції.

Контрольні запитання та завдання

(розділ 4)

1. Що мають на увазі, розглядаючи проблеми точності обробки, конструктор, метролог та технолог?
2. Якими показниками визначається точність виготовлення деталі?
3. Чому, розглядаючи технологічну точність, зручніше використовувати поняття погрішності? Сформулюйте поняття погрішності обробки.
4. Що визначає сумарна погрішність технологічної операції?
5. Яка головна вимога до застосування принципу суперпозиції для аналізу сумарної погрішності обробки в технологічній операції?
6. Наведіть класифікацію складових сумарної похибки ЛРО порожнин, забезпечивши виконання умов принципу суперпозиції та їх прив'язку до учасників ТОС.
7. Які погрішності та їх джерела пов'язані з нестабільністю параметрів інструменту – пучка лазерного випромінювання?
8. Які погрішності та їх джерела пов'язані з нестабільністю технологічних прийомів ЛРО та необхідного для їх реалізації технологічного оснащення?
9. Які погрішності та їх джерела пов'язані з нестабільністю параметрів заготовки?
10. В якому вигляді постулюється аналітична модель сумарної погрішності якісних та кількісних показників технологічної операції ЛРО на базі використання принципу суперпозиції?
11. Навести чисельні характеристики сумарної погрішності розмірних результатів ЛРО та їх взаємозв'язок в разі нормального закону розподілу результатів обробки.

Контрольні запитання та завдання

(розділ 4)

12. Яким чином можна представити ТОС, як деяку систему перетворення початкових нестабільностей учасників технологічної операції в її якісні характеристики?

13. Причини нестабільності енергетичних характеристик лазерного проміню для аморфних та кристалічних активних середовищ. Принцип об'єднання різних за природою нестабільностей в єдиний показник.

14. Причини нестабільності загальної тривалості імпульсу випромінювання та її зв'язок з нестабільністю процесу накачування активного середовища.

15. Яким чином впливає вид макроструктури лазерного імпульсу випромінювання на систематичну складову сумарної похибки та за допомогою яких засобів вдається знизити її величину для одно імпульсної та багато імпульсної обробки?

16. Які причини нестабільності кута розбіжності пучка випромінювання та її зв'язок з нестабільністю процесу накачування активного середовища?

17. Які складові погрішності утворюються внаслідок похибок виконання технологічних прийомів під час реалізації ЛРО?

18. Систематичні та випадкові нестабільності, які утворюються при відносному позиціюванні оптичного перетворюючого елемента та поверхні заготовки візуальним методом. Яким чином можна усунути систематичну помилку цієї процедури – хроматичну аберацию?

19. Порушення якого принципу співвідношення технологічних баз приводить до виникнення погрішності у взаємному розташуванні поверхні заготовки та пучка випромінювання?

20. Внаслідок яких явищ здійснюється деградація режиму лазерної обробки по мірі обробки партії заготовок?

Контрольні запитання та завдання

(розділ 4)

21. За яких умов можна виключити врахування дрейфу режиму роботи випромінювача на величину сумарної похибки обробки?

22. Чим можна забезпечити стабільність умов опромінення (параметрів перетворюючого оптичного елемента) при обробці партії заготовок?

23. До яких наслідків приводить нестабільність умов розташування заготовки в робочій зоні ЛТУ?

24. Які нестабільності параметрів заготовки та її матеріалу впливають на величину сумарної похибки технологічної операції? Які з них піддаються врахуванню та усуненню?

25. Яким чином можна визначити значення перетворюючих коефіцієнтів ТОС для моделі сумарної її похибки?

26. Які висновки можна зробити, вивчаючи структуру сумарної погрішності ЛРО? Чи можна використати результати розрахунків величини похибки на етапі проектування операції для оптимізації режимів обробки?

Бібліографічний опис до розділу 4

123. Венцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и её инженерное прилжение. – М: Наука, 1988. – 480с.
124. Котляров В.П., Коваленко И.С., Анякин Н.И. ОКГ для лазерных технологических установок. – Сб.: Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов. – Тула: ТПИ, 1985, С. 31-35
125. Вакс Е.Д., Соколов Б.М. Станки для лазерной обработки. – Станки и инструмент, 1977, №9, С. 35-37
126. Коваленко В.С., Котляров В.П., Дюмин В.В. Анализ погрешности при лазерной обработке материалов. – Технология и автоматизация маш-ния, 1976, №17, С. 18-21
127. Методы повышения точности лазерной размерной обработки /М.Н.Либенсон, Г.Н.Суслов, А.Н.Кокора и др. – Л: Знание, 1973, - 40с.
128. Действие излучения большой мощности на металлы / С.И.Анисимов, Я.А.Имас, Г.С.Романов и др. – М: Наука, 1972. – 272с.
129. Лазерная и электроннолучевая обработка материалов Н.Н.Рыкалин, А.А.Углов, И.В.Зуев и др. – М: Машиностроение, 1985, 496с.
130. Беломестов П.И. Перестраиваемый резонатор с зеркалом переменной кривизны. – Квантовая электроника, 1973, №4(16), С.110-113
131. Бреховских В.Ф., Рыкалин Н.Н., Углов А.А. О возможности влияния содержания газов в металлах на зону воздействия луча лазера. – ДАН СССР, 1979, т.190, №5, С.1059-1062
132. Применение лазерной технологии при выполнении отверстий в деталях топливной аппаратуры / В.С. Коваленко, В.П. Котляров ВП., А.И. Бычков и др. – Технология и организация производства, 1973, №9, С.34-36
133. Коваленко В.С., Котляров В.П., Снегс В.Л. Лазерная размерная обработка в дизелестроении. – Труды ЦНИИДИ, 1979, с.144-155.