

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

В.Д. Сотников, Ю.О. Невешкін, В.В. Третьак, С.В. Худяков

ТОЧНІСТЬ ФОРМОУТВОРЕННЯ ПОВЕРХОНЬ І БАЗУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ

Навчальний посібник

Харків «ХАІ» 2018

УДК 621.7.018:658.512 (075.8)
Т64

Колектив авторів:

В. Д. Сотников, Ю. О. Невешкін, С. В. Худяков, В. В. Третьак

Рецензенти: канд. техн. наук, проф. Ю. В. Дудукалов,
канд. техн. наук, доц. М. Ф. Савченко

Точність формоутворення поверхонь і базування деталей
Т64 [Електронний ресурс]: навч. посіб. / В. Д. Сотников, Ю. О. Невешкін,
С. В. Худяков, В. В. Третьак; за заг. ред. В. Д. Сотникова. – Харків :
Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін.-т», 2018.
– 206 с.

Викладено науково-методичні основи аналізу, розрахунків та оптимізації точності формоутворення поверхонь та базування деталей в технологічних процесах виготовлення деталей авіаційних і ракетно-космічних об'єктів.

Наведено методики і розрахунково-технологічні вправи виявлення та попередження браку, оптимізації операційних розмірів. Подано приклади комплексного розмірного аналізу та оптимізації схем базування деталей в робочій зоні металообробного обладнання для досягнення заданих вимог технічної документації.

Для студентів авіаційної та ракетно-космічної галузі при вивченні професійно-орієнтованих дисциплін і виконанні курсових та дипломних проектів, а також для аспірантів і науковців.

Іл. 137. Табл. 13. Бібліогр.: 46 назв

УДК 621.7.018:658.512 (075.8)

© Колектив авторів, 2018

© Національний аерокосмічний
університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут», 2018

ЗМІСТ

	ВСТУП	5
1	АНАЛІЗ, РОЗРАХУНКИ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ТОЧНОСТІ ФОРМОУТВОРЕННЯ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ	6
1.1	Основні терміни, поняття та визначення	6
1.2	Фактори, що впливають на дійсну похибку формоутворення поверхонь	14
1.3	Методи дослідження факторів, що впливають на дійсну похибку формоутворення поверхонь деталей.....	38
1.4	Принципи визначення очікуваної точності при автоматичному забезпеченні координуючого розміру.....	57
1.5	Підсумовування складових очікуваної похибки	80
1.6	Розмірний аналіз точності формоутворення торцевих поверхонь та визначення технологічних розмір-координат	88
1.7	Розрахунково-технологічні вправи визначення параметрів точності формоутворення поверхонь і браку деталей	103
1.7.1	Тема 1. Визначення вірогідності браку у формоутворюючих операціях, що виконуються в умовах несуміщення баз	103
1.7.2	Тема 2. Перерахунки і оптимізації операційних розмірів для забезпечення 100%-ної придатності деталей, що оброблюються в умовах несуміщення конструкторських і технологічних баз	112
2	АНАЛІЗ, РОЗРАХУНКИ І ОПТИМІЗАЦІЯ ТОЧНОСТІ БАЗУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ У ФОРМОУТВОРЮЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОПЕРАЦІЯХ	116
2.1	Загальні відомості про базування	116
2.2	Прикладна теорія базування	120
2.3	Принцип суміщення баз	124
2.3.1	Основні терміни, поняття, визначення	124
2.3.2	Принцип суміщення баз при розробленні операції	125
2.3.3	Принцип суміщення баз і послідовність операцій	130
2.4	Вибір та обґрунтування установочної бази	132
2.4.1	Загальні умови	132
2.4.2	Вибір в умовах відмовлення від суміщення баз	134
2.5	Вибір та обґрунтування координуючої бази	142
2.5.1	Загальні положення	142
2.5.2	Перерахування розмірів при виборі координуючої бази	147
2.6	Поняття про розподіл похибок	155
2.6.1	Розподіл похибок взаємного положення двох установочних баз	155

2.6.2	Розполовинювання похибки P , зв'язаної з установленням деталі	158
2.7	Розрахунково-технологічні вправи визначення та оптимізації параметрів точності базування деталей	160
2.7.1	Тема 1. Оптимізація технологічних розмірів-координат для мінімізації браку деталей за креслярськими розмірами в умовах несуміщення конструкторських і технологічних баз при дотриманні правила єдиної установочної бази	160
2.7.2	Тема 2. Оптимізація технологічних розмірів-координат для мінімізації браку деталей за креслярськими розмірами в умовах не суміщення конструкторських і технологічних баз при порушенні умови найменшої похибки та правила єдиної установочної бази.....	167
2.7.3	Тема 3. Розрахунки та оптимізація точності технологічних розмірів з урахуванням варіантів розподілу похибок взаємного положення двох установочних баз в умовах серійного виробництва деталей партіями на заздалегідь налагодженому устаткуванні	172
2.8	Приклади і опис схем установлення та базування деталей	182
2.9	Таблиця 13 – Значення нормованої функції Лапласа	195
	Заключення	197
	Бібліографічний список	198

ВСТУП

Людині для її існування потрібні матеріальні та культурні блага, джерелами одержання яких є предмети природи і людська праця. Природа надає в розпорядження людини мізерно малу кількість предметів, які можна використовувати безпосередньо без затрат праці людини. Тому людині доводиться майже завжди витрачати працю і час, щоб шляхом якісного перетворення пристосовувати предмети природи для задоволення своїх потреб. Якісна зміна предметів природи, що здійснюється людиною, одержала назву "технологічний процес". Слово "технологія" має грецьке і латинське походження: **techne** – мистецтво, наука, ремесло і **logos** – вчення, що означає вчення про ремесло.

Нині цьому поняттю надається значення сукупності знань, навичок та компетенцій у методах, способах, засобах, закономірностях і наукових принципах здійснення процесів і операцій машинобудування (механічних, електрофізичних, складальних, зварювальних, ультразвукових і т. п.).

Технологія виробництва авіаційної та ракетно-космічної техніки (АРКТ) – це галузь науки, що займається оволодінням закономірностей у процесі виготовлення наукоємних машин з метою використання цих закономірностей для забезпечення необхідної якості при найменшій собівартості виробництва. Тому науково-технічні епохи вирізняються не тим, що виробляється, а чим і як: методами, способами, засобами, витратами. Від того, яким сумарним комплексом авіаційних та ракетно-космічних технологій володіє держава, залежить ефективність виробництва в країні в цілому, продуктивність праці в усіх галузях економіки.

Виготовлення машин розпочинається з моменту, коли початковим матеріалам починають надавати геометричні параметри і фізико-механічні властивості, необхідні для роботи машин, тобто від виготовлення напівфабрикатів деталей до їх складання та випробування. У такій широкій галузі, як технологія виробництва АРКТ, знаходять застосування багато різних за фізичною сутністю і необхідному устаткуванню процесів перероблення, оброблення і з'єднання матеріалів та напівфабрикатів. Технологічна підготовка виробництва багато в чому залежить від раціональної побудови розмірних зв'язків у процесі формоутворення, обґрунтованій точності припусків на оброблення і допусків операційних розмірів, а найголовніше – від забезпечення раціональної точності базування деталей в робочих зонах обладнання та формоутворення поверхонь, що відповідають вимогам робочої документації при мінімальних витратах на виробництво.

1 АНАЛІЗ, РОЗРАХУНКИ І ОПТИМІЗАЦІЯ ТОЧНОСТІ ФОРМОУТВОРЕННЯ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ

1.1 Основні терміни, поняття і визначення

Деталі машин характеризуються геометричними, фізико-механічними властивостями, які конструктори вказують в робочій документації. Під точністю деталі розуміють ступінь відповідності її дійсних параметрів заданим. Зіставляючи кожен з дійсних параметрів із заданим, отримують точність деталі за цим параметром. Сукупність результатів зіставлення за всіма параметрами деталі являє собою точність деталі.

На металообробних верстатах змінюють геометричні параметри, відповідно й поняття «точність формоутворення поверхонь» належить тільки до цих параметрів. Таким чином, точність формоутворення поверхонь (деталі) – це ступінь відповідності дійсних геометричних параметрів заданим.

Характеристики й категорії точності оброблення. При аналізі точності формоутворення зручно розглядати форму та конфігурацію деталі, інакше кажучи всю її поверхню як сукупність взаємозалежних простих поверхонь (за винятком деяких складнофасонних деталей). Тоді всі геометричні параметри деталі можна поділити на дві групи:

1. Параметри поверхонь, що утворюють форму деталі.
2. Параметри, що визначають взаємне положення цих поверхонь.

Послідовно розглядаючи поверхні, для кожної з них одержуємо дві характеристики точності формоутворення.

Перша характеристика – точність самої поверхні (за розмірами, формою, шорсткістю).

Друга характеристика – точність розташування цієї поверхні щодо інших поверхонь деталі (за координуючим розміром, паралельністю, перпендикулярністю або іншим співвідношенням).

Рекомендується використовувати **п'ять категорій точності**:

1. **Задана** (в робочій конструкторській документації).
2. **Дійсна** (одержана вимірюванням).
3. **Очікувана** або **розрахункова** (одержана в проектних розрахунках).
4. **Економічна** (одержана в звичайних виробничих умовах).
5. **Досяжна** (одержана в спеціально створених виробничих умовах).

Якщо йдеться про відповідність дійсних параметрів заданим, яку потрібно одержати після оброблення, то виходить, що мова йде про задану або необхідну точність формоутворення поверхонь.

Коли говориться про точність, уже одержану після оброблення та вимірювань, мають на увазі дійсну точність формоутворення поверхонь.

Якщо мається на увазі точність, яку приблизно або на підставі розрахунків можна чекати після оброблення, то це – очікувана або розрахункова точність формоутворення поверхонь.

Відносно середньоекономічної і технічно досяжної точності формоутворення поверхонь слід мати на увазі, що з підвищенням вимог до неї трудомісткість і вартість оброблення збільшуються. Це пов'язано з тим, що для зменшення допусків на технологічні параметри необхідно використовувати точніші і дорожчі верстати та інструменти, знижувати режими різання, збільшувати число проходів. Для виконання цих операцій є необхідним залучення робітників високої кваліфікації з підвищеною оплатою праці. Це обумовлює таку залежність повного (калькуляційного) часу оброблення від точності:

$$T = T_0 + A / \omega^k, \quad (1)$$

де T_0 – постійна величина, що відповідає мінімально можливим для аналізованого методу, способу і засобів формоутворення поверхонь, витратам часу; ω – сумарна похибка розмірів при обробленні деталей за цим варіантом деталеоперації; A і k – коефіцієнти.

Вартість оброблення $Q = f(\omega)$ буде аналогічною.

На рисунку 1 показано криву, що відображає залежність $Q = f(\omega)$. Нанесені пунктиром лінії на відстанях T_0 і ω_0 від осей координат є асимптотами кривої: T_0 – це час, який необхідно витратити на оброблення деталі за цим варіантом операції незалежно від необхідної точності, а ω_0 – це мінімально досяжна похибка оброблення. На кривій $T = f(\omega)$ слід розрізнити ділянки **A**, **Б** і **В**. На ділянці **A** крива розташована майже паралельно осі ординат. Значно збільшуючи витрати часу T і засоби Q на оброблення, можна отримати лише невелике підвищення точності і навпаки. Точність, яка досягається при такому обробленні, називають областю технічно досяжної точності методу, способу і засобів. Робота з допусками $\omega_0 < \delta < \omega_0$ протікає нестійко, підвищується вірогідність браку: вона відповідає випадку, коли для досягнення високої точності використовується недостатньо кваліфікований метод – наприклад, точіння для розмірів з допусками 7 ... 5 квалітетів точності.

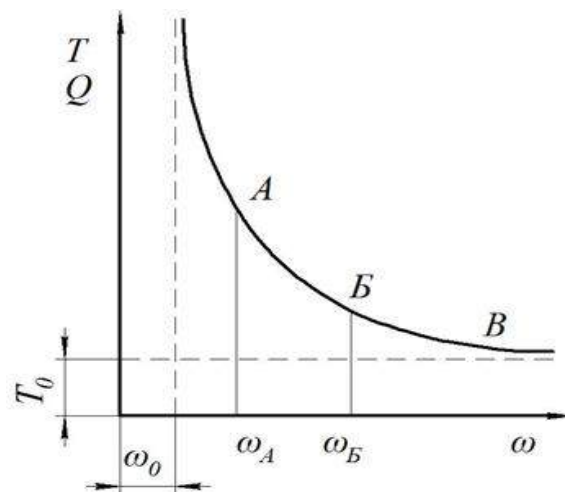


Рисунок 1 – Схема для визначення економічної точності оброблення

На ділянці **В** крива, навпаки, розташовується майже паралельно

горизонтальній осі. Тут при невеликому збільшенні T або Q можна значно підвищити точність оброблення. Область значень $\omega > \omega_B$ називають гарантованою точністю методу. Робота з точністю $\delta > \omega_B$ відповідає випадку, коли який-небудь кваліфікований метод використовується в умовах, що не потребують високої точності (наприклад, шліфування з допусками 13...11 квалітетів). Робота на ділянці гарантованої точності стає також неекономічною. У більшості випадків точність відповідає ділянці B кривої, для якої існує майже пропорційна залежність між T і ω . Область $\omega_A... \omega_B$ і буде **областю економічної точності даного методу**. Для визначення меж області B , в яких ці метод, спосіб та засоби формоутворення поверхонь є економічно виправданими, необхідно порівняти його з іншими варіантами, які технічно можна застосувати для виконання заданої деталеоперції.

Тепер можна сформулювати визначення економічної точності оброблення. Економічною (або середньоекономічною) точністю яких-небудь методів, способів та засобів формоутворення поверхонь на цьому рівні розвитку техніки називається точність, що забезпечується в нормальних виробничих умовах і при витраті часу і засобів, що не перевищують витрат при застосуванні інших методів, способів і засобів, що порівнюються з тими, що розглядаються [28]. Значення середньоекономічної точності для найбільш поширених методів, способів та засобів формоутворення поверхонь наведені в підручниках і довідниках з технології машинобудування, вони використовуються при призначенні операційних допусків на механічне оброблення. Вони не залишаються незмінними, оскільки у міру прогресу техніки досягнення певної точності стає економічнішим.

Отже, коли йдеться про економічну точність формоутворення поверхонь, то це є результат, досягнутий в звичайних стабільних виробничих умовах. Якщо йдеться про досяжну точність формоутворення поверхонь, то це є результат, досягнутий в спеціально створених виробничих умовах.

Тільки стосовно категорії дійсної точності і тільки в окремих випадках можна говорити про точність або похибку окремо взятої деталі. У більшості випадків поняття точності, допуску, похибки пов'язують з певною сукупністю деталей. Наприклад, потрібна в кресленні точність, що задається через допуск, належить до всіх без виключення деталей і машин, які будуть виготовлені за цим кресленням [1].

Очікувана точність – це точність, яку планують одержати при виготовленні всіх деталей за певним технологічним процесом, на певному пристосуванні, певним інструментом.

Дійсна точність характеризується величиною поля розсіювання R заданого розміру у деякої сукупності деталей: $R = A_{д.макс} - A_{д.мін}$,

де $A_{д.макс}$ і $A_{д.мін}$ – найбільший і найменший дійсні розміри в межах сукупності деталей.

Стосовно способу автоматичного отримання розмірів на верстатах розрізняють такі види сукупностей деталей:

а) **партія** – деталі, оброблені одним мірним інструментом або при одній наладці верстата до зміни інструменту внаслідок притуплювання;

б) **генеральна або складська сукупність** об'єднує деталі багатьох партій, оброблених на різних верстатах, при різних наладках і в різний час.

Поняття – задана точність (допуск) і очікувана або розрахункова точність (похибка), що належать до генеральної сукупності;

в) **вибірка** – деталі, що вибрані з партії або генеральної сукупності для статистичного аналізу точності оброблення або статистичного контролю точності. Вибірка буває малою (5...20 деталей) і великою (50 і більше деталей).

Оскільки кількість деталей в генеральній сукупності $N_{г.с}$ більше, ніж кількість деталей в окремій партії $N_{парт}$, а $N_{парт}$ більше розміру вибірки $N_{виб}$, тобто $N_{г.с} > N_{парт} > N_{виб}$, тому справедливою буде нерівність:

$$\delta \geq \omega_{г.с} \geq \omega_{парт} \geq \omega_{виб}, \quad (2)$$

де δ – допуск на даний розмір;

$\omega_{г.с}$, $\omega_{парт}$, $\omega_{виб}$ – величини похибки розміру (поля розсіювання) в межах відповідності генеральній сукупності, партії і виборці.

Точність формоутворення поверхонь за розмірами. Заданий розмір. Більшу частину геометричних параметрів деталі задають у вигляді лінійних розмірів. Крім того, при аналізі точності за параметрами, заданими інакше, у багатьох випадках зручно замінити їх лінійними розмірами. Наприклад, циліндричність поверхні розглядають як умову однаковості діаметрів поверхні (тобто лінійних розмірів) у всіх її перетинах. Подібним чином діють і відносно кутових розмірів, паралельності і т. п. Через таку причину методи кількісного оцінювання точності і всі основні положення, що належать до точності формоутворення поверхонь, розглядають насамперед стосовно лінійних розмірів.

Із загального визначення точності формоутворення виходить, що точність формоутворення поверхонь за розмірами – це ступінь відповідності дійсних розмірів заданим.

Виникає запитання – що таке «заданий розмір»?

Розмір, заданий однозначно, наприклад, 20 мм, не можна забезпечити при обробленні; можливо лише з якоюсь точністю наблизитися до нього. Тому кожен розмір задають не однозначно, а двома припустимими заданими граничними значеннями: $L_{з.макс}$ і $L_{з.мін}$. Різницю a між ними називають допуском розміру: $a = L_{з.макс} - L_{з.мін}$.

Записуючи розміри, керуються системами допусків, іншими

умовностями або особливими міркуваннями. Наприклад, запис граничних значень 19,800 і 19,900 може зустрітися у вигляді: $19,800^{+0,100}$; $19,900^{-0,100}$; $19,850 \pm 0,050$; $20_{-0,200}^{-0,100}$ і т. д. Оскільки існують різні способи написання розмірів, не можна зважати лише на один запис про те, яке саме зі значень розміру (одне із граничних, середнє або яке-небудь інше) виконує роль заданого розміру. Доводиться обидва заданих граничних значення вважати однаково важливими. Із цього ясно, що в сучасних умовах, коли розміри не задають однозначно, поняття «заданий розмір» стало умовним. Це – коротка назва двох припустимих граничних значень дійсного розміру, які задають у вигляді якого-небудь номінального розміру і його відхилень.

Дійсний розмір, що повністю відповідає (дорівнює) одному з двох заданих граничних значень, буде відповідати другому граничному значенню з точністю, що дорівнює інтервалу між значеннями. Обидва граничних значення – рівноправні. Таким чином, задана точність розміру («заданого розміру») дорівнює величині інтервалу між заданими граничними значеннями, тобто допуску на «заданий розмір», немовби останній не був записаним у кресленні деталі: $T = a$.

Очевидно, що в таких умовах вислови: «витримати заданий розмір», «витримати розмір із заданою точністю» або «витримати задану точність розміру» означають одне й те ж, а саме: «зробити так, щоб величина дійсного розміру опинилася в інтервалі між заданими граничними значеннями всередині поля допуску на «заданий розмір».

Місце всередині заданого інтервалу (або поза ним), на якому знаходиться дійсне значення розміру, не може бути завжди довільним. Уявлення про це місце має давати величина дійсної точності. При проектуванні технологічних процесів і оснащення необхідно визначати ймовірне місце значення розміру, тобто визначати очікувану (розрахункову) точність.

Числовий вираз дійсної і очікуваної точності формоутворення поверхонь за розмірами. Зіставляючи дійсний розмір L_d , визначений вимірюванням (після оброблення деталі), з кожним із двох граничних значень заданого розміру L_z , одержимо дійсну точність формоутворення поверхонь цієї деталі: $T_{d1} = L_d - L_{z.макс}$, $T_{d2} = L_d - L_{z.мін}$.

Ці два результати є повним і вичерпним числовим виразом дійсної точності формоутворення поверхні однієї деталі. Разом з тим неважко переконатися, що таке зіставлення позбавлене необхідної наочності, тому що геометричний зміст двох одержуваних чисел (наприклад, $T_{d1} = -0,100$; $T_{d2} = +0,200$) стає ясным не відразу. У деяких випадках, наприклад, при налагодженні верстата і досить часто при контролі деталі потрібно знати обидва або, принаймні, одне із цих чисел.

Для інших, більш загальних цілей, наприклад, для серійного виробництва зручніше зіставляти L_d із середнім значенням заданого розміру $L_{3.сер}$, одержуючи результат (рисунок 2) у вигляді одного числа:

$$T_{д1} = L_d - L_{3.сер} = \mu,$$

де $L_{ном}$ – номінальне значення розміру. Правомірність такого зіставлення об'єктивно підтверджується тим, що цей результат є середнім арифметичним значень $T_{д1}$ і $T_{д2}$. Дійсно, $0,5 \cdot (T_{д1} + T_{д2}) = 0,5 \cdot [(L_d - L_{3.макс}) + (L_d - L_{3.мін})] = L_d - 0,5 \cdot (L_{3.макс} - L_{3.мін}) = L_d - L_{3.сер} = \mu$. Одержання наочного числового виразу дійсної точності партії деталей $L_{пд}$ пов'язано з рядом труднощів, обумовлених тим, що внаслідок нестабільності умов операції розміри оброблених деталей стають неоднаковими.

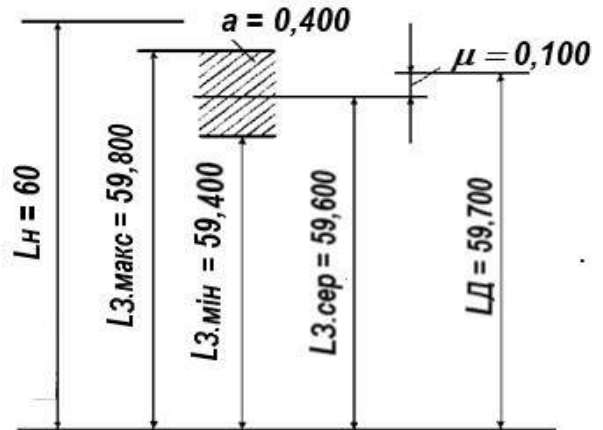


Рисунок 2 – Поняття точності оброблення однієї деталі: заданий розмір $60_{-0,600}^{-0,200}$

Виникає так зване *розсіювання розмірів*. Величина цього розсіювання R є різниця між найбільшим $L_{д.макс}$ і найменшим $L_{д.мін}$ відповідними розмірами деталей у партії:

$$R = L_{д.макс} - L_{д.мін}.$$

Для визначення $L_{пд}$ необхідно зіставляти із граничними значеннями заданого розміру всі дійсні розміри партії деталей. Щоб уникнути пов'язаних із цим труднощів користуються різними спрощуючими заходами і умовами. Найбільш характерними з них є такі:

1. Графічне зображення дійсної точності: побудова так званих *кривих розподілу, гістограм, точкових діаграм* і т. п. Цей трудомісткий захід є дослідженням і виправдовується тоді, коли про точність партії потрібно одержати найбільш повне й наочне уявлення.

2. Оцінювання точності партії тільки на основі точності її крайніх розмірів $L_{д.макс}$ і $L_{д.мін}$. При такому спрощенні дійсну точність партії можна виразити тільки чотирма числами:

$$\text{для } L_{3.макс}: L_{пд1} = L_{д.макс} - L_{3.макс} \text{ і } L_{пд2} = L_{д.мін} - L_{3.макс};$$

$$\text{для } L_{3.мін}: L_{пд3} = L_{д.макс} - L_{3.мін} \text{ і } L_{пд4} = L_{д.мін} - L_{3.мін}.$$

Існування такого спрощення виправдовується тим, що в багатьох випадках першочерговий інтерес, виявляється саме до крайніх значень

розмірів. Із чотирьох чисел частіше необхідними є перший і останній результати зіставлення ($L_{д.макс}$ з $L_{з.макс}$ та $L_{д.мін}$ з $L_{з.мін}$).

3. Звертання до умовності називають дійсною точністю оброблення партії деталей величину R розсіювання розмірів, тобто вважають $T_{д1} = R$.

Підставою для такої умовності є аналогія із заданою точністю оброблення. Інтервал $L_{з.макс} - L_{з.мін} = a$ (допуск), в якому мають лежати дійсні розміри, являє собою задану точність розміру. За аналогією інтервал $L_{д.макс} - L_{д.мін} = R$ називають дійсною точністю. Завдяки однозначності величин a і R їх легко зіставляти одну з одною. Тому така умовність широко прийнята у виробничій практиці і в технічній літературі.

Однак розсіювання розмірів R , що є немовби мірою стабільності умов операції, не є дійсною точністю оброблення деталей. Наприклад, отримавши $R = 0,200$ мм, ми ще не знаємо дійсної точності деталей. Величину R можна було б назвати точністю дійсних розмірів деталей у партії (результат зіставлення дійсних розмірів), але це не є дійсною точністю деталей за заданим розміром, тому що його у зіставленні не використовують.

Сказане вище підтверджується і тим, що в результаті формоутворення поверхні потрібно витримати задану точність, не тільки дотримуючись умови $a \geq R$, але, крім того, забезпечуючи для кожної деталі партії виконання умови $L_{з.макс} \geq L_{д} \geq L_{з.мін}$. Крім величини R як додаткового критерію дійсної точності в необхідних випадках потрібно враховувати ще й положення поля розсіювання R відносно поля допуску a , наприклад, у вигляді величини μ , тобто величини зсуву середини поля розсіювання щодо середини поля допуску a (рисунок 3).

Таким чином, дійсна точність оброблення партії деталей $T_{пд}$ визначається величиною поля розсіювання R дійсних розмірів і величиною μ зсуву цього поля щодо середнього значення заданого розміру.

Якщо «партія» складається з однієї деталі, то $R = 0$ і $T_{пд} = T_{д1} = \mu$. Вибираючи засіб для досягнення заданої точності оброблення, необхідно з достатньою вірогідністю визначати величину дійсної точності, що забезпечать ці засоби.

Звідси неминуче виникає поняття про очікувану (розрахункову) точність оброблення. Через неможливість передбачити, яке саме сполучення змінних факторів складеться при обробленні кожної окремої деталі, метод визначення очікуваної точності для однієї деталі і для партії деталей є таким же самим. Розрахунок зводиться до знаходження ймовірної величини δ_x поля розсіювання дійсних розмірів. Знайдене поле δ_x можна співставити з будь-яким значенням розміру, у тому числі й із середнім значенням $L_{з.сер}$ заданого розміру. Тому ступінь відповідності

очікуваного дійсного розміру (розмірів) заданому розміру може безпосередньо відобразити сама величина $\delta\sigma$.

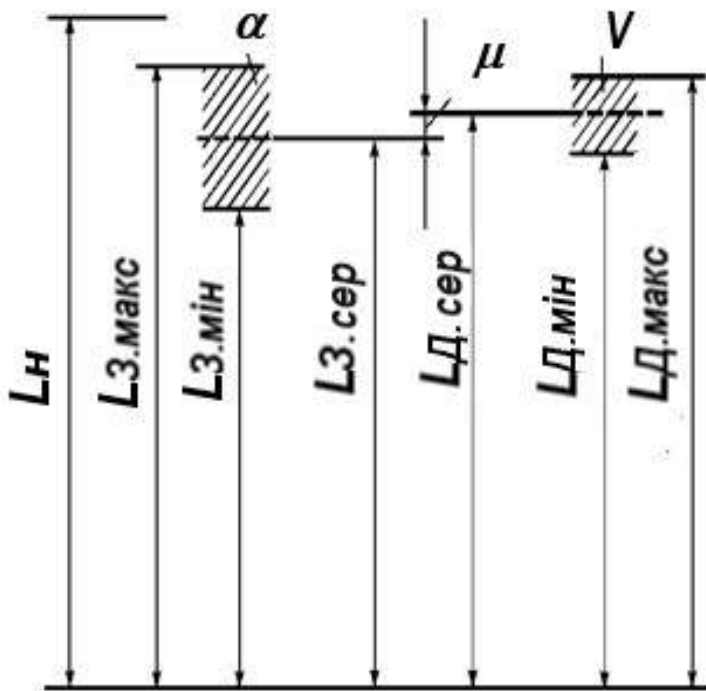


Рисунок 3 – Поняття точності оброблення партії деталей

Якщо забути про дійсну точність оброблення $T_{д1}$ однієї деталі (значить, і про те, що кожна деталь із партії має свою точність) і про другий критерій μ дійсної точності партії деталей (тобто замість *дійсної точності оброблення за заданим розміром* мати на увазі *точність дійсних розмірів*), то одержимо просте й тому загальноприйняте співвідношення між різними категоріями точності оброблення. Задана точність дорівнює допуску на заданий розмір $T_з = a$. Дійсна точність дорівнює дійсному розсіюванню розмірів $T_д = R$.

Розрахункова точність дорівнює очікуваному (розрахунковому) розсіюванню $T_о = T_р = \delta\sigma$.

Усі лінійні розміри й взагалі усі параметри і показники якості деталі (кутові розміри, вага, твердість матеріалу, відсутність овальності, биття, непаралельності і т. п.) захищають допусками. Тому викладений вище підхід до оцінювання точності оброблення за лінійним розміром можна поширити й на інші геометричні параметри, а з деякими несуттєвими доповненнями – і на показники якості.

Похибка формоутворення (оброблення) поверхонь. Числовий вираз точності не завжди зручно називати точністю, тому що потрібно пам'ятати: число більше – точність менша. Вживаючи термін «неточність» або «похибка», уникають цього: число більше – похибка (неточність) теж більша. У той же час не можна уникнути і терміна «точність», бо слова «похибка» і «неточність» мають негативний зміст, внаслідок чого погано звучать вислови типу «задана неточність», «досягнута задана похибка» і т. п. В технологічних задачах виникають ситуації, коли деталь неможливо встановити в робочій зоні верстата з потрібною для цього точністю. Така можливість пов'язана з визначенням величини необхідного підвищення точності взаємного розташування технологічних баз і точності оснащення.

Таким чином, терміни «точність формоутворення (оброблення)» і «похибка формоутворення (оброблення)» вживаються паралельно. Можна вважати, що «похибка оброблення» є назвою числового виразу точності оброблення. Все викладене вище щодо точності можна перефразувати стосовно похибки.

1.2 Фактори, що впливають на дійсну похибку формоутворення поверхонь

Загальний огляд

На відміну від похибки формоутворення поверхонь фактори, під безпосереднім впливом яких вона виникає, називаються *виробничими* похибками. Факторів, що впливають на похибки формоутворення, можна назвати і багато, і мало – це залежить від рівня їхньої деталізації. Якщо, наприклад, назвати «овальність шийки шпинделя верстата», то при такому рівні деталізації всіх факторів загальна їхня кількість виявиться надзвичайно великою. Якщо назвати «неточності верстата», то інші фактори прийдеться назвати настільки ж укрупнено, загальна кількість їх буде меншою, а якщо – «якість верстата», то буде ще меншою.

Виробничі похибки є досить різноманітними за своєю природою (геометричні, силові, кінематичні і т. д.), місцем в процесі виконання операції та іншими ознаками. До того ж в одних операціях найбільш істотними виявляються одні фактори, а в других – інші. Через ці причини встановити співвідпорядкованість виробничих похибок неможливо, тому що якої-небудь загальної класифікації їх не існує. Перелічуючи ці похибки стосовно всіх операцій, що зустрічаються, або певної групи операцій, або навіть однієї операції, у кожному випадку виробничі похибки групують так, як це краще відповідає виконуваному завданню.

Визначення первинних (елементарних) похибок формоутворення поверхонь виконується з метою отримати якісні й кількісні залежності для оцінювання впливу основних виробничих чинників на точність, знайти шляхи підвищення точності, одержати початкові дані для визначення розрахунковим шляхом результуючої (сумарної) операційної похибки. Майже кожна з первинних похибок може бути визначена аналітичним або експериментальним методом. Найбільш достовірні результати отримують при поєднанні, спільному використанні обох названих методів.

У реальних виробничих умовах чинники, що викликають появу похибок оброблення, діють одночасно, спільно. При встановленні ж залежності між окремо взятим виробничим чинником і обумовленою його дією первинною похибкою допускають, що в цей час інші чинники немовби відсутні, не діють. Такий методичний прийом є вимушеним, оскільки немає можливостей визначити одночасно вплив усіх виробничих чинників.

На основі наведеного далі огляду дамо загальне уявлення про фактори, що впливають на похибки формоутворення поверхонь.

Усі фактори рекомендується поділяти на дві найбільш вживані групи залежно від джерел виникнення та особливостей операції – неточності та деформації (таблиця 1).

Таблиця 1 – Фактори, що впливають на дійсну похибку формоутворення поверхонь

Фактори-неточності	Фактори-деформації
Неточності верстата і оснащення	Деформації пружної системи
Неточності формоутворення	Деформації обладнання
Неточності заготовки	Деформації оснащення
Неточності базування	Деформації заготовки
Неточності наладки операції	Деформації закріплення
Неточності мірного інструмента	Деформації температурні верстатів
Неточності встановлення	Деформації температурні інструмента
Неточності вимірювання	Деформації інструмента
Неточності кінематичні	Інші

Розглянемо найбільш відомі та вивчені з цих факторів.

Неточності верстата. На похибки формоутворення поверхонь можуть впливати: биття шпинделя; непрямолінійність направляючих станини, супорта, робочого стола; неперпендикулярність осі шпинделя та направляючих; зазори в з'єднаннях деталей і агрегатів верстата і т. п.

Припустимі неточності нових верстатів регламентуються нормами точності (ДСТУ), на основі яких розробляються правила їх експлуатації. Для верстатів, що виходять із ремонту, встановлено три класи точності. Основний клас Н відповідає точності нових верстатів. Клас П охоплює верстати пониженої точності. В третій клас Г входять верстати низької точності, призначені для грубих операцій. Є й інші класифікаційні системи.

Неточності пристроїв. Пристрій, що з'єднує оброблювану деталь із верстатом, має свої неточності, допущені при його виготовленні, вони можуть збільшуватися внаслідок зношування. Особливе значення мають:

а) неточності елементів, за допомогою яких встановлюють оброблювану деталь в робочій зоні для надання їй певного положення в напрямі координуючого розміру;

б) неточності поверхонь корпусу, якими пристрій встановлюється на верстаті;

в) неточності елементів, що визначають положення інструмента.

Припустимі неточності розраховують при проектуванні пристрою і обмежують в робочих кресленнях його деталей відповідними допусками.

Неточності різального інструменту. Особливо істотними є неточності розмірних інструментів (зенкерів, розгортки, мітчиків, протяжок і т. п.) та профільних (фасонних різців, фрез, шліфувальних кругів і т. п.). Від характеристик розмірного інструмента безпосередньо залежать параметри оброблюваної поверхні, а від неточностей профільного – похибки геометричних параметрів формоутворення відповідного профілю.

Припустимі неточності виготовлення інструментів регламентовано ДСТУ. В необхідних випадках їх розраховують (наприклад, при проектуванні спеціальних інструментів і спеціальних пристроїв для інструментів). Для всіх інструментів дуже істотним фактором є зношування різальної частини в напрямі розміру, що витримується при обробленні деталі, так зване розмірне зношування інструмента.

Завжди існує копіювання (перенесення на деталь) неточностей розмірних і профільних інструментів. Якщо, наприклад, розмір протяжки буде на 0,020 мм більше за потрібний, то в усіх заготовках, оброблених цією протяжкою, розмір отворів буде завищеним на таку ж величину. Це пояснює, чому допуски на розмірні різальні інструменти (розгортки, зенкери, свердла, пазові різці і фрези) призначаються у багато разів меншими допусків на розміри відповідних оброблюваних поверхонь.

Профільні інструменти – це різьбові різці і фрези, зуборізні інструменти, фасонні різці, фрези і шліфувальні круги. Неточність профілю таких інструментів, незалежно від причини її виникнення, переноситься на деталь, обумовлюючи появу похибок форми і розмірів.

Неточності деталі. Деталь (напівфабрикат), що надходить на дану операцію, має похибки оброблення, що виникли при виконанні попередніх операцій. Допущені раніше похибки оброблення виступають уже в ролі виробничих і можуть впливати на дійсні похибки оброблення у цій операції. Внаслідок неоднакової дійсної точності деталей на попередніх операціях, поверхні кожної з них будуть займати в робочій зоні верстата своє оригінальне положення, що відрізняється від положення, що займуть однойменні поверхні інших деталей партії. Тому положення обробленої поверхні відносно ще необробленої поверхні кожної деталі буде своїм.

Таким чином, неточності деталі безпосередньо впливають на другу характеристику точності оброблення (точність за розміром, що координує оброблювану поверхню за паралельністю та іншими співвідношеннями).

Припустимі неточності деталі в кожній операції технологічного процесу визначають при розробленні процесу.

Деформації верстата, пристрою та інструмента. Під впливом сил різання у верстаті виникають пружні деформації двох видів:

а) деформації деталей і агрегатів верстата в місцях їхніх з'єднань – деформації стиків (обтиснення шпинделя, стола, супорта і т. п.);

б) деформації тіла деталей (прогин станини, шпинделя і т. п.).

Подібні ж пружні деформації діють на пристрій; крім сил різання, діють сили, що з'являються при закріпленні в ньому деталі.

Деформації, що змінюють взаємне положення деталі й різальних кромок інструмента приводять до виникнення похибки оброблення. Відомо, що жорсткість верстата є одним з головних факторів, що впливають на *першу* характеристику точності формоутворення поверхонь. Залежить вона, насамперед, від конструкції верстата та якості його виготовлення. Для верстатів, що перебувають в експлуатації, норм жорсткості не існує.

Окремим від інших факторів є облік впливу деформацій верстата на похибки формоутворення поверхонь та являє собою надзвичайно складне й громіздке експериментально-розрахункове завдання. Деформації верстата визначають разом з іншими факторами.

Іноді значна похибка формоутворення поверхонь буває наслідком деформацій інструмента. Наприклад, при свердлінні надглибоких отворів спостерігається скривлення осі каналу свердління. З недостатньою жорсткістю верстата, пристрою та інструмента пов'язане виникнення вібрацій при обробленні і збільшення шорсткості обробленої поверхні.

Деформації заготовки. Цей чинник має особливе значення при обробленні нежорстких деталей: довгих валів, тонкостінних циліндрів, кілець і т. п. Деформації спричиняються силами затиснення при закріпленні та силами різання в процесі формоутворення поверхонь. На рисунку 4 показано приклади впливу цих сил на похибки формоутворення циліндричної поверхні.

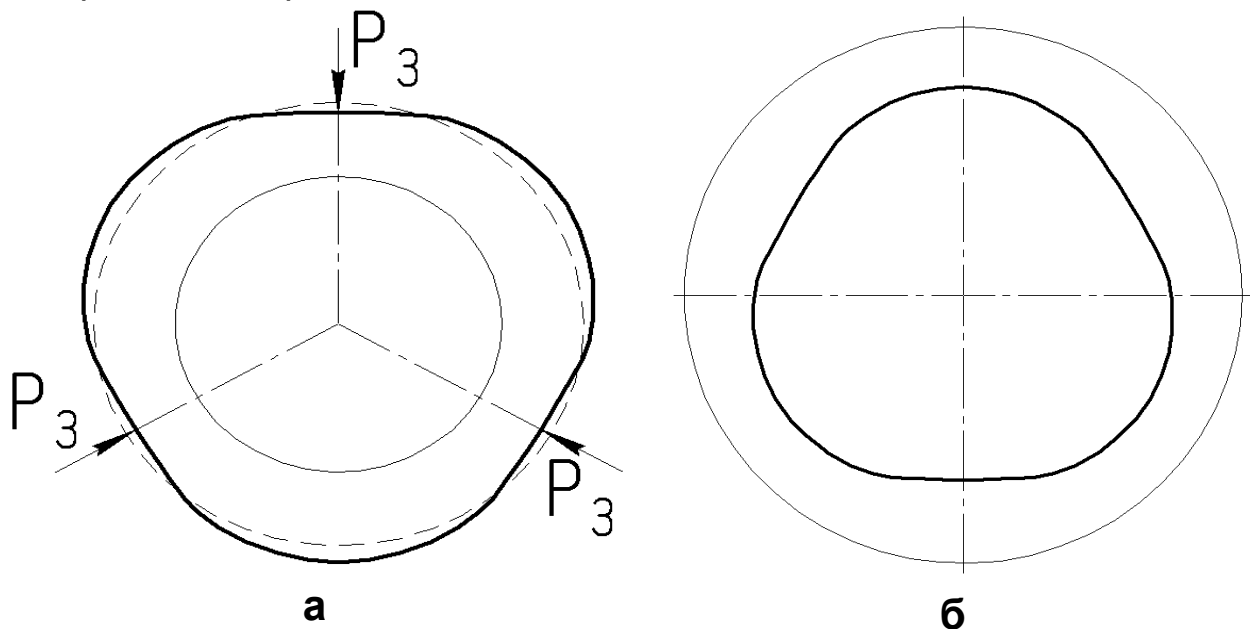


Рисунок 4 – Похибка форми нежорсткої заготовки в результаті деформації під дією сил закріплення

При закріпленні заготовок зусилля затиску досягають великих значень. Так, при закріпленні заготовки в трикулачковому патроні діаметром 240 мм затискне зусилля, що передається кожним кулачком на заготовку, становить 7...8 кН. При цьому недостатньо жорсткі заготовки (наприклад, тонкостінні втулки) отримують значні пружні деформації.

Якщо розточити отвір втулки в деформованому стані, то він буде круглим при затиснутому положенні (рисунок 4, а). Однак, якщо заготовку після оброблення зняти з верстата, оброблений отвір матиме похибку форми – гранчастість (рисунок 4, б). Ця похибка Δ визначається різницею найбільшого і найменшого радіусів і підраховується за формулою:

$$\Delta = 0,0242 P_z \cdot (k + 1)^3 / b \cdot E (k - 1)^3, \quad (3)$$

де $k = D_{зовн} / D_{внутр}$ – відношення зовнішнього діаметру втулки до внутрішнього; P_z – зусилля затиску; b – довжина втулки; E – модуль пружності. При закріпленні заготовок у двокулачкових патронах їх деформації і похибки форми будуть більшими, ніж при закріпленні в трикулачковому патроні. При закріпленні в патроні, в цанзі з чотирма і більшим числом елементів контакту деформація заготовок і похибки форми будуть значно меншими.

Визначення похибок, що виникають в результаті пружних деформацій технологічної системи під дією сил різання.

Механічне оброблення заготовок на металорізальних верстатах виконується з використанням відповідних пристосувань і інструментів. Усі агрегати і пристрої, що беруть участь у цьому процесі, й оброблювана деталь (заготовка) утворюють технологічну пружну систему: верстат–пристрій–інструмент–заготовка (ВПІЗ). З даної точки зору важливою характеристикою системи є її жорсткість, тобто здатність чинити опір дії сил, що деформують її. За пропозицією проф. А. П. Соколовського [28], жорсткість пружної технологічної системи описується відношенням зусилля різання, спрямованого по нормалі до оброблюваної поверхні P_y , до зміщення леза інструмента відносно заготовки y , відлічуваному в тому ж напрямі сил, що деформують її:

$$j = P_y / y \text{ Н/мм.} \quad (4)$$

Пружні деформації технологічної системи виникають під дією всіх складових P_z , P_y і P_x сили різання. Формула жорсткості враховує вплив тільки складової P_y , бо деформація системи $y = P_y / j$ впливає на точність розміру (наприклад, діаметру) прямо, безпосередньо, тоді як деформація під дією інших складових впливає на точність розміру побічно, в незначній мірі.

Для практичних цілей зручніше користуватися поняттям податливості

W , що дорівнює зворотній величині жорсткості:

$$W = 1 / j \text{ мкм/Н.} \quad (5)$$

Величина податливості дорівнює відношенню величини зміщення леза інструмента y до величини нормальної складової зусилля різання P_Y :

$$W = y / P_Y \text{ мкм/Н.} \quad (6)$$

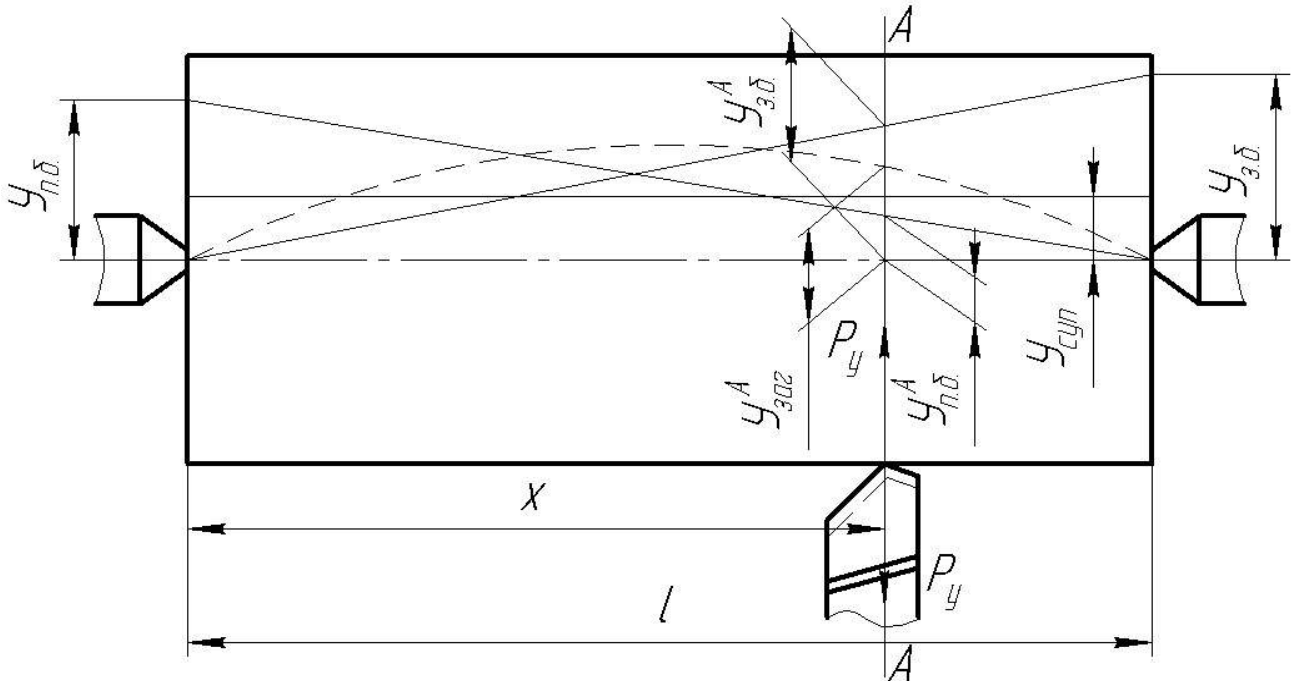


Рисунок 5 – Структура переміщень при закріпленні деталі в центрах

Жорсткість системи залежить від жорсткості складових її елементів: верстата, інструмента, пристосування і заготовки, жорсткість верстата, у свою чергу, – від жорсткості його агрегатів.

Розглянемо для прикладу структуру жорсткості системи при обробленні гладкого вала на токарному верстаті з установленням в центрах (рисунок 5). Сумарне переміщення леза інструмента відносно заготовки в перерізі A

$$y^A = y_{п.б}^A + y_{з.б}^A + y_{суп}^A + y_{заг}^A. \quad (7)$$

Позначимо через $W_{п.б}$, $W_{з.б}$, $W_{суп}$, $W_{заг}$ податливість відповідно до передньої бабки, задньої бабки, супорта і заготовки.

Тоді, випустивши проміжні викладки, можна записати сумарне пружне переміщення системи в перерізі A : $y^A = P_Y \cdot W^A$;

переміщення внаслідок деформації передньої бабки в перерізі A :

$$y_{п.б}^A = P_Y \cdot W_{п.б} \cdot ((L - x) / L)^2;$$

переміщення внаслідок деформації задньої бабки в перерізі A :

$$y_{з.б}^A = P_Y \cdot W_{з.б} \cdot (x / L)^2;$$

переміщення внаслідок деформації супорта в перерізі A :

$$y_{суп}^A = P_Y \cdot W_{суп};$$

переміщення внаслідок деформації заготовки в перерізі **A**:

$$y_{\text{заг}} = P_Y \cdot W^A_{\text{заг}} = P_Y \cdot x^2 \cdot (L - x)^2 / 3E \cdot I \cdot L.$$

Підставляючи в рівняння (7) ці значення переміщень, отримуємо вираз податливості технологічної системи

$$W^A = W_{\text{п.б}} \cdot ((L-x)/L)^2 + W_{\text{з.б}} \cdot (x/L)^2 + W_{\text{суп}} + x^2 \cdot (L - x)^2 / 3 \cdot E \cdot I \cdot L. \quad (8)$$

З рівняння (8) видно, що податливість (жорсткість) системи по довжині оброблення не залишається постійною, вона міняється.

Жорсткість верстата або окремих його агрегатів визначається без особливих затрат експериментальним шляхом. Жорсткість (податливість) заготовки в простих випадках можна розраховувати, користуючись формулами з курсу опору матеріалів. Так, оброблювану заготовку у формі гладкого вала, встановлену в центрах, можна уподібнити балці, що лежить на двох опорах з навантаженням P_Y посередині прольоту.

Деформація заготовки $y_{\text{заг}} = P_Y \cdot L^3 / 48E \cdot I,$

а податливість $W^A_{\text{заг}} = L^3 / 48 \cdot E \cdot I. \quad (9)$

Аналогічно можна записати рівняння податливості заготовки валика з установкою в патроні

$$W^A_{\text{заг}} = L^3 / 3 \cdot E \cdot I \quad (10)$$

і в патроні з підтримкою заднім центром

$$W^A_{\text{заг}} = L^3 / 110 \cdot E \cdot I. \quad (11)$$

Рівняння (9) – (11) показують, що спосіб установлення і закріплення заготовки в значній мірі впливають на її податливість (жорсткість).

Перейдемо тепер безпосередньо до визначення похибок, пов'язаних з пружними деформаціями системи під впливом сил різання. В результаті цих деформацій змінюється відстань між різальною кромкою інструмента і базовою поверхнею (лінією, віссю) заготовки.

Якщо, наприклад, до початку різання різець було встановлено на розмір D_0 (рисунок 6), то в результаті деформації системи при різанні відстань між вершиною різця і віссю обертання збільшиться на $y = P_Y \cdot W$ і дійсний діаметр після обточування буде $D = D_0 + 2y$. Якби зусилля різання P_Y і жорсткість (податливість) були постійними в усіх перерізах і напрямках оброблення, а також при обробленні усіх деталей партії, то можна було б заздалегідь визначити величину пружної деформації системи і скоректувати положення різця при налаштуванні – встановити його ближче до осі обертання на величину деформації $y = P_Y \cdot W$. Таке коригування, проте, є неможливим, оскільки значення P_Y і W увесь час змінюються. В результаті виникають похибки форми, розмірів і розташування оброблюваних поверхонь. Оскільки аналітично врахувати одночасний

вплив зміни P_Y і W на точність неможливо, розділимо загальний випадок на два окремих: в першому аналізуватимемо вплив на точність оброблення зміни податливості W при незмінному значенні P_Y , в другому – визначимо вплив сили P_Y в припущенні постійності податливості W .

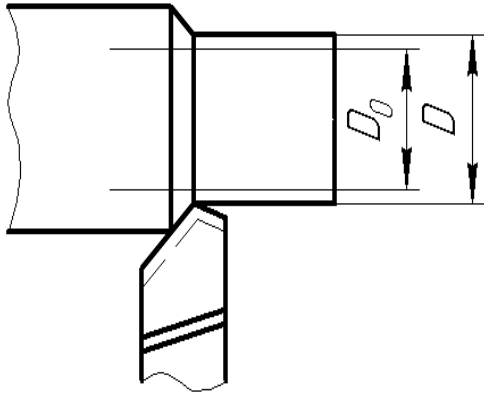


Рисунок 6 – Зміна розміру заготовки в результаті пружних деформацій системи

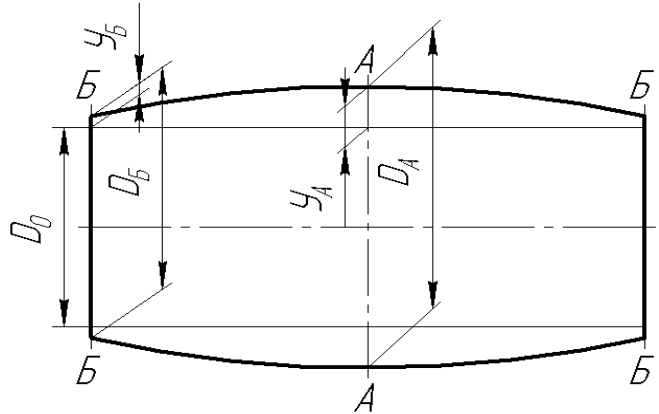


Рисунок 7 – Похибки форми вала в результаті зміни жорсткості системи по довжині оброблення

1-й випадок. Визначення похибок оброблення при $P_Y = const$ і $W = var$.

Користуючись рівнянням податливості системи (8), для випадку токарного оброблення можна показати, що залежно від співвідношення значень податливостей $W_{п.б}$, $W_{з.б}$, $W_{суп}$ та $W_{заг}$ закон зміни податливості системи по довжині оброблення буде різним. Так, якщо на верстаті, що має велику податливість (низьку жорсткість) агрегатів, обробляти заготовку малої податливості, то W системи на початку і у кінці оброблення (у передньої і задньої бабок) буде більше, ніж у середині. Тоді заготовка після обточування матиме похибку форми у вигляді корсетності (вгнутості твірної). Якщо ж на верстаті, що має високу жорсткість агрегатів, обробляти довгий і тонкий нежорсткий вал, то закон зміни жорсткості по довжині оброблення буде зворотним. В результаті з'явиться похибка форми іншого характеру – бочкоподібність. На рисунку 7 тонкими лініями показано циліндричну форму вала діаметром D_0 , яку він мав би, якби не було деформації системи, контурними лініями – форму і розміри вала з урахуванням деформації системи під дією сил різання. Величина похибки форми ω_{ϕ} – бочкоподібності: $\omega_{\phi} = D_A - D_B$, але

$$D_A = D_0 + 2y_A \quad \text{і} \quad D_B = D_0 + 2y_B, \quad \text{тоді} \quad \omega_{\phi} = 2(y_A - y_B).$$

Деформація системи $y_A = P_Y \cdot W_A$ і $y_B = P_Y \cdot W_B$.

Оскільки за умови $W_A > W_B$, то $y_A > y_B$, а після підстановки значень

$$u_A \text{ і } u_B \text{ отримуємо } \omega_{\phi} = 2P_Y \cdot (W_A - W_B) \quad (11)$$

Для оцінювання значень ω_{ϕ} розглянемо приклад. На токарному верстаті, що має податливість агрегатів $W_{п.б} = W_{з.б} = W_{суп} = 0,020$ мкм/Н, обробляється вал зі встановленням у центрах. Розміри вала: $d = 100$ мм, $L = 1200$ мм. Зусилля різання $P_Y = 1500$ Н. Визначити похибку форми ω_{ϕ} . Податливість заготовки в перерізі А–А

$$W_{заг}^A = L^3 / 48 \cdot E \cdot I = 0,036 \text{ мкм/Н.}$$

Податливість системи в перерізі А–А: ($x = 0,5 \cdot L$) відповідно до рівняння (8):

$$\begin{aligned} W^A &= W_{суп} + 0,25 \cdot (W_{п.б} + W_{з.б}) + W_{заг}^A = \\ &= 0,020 + 0,25 \cdot (0,020 + 0,020) + 0,036 = 0,066 \text{ мкм/Н.} \end{aligned}$$

Податливість системи в перерізі Б–Б ($x = 0$) згідно з рівнянням (8):

$$W^B = W_{п.б} + W_{суп} = 0,020 + 0,020 = 0,040 \text{ мкм/Н.}$$

Похибка форми ω_{ϕ} – бочкоподібність відповідно до рівняння (12):

$$\omega_{\phi} = 2P_Y \cdot (W^A - W^B) = 2 \cdot 1500 \cdot (0,066 - 0,040) = 78 \text{ мкм.}$$

Слід зазначити, що хоча безпосередньою причиною похибок стала нерівномірність податливості системи, величина похибок залежить від градієнта зміни податливості та від величини діючих зусиль. Так, наприклад, при зменшенні P_Y від 1500 до 750 Н похибка форми стане в два рази меншою.

При обробленні заготовок на токарних верстатах з установленням в патроні характер зміни жорсткості по довжині оброблення буде монотонним: зі збільшенням вильоту заготовки, тобто зі збільшенням відстані від місця закріплення, податливість зростатиме. Тому і характер похибки форми в поздовжньому перерізі, пов'язаної з пружними деформаціями системи під впливом сил різання, буде завжди однаковим: діаметр обробленої заготовки на правому кінці буде більшим, біля кулачків – меншим.

В окремих випадках жорсткість (податливість) системи змінюється за час одного оберту шпинделя із заготовкою або інструментом. При обробленні заготовок у технологічній системі з такою характеристикою податливості можлива поява похибки форми в поперечному перерізі (овальності, гранчастості і т. п.).

2-й випадок. Визначення похибок при $W = \text{const}$ і $P_Y = \text{var}$.

У процесі оброблення однієї заготовки і окремих заготовок партії величина сил різання безперервно змінюється. Головними причинами зміни P_Y є зміна глибини різання, притуплювання інструмента, зміна геометрії інструмента (кутів φ , γ ..., радіуса при вершині r), механічних властивостей матеріалу. Розглянемо, як і які похибки виникають від

деформації системи під дією сил різання у разі, коли зміна P_Y відбувається внаслідок зміни глибини різання. Нехай, наприклад, початкова заготовка має похибку форми в поперечному перерізі – овальність (рисунок 8).

Коло діаметром D_0 показує розмір і форму заготовки, яку можна було б отримати, якби не було деформації пружної системи під впливом сил різання.

Зі схеми видно, що глибина різання t безперервно змінюється від максимального значення t_1 в перерізі 1-1 до мінімального t_2 в перерізі 2-2. Відповідно змінюватиметься складова сили різання P_Y від P_{1Ymax} до P_{2Ymin} . Для спрощення математичних викладок приймемо $P_Y = \lambda P_Z = \lambda \cdot C_{pz} \cdot t^{X_{pz}} \cdot S^{Y_{pz}}$.

При обробленні сталі та інших матеріалів значення $X_{pz} \approx 0$. Тоді можна записати:

$$P_{1Y} = \lambda \cdot C_{pz} \cdot t_1 \cdot S^{Y_{pz}};$$

$$P_{2Y} = \lambda \cdot C_{pz} \cdot t_2 \cdot S^{Y_{pz}}.$$

Деформація системи під дією сил різання також мінятиметься за час одного оберту від максимального значення $y_1 = P_{1Y} \cdot W = \lambda \cdot C_{pz} \cdot t_1 \cdot S^{Y_{pz}} \cdot W$ в перерізі 1-1 до мінімального $y_2 = P_{2Y} \cdot W = \lambda \cdot C_{pz} \cdot t_2 \cdot S^{Y_{pz}} \cdot W$ в перерізі 2-2.

З урахуванням пружних деформацій системи деталей після оброблення буде не круглою: на рисунку 8 контур перерізу деталі показано овальним. Похибка форми деталі – овальність: $\omega_{dem} = D_{1dem} - D_{2dem}$.

Оскільки $D_{1dem} = D_0 + 2y_1$, а $D_{2dem} = D_0 + 2y_2$, після підстановки в рівняння $\omega_{dem} = 2(y_1 - y_2)$ замість y_1 і y_2 їх приведені вище значення, отримуємо $\omega_{dem} = \lambda \cdot C_{pz} \cdot S^{Y_{pz}} \cdot W \cdot 2(t_1 - t_2)$.

Слід зазначити, що це рівняння є приблизним, оскільки дійсна глибина різання буде не t_1 і t_2 , а відповідно $(t_1 - y_1)$ і $(t_2 - y_2)$. Але рівняння з точним значенням глибини різання виходить ірраціональним, розв'язання його виявляється громіздким, тому приймемо для подальших розрахунків

$$2(t_1 - t_2) = D_{1zag} - D_{2zag} = \omega_{zag}.$$

$$\text{Тоді отримуємо } \omega_{dem} = \lambda \cdot C_{pz} \cdot S^{Y_{pz}} \cdot W \cdot \omega_{zag}. \quad (13)$$

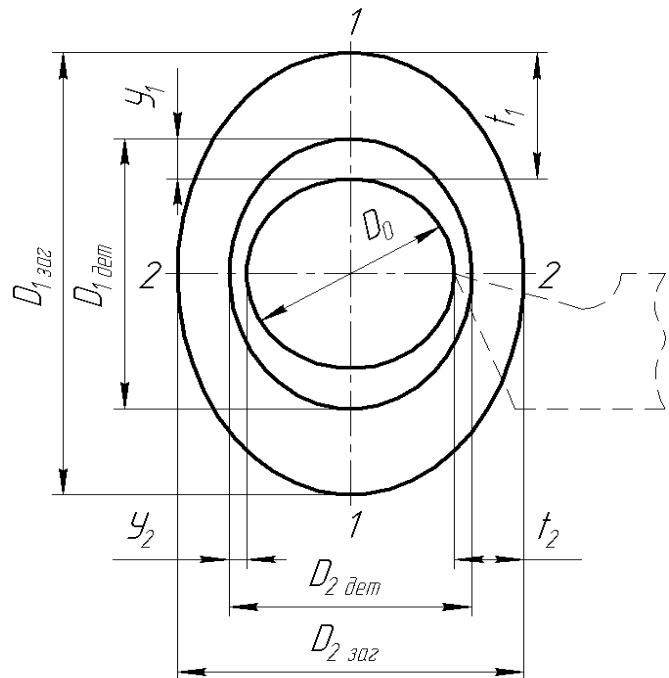


Рисунок 8 – Схема утворення похибки форми деталі в результаті деформації системи ВПІЗ під дією сил різання

Отримана залежність має назву **формули копіювання**. Формула показує, що будь-яка похибка заготовки копіюється зі зменшенням на деталь у вигляді подібної ж похибки. Якщо заготовка мала похибку форми – овальність або конусність, то і деталь після оброблення матиме аналогічну похибку – відповідно овальність або конусність.

На рисунку 9 показано схему токарного оброблення строго циліндричної заготовки, вісь якої $O_{заг}$ зміщена з осі центрових гнізд $O_{ц}$ (тобто з геометричної осі обертання) на величину $\omega_{заг} = e_{заг}$.

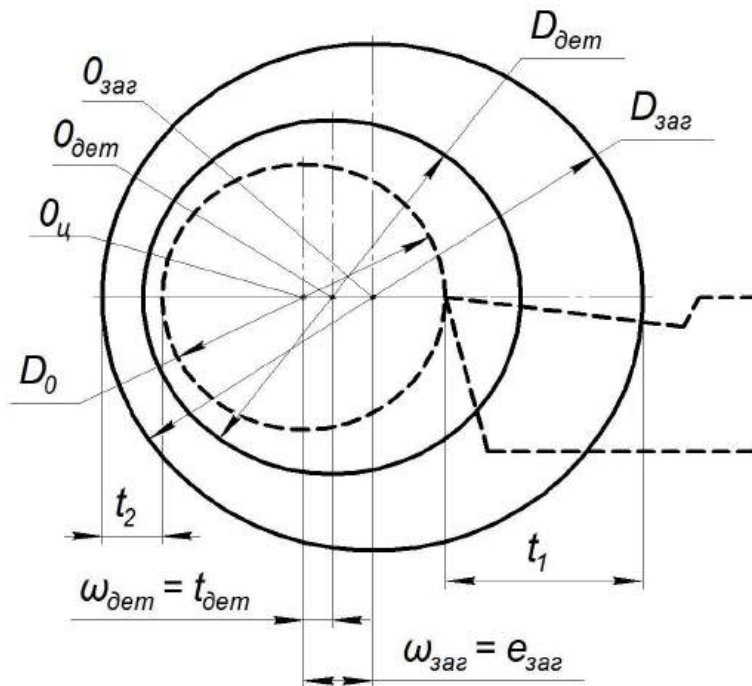


Рисунок 9 – Схема копіювання похибки розміщення заготовки

Тут похибкою заготовки є неточність її встановлення $e_{заг}$. В результаті наявності похибки встановлення $e_{заг}$ глибина різання по периферії оброблення безперервно міняється від максимального значення t_1 до мінімального t_2 . Аналогічно за час одного оберту міняється сила різання P_y і деформація системи y . В результаті станеться копіювання похибки встановлення заготовки на деталь, після обточування контур її буде зміщено з осі обертання на величину $e_{дет} = \omega_{дет}$.

Для визначення величини цієї похибки може бути вико-

ристана формула копіювання. Як відомо, розміри заготовок коливаються в межах допуску. Це коливання обумовлює коливання припуску, глибини різання, сил різання і пружних деформацій системи. В результаті деформацій системи коливання розмірів у партії заготовок копіюються, що приводить до коливання розмірів деталей після оброблення.

Величину коливання (похибок) розмірів ω_d також можна визначати, використовуючи рівняння копіювання похибок (13). Для того, щоб отримати уявлення про величину похибки, що виникає в результаті деформації системи ВПЗ під дією сил різання, розглянемо приклад.

На токарному верстаті з податливістю системи ($W = 0,066$ мкм/Н) обробляється партія заготовок $D_{заг} = 50^{+2}_{-1}$. Матеріал – сталь; $\lambda = 0,4$; $C_{pz} = 1960$ МПа; $S = 0,5$ мм/об.

Слід визначити коливання (похибки) розмірів заготовок після

обточування, пов'язане з пружною деформацією системи під дією сил різання. При $D_{заг} = 50^{+2}_{-1}$ похибка заготовки $\omega_{заг} = 3,0$ мм. Використовуючи формулу копіювання, отримуємо

$$\omega_{дем} = \lambda \cdot C_{pz} \cdot S^{Y_{pz}} \cdot W \cdot \omega_{заг} = 0,4 \cdot 1960 \cdot 0,5^{0,75} \cdot 0,066 \cdot 3 = 96 \text{ мкм.}$$

Формула копіювання може бути також використана для вирішення багатьох інших технологічних задач: для дослідження шляхів підвищення точності оброблення, для визначення жорсткості (податливості) системи методом обточування східчастих або ексцентричних валиків для визначення подачі, що забезпечує оброблення деталей із заданим допуском. Для розв'язання такої задачі у формулі копіювання замінимо $\omega_{дем}$ на $\delta_{дем}$, $\omega_{заг}$ на $\delta_{заг}$, де $\delta_{дем}$ і $\delta_{заг}$ – допуски на розміри деталі і заготовки відповідно. Тепер розв'яжемо рівняння відносно подачі S :

$$S^{Y_{pz}} = \delta_{дем} / \lambda \cdot C_{pz} \cdot W \cdot \omega_{заг}.$$

Уведемо у формулу коефіцієнт $k \leq 0,5$, що показує, яку частину допуску на розмір деталі відводять на компенсацію похибки, що виникає в результаті деформацій системи ВПІЗ під дією сил різання (інша частина $\delta \cdot (1 - k)$ має бути передбачена для компенсації похибок оброблення, що виникають в результаті впливу інших виробничих чинників – зношування різального інструмента, температурних деформацій і т. п.). Беручи також до уваги, що при обробленні сталей $Y_{pz} \approx 0,75 = 3/4$, отримуємо

$$S \leq (\delta_{дем} \cdot k / \lambda \cdot C_{pz} \cdot W \cdot \omega_{заг})^{4/3}. \quad (14)$$

Приклад. Для випадку токарного оброблення валика визначити величину поздовжньої подачі, допустимої з умови забезпечення заданого допуску на розмір оброблюваної поверхні. Умови оброблення: $D_{заг} = 50^{+2}_{-1}$; матеріал – сталь; $C_{pz} = 1960$ МПа; $\lambda = 0,5$; $S = 0,5$ мм/об, податливість системи $W = 0,050$ мкм/Н; $\delta_{заг} = 2$ мм; $\delta_{дем} = 0,100$ мм. Використавши рівняння (14) і прийнявши $k = 0,5$, отримаємо

$$S \leq (0,1 \cdot 0,5 / 0,5 \cdot 1960 \cdot 0,05 \cdot 2)^{4/3} = 0,39 \text{ мм/об.}$$

Зміна сил різання спричиняється у ряді випадків зміною механічних властивостей оброблюваного матеріалу [12]. Наприклад, твердість холоднотягнутих прутків із сталі 2Х13 в межах одного прутка змінюється на 5...20 одиниць за Бринелем, а в межах партії – на 94 одиниці. При цьому буде значним зростання сили ΔP_Y і значення деформації y системи ВПІЗ.

$$y = \Delta P_Y \cdot W. \quad (15)$$

Це призведе до появи додаткових похибок: коливання механічних властивостей в межах партії заготовок обумовлює розсіювання розмірів оброблених деталей, а коливання властивостей в межах однієї заготовки

породжуватиме похибку геометричної форми деталі. З теорії різання металів відомо, що у міру притуплювання різального інструмента зростають сили різання. Так, при збільшенні величини майданчика зношування у задньої грані різця до 0,700 мм складова P_y зростає в два рази. Похибки, обумовлені впливом ΔP_y , можна також визначати рівнянням (15).

Температурні деформації. Зміна температури верстата, пристрою, інструмента та деталі може бути досить істотним фактором. Розігрівання верстата після початку роботи приводить до зміни взаємного розташування його елементів, що утримують деталь і різальний інструмент, і, отже, може бути причиною похибок. Звичайно перед виконанням точної операції верстату дають якийсь час прогрітися на холостих обертах.

Нагрівання деталі в процесі формоутворення впливає на похибки оброблення тим більше, чим більше розмір, що витримується, і коефіцієнт лінійного розширення матеріалу деталі. Для зменшення похибки деталі охолоджують. При різанні без мастильно-охолоджувальної суміші в необхідних випадках (наприклад, при обробленні великих деталей з алюмінієвих сплавів) деталь охолоджують, обдуваючи її стисненим повітрям. На рисунку 10 показано схему шліфування тонкостінної гільзи. Подовження деталі в процесі оброблення, якому перешкоджає затискувач, може викликати її вигинання, а після охолодження гільза стає увігнутою, тобто корсетною.

Визначення похибок, пов'язаних з пружними деформаціями системи під впливом нагрівання

У процесі оброблення заготовок елементи системи ВПІЗ знаходяться під безперервною дією різних теплових джерел. Нагрівання елементів системи приводить до їх температурних деформацій і виникнення похибок формоутворення поверхонь:

а) похибки від дії температурних деформацій верстата

При роботі верстатів найбільшою мірою нагріваються шпиндельні бабки: температура в різних точках бабки підвищується від 10 до 50° С [12]. Нагрівання агрегатів верстата обумовлює зміну їх взаємного розташування. З точки зору точності оброблення необхідно враховувати переміщення передньої і задньої бабок, супорта відносно станини у напрямі нормалі до оброблюваної поверхні: у токарних верстатах, наприклад, у горизонтальній площині.

Температурні деформації агрегатів верстата невеликі – 8...12 мкм. Для попередження появи похибок від дії температурних деформацій верстатів при точних роботах виконують їх попереднє прогрівання обкаткою вхолосту впродовж 2...3 годин. Подальші перерви в роботі

мають бути не тривалими з тим, щоб верстат не втратив "робочу форму";

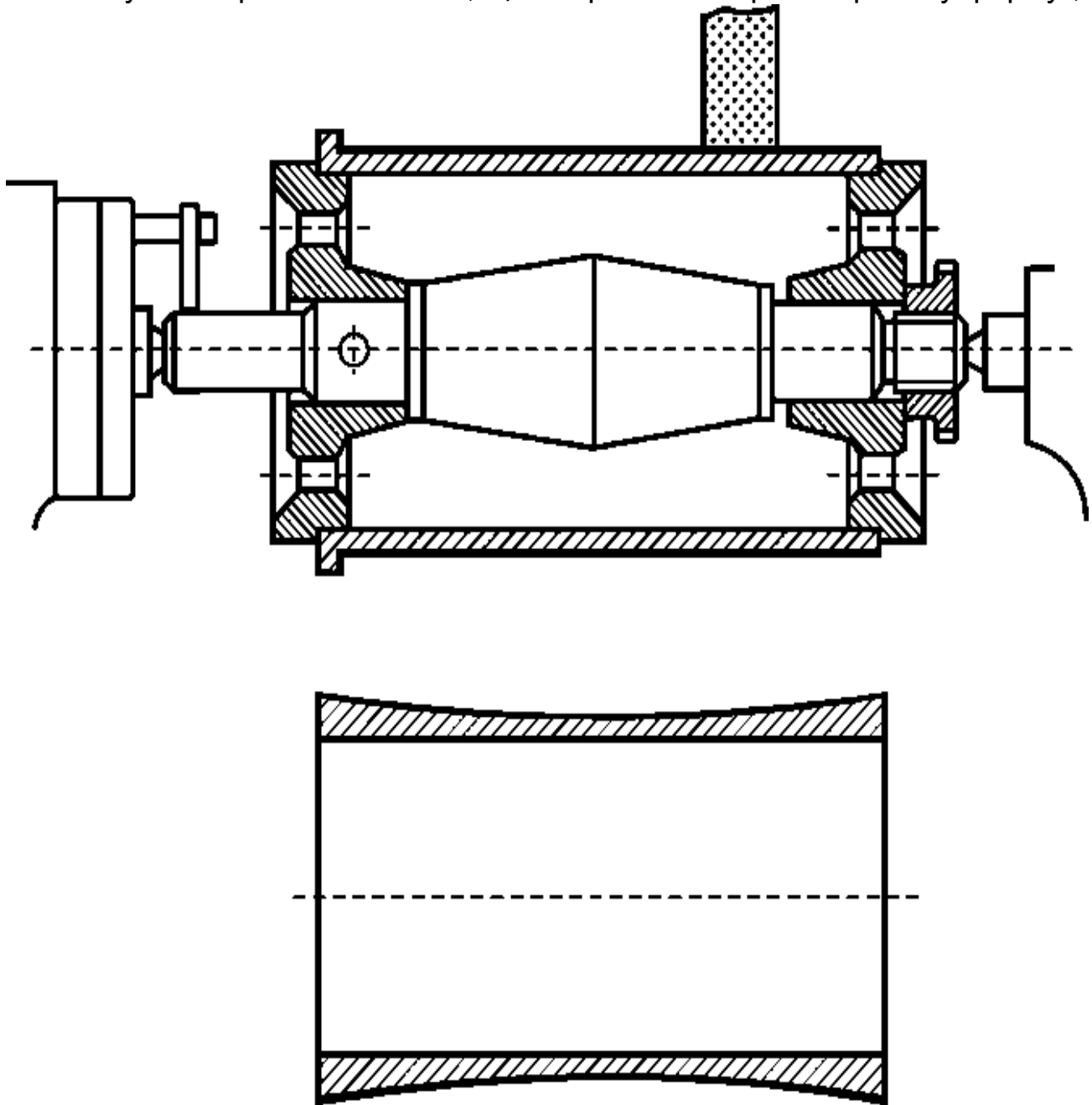


Рисунок 10 – Увігнутість гільзи в результаті деформацій від нагрівання при шліфуванні

б) похибки від дії температурних деформацій інструмента

Теплота різання, що переходить в інструмент, приводить до його нагрівання і подовження. У зв'язку з тим, що при обробленні твердосплавним інструментом охолодження не застосовується, температурні деформації його бувають значними: подовження різця, наприклад, може досягати 30...50 мкм.

На рисунку 11 зображено криві температурних деформацій

(подовження) різців U_{TP} залежно від тривалості безперервного різання (параметри: $V = 122$ м/хв; $S = 0,100$ мм/об). Нагрівання і подовження збільшуються при зростанні швидкості різання, глибини різання та подачі. Криві мають аналогічний характер: спочатку подовження збільшується інтенсивно, потім сповільнюється і стабілізується – настає теплова рівновага. Теплова рівновага настає через 10...15 хвилин при обробленні м'якої сталі і через 20...25 хвилин при обробленні легированої сталі [28].

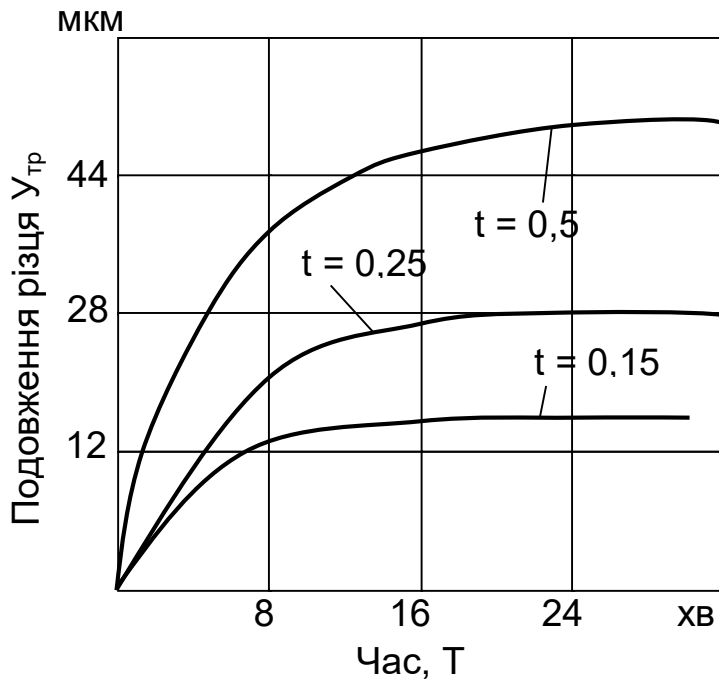


Рисунок 11 – Температурні деформації (подовження) різця

Вплив температурних деформацій різця виявляється по-різному залежно від габаритів заготовки, співвідношення часу різання. У перший період роботи (до настання теплової рівноваги) на подовження різця впливає похибка форми заготовок, а при роботі з попереднім налагодженням подовження виявлятиметься у безперервній зміні розмірів послідовно оброблюваних дрібних заготовок. Зазвичай оброблення заготовок супроводжується чергуванням різання і перерв.

На рисунку 12 зображено: криву 1 – подовження різця при нагріванні в умовах безперервного різання, криву 2 – подовження різця при охолодженні і криву 3, що характеризує зміну температурних деформацій різця при різанні з перервами. Видно, що температурна деформація різця в період $U_{TP.уст}$ у багато разів менше $U_{TP.мах}$. Якщо налагодження верстата виконано при такому стані різця, то похибка оброблення при обточуванні $\omega = 2U_{TP.уст}$ буде у багато разів менше похибки при налагодженні при холодному різці:

$$\omega = 2U_{TP.мах}; \quad (16)$$

в) похибки від дії температурних деформацій заготовки

При механічному обробленні більше 10 % теплоти різання переходить у заготовку, викликаючи її нагрівання та деформації. Характер похибок оброблення залежить від рівномірності нагрівання. При нерівномірному нагріванні заготовка викривляється, що призводить до утворення похибок форми. Наприклад, при обробленні чавунної станини завдовжки 2000 мм і заввишки 600 мм температура на оброблюваній стороні виявляється

вище на $2,4^{\circ}\text{C}$. Це викликає похибку форми – неплосинність $0,010\text{ мм}$ на 1 м довжини [12]. При рівномірному нагріванні результатом температурних деформацій заготовки буде похибка розмірів. Кількість теплоти різання, що переходить в заготовку, залежить від режимів різання та інших чинників. При збільшенні глибини різання t температура заготовки зростає. Зі збільшенням швидкості різання V зростає швидкість переміщення температурного поля, внаслідок чого нагрівання заготовки зменшується. Наприклад, при збільшенні V від 30 до 150 м/хв ($t = 3\text{ мм}$, $S = 0,44\text{ мм/об}$) температура заготовки зменшується з 24 до 11°C [12].

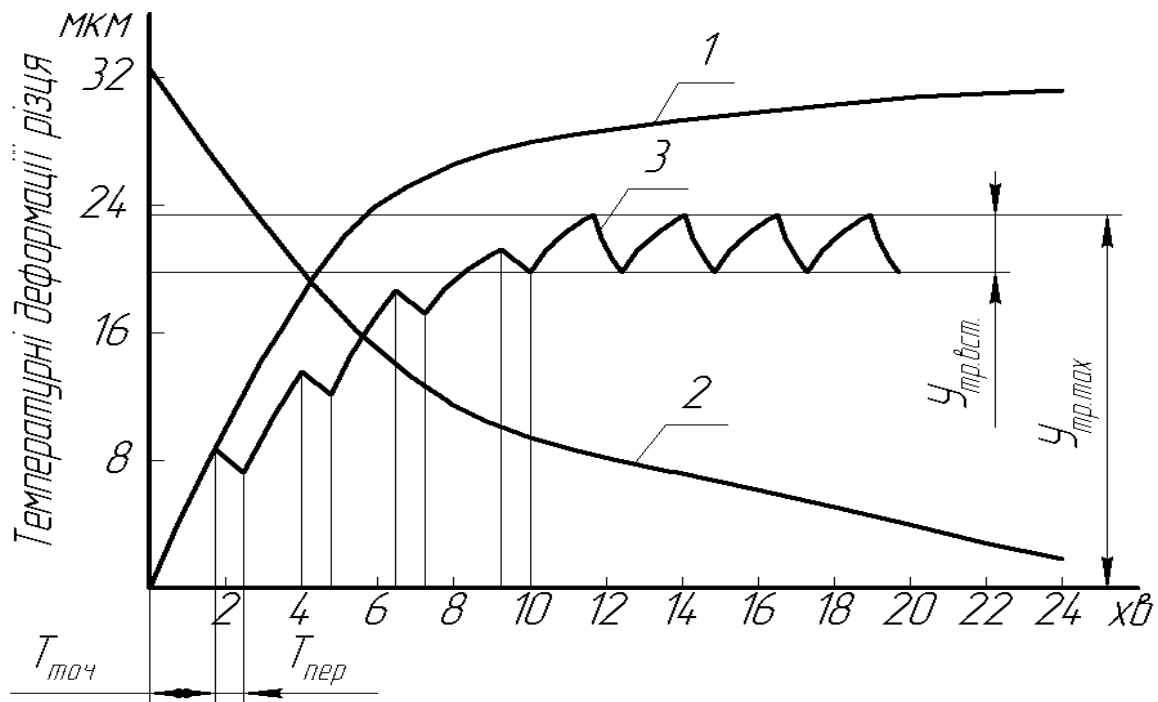


Рисунок 12 – Температурні деформації різця при точінні з перервами

Аналогічний вплив має і подача S : при збільшенні S від $0,11$ до $0,44\text{ мм/хв}$, ($V = 140\text{ м/хв}$, $t = 3\text{ мм}$) температура заготовки зменшується з 35 до 11°C [12]. За інших однакових умов підвищення температури заготовки залежить більшою мірою від конструкції деталі: тонкостінні ажурні деталі нагріваються значно сильніше, ніж масивні суцільні заготовки. Наприклад, при обробленні суцільної заготовки ($D = 140\text{ мм}$; $L = 300\text{ мм}$; $V = 150\text{ м/хв}$; $t = 3\text{ мм}$, $S = 0,2\text{ мм/об}$) температура її підвищується на $\Delta T_1 = 11^{\circ}\text{C}$. Температурна деформація її буде $\Delta_1 D = D \cdot \Delta T_1 \cdot \alpha_t = 140 \cdot 11 \cdot 1,1 \cdot 10^{-5} \cdot 1000 = 17\text{ мкм}$. Якщо заготовка при тих же габаритних розмірах D і L є трубою з діаметром отвору $d = 120\text{ мм}$, то температура її підвищуватиметься до 44°C , а температурна деформація $\Delta_2 D = 140 \cdot 11 \cdot 1,1 \cdot 10^{-5} \cdot 1000 = 68\text{ мкм}$. Якщо заготовка в період оброблення має розмір в межах допуску, то при охолодженні виявляється похибка розміру відповідно до 17 та 68 мкм .

Похибки, що виникають в результаті розмірного зносу інструмента

Знос інструмента, вимірюваний по нормалі до оброблюваної поверхні і такий, що безпосередньо впливає на точність, прийнято називати розмірним. Стосовно обточування різцями розмірний знос – це радіальний знос. Розмірний знос позначають u (рисунок 13), вимірюють в мкм і виражають залежно від шляху різання L . На кривій $u=f(L)$ є три характерні ділянки: *I* – початкового зносу, *II* – нормального зносу і *III* – інтенсивного зносу, коли треба припиняти різання, щоб уникнути руйнування різальної кромки різця. Шлях різання для початкового зносу складає 500...1000 м, для ділянки нормального зносу – 30000...40000 м (для різців Т30К4). На ділянці нормального зносу залежність $u=f(L)$ має лінійний характер. Це дозволяє характеризувати інтенсивність зносу величиною відносного або питомого зносу

$$u_0 = 1000 \cdot u / L \text{ мкм/км.} \quad (17)$$

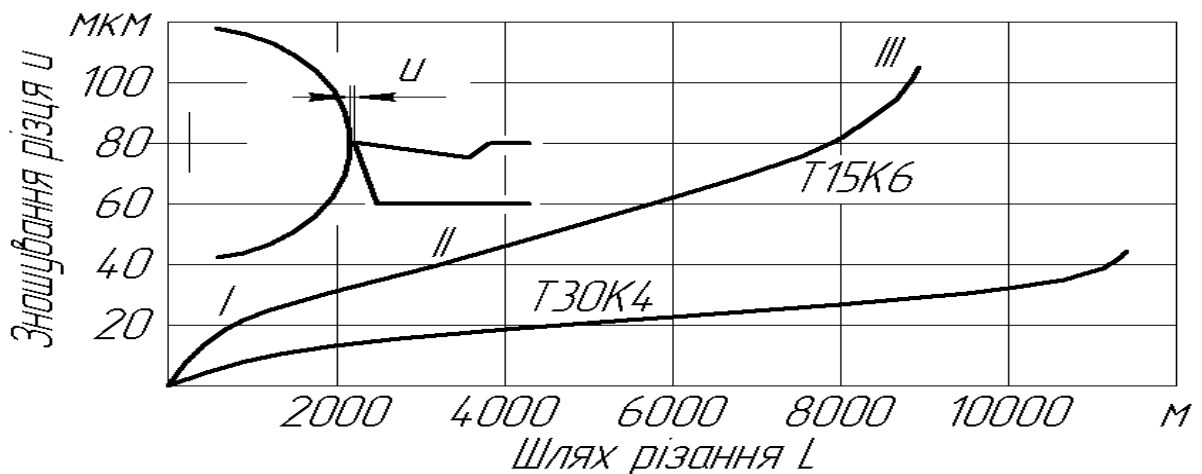


Рисунок 13 – Графік розмірного зносу різців

Отже, відносний знос – це розмірний знос на шляху різання 1000 м (1 км). Значення u_0 залежить від матеріалу оброблюваної заготовки, режимів різання, марки матеріалу різального інструмента та інших чинників. Наприклад [12], при обробленні легованої сталі на швидкості 135 м/хв різцями Т15К6 $u_0 = 8,5$ мкм/км, а різцями Т30К4 $u_0 = 3,5$ мкм/км; алюмінієвих сплавів на швидкості 180...200 м/хв різцями ВК8 $u_0 = 2,0$ мкм/км; алмазними різцями при швидкості до 1000 м/хв $u_0 = 0,0005...0,0010$ мкм/км.

У результаті розмірного зносу відстань між вершиною різця і віссю обертання збільшується (зменшується для отвору) на величину u_1 (рисунок 14). За час оброблення однієї заготовки знос

$$u_1 = u_0 \cdot L / 1000 \text{ мкм.} \quad (18)$$

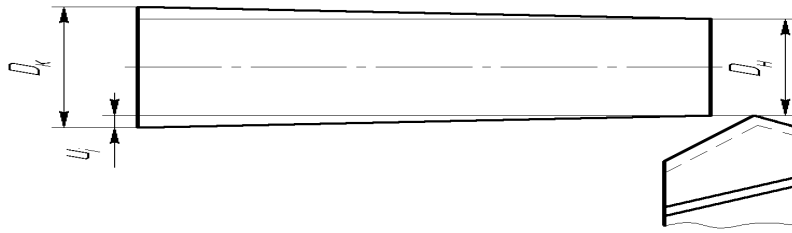


Рисунок 14 – Схема утворення похибки форми в результаті розмірного зносу інструмента

$$\text{Довжина шляху різання } L = \pi \cdot D \cdot L / 1000 \cdot S, \quad (19)$$

де D і L – відповідно діаметр і довжина оброблюваної поверхні, мм;
 S – подача, мм/об.

Безпосереднім результатом впливу розмірного зносу буде поява похибки форми (для випадку токарного оброблення – конусності (див. рисунок 14):

$$\omega_{\phi} = D_K - D_H = 2u_i.$$

Знос за час оброблення великогабаритної заготовки досягає великих значень; також значною буде і похибка форми. Наприклад, при обточуванні вала $D = 200$ мм, $L = 2000$ мм різцем T15K6 на режимах $V = 150$ м/хв, $S = 0,3$ мм/об, $u_0 = 8$ мкм/км.

За рівнянням (19) при обточуванні одного вала шлях різання

$$L = \pi \cdot D \cdot L / 1000 \cdot S = 3,14 \cdot 200 \cdot 2000 / 1000 \cdot 0,3 = 4200 \text{ м.}$$

За рівнянням (18) за час обточування однієї заготовки знос $u = 8 \cdot 4200 / 1000 = 34$ мкм, конусність $\omega_{\phi} = D_K - D_H = 2 \cdot u_i = 2 \cdot 34 = 68$ мкм.

Розмірний знос на точність розмірів впливає по-різному, залежно від того, як виконується операція. Якщо заданий операційний розмір виконується на основі промірювань, то вплив розмірного зносу компенсується (усувається) установленням інструмента для оброблення кожної нової заготовки виміром її розміру.

У цьому випадку похибка розміру від зносу інструмента дорівнюватиме похибці форми, тобто $\omega = \omega_{\phi} = 2u_i$. При обробленні заготовок з попереднім налагоджуванням обладнання знос не компенсується, а накопичується, обумовлюючи регулярне збільшення (щодо вала) або зменшення (щодо отвору) розмірів послідовно оброблюваних заготовок: кожна наступна заготовка буде відрізнятися від попередньої на величину $2u_i$. Якщо перша заготовка має розмір D_1 , то розмір другої буде $D_1 + (2-1) \cdot 2u_i$, а n -ї заготовки – $D_1 + (n-1) \cdot 2u_i$. Розмір, наприклад, п'ятої заготовки буде більше першого на $(5-1) \cdot 2 \cdot 34 = 272$ мкм. Для визначення похибки від зносу інструмента в межах партії заготовок можна використати рівняння

$$\omega = n \cdot 2 \cdot u_i, \quad (20)$$

де n – число заготовок, виготовлених між двома налагодженнями верстата.

Кінематичні похибки

Кінематичними називають похибки, що виникають при заміні точної схеми формоутворення поверхні наближеною схемою. Наприклад, необхідно нарізати модульну різьбу (черв'як) $m = 2,5$ мм на токарному верстаті, крок його ходового гвинта $t_e = 6$ мм. Передатне відношення в ланцюзі подач

$$i = t_p / t_e = \pi \cdot m / t_e = 3,14 \cdot 2,5 / 6 = 22 \cdot 5 / 7 \cdot 12,$$

де π – число ірраціональне, яке замінили простим дробом $\pi = 22 / 7$.

При налагодженні ланцюга подач при такому передатному відношенні нарізаний гвинт матиме похибку кроку 0,04 %.

При фрезеруванні різьби вісь дискової фрези встановлюється під кутом нахилу гвинтової лінії відносно осі виробу, і схема оброблення виходить точною. Однак при фрезеруванні груповою фрезою використовується наближена схема: вісь фрези встановлюється паралельно осі виробу, внаслідок чого виникає кінематична похибка профілю різьби.

Похибки оброблення, пов'язані з неточністю розмірного і профільного інструменту

Завжди існує місце копіювання (перенесення на деталь) неточностей розмірних і профільних інструментів. Якщо, наприклад, розмір протяжки буде на 0,030 мм більше за потрібний, то в усіх заготовках, оброблених цією протяжкою, розмір отворів буде завищеним на таку ж величину. Сказане пояснює, чому допуски на розмірні різальні інструменти (розгортки, зенкери, свердла, пазові різці і фрези) призначаються у багато разів меншими допусків на розміри відповідних оброблюваних поверхонь.

Профільні інструменти – це різьбові різці і фрези, зуборізні інструменти, фасонні різці, фрези і шліфувальні круги. Неточність профілю таких інструментів, незалежно від причини її виникнення, переноситься на деталь, обумовлюючи появу похибок форми.

Похибки, пов'язані з деформацією заготовок через перерозподіл залишкових внутрішніх напруг

Внутрішніми називають напруги, що існують у матеріалі деталі, якщо відсутні будь-які зовнішні навантаження. Ці напруги виникають у процесі виготовлення заготовок і при механічному обробленні. Зовні вони нічим себе не виявляють, тому що взаємно врівноважуються. Однак зняття шарів металу при обробленні порушує цю рівновагу. Відбувається

перерозподіл напруги до нового їхнього зрівноважування, внаслідок чого форма обробленої поверхні деталі в цілому може спотворитися.

Внутрішні напруження зменшують відповідним термообробленням, а їхній вплив – правильним поділом технологічного процесу на етапи.

Залишковою називають напругу, яка існує в матеріалі заготовки, якщо відсутні дії зовнішніх сил. Залишкова напруга виникає в процесі попереднього оброблення і залишається після його закінчення.

Класифікація залишкової напруги

За пропозицією акад. М. М. Давиденкова [26] розрізняють три види залишкової напруги:

Напруга 1-го роду – макронапруга, що охоплює області, які співрозмірні з розмірами деталі і урівноважуються в межах деталі; вони мають орієнтацію, пов'язану з формою деталі.

Напруга 2-го роду – мікронапруга, що діє в межах одного кристала, тобто поширюється на окремі зерна металу або на групу зерен.

Напруга 3-го роду – субмікроскопічна, елементарна, така, що належить до спотворень атомних ґрат кристала.

Залежно від характеру і режимів оброблення в деталях машин виникає напруга 1-го роду або одночасно два чи три види залишкової напруги (наприклад, при охолодженні металевої відливки і т. п.).

У технології машинобудування найбільша увага приділяється напрузі 1-го роду – макроскопічній.

Макроскопічна напруга, яка має найбільш суттєвий (іноді визначальний) вплив на експлуатаційні характеристики деталей, виникає в результаті неоднорідного (нерівномірного) розподілу деформацій в об'ємі деталі. Такий неоднорідний деформований стан може виникнути:

- у результаті неоднорідної пластичної деформації при обробленні металу волочінням, куванням, холодною правкою, різанням, а також нагріванням та охолодженням;
- у результаті неоднорідної зміни об'єму деталі і при фазових перетвореннях металу (загартуванні, старінні, цементації), або при неоднорідних фазових перетвореннях (азотуванні, кристалізації відливок).

У більшості випадків залишкова напруга виникає в умовах одночасної дії різних чинників: механічних, теплових і фізико-хімічних.

За місцем виникнення (залягання) залишкову напругу можна поділити на таку, що поширюється по всьому перерізу (об'єму), яку умовно називатимемо внутрішньою, і залишкову напругу в поверхневому шарі. На точність форми і розмірів поверхонь деталей найбільший вплив має внутрішня напруга.

Внутрішня напруга виникає при виконанні заготівельних процесів, пов'язаних з нагріванням і охолодженням металу (лиття, штампування,

зварювання і т. п.). Наприклад, при різній товщині стінок відливання, а також унаслідок відмінностей в умовах охолодження існує нерівномірність охолодження окремих частин відливки, що веде до виникнення залишкової напруги, яка може з'явитися в результаті опору матеріалу форм і стрижнів усадці відливання.

Особливо великих значень залишкова напруга досягає у відливках зі складними конструктивними формами, з різкими переходами від основних частин конструкції до тонких ребер, стінок і т. д. Основні шляхи зменшення залишкової напруги в литих заготовках – удосконалення їх конструктивних форм і технологічні заходи, що забезпечують повільне і рівномірне охолодження всіх частин заготовки.

Механізм виникнення залишкової внутрішньої напруги внаслідок неоднорідних об'ємних змін металу розглянемо на прикладі охолодження сталевго диска (рисунок 15), який було нагріто при штампуванні до

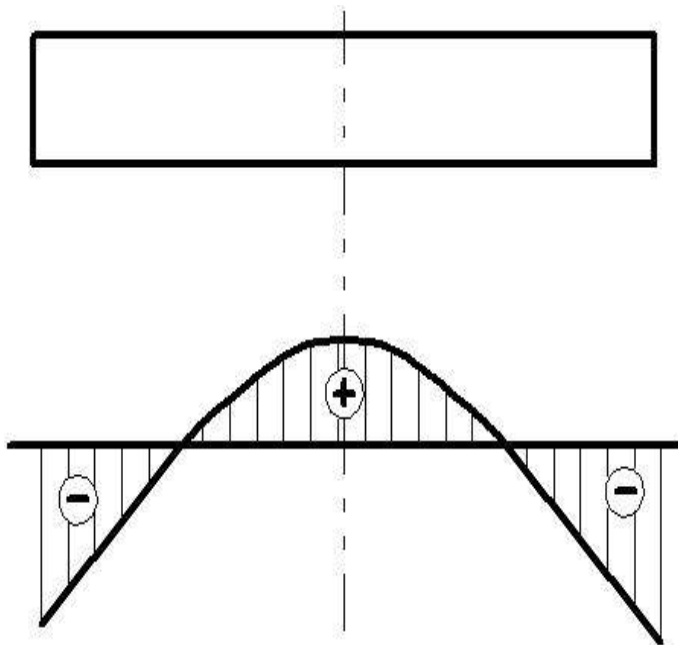


Рисунок 15 – Схема утворення залишкової напруги при охолодженні заготовки

700...800° С [29]. Зовнішній шар охолоджується швидше, ніж внутрішній. При температурі нижче 500° С цей шар втрачає пластичні властивості. При наближенні температури зовнішнього шару до нормальної об'ємні зміни металу в цьому шарі припиняються. Серцевина ж продовжує охолоджуватися і, змінюючись в об'ємі, стягує зовнішній захололий шар. У результаті в зовнішньому шарі виникає напруга стискування, в серцевині – розтяжна напруга. Епюру залишкової напруги в

диску після охолодження показано на рисунку 15.

Розглянемо тепер схему виникнення залишкової напруги в результаті неоднорідної пластичної деформації на прикладі холодної правки прокату під пресом. При навантаженні зовнішні волокна будуть у стані пластичного стискування (верхні) і розтягування (нижні). У середній частині перерізу існуватиме тільки пружна напруга (рисунок 16).

У процесі правки відбувається пластична деформація зовнішніх шарів металу, неоднорідна за величиною і знаком в різних точках перерізу.

Після зняття навантаження зовнішні шари металу, в яких сталася пластична деформація, перешкоджають поверненню деталі в початкове положення. Картину внутрішньої напруги, яка залишається в матеріалі деталі після правки, показано на рисунку 16. Дещо інша картина залишкової напруги спостерігається в матеріалі прокату після холодного оброблення його пластичною деформацією (плющенням, волочінням): в приповерхневих шарах існує значна залишкова розтяжна напруга, а у внутрішніх – напруга стискування. Залишкова напруга заготовок під впливом періодичних (сезонних, добових і т. п.) коливань температури, при невеликих механічних навантаженнях поступово перерозподіляється і заспокоюється, викликаючи залишкові деформації заготовок.

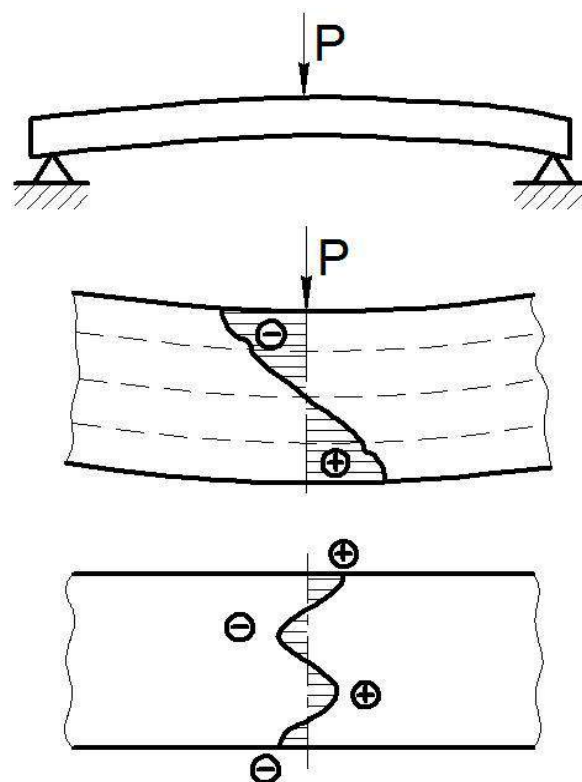


Рисунок 16 – Схема утворення залишкової напруги при холодній правці заготовок

Значний (стрибкоподібний) перерозподіл внутрішньої напруги відбувається при знятті шарів металу, що містять напругу, в процесі механічного (особливо чорнового) оброблення. При цьому виникають значні деформації (викривлення) деталей, характер і величина таких деформацій залежать від епюри залишкової напруги і її інтенсивності перед механічним обробленням.

Для зменшення і усунення внутрішньої залишкової напруги використовують природне старіння. Мимовільний перерозподіл і загасання залишкової напруги особливо інтенсивно проходить в перші дні і місяці після виготовлення заготовок. Тому при невисоких вимогах до точності деталей виявляється достатнім природне старіння тривалістю 10...30 днів [29]. Воно полягає у зберіганні (перебуванні) заготовок на повітрі. Істотними недоліками природного старіння є неповнота зняття напруги і велика тривалість процесу. Тому для заготовок невеликих і середніх розмірів останнім часом все більше використовують штучне старіння.

Окремого розгляду заслуговує термічне оброблення заготовок, при якому відбуваються не лише об'ємні (при нагріванні і охолодженні), але й структурні зміни металу. При деяких видах термооброблення (наприклад, цементації, азотуванні) змінюється хімічний склад металу. Це обумовлює складність хімічних, фізичних і механічних процесів, що протікають при цьому.

В результаті виникають порушення точності, що відбуваються за двома напрямками:

1. Такі, що існують при термообробленні, структурні й фазові перетворення обумовлюють внутрішню термічну напругу, величина і характер яких залежать від хімічного складу початкового стану металу, виду термооброблення, його режимів, складу середовища при нагріванні і охолодженні, швидкості нагріву і охолодження, перерізу і конструктивних форм деталі. Термічна напруга часто буває настільки великою, що від її дії можуть виникнути тріщини.

Результатом впливу термічної залишкової напруги є деформація деталей (викривлення) як безпосередньо при термообробленні, так і при подальшому механічному обробленні (як це було описано вище). Для зменшення термічної напруги і пов'язаною з нею деформацією деталей використовується ряд заходів: зменшення швидкості нагрівання при загартуванні, захист тонких стінок ізолюючою обмазкою, пом'якшення гартівного середовища, виконання загартування в пристосуваннях (у штампах), заміна суцільного загартування поверхневим загартуванням з нагріванням струмами високої частоти. Найбільш суттєвим засобом зменшення термічної напруги в сталевих деталях є післязагартувальне відпущення.

2. При термообробленні, як вже відзначалося, існують структурні перетворення металу, що і є метою термічного або термохімічного оброблення. Наслідком цих перетворень є зміна розмірів термооброблених деталей. Залежно від марки матеріалу, виду термооброблення, режимів, конфігурації деталей і багатьох інших чинників можливе або розбухання (збільшення), або усадка (зменшення) розмірів. Наприклад, діаметр початкового кола шестерні із сталі 40X після ціанування і загартування з нагріванням до 845° C збільшується з 90,246 до 90,348 мм (тобто на 0,102 мм) [2]. Нині доки не встановлені аналітичні залежності для визначення зміни розмірів при термообробленні. На зразках або на деталях дослідної партії експериментально встановлюють характер (розбухання, усадку) і величину зміни розмірів. Ці дані використовують потім при проектуванні технологічних процесів, при встановленні припусків на механічне оброблення після термічного.

Похибки налагодження верстата

Налагодження верстатів є процес первинного встановлення необхідної точності відносного положення і руху виконавчих поверхонь інструмента, верстата і пристосування з метою отримання заданої точності оброблюваних заготовок [30].

Як відомо, в практиці машинобудування використовуються два методи налагодження верстатів: налагодження з обробленням пробних заготовок і статичне налагодження або налагодження за еталонами.

У першому випадку встановлення різального інструмента в необхідне положення виконують шляхом послідовного наближення до заданого настроювального розміру (часто $A_{сер}$) в результаті оброблення на верстаті пробних заготовок. За даними виміру розмірів пробних заготовок визначають величину і напрям необхідного коригування інструмента. За другим методом різальний інструмент налагоджують в необхідне положення за еталоном в неробочому статичному стані верстата.

При налагодженні за першим методом похибка може становити [12]:

$$\omega = 1,2\sqrt{\omega_{рег}^2 + \omega_{вим}^2},$$

де $\omega_{вим}$ – похибка виміру пробних заготовок, яка приймається такою, що дорівнює граничній похибці вживаного вимірювального інструмента;

$\omega_{рег}$ – похибка регулювання положення різального інструмента і окремих агрегатів верстата відносно встановленого інструмента. При спрощених розрахунках $\omega_{рег}$ можна приймати такою, що дорівнює ціні поділки регулювального пристрою (лімбу, індикатору, упору і т. д.).

Похибка налагодження за еталоном [8]

$$\omega = 1,2\sqrt{\omega_{вуз.е}^2 + \omega_{у.і}^2}, \quad (21)$$

де $\omega_{вуз.е}$ – похибка виготовлення еталона, включаючи і ексцентриситет шийок.

Еталони виготовляють з високою точністю, так що $\omega_{вуз.е} = 15$ мкм; $\omega_{у.і}$ – похибка встановлення інструмента. При встановленні за допомогою щупа $\omega_{у.і} = 20... 30$ мкм [10]. Похибка встановлення за жорсткими упорами становить зазвичай 20...25 мкм, а за індикаторними упорами – 10...15 мкм.

Неточності встановлення інструмента на розмір

Установлюючи інструмент, неможливо надати йому жодне однозначно задане положення, а замінюючи інструмент, що затупився, не можна надати новому точно таке ж положення, яке займав попередній. Неточність встановлення інструмента на розмір безпосередньо впливає на величину розміру.

Неточності вимірювання розміру

Ці неточності є наслідком неточностей вимірювального інструмента або приладу й неточностей, що супроводжують процес вимірювання (помилки при настроюванні приладу, відліку показань інструмента і т. п.). Оскільки правдиву величину розміру визначають за результатами вимірювання, помилка в цьому результаті є виробничою похибкою і завжди є одним з факторів, що впливають на похибку оброблення.

1.3 Методи дослідження факторів, що впливають на дійсну похибку формоутворення поверхонь деталей

Існують два принципово різних методи дослідження розглянутих вище факторів: *статистичний* і *експериментально-аналітичний*.

Статистичний метод вирізняється насамперед тим, що дозволяє оцінювати вплив відразу всієї сукупності факторів, що діють в умовах досліджуваної операції. В основі методу лежить вимірювання дійсних розмірів деталей після оброблення. Результати вимірювання систематизують, щоб подати їх з використанням графічної інтерпретації. Графік наочно показує дійсну похибку оброблення деталей і дозволяє робити деякі висновки про те, якого роду фактори її викликали.

На противагу цьому методу експериментально-аналітичний метод дозволяє оцінювати вплив кожного фактора окремо. В його основі лежить аналіз операції для того, щоб виявити ці фактори й знайти математичну залежність між значенням фактора й викликаного ним часткою похибки оброблення. Для одержання деяких даних можуть бути необхідними й спеціальні експерименти.

Обидва методи існують одночасно і можуть бути застосовані до проведення будь-якої операції. Однак, якщо метою дослідження є *нагромадження матеріалів, необхідних для того, щоб у практичній роботі правильно визначати очікувану точність при автоматичному одержанні розмірів на попередньо налагодженому обладнанні*, то виявиться, що доцільність застосування того або іншого методу залежить від умов операції. Тому кожний з методів має свою основну область застосування. Наприклад, використовувати статистичний метод для дослідження операції, схема якої показана на рисунку 17, а (розмір **A**), зовсім не має сенсу.

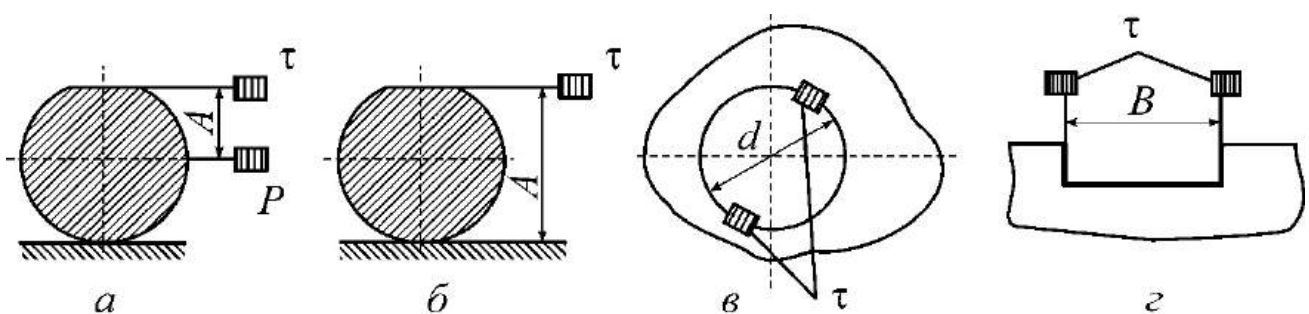


Рисунок 17 – Застосування методів дослідження:

а, б – одностороннє оброблення; в, г – кругове й двостороннє оброблення

Тут у сукупність факторів, що впливають на розмір **A**, буде входити похибка діаметра валика, що залежить від допуску **a**, який витримується в попередній операції. Як і інші виробничі похибки, допуск **a** буде вносити в

похибку розмірну частку (умовно показану полем **P**), що не можна виділити статистичним методом.

Отже, результати дослідження будуть позбавлені головного: вони не одержать досить широкого використання при проектуванні інших операцій, тому що допуски на валики (циліндричні поверхні) бувають всілякими. Недоцільність застосування статистичного методу до дослідження наведеної операції підкреслюється і тим, що нескладний аналіз дозволяє легко знайти математичну залежність між допуском **a** і часткою, що він може внести в похибку розміру **A**: $P = 0,5 \cdot a$.

Інша справа – зовні схожа операція, показана на рисунку 17, б. У цій операції, як і для розмірів **d** і **B** в схемах в та г на рисунку 17, взагалі відсутні фактори, що легко піддаються аналізу.

У сукупності факторів головне місце займають неточності верстата, неточності інструмента, його зношування й помилки в установленні на розмір, деформації й інші фактори, безпосередньо пов'язані із застосовуванним процесом різання (методом формоутворення поверхонь). Роздільне вивчення цих факторів у рамках однієї конкретної операції (певний верстат, інструмент, деталь і т. д.), зрозуміло, є недоцільним. Поширення ж досліджень потребує величезної експериментальної роботи. Таку роботу розпочато кілька десятиліть тому, але ще й зараз немає надії на те, що вона принесе помітні результати. Треба вважати, що для проведення подібних операцій, безумовно, кращим буде статистичний метод дослідження.

Зрозуміло, що відмова від аналітичного методу, що дозволяє розкривати механізм дії факторів і ясно бачити можливі шляхи керування ними, є змушеною. Однак область, в якій аналітичне дослідження є неможливим або натрапляє на значні труднощі, велика: вся вона залишається на частку методу статистичного.

Наведемо загальні висновки:

1. Основна область застосування статистичного методу дослідження факторів пов'язана з методом формоутворення поверхонь в умовах, коли ці фактори є практично єдиними, що впливають на операційний розмір (див. схеми б, в, г на рисунку 17 і т. п.).

2. Основна область застосування аналітичного методу дослідження виробничих похибок пов'язана із самою оброблюваною деталлю і пристроєм для її встановлення на верстаті. Тут немає потреби в проведенні експериментів (метод з експериментально-аналітичного перетворюється в просто аналітичний), тому що величини виробничих похибок (допуски на розміри деталі, що витримуються при попередньому обробленні, і допуски на елементи пристрою) завжди відомі.

3. Метод формоутворення поверхонь є головним засобом, що забезпечує *першу* характеристику точності поверхні (точність самої

поверхні), а верстат та пристрій для деталі – головним засобом, що забезпечує *другу* (точність положення поверхні).

Отже, статистичний метод є головним методом дослідження *першої* характеристики точності, а аналітичний – головним методом дослідження *другої*.

Розподіл розмірів у полі розсіювання

Статистичний метод дає можливість не ставити спеціальні експерименти, замінюючи їх спостереженнями безпосередньо при виробництві. При цьому потрібно лише регламентувати умови операції й зважати на *закон великих чисел*, на основі якого роблять висновки при статистичних дослідженнях. Відповідно до цього закону при збільшенні числа спостережень над однорідними явищами *частість* появи якої-небудь події в минулому наближається до *ймовірності* появи її в майбутньому. Частістю (відносною частотою) називають відношення числа випадків *m*, коли подія спостерігалася, до загального числа *n* зроблених спостережень: імовірність відношення числа випадків, що сприяють даній події, до всього числа можливих випадків. Імовірність достовірної події дорівнює одиниці (100 %), неможливої – нулю.

Сказане означає, що не всяке вимірювання розмірів можна покласти в основу висновків про похибки формоутворення поверхонь. Наприклад, величина розсіювання $R = 0,100$ мм, отримана після оброблення партії з 30 деталей, є критерієм похибки оброблення, безумовно, достовірною для даної партії. Однак ця величина буде неправильною (мало достовірною), якщо прийняти її як норматив, тому що число оброблених деталей (число спостережень) є занадто малим. У теорії таку величину, на відміну від дійсного поля розсіювання, називають розмахом розподілу.

Застосовуючи статистичний метод для оцінювання похибки оброблення партії деталей, виявляють не тільки величину R поля розсіювання, але й *характер розподілу* розмірів у цьому полі. На рисунку 18 зображено чотири похибки оброблення (чотирьох партій із 17 деталей), однакових за величиною поля розсіювання R , але з різним розподілом розмірів усередині поля. Ясно, що ці похибки не рівноцінні й вплив факторів, що їх викликали, був різним. Знання характеру розподілу дає повне уявлення про похибки оброблення. З огляду на характер розподілу, можна точніше виконувати багато завдань, що потребують визначення очікуваної точності формоутворення поверхонь.

Метод кривих розподілу

Побудова кривої розподілу. Велика кількість розмірів, серед яких завжди виходить багато практично однакових, важко зображувати так, як це зроблено на рисунку 18. Крім того, таке зображення обмежує можливості математичного аналізу розподілу. Краще уявлення надає крива розподілу розмірів (рисунок 19).

Поле розсіювання R , що вийшло, поділяють на k рівних інтервалів і у вибраному масштабі зображують на осі абсцис. Підраховують кількість (частоту) m розмірів (деталей), що потрапили в кожен ($m_1, m_2, \dots, m_k$) з інтервалів. Вибирають масштаб по осі ординат, із середини кожного інтервалу відкладають відповідну частоту у вигляді відрізка. З'єднуючи кінці відрізків, одержують ламану лінію, так звану практичну криву розподілу.

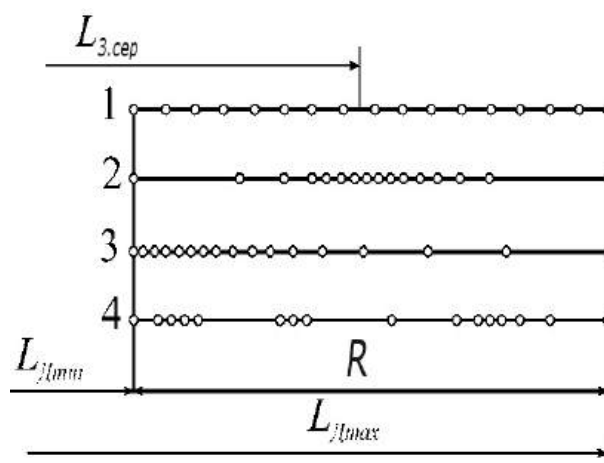


Рисунок 18 – Різні розподіли 17 розмірів у полі розсіювання

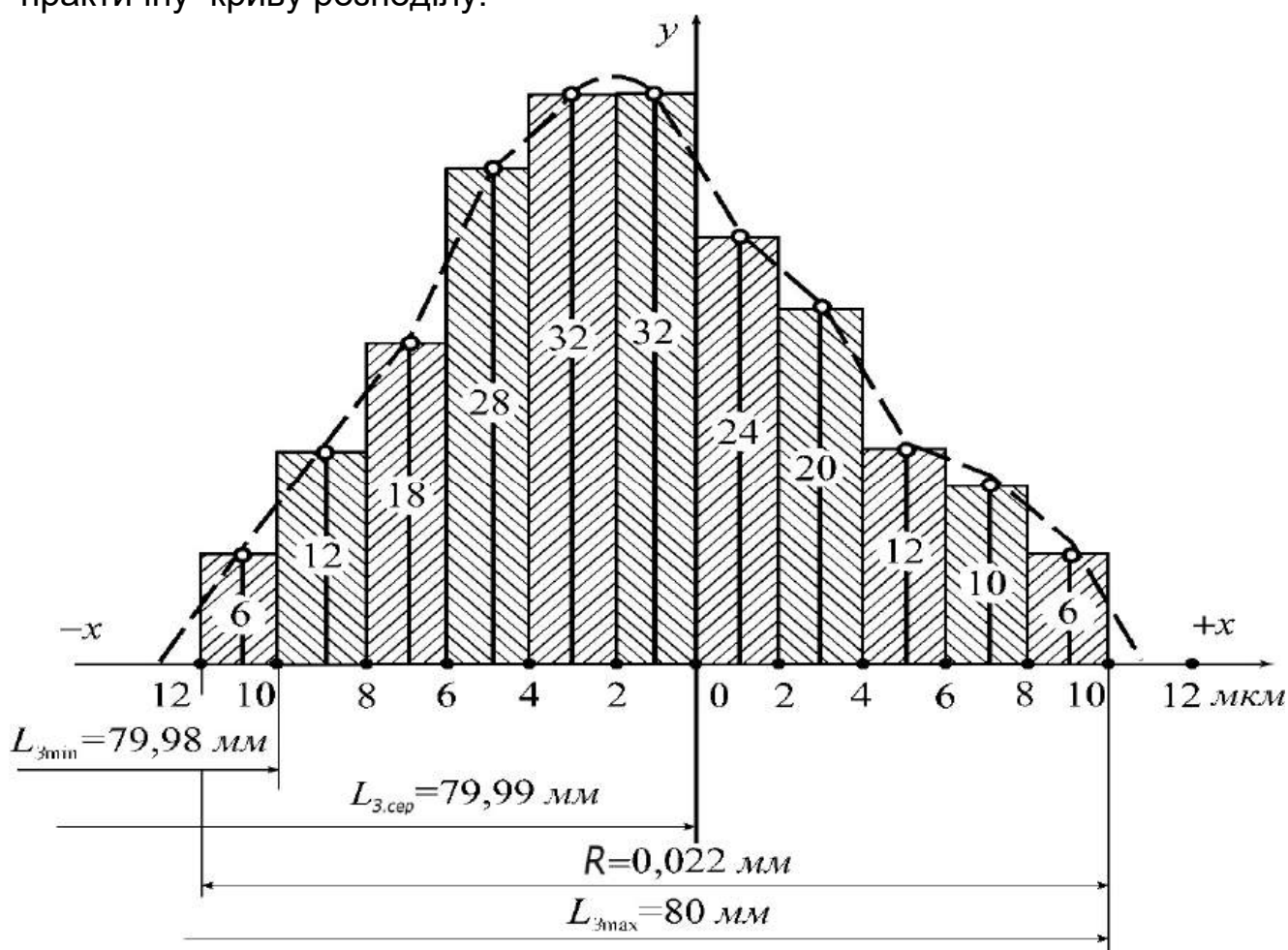


Рисунок 19 – Крива розподілу розмірів

Якби кількість оброблених деталей була безмежно великою, то відповідно безмежним могло бути й число інтервалів. Тоді ламана лінія перетворилася б у плавну криву й відображувала б закон розподілу розмірів.

Площа під кривою розподілу являє собою у відповідному масштабі число n обмірюваних розмірів, тобто всю кількість деталей у партії ($m_1 + m_2 + \dots + m_k = n$). Частина цієї площі, що відповідає будь-якому інтервалу між двома розмірами, відображає кількість розмірів (деталей) у цьому інтервалі (див. заштриховані прямокутники на рисунку 19).

Показана крива побудована за результатами вимірювання діаметрів у партії $n = 200$ шт.) валиків, що пройшли операцію безцентрового шліфування. В результаті дослідження необхідно було виявити дійсну точність оброблення цієї партії за заданим розміром $\varnothing 80_{-0,020}$.

Схема виконана так, що безпосередньо видно не тільки розподіл розмірів (деталей) у полі розсіювання, але і їхній розподіл у полі допуску на заданий розмір (6 деталей виявилися браком).

При вибраному масштабі форма кривої розподілу залежить *тільки від різниці значень розмірів*. Тому криву можна будувати, приймаючи за початок координат будь-яке довільно взяте значення розміру. В дослідженнях, пов'язаних з певним заданим розміром, початком координат є середнє значення $L_{з.сер}$ цього розміру. При використанні такого способу досягається найбільша наочність (див. рисунок 19).

В інших випадках початок координат може бути іншим. На рисунку 20 показано криву з початком координат у середині поля розсіювання.

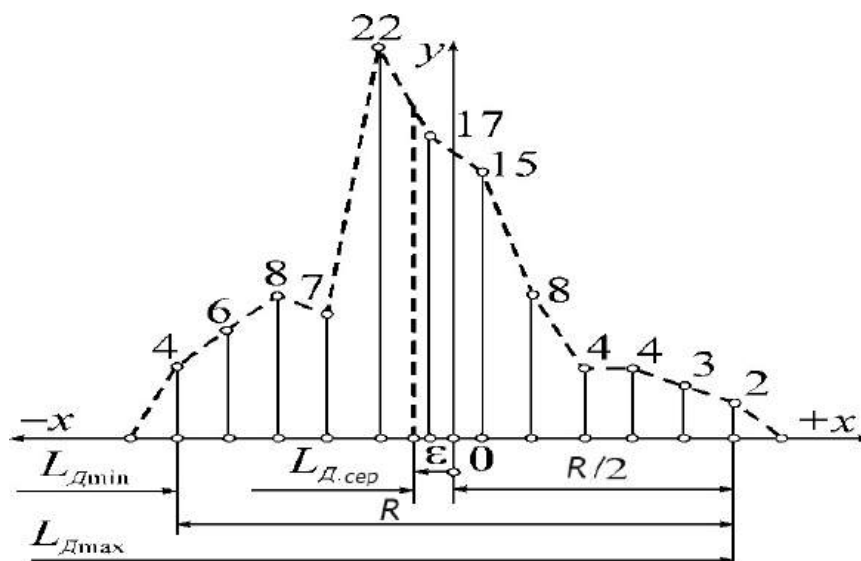


Рисунок 20 – Побудова кривої розподілу

Параметри кривої. Крива нормального розподілу

Криву розподілу характеризують певні головні параметри (див. рисунок 20). Поле розсіювання розмірів $R = L_{д.макс} - L_{д.мін}$.

Центр групування відхилень. Положення його в полі розсіювання відповідає середньому значенню дійсних розмірів:

$$L_{д.сер} = (L_{д1} \cdot M_1 + L_{д2} \cdot M_2 + \dots + L_{дk} \cdot M_k) / n.$$

Слід зауважити, що, не знаючи характеру розподілу, ми змушені вважати що дійсними є тільки суміщення центра групування із серединою поля розсіювання, тобто симетричних кривих:

$$L_{д.сер} = 0,5(L_{д.макс} + L_{д.мін}).$$

Абсолютна несиметрія. Цей параметр характеризує несиметричність кривої. Величина його ε являє собою зсув центра групування із середини поля розсіювання:

$$\varepsilon = L_{д.сер} - 0,5(L_{д.макс} + L_{д.мін}).$$

Середньоквадратичне відхилення розмірів від центра групування (від $L_{д.сер}$) у статистичних дослідженнях відіграє важливу роль:

$$\sigma = \sqrt{\left[(L_{д1} - L_{дсер})^2 \cdot M_1 + (L_{д2} - L_{дсер})^2 \cdot M_2 + \dots + (L_{дk} - L_{дсер})^2 \cdot M_k \right] / n}.$$

По-перше, величина σ вірніше, ніж величина поля R , характеризує інтенсивність розсіювання. Наприклад, поле R кривої 1 на рисунку 21 більше, ніж кривої 2.

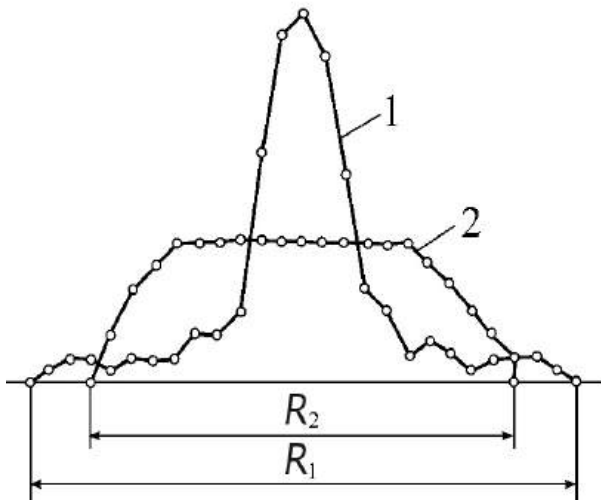


Рисунок 21 – Криві розподілу
з $R_1 > R_2$ і $\sigma_1 < \sigma_2$

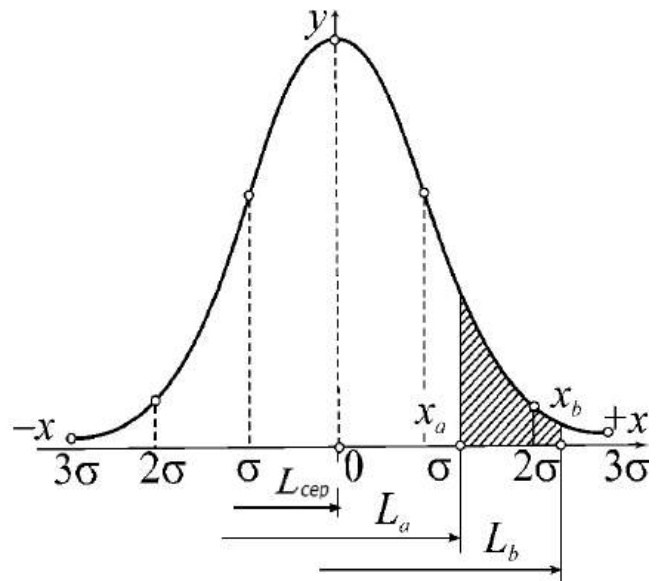


Рисунок 22 – Крива
нормального розподілу

Однак вважати це ознакою меншої стабільності умов першої операції буде не зовсім правильним. Хоча $R_1 > R_2$, але кількість розмірів, що знаходяться поблизу центра групування, у першому випадку більше, ніж у другому ($\sigma_1 < \sigma_2$).

По-друге, параметром σ широко користуються при переході від практичних кривих до законів розподілу й зіставлення законів. Практичні

криві виходять у вигляді ламаних ліній, що мають не цілком правильну форму. Використовувати їх для виведення загальних закономірностей важко. Тому їх заміняють придатними «теоретичними» кривими, що відображають цілком певні закони розподілу, які задають математичними рівняннями $y = f(x)$. Для зручності зіставлення практичної кривої з теоретичною обидві криві будують в однаковому масштабі. При цьому вся площа під кривою чисельно дорівнює одиниці (100 % деталей). Частиною цієї площі, що відповідає деякому інтервалу відхилень, вимірюють частість, а при переході від практичної кривої до закону розподілу – імовірність входження відхилень у цей інтервал.

По-третє, величина σ є єдиним параметром, що визначає форму так званої кривої нормального розподілу (закону Гауса), що має особливе значення, тому що до неї іноді дуже близько підходять практичні криві (рисунок 22). Рівняння, що описує цю криву в координатах **3** початком у центрі групування, має вигляд

$$y = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}},$$

де e – основа натуральних логарифмів ($e = 2,718...$).

Крива асимптотично наближається до осі абсцис. Вона має дві точки перегину на відстані $+\sigma$ і $-\sigma$ від центра групування.

При такому законі розподілу 25 % всіх деталей партії перебуває в інтервалі $x = \pm 0,3\sigma$; 50 % – в інтервалі $\pm 0,7\sigma$; 75% – в інтервалі $x = \pm 1,1\sigma$; 99,73% – в інтервалі $\pm 3\sigma$.

У зв'язку із цим вважають, що практично все поле розсіювання перебуває в інтервалі $\pm 3\sigma$ (помилка становить лише 0,27 %), тобто приймають

$$R = L_{д.макс} - L_{д.мін} = 6\sigma.$$

Щоб уникнути інтегрування, необхідного при підрахунках площі окремих ділянок, використовують вже складені таблиці Лапласа завчасно обчислених значень інтегралів.

Види похибок формоутворення поверхонь партії деталей

Кожний закон розподілу можна розглядати як закон розподілу розмірів і як закон розподілу похибок (рисунок 23).

Якщо розмістити криву в системі координат, початком якої (**0**) є дійсний нуль (схема **а**), вона буде кривою розподілу розмірів. Але якщо за початок прийняти будь-яке інше значення розміру (якесь **L**), то можна знаходити всі інші розміри через їхні відхилення від цього розміру. У другому випадку (схема **б**) кожне таке відхилення (ΔL) буде являти собою

величину невідповідності розміру ($L + \Delta L$), що відповідає йому, розміру L , прийнятому за нульовий, тобто буде похибкою розміру L .

Виходить, крива буде відображувати закон розподілу похибки розміру L . Якщо ж як нульове прийняти середнє значення $L_{з.сер}$ заданого розміру оброблення (схема в), то кожне значення абсциси буде значенням похибки оброблення деталі, крива відобразить закон розподілу похибок оброблення деталей, що входять у партію. Застосовуючи метод кривих розподілу до вивчення похибки оброблення партії деталей, розрізняють три «чистих» (теоретичних) види цих похибок: а) *постійні*; б) *закономірно-змінні*; в) *випадкові*.

Похибки партії деталей називають *постійними*, якщо похибки деталей, що входять у партію, є однаковими. Такі похибки утворилися під дією факторів, які є постійними протягом оброблення всієї партії деталей. Поле розсіювання постійної похибки дорівнює нулю (розсіювання відсутнє, рисунок 24, а).

Похибки партії деталей називають *закономірно-змінними*, якщо у ході оброблення партії з'являється закономірність у зміні похибок деталей. Форма кривої розподілу такої похибки залежить від закону зміни загальної дії факторів, що викликають похибки.

На рисунку 24, б, в, г показано форми кривих розподілу (теоретичні закони), що існують при закономірній зміні (за час оброблення партії) загальної дії факторів: б – при рівномірно зростаючій дії факторів (закон рівної ймовірності); в – при уповільнено зростаючій дії за параболою другого ступеня (закон рівномірно зростаючої ймовірності); г – при уповільнено зростаючій дії протягом першої половини часу й прискорено зростаючій дії протягом другої половини – за параболою другого ступеня (розподіл за трикутником, закон Сімпсона). Постійні і закономірно-змінні похибки мають назву *систематичних похибок*.

Похибки оброблення партії називають *випадковими*, якщо в ході оброблення партії видима закономірність зміни похибок деталей відсутня. При цьому ні величину, ні напрямок похибки якої-небудь із деталей не можна заздалегідь визначити.

Таку похибку одержали б під дію одного або декількох випадкових факторів, тобто таких, які самі змінюються випадково, або ж під впливом

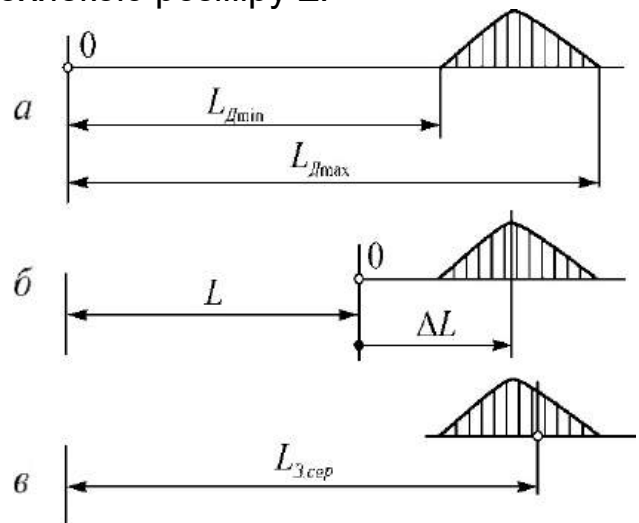


Рисунок 23 – Криві розподілу:
а) похибок розмірів; б) похибок ΔL ;
в) похибок формоутворення

великого числа однорідних (приблизно однакових за впливом) змінних факторів, хоча б кожний з них і був не випадковим.

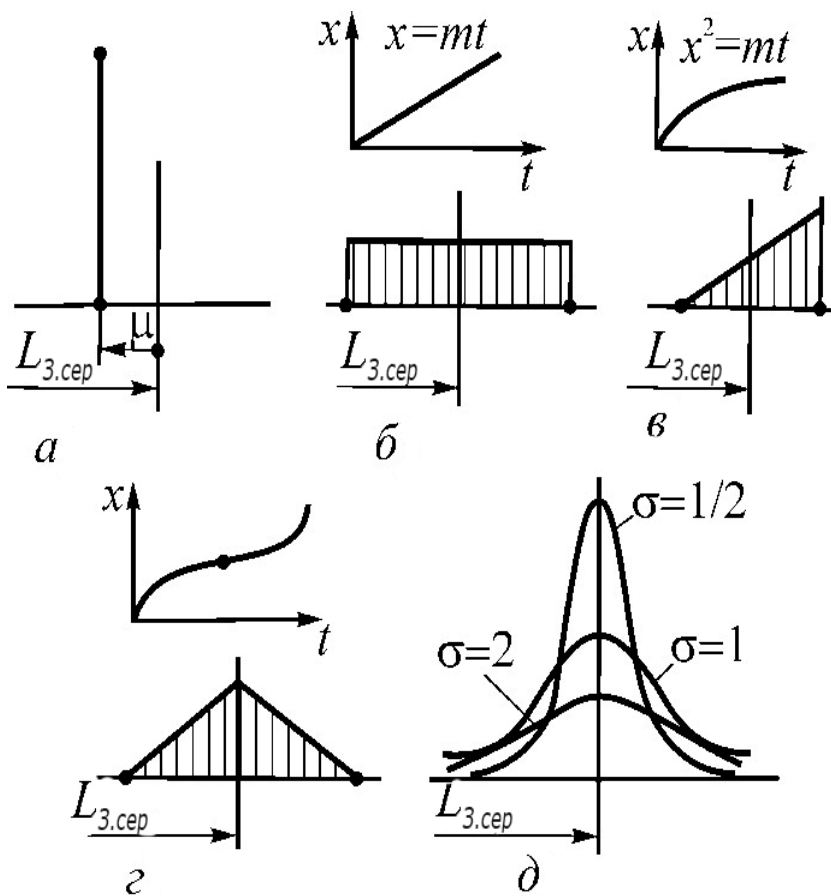


Рисунок 24 – Види похибок оброблення партії деталей: а – постійні; б, в, г – закономірно-змінні; д – випадкові з різною величиною σ

Крива розподілу випадкової похибки є кривою нормального розподілу (рисунок 24, д). На практиці жодну із цих «чистих» похибок партії деталей отримати не можна. Постійну або закономірно-змінну похибку не можна одержати тому, що на дію великого постійного або закономірно-змінного фактора обов'язково накладається дія безліч дрібних змінних факторів (коливання величини припуску, властивостей матеріалу деталі, температури, умов змащування, розходження у впливі неточностей верстата, пристрою і стану леза інструмента, розходження в силі закріплення деталей і т. д.), які викликають похибки, що наближаються до випадкових. Випадкова похибка не може бути в «чистому» виді через неминучість якого-небудь відносно великого постійного фактора або змінного, що не є випадковим. Тому дійсна похибка оброблення партії деталей завжди є більш складною. У числі її особливостей можуть бути одночасно всі особливості, властиві кожному виду «чистих» похибок.

Маючи рівняння кривих розподілу найпростіших закономірно-змінних похибок (рисунок 24, б, в, г), одержують більш складні математичні криві як певні *композиції* законів розподілу тієї або іншої з найпростіших кривих: а – нормального розподілу й рівної ймовірності, б – нормального розподілу й рівномірно-зростаючої ймовірності (рисунок 25).

Цим значно збільшується кількість теоретичних кривих, з якими можна зіставляти практичні криві й відповідно розширювати можливості аналізу похибок оброблення. В практиці промислового виробництва авіаційно-космічної техніки накопичено значну кількість дослідно-статистичної

інформації, що оформлена у вигляді галузових та стандартів підприємств конструкторсько-технологічної підготовки виробництва авіаційних двигунів та агрегатів.

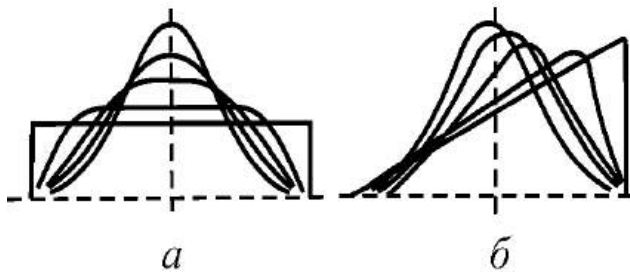


Рисунок 25 – Композиції законів розподілу: а – нормального розподілу й рівної ймовірності, б – нормального розподілу й рівномірно-зростаючої ймовірності

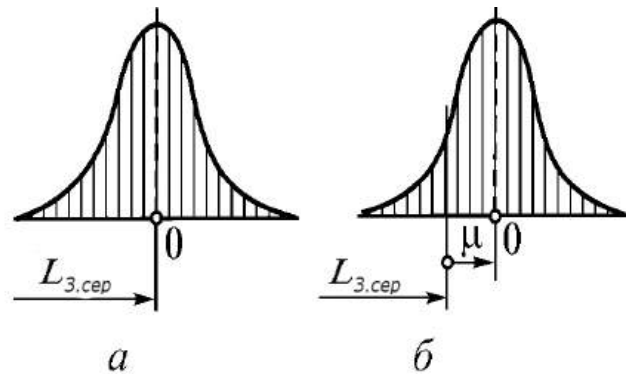


Рисунок 26 – Розподіл похибок партії, що вказує: а – на високий рівень операцій; б – на вплив домінуючої постійної похибки

Вихідні положення для аналізу кривих

При аналізі керуються такими основними положеннями:

1. Через велике число різних виробничих похибок, що впливають на розмір $L_{3,сеп}$, якого додержуються при обробленні, похибки оброблення партії деталей у найкращому випадку мають бути випадковими величинами, що підпорядковуються закону Гауса. Це означає, що розподіл похибок деталей, що входять у партію, має відповідати кривій нормального розподілу із центром групування $O (L_{д,сеп})$, що збігається з $L_{3,сеп}$ (рисунок 26, а).

Одержавши такий розподіл, можна зробити висновок, що серед виробничих похибок не було великих, які б домінували над іншими. Отже, великі були виявлені й усунуті при розробленні, налагодженні й виконанні операції. Залишилася лише безліч дрібних виробничих похибок, мало істотних. Усунення однієї або декількох з них уже не може привести до помітного зменшення похибки оброблення. Точні можливості методу оброблення практично вже вичерпані. Істотне зменшення похибки оброблення, якщо воно необхідне, потребує переходу до інших методів, способів і засобів формоутворення поверхонь, більш точних в цілому, чим розглянутий, наприклад, переходу від точіння до шліфування, від зенкерування до розгортання і т. п.

При такому розподілі величина поля розсіювання $R = 6\sigma$. Найбільша з похибок деталей має величину, що дорівнює 3σ . Таким чином, відносно використання поля допуску такий розподіл є найбільш вигідним.

2. Усяке відхилення від такого розподілу вказує на те, що виробничі похибки, що викликали похибки оброблення, були неоднорідними. Серед них були одна або декілька, що трохи домінували над іншими.

3. Вплив домінуючої постійної виробничої похибки визначається в тому, що центр групування O ($L_{д.сер}$), залишаючись у середині поля розсіювання ($\varepsilon = 0$), зміщується від значення $L_{з.сер}$ на величину μ , що являє собою постійну похибку оброблення (рисунок 26, б). Величина поля розсіювання такої похибки партії $R = 6\sigma$, але найбільша з похибок деталей має величину, що дорівнює $3\sigma + \mu$. Похибка μ обумовлена неточністю встановлення інструмента на розмір $L_{з.сер}$ і є неминучою. Хоча, перевіривши встановлення інструмента, неважко виміряти першу оброблену деталь і визначити її похибки ($L_{д1} - L_{з.сер}$), але не можна передбачити, якими будуть похибки інших деталей, тобто де виявиться центр групування. Значна порівняно з полем розсіювання постійна похибка μ вказує на недосконалість методу, за яким установлювали інструмент. Відмінними вважають методи, що забезпечують $\mu \leq 0,5\sigma$. При обробленні мірним інструментом неточність установлення інструмента на розмір визначається неточністю діаметра інструмента. Стосовно партій, оброблених при різних установленнях інструмента, неточність установлення інструмента й відповідно похибка μ є величинами випадковими.

4. Вплив домінуючої змінної виробничої похибки зовні характеризується тим, що форма кривої відрізняється від форми кривої нормального розподілу. Нова форма кривої залежить від закону зміни домінуючої виробничої похибки і від того, наскільки велика остання порівняно із сукупністю інших похибок. Залежно від цього закону центр групування O може залишитися в середині поля розсіювання $L_{з.сер}$ (рисунок 27, а), тобто крива буде симетричною ($\varepsilon = 0$), або ж він може зміститися із середини поля (рисунок 27, б), тобто крива буде несиметричною ($\varepsilon \neq 0$).

5. Найчастіше в ролі домінуючої закономірно-змінної виробничої похибки виступає знос різального інструменту, у ролі домінуючої випадкової – неточність установлення інструмента, що приводить до похибки μ (оброблення при різних установленнях інструмента).

6. Домінуюча закономірно-змінна виробнича похибка приводить у процесі оброблення до закономірного збільшення поля розсіювання й закономірної зміни величини постійної похибки μ . Для пояснення наведемо приклад. Припустимо, що єдиною виробничою похибкою є рівномірно зростаюча похибка типу показаної раніше на рисунку 24, б, угорі, (допустимо, що це є рівномірний знос інструмента).

Будемо вважати далі, що встановлення інструмента забезпечило одержання розміру першої обробленої деталі, який точно дорівнює $L_{3.сер}$.

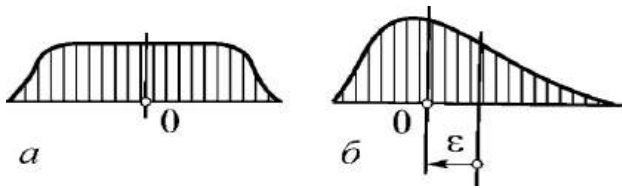


Рисунок 27 – Вплив домінуючої змінної виробничої похибки:
а – центр групування залишається всередині поля розсіювання;
б – центр групування зміщено

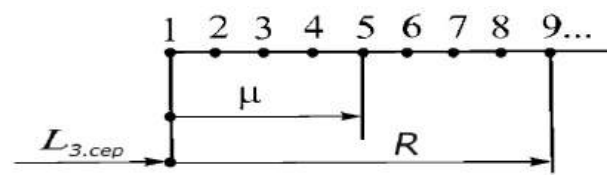


Рисунок 28 – Зміна постійної похибки μ під впливом єдиної рівномірно зростаючої виробничої похибки

Тоді при тому ж положенні інструмента похибки інших деталей будуть поступово зростати (рисунок 28), а положення центра групування і, отже, постійна похибка μ будуть залежати від числа оброблених деталей (кількості їх у партії). Величину такого розсіювання можна заздалегідь підрахувати (для даної партії) і компенсувати зустрічним зсувом інструмента при встановленні його на розмір $L_{3.сер}$ щодо першої деталі. У результаті, якби знос був єдиним фактором, то можна було б одержувати похибки оброблення партії типу показаних раніше на рисунку 24, б і в ($\mu = 0$, $\mu = \varepsilon$) та будь-яке інше необхідне положення відносно поля розсіювання.

7. Однак закономірно змінна виробнича похибка не є єдиною. Вона лише домінує над іншими, спільно викликаючих розсіювання не закономірне, а випадкове. Тому, навіть знаючи закон її зміни, і з огляду на нього при встановленні інструмента все ж не можна забезпечити $\mu = 0$ при симетричному розподілі (рисунок 29, а) або $\mu = \varepsilon$ при несиметричному (рисунок 29, б). Постійна похибка оброблення μ є неминучою (рисунок 29, в, г) і характеризує якість установа інструмента на розмір $L_{3.сер}$.

8. Вплив домінуючої випадкової виробничої похибки, якою може бути неточність установа інструмента на розмір, є різним. Кожна частина деталей партії, оброблених при одному встановленні інструмента, має свій центр групування й відповідно своє значення похибки оброблення μ (наприклад, див. рисунок 26, б).

Форма кривої розподілу партії, складеної з подібних частин, буде залежати від кількості частин (числа встановлення інструмента), від кількості деталей у кожній частині і величини та характеру розсіювання центрів групування частин. На рисунку 30, а показано криві розподілу партій, складених із двох і трьох різних за обсягом частин.

Багатовершинні криві одержують при великому розсіюванні $R_{ц}$ центрів групування частин ($R_{ц} > 2\sigma$). При меншому розсіюванні ($R_{ц} < 2\sigma$) отримують одновершинні криві з більш тупою вершиною (рисунк 30, б), ніж у кривій Гауса.

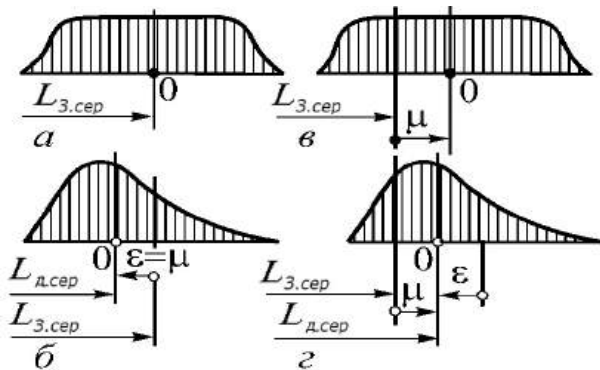


Рисунок 29 – Розподіл похибок оброблення під впливом безлічі виробничих похибок:

а – симетричний розподіл при $\mu = 0$; б – несиметричний розподіл при $\mu = \varepsilon$; в, г – дійсні розподіли

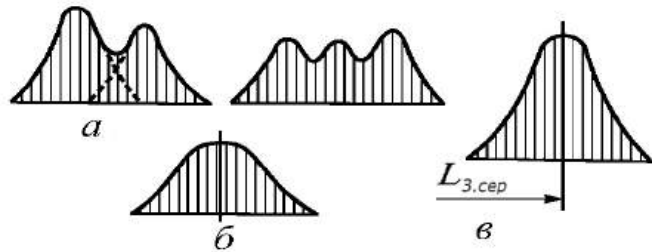


Рисунок 30 – Криві розподілу партій з декількох частин, оброблених при різних установах інструмента:

а – при $R_{ц} > 2\sigma$, б – при $R_{ц} < 2\sigma$, в – при розсіюванні $R_{ц}$ за законом Гауса

При великій кількості частин і розсіюванні центрів групування відносно $L_{3.сер}$ за законом Гауса крива розподілу похибки оброблення партії (рисунк 30, в) також відповідає закону Гауса зі середньоквадратичним відхиленням

$$\sigma_n = \sqrt{\sigma_d^2 + \sigma_{ц}^2},$$

де σ_d – середньоквадратичне відхилення похибок оброблення від свого центра групування в кожній частині партії (є однаковим для всіх частин і дорівнює σ – відхиленню, одержуваному при обробленні деталей без зміни положення інструмента);

$\sigma_{ц}$ – середньоквадратичне відхилення від $L_{3.сер}$ центрів групування частин партії:

$$\sigma_{ц} = \sqrt{(\mu_1^2 + \mu_2^2 + \dots + \mu_N^2)/N},$$

де N – число частин партії (кількість установлень інструмента).

Застосування методу

Побудова кривої розподілу з початком у $L_{3.сер}$ дає вичерпне уявлення про дійсну похибку оброблення партії деталей, наочно показує розподіл розмірів у полі допуску, тобто як використовується останній розмір при виконанні операції. За співвідношенням величини поля розсіювання R і величини поля допуску a можна робити висновок про те, як умови

операції (метод, спосіб та засоби формоутворення поверхні) відповідають заданій точності оброблення. За наявності домінуючого фактора положення і форма кривої розподілу допомагають відшукати цей фактор та вжити заходів до поліпшення умов проведення операції, якщо це необхідно.

За розміщенням в полі допуску центра групування **L3.сер** симетричної кривої (постійної похибки μ) або центра групування та середини поля розсіювання μ і σ несиметричної кривої, можна робити висновок про якість установлення інструмента на розмір (правильність розміру еталона деталі або встановлення шаблону, положення установка для інструмента в пристрої або розміру пробної деталі, якщо інструмент установлюється методом пробних проходів і вимірів), а при обробленні мірним інструментом (розгорткою, зенкером, пазовою фрезою, протяжкою і т. п.) можна робити висновки про правильно вибраний розмір інструмента.

За формою кривої (відступу від кривої нормального розподілу) можна робити висновки про домінуючий змінний фактор. Звичайно в ролі такого фактора виступає знос інструмента, але може бути й розігрівання верстата і інструмента в ході оброблення деталей.

Одержання двовершинної кривої, хоча партія оброблялася при одному встановленні інструмента, вказує на те, що в якийсь момент в дію втрутився непередбачений великий постійний фактор – збілося положення інструмента, викришилося лезо (різця) і т. п.

Область застосування методу значно поширюється, якщо заздалегідь відомо, що очікувана крива має виходити близькою до закону нормального розподілу. Численними дослідженнями різних методів оброблення встановлено, що автоматичне одержання розміру у багатьох випадках (насамперед за відсутності домінуючого зносу інструмента) забезпечує отримання куполоподібної кривої, що у першому наближенні можна вважати збіжною з кривою Гауса. Саме з такими випадками і пов'язане найбільш поширене застосування методу кривих розподілу. Знаючи, що розподіл має бути таким, можна спростити саме дослідження операцій, обмежившись меншим числом спостережень оброблених деталей. Підрахувавши для оброблених деталей (50...100 шт.) величину a , можна, минувши побудову практичної кривої, відразу ж визначити поле $R = 6\sigma$ розсіювання.

Поряд із цим спрощується використання результатів досліджень для виконання різних завдань, пов'язаних з очікуваною точністю оброблення, а саме завдань про можливість застосування даного методу оброблення при тій або іншій величині допуску на заданий розмір; завдань про те, яка частка допуску на заданий розмір може бути використана як допуск на постійну похибку μ , тобто як допуск на неточність установлення

інструмента на розмір при налагодженні верстата або як допуск на виготовлення й знос мірного інструмента.

Наявність заздалегідь підрахованих значень інтегралів (площ) для ділянок під кривою нормального розподілу спрощує вирішення питань, пов'язаних з імовірним виходом поля розсіювання за межі поля допуску на заданий розмір (визначення ймовірного відсотка браку деталей, коли метод формоутворення поверхонь не гарантує задану точність). Найбільш важливе загальне значення досліджень дійсної похибки оброблення за допомогою кривих розподілу полягає у тому, що вони дозволяють скласти обґрунтовані нормативи точності (величина поля розсіювання $R = 6\sigma$), яку можна очікувати, користуючись різними методами оброблення. Саме з методом, способом та засобами формоутворення поверхонь (верстатів, інструментів, технологічних режимів) пов'язана більша частина виробничих похибок, аналітичне дослідження яких неможливе або дуже складне.

Метод точкових діаграм

Діаграма розсіювання (точкова діаграма, англ. *Scatter plot*) – один із типів математичних діаграм, при побудові якої використовується декартова система координат для відображення значень двох змінних із набору даних. Дані показані у вигляді набору точок, кожна з яких має значення однієї змінної, тобто визначає її положення на горизонтальній осі та значення іншої змінної – її положення на вертикальній осі. Така діаграма теж називається *діаграмою розсіювання, графом розкиду*.

Точкова діаграма використовується, коли існує змінна, яка не може контролюватись експериментатором. Якщо існує параметр, який систематично збільшується або зменшується іншим, то це називається управлінням параметром або незалежною змінною і зазвичай відкладається по горизонтальній осі. Залежна змінна відкладається по вертикальній осі. Якщо немає залежних змінних, то вони відкладаються на будь-якій осі і точкова діаграма ілюструватиме лише ступінь кореляції двох змінних.

Точкова діаграма дозволяє користуватися різними видами кореляції між змінними з певним довірчим інтервалом. Наприклад, вага і зріст, вага буде на осі **X**, а зріст буде на осі **Y**. Кореляція може бути позитивною (зростання), негативною (спадання) або нульовою (некореляційною). Якщо система точок має нахил від нижнього лівого кута у верхній правий кут, то можна припустити, що позитивна кореляція між змінними була досліджена. Якщо система точок має нахил від верхнього лівого кута в нижній правий кут, можна припустити, що існує негативна кореляція. Лінія найкращої відповідності може бути зображена для того, щоб вивчити кореляції між змінними. Рівняння кореляції між змінними може бути визначено методом найкращого наближення. Для лінійної кореляції найбільш підходяща

процедура – лінійна регресія, яка гарантовано дозволяє одержати правильні рішення.

Немає універсальних найкращих процедур, які гарантовано приводять до правильних рішень при будь-яких співвідношеннях. Точкова діаграма є також дуже корисною, коли хочемо побачити, як два зіставлених набори даних узгоджуються один з одним. У цьому випадку ідентичність лінії, тобто лінії $y = x$ або лінії 1:1, часто зображується у вигляді посилання. Чим більшою є узгодженість цих двох наборів, тим більший розкид концентрується в безпосередній близькості від лінії ідентичності; якщо два набори даних чисельно ідентичні, розкид збігається з лінією ідентичності.

Точкова діаграма – один з семи основних інструментів вимірювання, оцінювання, контролю та покращення якості виробничих процесів, що входять до «родини інструментів контролю якості»: контрольна карта, контрольний аркуш, гістограма, діаграма розсіювання, діаграма Парето, діаграма Ісікави, розшарування (стратифікація).

Слід брати до уваги, що статистичні графіки – це графіки, що використовуються у статистиці для візуалізації кількісних даних.

У той час, як статистика та процедури аналізу даних зазвичай видають свої результати у числовій або табличній формі, графічні прийоми дозволяють зобразити такі результати у певній графічній формі. Вони містять графіки, такі як діаграми розсіювання, гістограми, графіки розподілу ймовірності, блокові діаграми, спагетті-діаграми, графіки залишків, коробкові графіки, подвійні графіки та ін. Розвідувальний аналіз даних значною мірою ґрунтується на таких прийомах. Вони також дають уявлення про набір даних, допомагаючи у тестуванні припущень, виборі моделі і перевірці регресійної моделі, виборі оцінок, ідентифікації зв'язків, визначенні впливу факторів і виявленні викидів. Крім того, вибір відповідних статистичних графіків робить переконливими основні висновки, які впливають із аналізу даних під час комунікації їх з користувачами.

Графічні статистичні методи мають чотири мети:

- дослідження вмісту набору даних;
- пошук структури даних;
- перевірка припущень статистичних моделей;
- комунікація результатів аналізу.

Якщо статистичні графіки не використовуються, то втрачається розуміння одного або більшої кількості аспектів внутрішньої структури даних.

Статистичні графіки займають центральне місце у розвитку науки, їх застосовували у найбільш ранніх спробах аналізу даних.

Багато знайомих форм таких графіків, зокрема двовимірні графіки, статистичні мапи, стовпчикові діаграми, а також міліметровий папір

використовували ще у XVIII столітті. Статистичні графіки одержали розвиток через увагу до таких чотирьох проблем:

- просторової організації у XVII та XVIII ст;
- дискретного порівняння в XVIII та на початку XIX ст;
- безперервного розподілу у XIX ст;
- багатовимірного розподілу і кореляції наприкінці XIX та в XX ст.

З 1970-х років статистичні графіки відродилися як важливий аналітичний інструмент на фоні прогресу у комп'ютерній графіці та пов'язаних з нею технологіях.

Візуалізація інформації – це інтерактивне вивчення візуального подання абстрактних даних для посилення людського пізнання. Абстрактні дані містять як числові, так і нечислові дані, такі як текст і географічна інформація. Однак візуалізація інформації відрізняється від наукової візуалізації тим, що вже просторове уявлення вибрано, а просторове уявлення подано.

Галузь візуалізації інформації з'явилася внаслідок досліджень взаємодії людини і комп'ютера, комп'ютерних наук, графіків, дизайну, психології та бізнес-методів. Вона все частіше застосовується як найважливіший компонент у наукових дослідженнях, цифрових бібліотеках, інтелектуальному аналізі даних, фінансових даних аналізу, дослідженні ринку і виробничого контролю та ін. Візуалізація інформації припускає, що візуальні уявлення і методи взаємодії користуються здатністю людського ока пропускати інформацію в мозок, щоб користувачі могли побачити, вивчити і зрозуміти велику кількість інформації за один раз. Візуалізація інформації спрямована на створення підходів до передачі абстрактної інформації інтуїтивно зрозумілими способами.

Аналіз даних є невід'ємною частиною всіх прикладних досліджень та вирішення проблем в промисловості. Найбільш фундаментальні підходи до аналізу даних – візуалізація (гістограми, точкові ділянки, ділянки поверхні, дерево карт, паралельно координовані ділянки і т. д.), статистика (гіпотеза, тест, регресія та ін.), видобуток даних (асоціації гірничодобувної промисловості і т. д.) і методи машинного навчання (кластеризація, класифікація, дерева рішень і т. д.).

Серед усіх цих підходів візуалізації інформації або, іншими словами, візуального аналізу даних, є той, який спирається в основному на пізнавальні навички аналітиків, а також дозволяє розкрити неструктуровані дієві ідеї, які обмежені тільки людською фантазією та творчістю. Аналітик не повинен застосовувати різні витончені методи, щоб мати можливість інтерпретувати візуалізацію даних. Візуалізація інформації – це також схема гіпотез, які можуть бути і, як правило, є попередниками більш аналітичного або формального аналізу на кшталт статистичних гіпотез.

Сучасним дослідженням візуалізації передувала комп'ютерна графіка, яка з самого початку використовувалась для вивчення наукових проблем.

Однак відсутність графічної потужності на першому етапі найчастіше обмежувала корисність візуалізації.

Останній акцент на візуалізації було поставлено в 1987 році внаслідок появи особливого питання щодо комп'ютерної графіки при візуалізації в наукових обчисленнях. Відтоді було проведено багато конференцій та семінарів з відповідною тематикою. Вони були присвячені загальним темам візуалізації даних, візуалізації інформації і наукової візуалізації і більш конкретним областям, таким, як обсяг візуалізації.

Описане вище має суттєве значення для всебічного розвитку та збагачення методів, способів та засобів аналітичного і практичного їх застосування в практиці промислового виробництва наукоємних об'єктів авіаційної та аерокосмічної техніки.

Криву розподілу будують незалежно від того, у якій послідовності оброблялися деталі партії. Всі деталі як би перемішуються. На відміну від цього точкову діаграму будують по ходу оброблення партії в координатах «номер деталі (або момент оброблення) – розмір деталі» (рисунк 31).

В умовах, коли під впливом виробничих похибок виникає нормальний розподіл розмірів, побудова точкової діаграми ніяких нових висновків зробити не дозволяє. У цьому випадку точки діаграми розташовуються прямою смугою (рисунк 32), ширина якої (при досить великій кількості оброблених деталей) приблизно буде $R = 6\sigma$, густина розташування точок по ширині смуги буде зменшуватись до її країв.

Якщо точки спроектувати на вісь розмірів і кількість точок, що потрапили в одне місце, зобразити пропорційними відрізками, то кінці цих відрізків розташуються на кривій нормального розподілу.

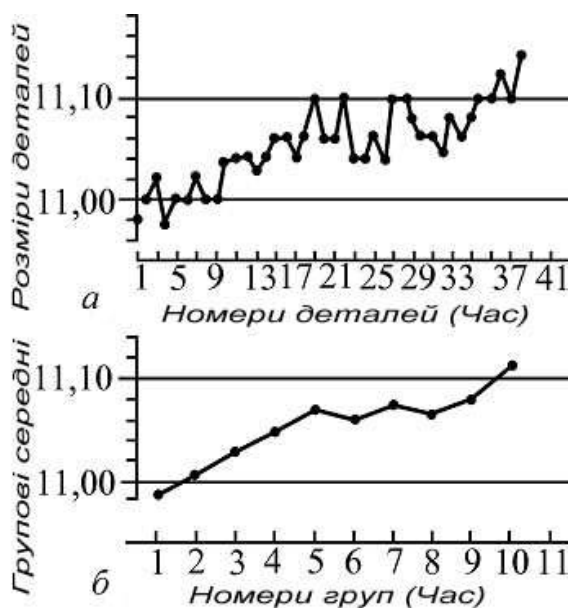


Рисунок 31 Точкові діаграми

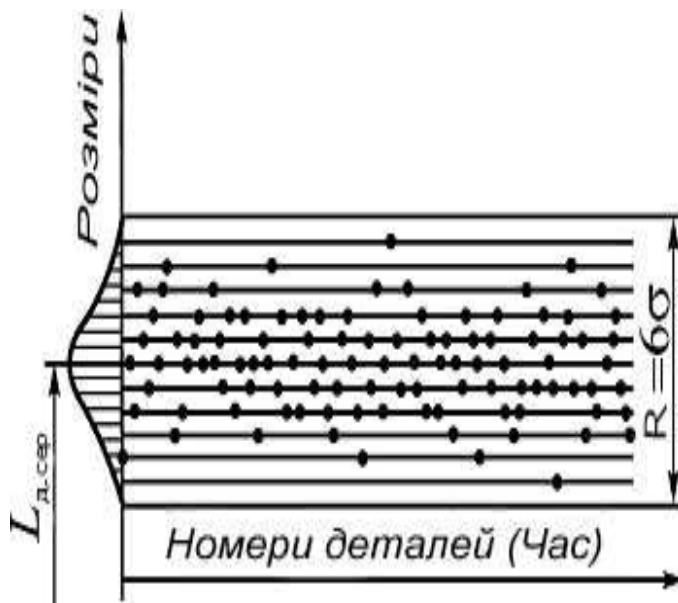


Рисунок 32 – Точкова діаграма при нормальному розподілі розмірів

Однак за наявності домінуючої закономірно змінної виробничої похибки (у такій ролі виступає звичайно знос різального інструменту) точкова діаграма дозволяє, хоча й дуже приблизно, безпосередньо робити висновки про вплив цієї похибки.

На противагу дії випадкових факторів, що викликає різку стрибкоподібну зміну розміру від деталі до деталі, дія закономірно змінного фактора викликає плавну зміну розміру. На точковій діаграмі це відображується відступом смуги точок від паралельності стосовно осі абсцис (осі часу): нахилом смуги (якщо зміна закономірно змінного фактора є рівномірною) або скривленням смуги (якщо зміна його є нерівномірною). Завдяки цьому й з'являється можливість оцінювати вплив домінуючого фактора.

Побудова точкових діаграм типу показаних на рисунку 31, б, практикується при *статистичному методі контролю ходу операції*. При такому контролі вимірюють не всі деталі партії, а тільки заздалегідь передбачену частину їх. Цю частину поділяють на групи-проби, які беруть періодично в ході операції, – так зване статистичне регулювання точності технологічних процесів. При значних змінах розміру від деталі до деталі напрямок всієї смуги точок виявляється нечітко. Він стає більш виразним, якщо на діаграмі відкладати не розмір кожної деталі (рисунок 31, а), а середній розмір групи (4...10 шт.) деталей (рисунок 31, б).

Вихід точки за певну межу є сигналом про можливість появи браку деталей і вказує на необхідність підналагодження верстата (внесення змін в положення інструмента або заміну його новим).

Розсіювання середніх групових розмірів менше, ніж розсіювання розмірів окремих деталей (рисунок 33).

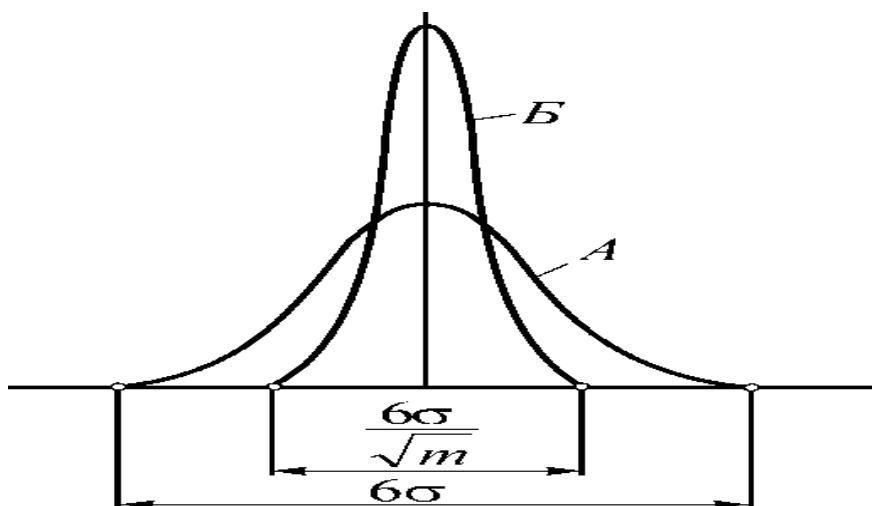


Рисунок 33 – Розподіл окремих розмірів (А) і середніх групових розмірів (Б)

Якщо, наприклад, перше підпорядковується закону нормального розподілу з середньоквадратичним відхиленням σ , то друге – тому ж закону, але зі середньоквадратичним відхиленням, що дорівнює $\sigma/\sqrt{m}$, де m – число деталей у групі. При цьому ламана лінія діаграми виходить більш плавною.

1.4 Принципи визначення очікуваної точності при автоматичному забезпеченні координуючого розміру

Координуючий розмір

Операційний розмір, що координує оброблювану частину деталі відносно необроблюваної частини, називаємо для стислості *координуючим розміром*. На рисунку 34 показано кілька операційних ескізів оброблення. Як видно, «оброблювана частина деталі» може бути однією поверхнею (схеми а, б) або комплексом взаємозалежних поверхонь (схеми в, г, д), одержуваним одним або декількома інструментами.

Показані на схемах операційні розміри **d** являють собою розміри (діаметри) оброблюваних поверхонь. Плоска поверхня власного розміру не має. Її довжина (як і довжина інших поверхонь) при обробленні не змінюється, тому з позицій точності не є розміром.

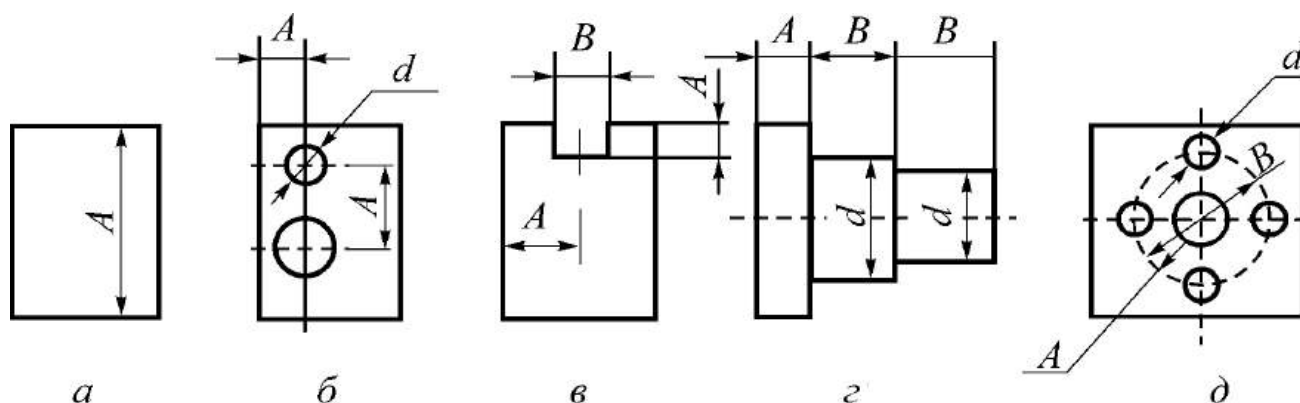


Рисунок 34 – Операційні розміри:

A – координуючі розміри; **d** і **B** – розміри поверхонь і внутрішньокмплексні розміри-координати

Розміри **B**, що з'єднують оброблювані поверхні між собою, є внутрішньокмплексними розмірами-координатами. Координуючі розміри **A** відповідають наведеному вище визначенню: вони пов'язують оброблювану частину деталі з необроблюваною частиною.

Взаємне розташування двох будь-яких оброблених ділянок не залежить від положення, що займає деталь у робочій зоні верстата, тому що воно залишається таким же при утворенні всіх ділянок.

Це означає, що відстань між такими ділянками, належать вони до однієї поверхні (розмір **d**) або до різних поверхонь (внутрішньокмплексна координата **B**), не залежить ні від неточностей необроблюваної частини деталі, ні від неточностей пристрою, що встановлює деталь у робочій зоні верстата. Вона залежить від факторів, пов'язаних з методом, способом та засобом формоутворення поверхонь, тому для її оцінювання (точність розміру **d** або **B**) більш доречно використовувати методи статистичні, а не розрахунково-аналітичні.

Відмінною рисою координуючого розміру **A** є те, що його відлічують від необроблюваної частини деталі, внаслідок чого його величина залежить насамперед від положення деталі в робочій зоні верстата. Стосовно такого розміру фактори, пов'язані з методом оброблення, втрачають своє домінуюче значення. Їхнє місце займають похибки самої деталі і пристрою. Значення тих і інших завжди точно відомі (допуски на розміри деталі задають у попередніх операційних картах, а на елементи пристроїв – у відповідних кресленнях технологічного оснащення). Тому при оцінюванні їхнього впливу (точність координуючого розміру) на перший план висувається метод розрахунково-аналітичний. Оскільки сказане про координуючий розмір не залежить від того, чи є оброблювана частина деталі однією поверхнею або комплексом поверхонь, надалі для зручності будемо говорити просто про координацію оброблюваної поверхні.

Необроблювана частина деталі, стосовно якої координується оброблювана поверхня, також може являти собою або одну поверхню, або комплекс поверхонь. Незалежно від цього взаємне розташування однойменних ділянок цієї частини у різних екземплярах деталі буде різним у межах допусків, яких дотримувалися при попередньому обробленні. Природно, що внаслідок цих допусків і неточностей пристрою однойменні ділянки різних екземплярів деталі не будуть мати постійного положення в робочій зоні верстата. Оскільки при цьому положення інструмента не регулюється (автоматичне одержання координуючого розміру на попередньо налагодженому обладнанні), розсіювання положень ділянок у робочій зоні верстата означає зміну їхніх відстаней від інструмента. Тому на точність координуючого розміру впливають дві обставини:

1) від якої з необроблюваних (оброблених у попередніх операціях) ділянок деталі координується оброблювана поверхня;

2) яка ділянка (або ділянки) деталі використовується для установлення в пристрої.

У зв'язку із цим виникають поняття про *координуючу й установочну* бази деталі. Надалі у зв'язку із завданнями про раціональне проектування технологічного процесу знадобляться ще два найважливіших визначення, що належать до поняття «база»: база *вимірювальна* і база *конструкторська*. Для зручності наведемо всі чотири визначення.

Визначення баз

Базами називають поверхні, лінії або точки самої деталі й пов'язані з деталлю, стосовно яких розглядають положення інших поверхонь, ліній або точок. Наприклад, базою може бути циліндрична поверхня (поверхня самої деталі) або тільки одна твірна цієї поверхні (лінія самої деталі) або вісь цієї поверхні (лінія, пов'язана з деталлю). Базою може бути й точка: наприклад, точка сферичної поверхні, центр сфери, вершина конуса,

перетинання осей поверхонь і т. д. Якщо мається на увазі відлік будь-якого розміру, що координує розглянуту поверхню, лінію або точку, то база виконує роль початку відліку.

Наведемо чотири найбільш важливі визначення, що належать до поняття «база». Підкреслимо, що оскільки це поняття використовується не тільки в описових цілях, але й у кількісних розрахунках, важливо, щоб визначення, що наводяться, розумілися буквально – так, як вони написані. Наприклад, якщо база визначається як поверхня, але не вказується, що це поверхня деталі, варто розуміти будь-яку поверхню, причому не тільки матеріальну («реальну» базу), але й чисто геометричну.

1. Координуюча база (КрБ) – це поверхня, лінія або точка, відносно якої в операційній карті та карті ескізів (або іншому технологічному документі) координується положення оброблюваної поверхні деталі.

Розмір, за допомогою якого це зроблено, названо вище координуючим розміром.

Поняття координуючої бази було вперше запропоновано В. П. Фіраго як «исходная» база [1]. В роботах А. А. Маталіна [12] бази такого призначення називались настроювальними і розрахунковими.

За своїми властивостями та призначенням такому елементу деталі рекомендується дати назву **координуючої бази**.

На рисунку 35 показано два операційних ескізи з по-різному вибраними координуючими базами і координуючими розмірами A_1 , A_2 , A_3 та A_4 . Оскільки координуюча база виконує свою функцію в операційному ескізі (на папері, на екрані монітора), то в її ролі може виступати не тільки зображена на ескізі поверхня (лінія або точка) деталі, що виникає в процесі виготовлення деталі у вигляді матеріальної поверхні або її твірної, або точки, але й геометрична поверхня, лінія або точка. Наприклад, на рисунку 35 всі координуючі бази – «реальні» – це плоскі поверхні деталі; на рисунку 34, б координуючою базою є вісь циліндричної поверхні – геометрична лінія, пов'язана з деталлю.

2. Установочна база (УБ) – це поверхня деталі (тільки поверхня, не лінія і не точка), що при встановленні деталі в пристрій (або безпосередньо на верстат) забезпечує визначеність її положення в напрямку координуючого розміру.

На рисунку 36 показано чотири ескізи встановлення деталі в лещатах.

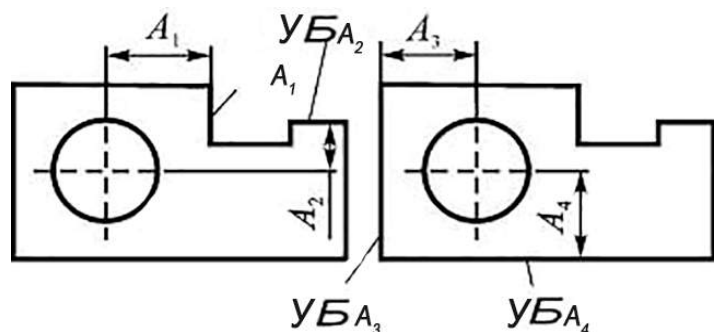


Рисунок 35 – Координуючі бази і координуючі розміри

За схемою **а** не можна визначити, яка поверхня деталі є установочною базою, бо не вказані координуючі розміри. Ясно лише, що нею не є поверхня, що прилягає до рухливої губки лещат, тому що остання, будучи рухливою, сама не займає певного положення в лещатах.

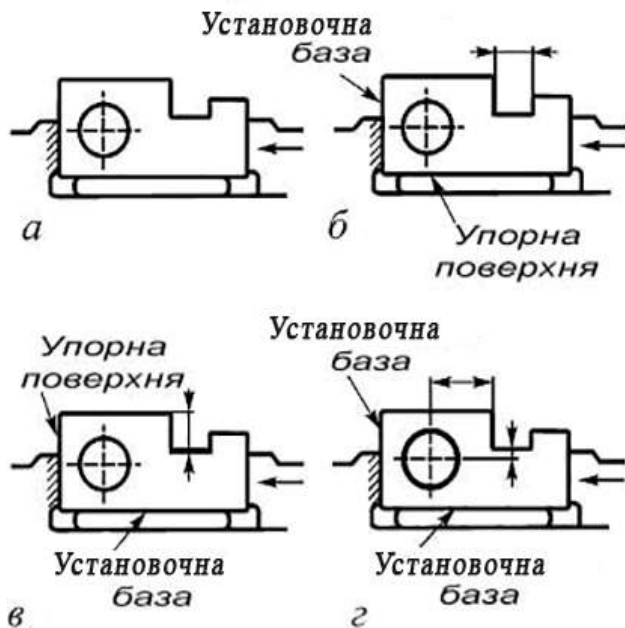


Рисунок 36 – Установочні бази й опорні поверхні при одному й тому ж способі закріплення деталі

Креслення деталі Ескіз обробки

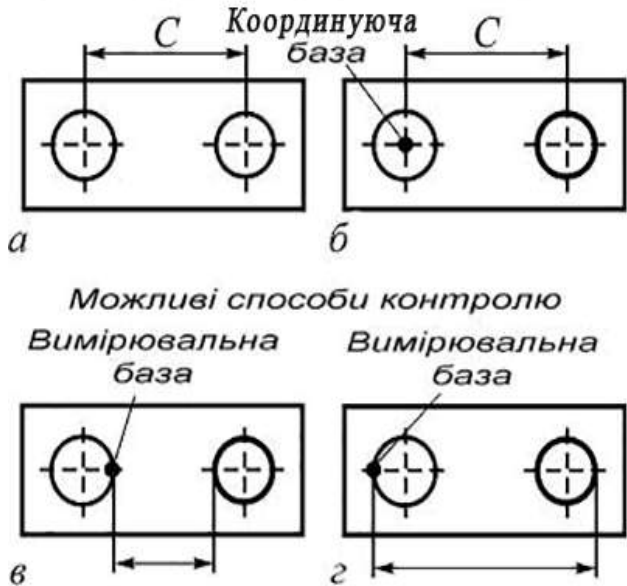


Рисунок 37 – Координуюча база і можливі вимірювальні бази

На схемах **б, в, г** позначено установочні бази й опорні поверхні деталі. Установочна база виконує свою функцію за допомогою контакту з відповідною (*установочною*) поверхнею пристрою. Природно, що для такої ролі придатна лише реально існуюча поверхня деталі.

3. **Вимірювальна база (ВБ)** – це поверхня, твірна поверхні або точка поверхні, щодо якої вимірюванням контролюють положення обробленої поверхні, тобто перевіряють координуючий розмір. Контроль координуючого розміру є найбільш простим, якщо є можливість вимірювати його безпосередньо від координуючої бази. Однак це виключено, якщо остання є елементом чисто геометричним.

На рисунку 37, **а** зображено креслення деталі; **б** – операційний ескіз оброблення одного отвору; **в** і **г** – два з можливих способів контролю положення обробленого отвору. Координуюча, установочна і вимірювальна бази використовуються в технологічному процесі, тому їх називають базами *технологічними*. На відміну від цього бази в кресленні деталі називаються *конструкторськими*.

4. **Конструкторська база (КБ)** – це поверхня, лінія або точка, щодо якої в робочому кресленні деталі координовано положення іншої поверхні, лінії або точки.

На відміну від операційного ескізу, на якому оброблювана поверхня зображується у сукупності необроблюваних (оброблених раніше), робоче креслення зображує деталь у готовому вигляді і всі її поверхні щодо цього є рівноправними.

Координуючий розмір можна розглядати як розмір, що визначає взаємне положення координуючої бази і оброблюваної поверхні; його, як і інші, виставляють зі стрілками на обох кінцях, але за своєю функцією він є розміром «спрямованим», що визначає положення оброблюваної поверхні щодо бази, але не навпаки. Саме тому не допускають за одним напрямком координації поверхні більше однієї координуючої бази, більше одного координуючого розміру, інакше виконання операції стає неможливим.

У робочих кресленнях подібна спрямованість деяких розмірів зустрічається – присутність бази спеціально обумовлюють, якщо це може мати серйозне значення при вимірюванні похибок готової деталі. Наприклад, при вимірюванні непаралельності двох номінально паралельних поверхонь, що мають різну довжину, величина «непаралельності на довжині поверхні» виявиться залежною від того, яка з них буде прийнята за базу (рисунок 38).

Задати в кресленні, наприклад, «взаємне биття поверхонь **A**, **B** і **C** не більше...» зовсім не те ж саме, що «биття **B** і **C** відносно **A** не більше...». Однак для більшості креслярських розмірів подібна спрямованість координації відсутня, вона виникає лише тоді, коли поверхня виділяється як «розглянута». При цьому стосовно поверхні може виявлятися кілька баз за тим же напрямком координації.

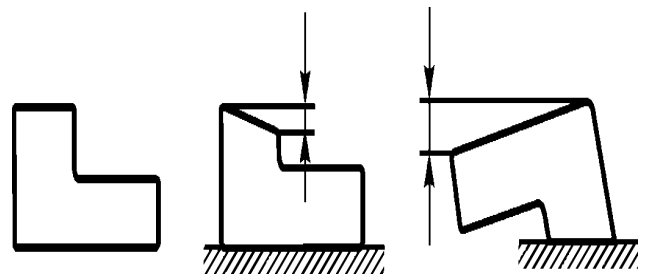


Рисунок 38 – Вплив спрямованості координації на величину «непаралельності на довжині поверхні»

Для виключення різного тлумачення баз при аналізі побудови технологічних процесів особливо важливо розуміти наведене вище визначення конструкторської бази зовсім формально, як умовний робочий прийом, без виправлень на різну важливість різних поверхонь деталі, їхню точність, враховуючи вплив спрямованості координації на величину «непаралельності на довжині поверхні» і т. д.

Головні складові очікуваної похибки

Розраховуючи очікувану похибку для координуючого розміру, доцільно поділяти всі виробничі похибки на три групи:

- 1) пов'язані зі встановлюванням деталі в пристрої;
- 2) пов'язані зі встановлюванням самого пристрою на верстаті;

3) пов'язані з методом, способом та засобами формоутворення поверхонь деталей.

Відповідно до цього очікувана похибка δ_{Σ} буде визначатися у вигляді суми трьох своїх головних складових:

$$\delta_{\Sigma} = P + \delta_{\Pi} + \tau.$$

Сформулюємо характерні ознаки цих складових.

Похибкою оброблення P , пов'язаною зі встановлюванням деталі в пристрої, варто вважати похибку «координуючого розміру», очікувану внаслідок того, що координуюча база може зайняти різне положення щодо корпуса пристрою (рисунок 39).

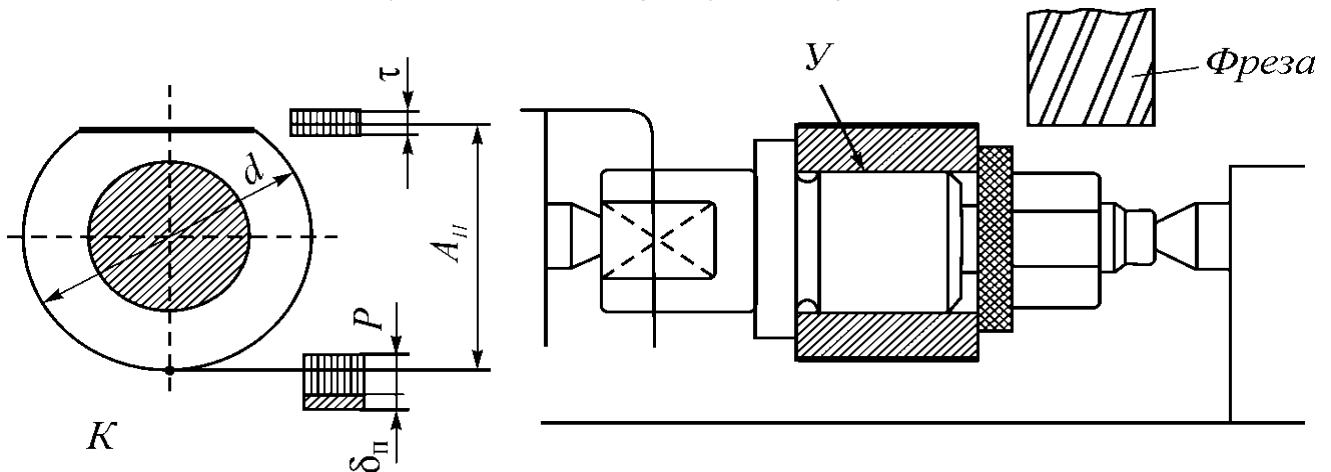


Рисунок 39 – Виникнення похибки δ_{Σ}

Наприклад, в операції фрезерування площини втулки координуюча база (КрБ) може зайняти будь-яке положення в межах поля P (умовно показано вертикальним штрихуванням). Причиною цього будуть похибка розміру d (допуск на зовнішній діаметр втулки), зазор між установочною поверхнею $У$ оправки і установочною базою та різностінність втулки.

Похибкою оброблення δ_{Π} , пов'язаною зі встановлюванням пристрою на верстаті, варто вважати похибку координуючого розміру, очікувану внаслідок того, що саме пристрій може зайняти різне положення в робочій зоні верстата.

У наведеному прикладі (див. рисунок 39) неточності центрових гнізд корпуса оправки й неточність положення гнізд щодо установочної поверхні $У$ будуть впливати на положення поверхні $У$, отже, на положення деталі, а значить, і координуючої бази КрБ.

Похибкою оброблення τ , пов'язаною з методом оброблення, варто вважати похибку координуючого розміру, очікувану внаслідок усіх виробничих похибок, вплив яких не враховується в складових P , δ_{Π} і τ .

Номенклатура виробничих похибок, що викликають похибку τ , загалом, збігається з тією, котру довелося б урахувати, якби визначали розрахунком очікувану похибку розміру поверхні. Так, у прикладі, що наведено (див. рисунок 39), положення площини щодо незмінного положення координуючої бази (КрБ) буде залежати від точності центрових гнізд верстата, що підтримують оправку (точності верстата), зносу фрези і т. д. Визначення очікуваної похибки $\delta_{\Sigma} = P + \delta_n + \tau$, якщо відомі її головні складові P , δ_n і τ , зводиться до простого підсумовування складових. Далі послідовно розглянемо основні особливості визначення похибок δ_n і τ .

Визначення головної складової, пов'язаної зі встановлюванням пристрою на верстаті

Величина цієї складової залежить від точності *установочного місця* корпусу пристрою (точності поверхонь, якими корпус встановлюється на верстат) і від точності положення цього місця щодо *робочої поверхні* установочного елемента. Форма установочного місця корпусу відповідає формі сполученої з ним частини верстата. Найчастіше установочне місце являє собою одну плоску поверхню (зв'язок зі столом верстата), а якщо пристрій зв'язується зі шпинделем, то установочне місце – це:

- два центрових гнізда;
- одна конусна поверхня;
- комбінація плоскої й циліндричної поверхонь (іноді з різьбою).

Величина похибки δ_n визначається при розробленні креслень пристрою тому що саме тоді призначають допуски на неточність виготовлення його елементів. Розглянемо методику визначення величини δ_n для основних груп пристроїв.

Пристрій токарного типу. У цю групу входять пристрої для різних токарних, круглошліфувальних і інших різних верстатів подібного типу. Ці пристрої зв'язуються зі шпинделем і обертаються разом з ним, призначені насамперед для забезпечення координуючих розмірів, напрямом яких перпендикулярний осі обертання шпинделя верстата (рисунок 40).

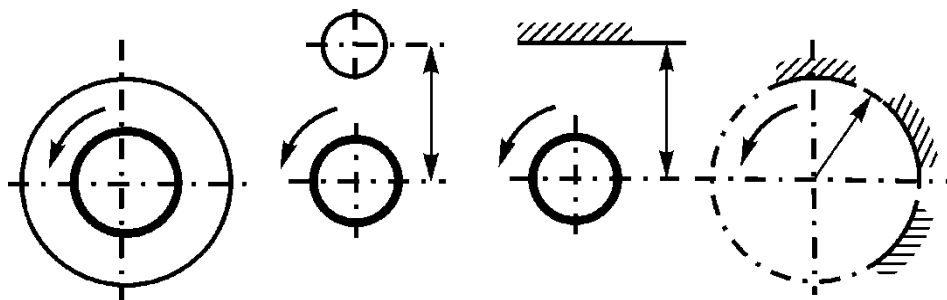


Рисунок 40 – Головне призначення пристосувань токарного типу щодо забезпечення точності оброблення

При цьому координуючі розміри, паралельні осі обертання, звичайно забезпечують шляхом обмеження подачі інструмента (за допомогою упорів) або просто встановлюванням інструмента на розмір.

Відповідно до цього в багатьох випадках припустимі неточності установочного місця корпуса, що задаються, як і неточності його положення щодо установочних елементів. При цьому навіть не доводиться перераховувати на величину цих неточностей, бо вони самі являють собою цю величину.

Для центрових оправок (рисунок 41, а) величина δ_n є безпосередньо величиною биття установочної поверхні (поверхня $У$), що задається відносно центрових гнізд. На величині биття позначається й неточність самих гнізд і неточність їхнього положення щодо поверхні $У$. Призначивши припустиму величину цього биття, тим самим відразу ж розраховують і величину $\delta_\Sigma = P + \delta_n + \tau$.

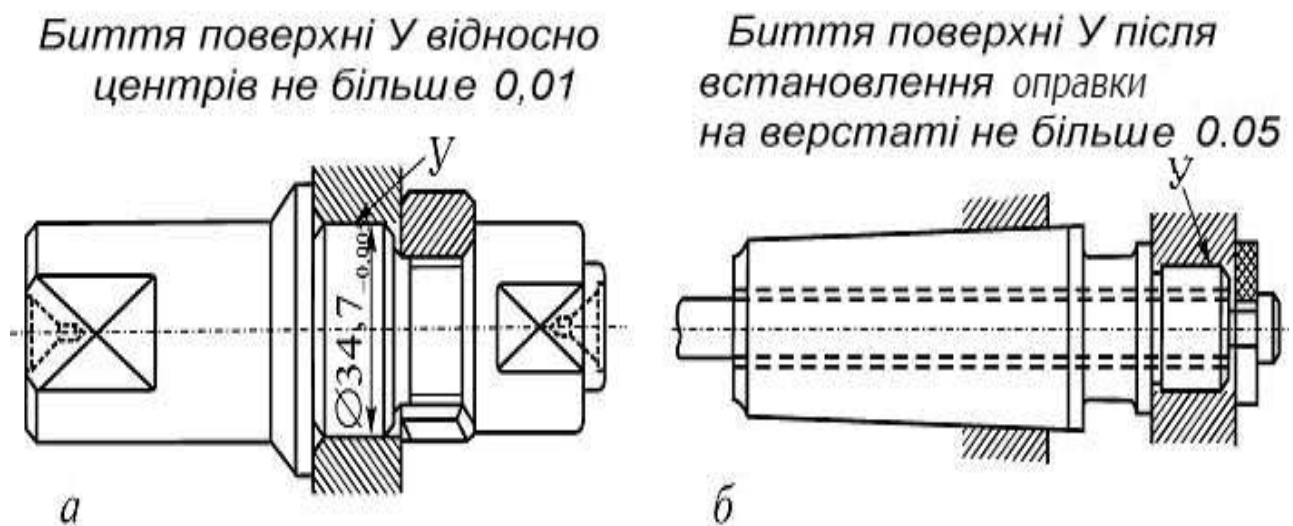


Рисунок 41 – Обмеження величини δ_n оправок

Для хвостових оправок, установлюваних у шпинделі верстата, величину δ_n призначають у такий же спосіб (рисунок 41, б). Через похибки конусних поверхонь оправки і шпинделя, а також через випадкові причини поверхні $У$ після встановлювання оправки в шпиндель похибка δ_n може бути значно більшою, ніж витримана похибка при виготовленні оправки відносно хвостовика.

Тому часто величину δ_n задають величиною биття, припустимого після встановлювання оправки в шпиндель (рисунок 41, б). Для пристосувань, що з'єднуються зі шпинделем за допомогою *перехідної* планшайби, величину δ_n визначають (призначають) так само, як і для оправок. Різниця полягає лише в тому, що установочне місце корпуса таких пристосувань являє собою циліндричну виточку (або бурт) із прилеглою до неї перпендикулярною площиною.

На рисунку 42 показано пристрій, в якому величина δ_n обмежена як припустиме биття установочної поверхні щодо бурту **A**.

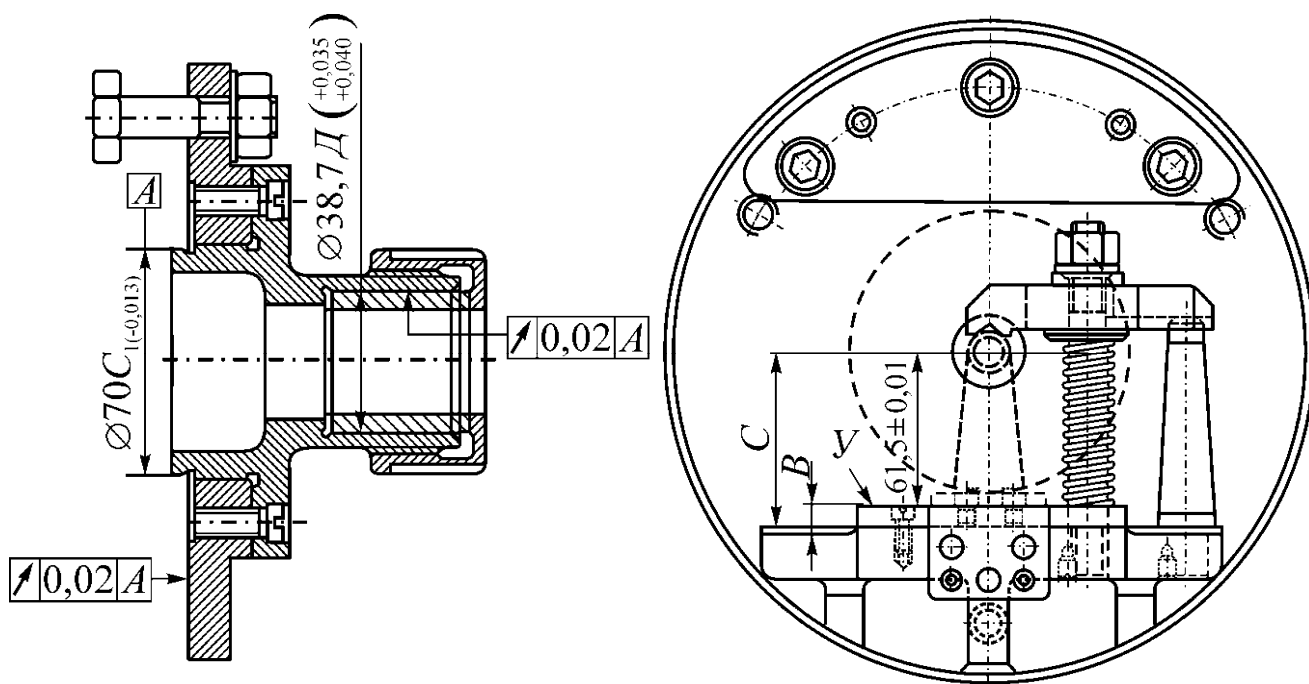


Рисунок 42 – Обмеження величини δ_n

Обмежено й торцеве биття плоскої частини установочного місця, хоча вплив його набагато менше, ніж вплив радіального биття установочної поверхні. Інший приклад показано на рисунку 42. Тут величину δ_n являє собою допуск на розмір, що зв'язує вісь центруючого бурту (показаний пунктиром) із плоскою установочною поверхнею **У**.

Як задано на кресленні

$$\delta_n = \pm 0,100 = 0,200 \text{ мм.}$$

Якщо циліндричні поверхні установочного місця корпусу й перехідної планшайби не приганяють щільно одну до одної, а допускають між ними щілину, то її значення входить у величину δ_n як одне зі складових.

При установленні й закріпленні пристрою без допомоги перехідної планшайби, а безпосередньо на шпindel, що має різьбу (при накручуванні пристрою на шпindel), заздалегідь розрахувати величину δ_n неможливо. У таких випадках розміри гладких з'єднань поверхонь невеликі, а різьба центрує погано. Може виникнути дуже велика неточність положення пристрою, а з нею й більша похибка оброблення δ_n .

Для проведення відповідальних операцій такий спосіб встановлювання пристосувань не практикують. Досвід показує, що при використанні такого способу потрібно очікувати величину δ_n не менше 0,100 мм.

Пристрої типу фрезерних. У цю групу входять пристрої для різних фрезерних, розточувальних, плоскошліфувальних і інших верстатів. Вони характерні тим, що встановлюються на столі верстата, і відповідно корпус їх має плоске установочне місце.

Для координуючих розмірів, що лежать у площинах, паралельних площині стола верстата, величина δ_n буде залежати від точності орієнтування корпусу пристрою на столі верстата й від довжини оброблення L (рисунок 43, а).

Звичайно пристрої орієнтують на столі за допомогою шпонок, зв'язаних з корпусом, та підганяють до паза столу.

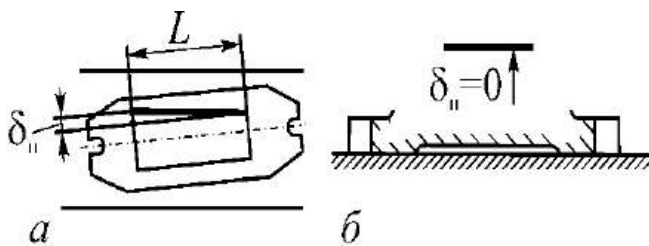


Рисунок 43 – Визначення δ_n для пристроїв фрезерного типу:
а – у площині стола верстата;
б – у перпендикулярній площині

Знаючи точність положення шпонок щодо установочних елементів і довжину оброблення L , розраховують величину δ_n . Для координуючих розмірів, перпендикулярних до площини стола верстата, орієнтування пристрою на площині стола не має значення (рисунок 43, б). Визначаючи величину очікувану похибку для таких розмірів, вважають $\delta_n = 0$.

Кондуктори. Ці пристрої для оброблення отворів характерні наявністю елементів для визначення положення інструмента щодо деталі (кондукторних втулок). Для можливості оброблення необхідно, щоб інструмент увійшов у кондукторну втулку. При цьому координати обробленого отвору не залежать від положення корпусу кондуктора на столі верстата. Тому, визначаючи δ_n для цих координат, вважають $\delta_n = 0$.

Інші пристрої. Пристрої для верстатів з обертовими (тими, що повертаються) столами (наприклад, для зубофрезерних, зубодовбальних, карусельно-фрезерних і т. п.) можуть мати плоске установочне місце і зв'язуватися з площиною стола (із centruванням по центру стола) або ж з отвором у центральній частині стола.

Оскільки в таких випадках оброблена поверхня є результатом обертання (повороту) деталі (наприклад, зуби шестерень, шліци, різьби, що нарізуються фрезеруванням і т. п.), то при визначенні похибки δ_n є повна аналогія із пристроями токарного типу, незалежно від того, як зв'язують пристрій з верстатом.

Прийоми зменшення похибки δ_n . При проектуванні враховують, що одиничний характер виробництва пристроїв допускає можливість широко застосовувати в процесах виготовлення й налагодження пристроїв особливі прийоми для зменшення похибки δ_n , пов'язаної з

встановлюванням пристрою на верстаті. Такими прийомами є: оброблення робочих поверхонь установочних елементів після складання цих елементів з корпусом; вивіряння положення пристрою на верстаті; оброблення робочих поверхонь установочних елементів після встановлювання пристрою на верстаті.

Визначення головної складової, пов'язаної з методом оброблення

При знаходженні цієї складової варто розрізняти два характерних випадки.

Перший – визначення її для координуючого розміру, який координує плоску оброблювану поверхню (рисунок 44, а) – похибка τ першого роду.

Другий – визначення її для розміру, що координує вісь поверхні обертання, що оброблюють, – похибка τ другого роду (рисунок 44, б).

Перший випадок.

Похибку τ першого роду визначити розрахунком надзвичайно важко. На неї впливають ті ж виробничі похибки, що й на першу

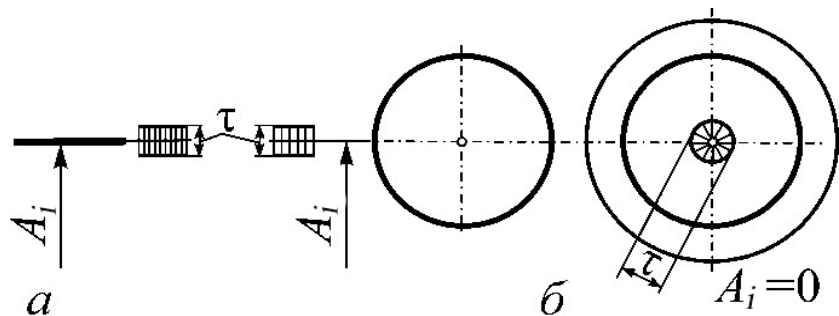


Рисунок 44 – Визначення похибки τ , пов'язаної з методом оброблення

характеристику точності, наприклад, на точність діаметра поверхні обертання. Достовірні відомості про кожну з них окремо одержувати в умовах практичної роботи неможливо. Тому доступний єдиний спосіб визначення τ першого роду – це використання відповідних нормативів, складених у результаті дослідження цієї похибки експериментальним шляхом (статистичний метод). Різні нормативи не завжди збігаються один з іншим, але вони дають уявлення про порядок величини τ , чого для практичних розрахунків цілком достатньо (таблиця 2). Значення τ наведено для вихідних розмірів до 10 мм; для розмірів від 10 до 50 мм табличні дані помножити на 1,2. Якщо за умовами операції треба очікувати особливо сильного впливу на величину τ будь-якого одного (домінуючого) фактора (наприклад, особливо великих деформацій, особливо великого зносу інструмента), тобто, коли ясно, що величина τ , узятя з нормативів, буде заниженою, прийдеться вдатися до розрахунку або іншим способом внести виправлення в нормативну величину τ .

Другий випадок. У цьому випадку (рисунок 44, б) нормативами точності оброблення скористатися не можна. Вони містять значення для діаметра оброблюваної поверхні, але в них немає і не може бути

відомостей про похибки положення осі поверхні, бо нормативи τ другого роду принесли б мало користі, тому що похибка координати осі залежить не стільки від методу оброблення (τ), скільки від положення деталі в робочій зоні верстата (P , δ_n , τ).

Таблиця 2 – Точність методів оброблення площин [31]

Метод оброблення площини	Результати, мкм, при ширині площини $B = 3...50$ мм			
	Довжина площини, L			
	$L < 3B$	$3B < L < 6B$	$6B < L < 12B$	$L > 12B$
Притирання механічне	5...11	6...15	8...15	9...15
Шліфування тонке	9...18	10...20	11...20	12...25
Фрезерування точне	15...20	15...20	18...25	20...30
Протягування	15...30	15...30	15...40	25...50
Шліфування торцем кола	13...27	15...30	18...40	25...50
Шліфування периферією кола	15...30	18...35	20...45	25...50
Стругання тонке	18...35	20...40	23...50	30...60
Фрезерування чистове торцевою фрезою	35...50	40...60	45...70	50...80
Фрезерування чистове циліндричною фрезою	30...50	35...60	40...70	45...80
Довбання чистове	50...70	50...80	60...100	70...120
Шліфування обдирне	100	100...120	120	–
Фрезерування чорнове торцевою фрезою	70...100	80...120	80...150	100...120
Фрезерування чорнове циліндричною фрезою	90...140	100...160	110...180	130...200

На величину похибки τ другого роду можуть впливати ті ж виробничі похибки, що й на величину τ першого роду. Однак це тільки, в принципі, номінально. Практично ж впливом більшості з них можна нехтувати, завдяки чому аналітичний метод визначення τ стає доступним. Тому при розрахунку доцільно визначати суму таких чотирьох складових:

$$\tau = \delta_B + \delta_i + \delta_n + \delta_d,$$

де δ_B – похибка оброблення, пов'язана з верстатом; δ_i – похибка оброблення, пов'язана з інструментом; δ_n – похибка оброблення, пов'язана з налагодженням (встановлюванням інструмента на розмір); δ_d – похибка оброблення, пов'язана з деформаціями.

Поділ τ саме на такі складові зручний тим, що це дозволяє нехтувати при розрахунку не тільки деякими частинами кожної складової, але також і цілком тією чи іншою з них залежно від умов операції.

Наприклад, якщо поверхня утворюється за допомогою обертання деталі щодо інструмента (точіння на токарному та йому подібних верстатах, шліфування на шліфувальних верстатах, якщо пристрій

зв'язано зі шпинделем), то можна цілком нехтувати складовими δ_B , δ_i , δ_H і δ_d . Це можливо тому, що похибки і знос інструмента, помилки в його установленні на розмір і деформації в процесі оброблення майже не впливають на положення осі оброблюваної поверхні (рисунок 45, а).

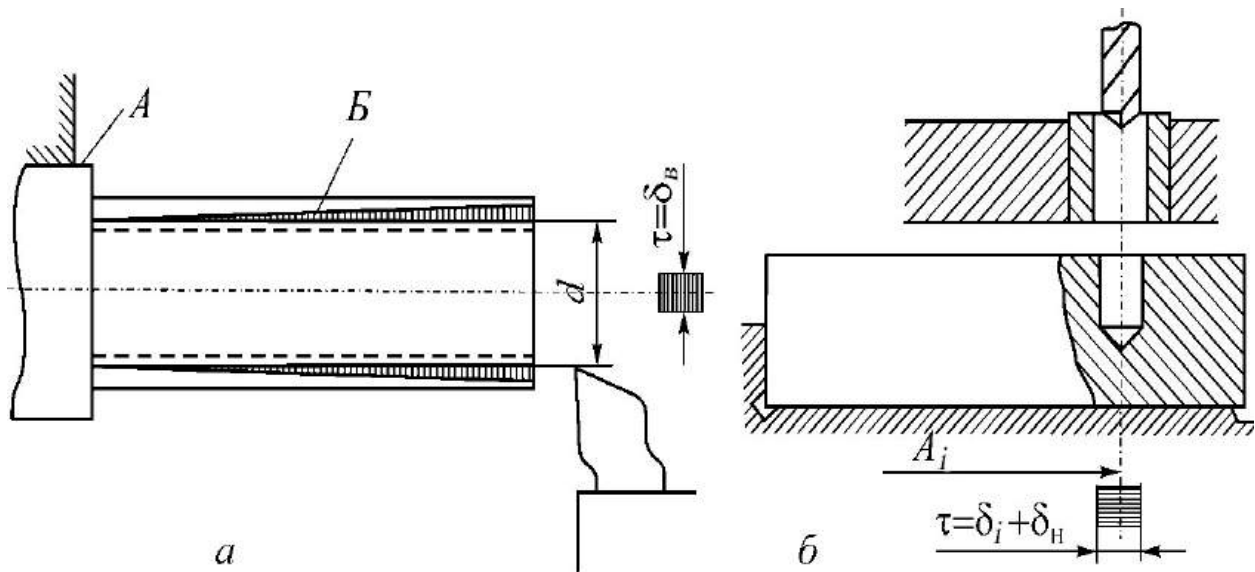


Рисунок 45 – Визначення похибки τ :
а – деталь обертається; б – деталь не обертається

Вони значно впливають на діаметр поверхні d , але мало – на розмір, що координує її вісь (у показаному випадку – на співвісність поверхонь **B** і **A**). Таким чином, у подібних випадках у першому наближенні $\tau = \delta_B$. Сама ж величина δ_B буде визначатися насамперед биттям шпинделя верстата, довідатися про яке можна з паспорта верстата або вимірявши його безпосередньо у цеху.

У випадку, якщо поверхня обертання утворюється при нерухомій деталі й оборотному інструменті, виявляється можливим нехтувати іншими складовими τ .

Характерним прикладом цього є свердління отворів з використанням кондуктора (рисунок 45, б). Тут відразу ж можливо нехтувати складовими δ_B і δ_d . Розташування отвору не буде залежати від верстата (через наявність кондукторної втулки). Воно не буде залежати й від деформацій, тому що серед них немає таких, які помітно впливали б на координати отвору (виключення – глибоке свердління, при якому є можливим значне «відведення» – скривлення осі отвору). Таким чином, залишається враховувати лише дві з чотирьох складових – δ_i , δ_H .

Виробничі похибки, від яких залежать ці дві складові, завжди відомі: похибка свердла (допуск на його діаметр) із нормативної документації, а похибки пристрою, що приводять до неточності положення втулки, що

направляє свердло, і внаслідок цього – до похибки δH – із креслень пристрою.

Не завжди і не у всіх випадках можна нехтувати такими складовими і саме так, як це було показано вище. Головне в тому, що здебільшого розрахунок τ другого роду є досить простим. Це є наслідком того, що фактори, що звичайно домінують при встановленні похибки розміру (діаметра) поверхні, втрачають це своє значення при знаходженні розміру, що координує її вісь.

Визначення головної складової, пов'язаної зі встановлюванням деталі в пристрої

Виробничими похибками, під впливом яких виникає складова похибки оброблення, є похибки самої оброблюваної деталі і похибки установочних елементів пристрою.

Знаючи похибки деталі (з операційних карт попередніх операцій) і установочних елементів (із креслень пристрою), можна розрахувати величину похибки P для кожного координуючого розміру, що витримується в даній операції. Розрахунок зводиться до розв'язання певного геометричного завдання.

Наприклад, координуючою базою для операційного розміру A при обробленні лиски у вала діаметром D –а, встановленого на призму, є твірна B вала (рисунок 46, а).

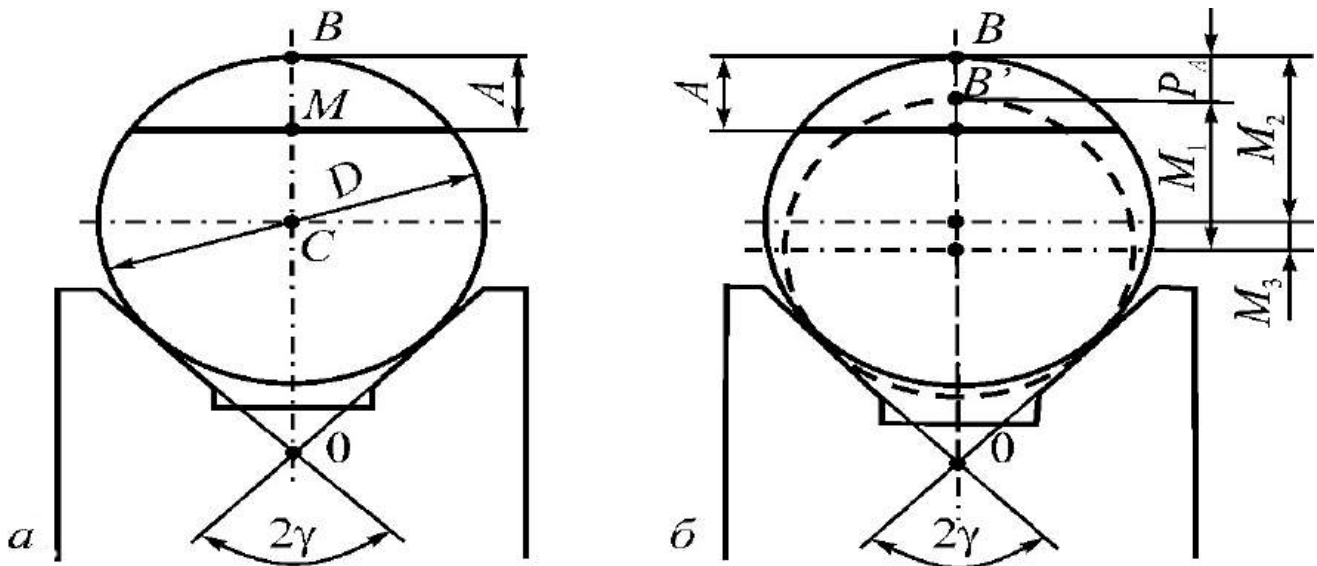


Рисунок 46 – Розрахунок похибки P

Зі схеми видно, що $A = OB - OM$. Оскільки $OM = \text{const}$, то похибка розміру A (ΔA), що виникає від зсуву координуючої бази, дорівнюватиме похибці відстані OB (ΔB), тобто $\Delta A = \Delta OB$.

Аналізуючи схему, одержуємо

$$OB = 0,5D + OC = 0,5D + 0,5D \cdot \sin \gamma = 0,5D \cdot (1 + 1 / \sin \gamma),$$

отже,

$$\Delta A = \Delta OB = 0,5D \cdot (1 + 1 / \sin \gamma),$$

а похибку P_A (що є граничним значенням ΔA) визначаємо як

$$P_A = 0,5a \cdot (1 + 1 / \sin \gamma).$$

Це завдання можна розв'язати, зобразивши два крайніх (граничних) положення деталі і виявивши розмірний ланцюг, в якому замикаючою ланкою буде величина P_A (рисунок 46, б): $P_A = BB'$.

З рівняння ланцюга $P_A + M_1 - M_3 - M_2 = 0$

одержуємо $P_A = M_3 + M_2 - M_1$,

але $M_3 = 0,5a \cdot \sin \gamma$; $M_2 = 0,5D$; $M_1 = 0,5(D - a)$, тому

$$P_A = 0,5a \cdot \sin \gamma + 0,5D - 0,5(D - a) = 0,5a \cdot \sin \gamma + 0,5a = 0,5a \cdot (1 + 1 / \sin \gamma).$$

Не можна вважати, що подібні завдання є складними, але при індивідуальному підході загальна їх кількість виходить надзвичайно великою. Наприклад, передбачаючи для тієї ж операції будь-яке інше положення призми (деталі на призмі), будемо щораз одержувати нове завдання (рисунок 47).

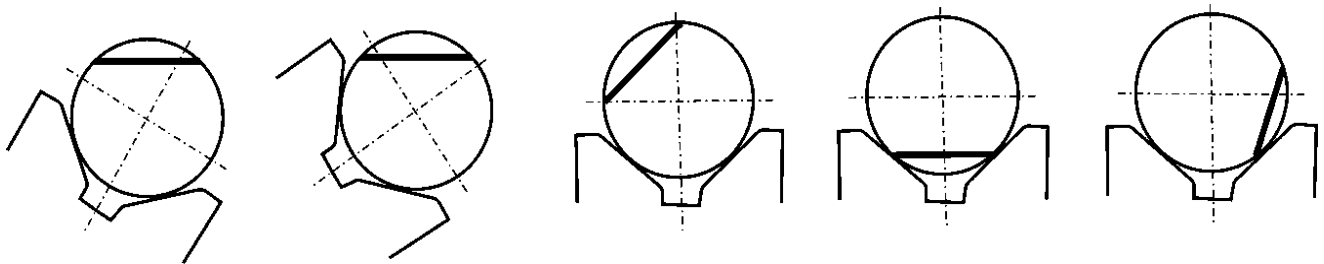


Рисунок 47 – Різні схеми встановлювання деталі при обробленні однієї й тієї ж поверхні

Тому в таких умовах вибір кращої схеми шляхом зіставлення схем за зручністю встановлювання деталі, простотою закріплення і величиною похибки P , пов'язаної з встановлюванням деталі, здійснимо лише за допомогою ряду спроб. Подібно цьому тільки шляхом ряду спроб можна вирішити й зворотнє завдання, а саме – визначити необхідну схему встановлювання деталі при відомій припустимій величині похибки P , що потрібно знати при проектуванні пристроїв.

Однак, крім індивідуального підходу до вирішення кожного завдання, можна знайти для великих груп подібних завдань одне загальне розв'язання у вигляді загальної розрахункової формули [1].

У таких формулах пов'язана з встановлюванням деталі похибка оброблення P буде функцією двох змінних: похибки встановлювання деталі в пристрої і напрямку координуючого розміру.

Похибка (точність) встановлювання деталі в пристрої

Похибка (точність) встановлювання деталі в пристрої є критерієм якості установочних елементів. Чим менше ця похибка, тим досконалішими (точнішими) мають бути установочні елементи.

Похибкою встановлювання деталі називають найбільш можливий зсув (різницю положень) установочної бази деталі внаслідок похибок самої цієї бази і похибок установочних елементів. Якщо установочних баз мало, то похибка встановлювання деталі чисельно характеризується похибками встановлювання цих баз.

Як установочні бази використовують переважно плоскі й циліндричні поверхні деталі. Числові значення похибки встановлювання знаходять, розглядаючи можливі крайні положення установочної бази в потрібній площині.

Установочна база – плоска поверхня. Перетин такої бази будь-якою площиною можна показати відрізком прямої **АВ** (рисунок 48, а).

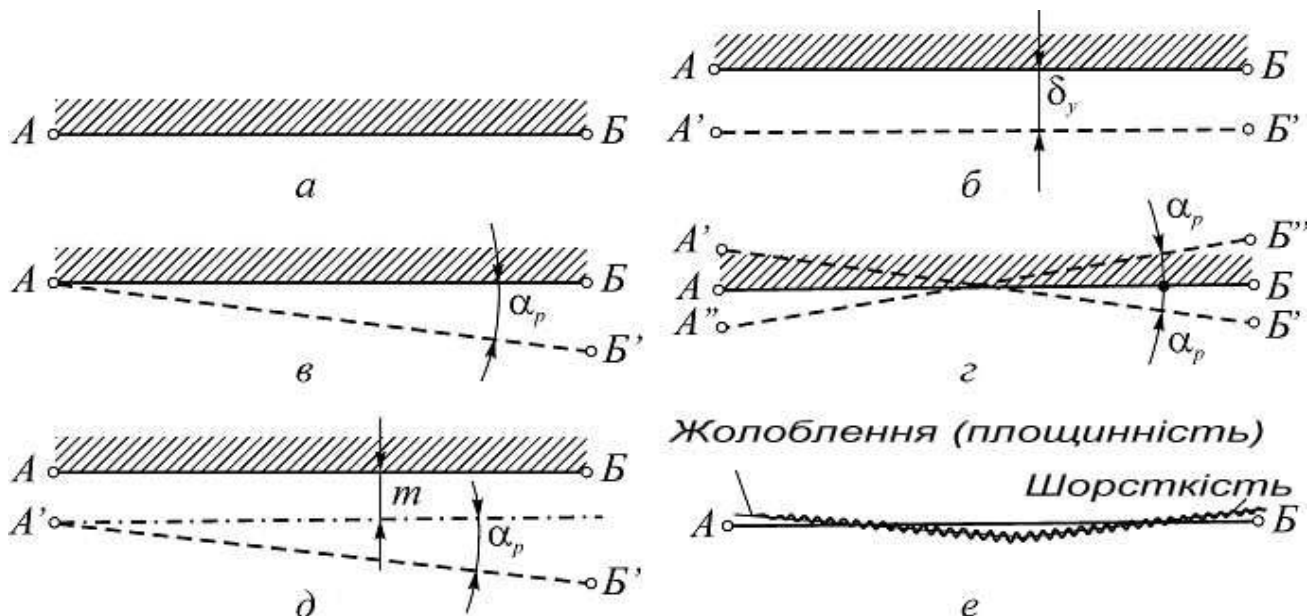


Рисунок 48 – Характер похибок установлювання плоскої поверхні і схема похибок самої поверхні

Визначення похибки встановлювання зводиться до визначення зсуву (можливих крайніх положень) відрізка **АВ** у площині. Числовими значеннями зсув виражають так, як це більш зручно. Наприклад (рисунок 48), у випадку б його можна відобразити величиною δ_y , у випадку в – кутом α_p , у випадку г – кутом $\pm\alpha_p$ і т. п. Пряма **АВ** являє собою перетин правильної геометричної площини. У дійсності установочна база завжди має похибки (рисунок 48, е), тому лінією **АВ** треба вважати середню лінію профілю. Однак і самий профіль можна приймати за пряму, якщо похибки бази досить малі.

Установочна база – циліндрична поверхня. Діаметральний перетин бази – коло із центром O , що зображує вісь бази. На рисунку 49 можна бачити, що внаслідок допуску на діаметр бази зсуви різних точок її перетину можуть бути неоднаковими як за величиною, так і за напрямком.

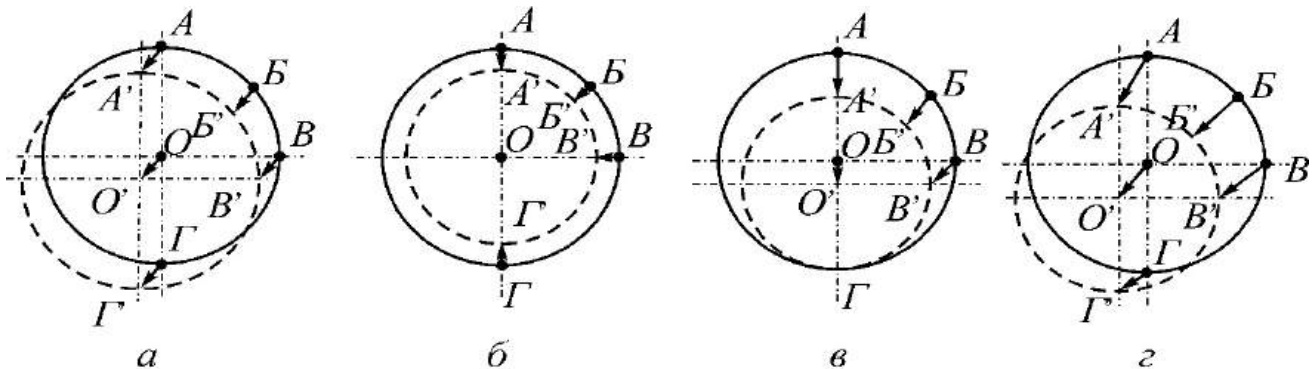


Рисунок 49 – Приклади зміни положення установочної бази

Тому положенням бази вважають *положення її осі*, відповідно до чого величину похибки встановлювання визначають як зсув (різницю положень) осі бази. У діаметральній площині похибку встановлювання можна зображувати одним вектором δ , в осьовій площині (перекіс осі) її легко визначати, якщо знайдені похибки встановлювання у двох паралельних площинах перпендикулярні осі.

Похибка форми бази (в кондиційних деталях вона не може бути більше допуску на діаметр) і шорсткість (рисунок 50) практичного значення при розрахунках не мають.

Оскільки похибка встановлювання бази має не тільки величину, але й напрямок, тут важлива однаковість у способах її відліку. При цьому керуються таким:

1. Початком відліку вважають номінальне положення бази (номінальне положення середньої лінії профілю, якщо база – плоска поверхня, або номінальне положення осі, якщо база – поверхня обертання).

2. Номінальним положенням бази вважають її положення, що відповідає *номінальному* розміру бази і відсутності похибок установочних елементів.

3. Номінальним розміром циліндричної бази вважають найбільший її діаметр, якщо вона – зовнішня поверхня, і найменший, якщо вона – внутрішня поверхня.

Наприклад, при діаметрі бази $50 \pm 0,100$ мм її розміри записують так:

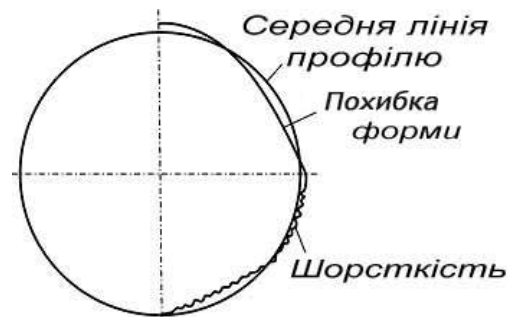


Рисунок 50 – Похибка форми і шорсткість бази

$D_{-a} = 50,100_{-0,200}$, якщо база – вал; $D^{+a} = 49,900^{+0,200}$, якщо база – отвір.

4. Похибку встановлювання позначають одним числом δ_j .

Види координації оброблюваної поверхні

На рисунку 51 показано схеми, що ілюструють можливості використання різних поверхонь як координуючих баз.

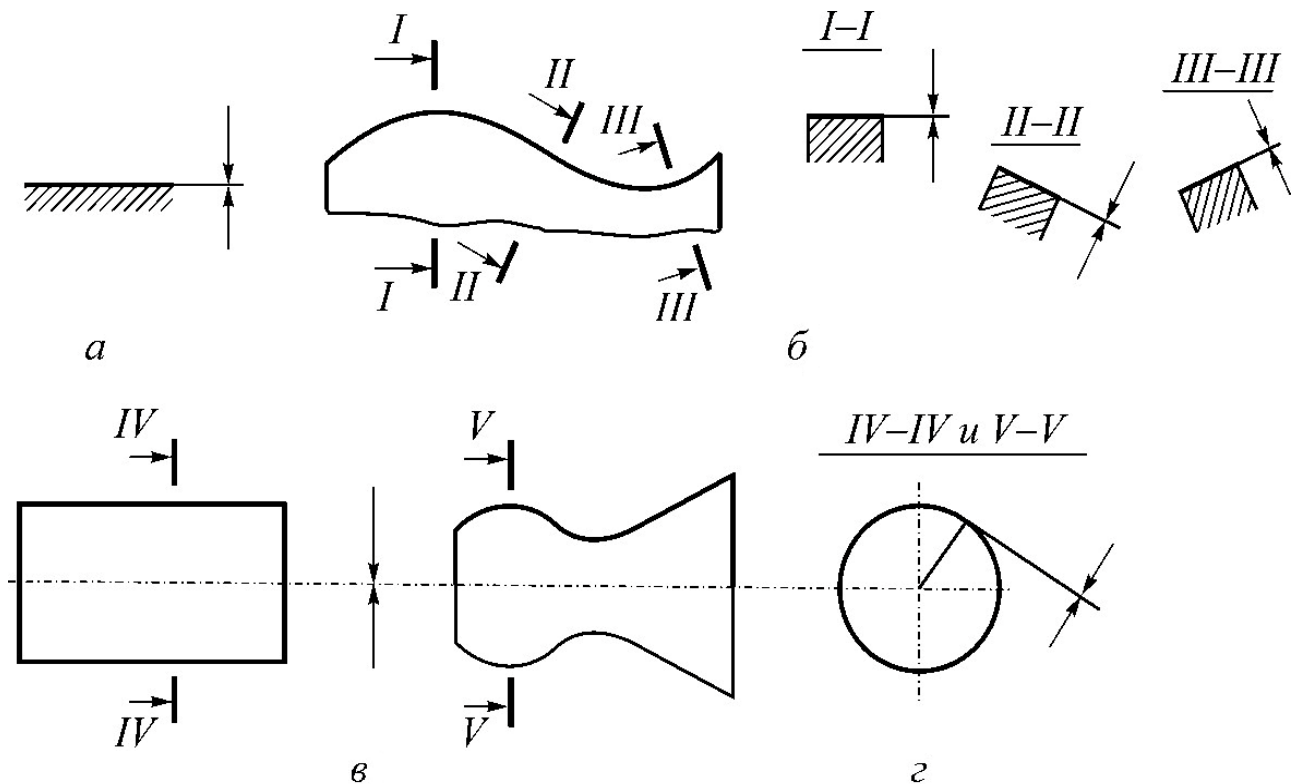


Рисунок 51 – Деякі способи координації:

а – від плоскої поверхні; б – від твірної прямолінійно-фасонної поверхні; в – від осі поверхні обертання; г – від твірної циліндричної поверхні (від точки перетину фасонної поверхні обертання, від точки кульової поверхні)

Плоска поверхня є єдиною поверхнею, що допускає координацію, яку можна не тільки умовно, але й буквально назвати координацією «від поверхні» (схема а). Інші поверхні допускають лише координацію щодо своєї твірної або точки (схеми б і г).

Всі способи координації мають задовольняти такий загальний вимозі: координуючий розмір, що проставляють від точки поверхні, має бути спрямованим по нормалі до поверхні в цій точці; той, що проставляють від лінії, має бути перпендикулярним до цієї лінії, а від площини – перпендикулярним до площини.

Відповідно до цього плоска поверхня допускає єдиний напрямок координації, циліндрична – безліч напрямків, але тільки радіальних.

Поверхні обертання та інші, що мають пряму вісь, до якої вони побудовані (різьба, зуби коліс, шліці та ін.), допускають ще координацію від своєї осі (схема в). Координація від осей таких поверхонь існує в робочих кресленнях деталей завдяки простоті, що створюється при розрахунках взаємного зв'язку поверхонь. Природно, що й у технологічних процесах виготовлення АРКТ до неї звертаються частіше, ніж до координаті від твірної або точки, але рідше, ніж при розробленні робочих креслень, тому що вісь непридатна бути вимірювальною базою.

Для розрахунку похибки оброблення P , пов'язаної зі встановлюванням деталі, безліч різних способів координаті оброблюваних поверхонь можна звести до трьох різних видів. Розглянемо їх стосовно координаті від плоских і циліндричних поверхонь. Особливості координаті від циліндричної поверхні поширюються на багато випадків координаті від інших поверхонь обертання (див. схему з на рисунку 51).

1. Випадок *несуміщення* координуючої і установочної баз відрізняється тим, що як координуюча база використовується поверхня, яка не є установочною базою, або лінія, або точка, що не належать цій базі. Це випадок, коли для цих двох баз використовуються різні елементи деталі (рисунк 52, а).

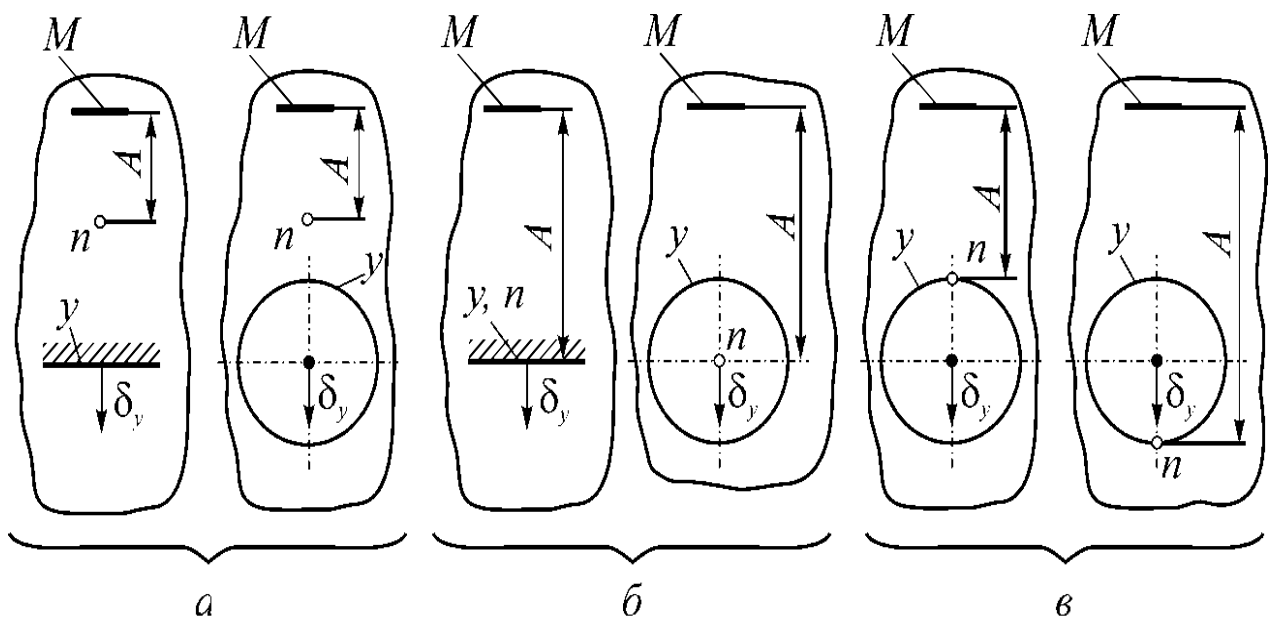


Рисунок 52 – Види координаті оброблюваної поверхні:
а – несуміщення баз КрБ $\neq$ УБ; б – суміщення баз КрБ = УБ;
в – неповне суміщення баз КрБ $\approx$ УБ

2. Випадок *суміщення* координуючої і установочної баз характеризується тим, що координуючою базою є сама установочна база, коли вона – плоска поверхня або вісь цієї бази, коли база – циліндрична поверхня (рисунк 52, б).

3. Випадок *неповного суміщення* координуючої і установочної баз визначається тим, що координуючою базою є яка-небудь одна з твірних циліндричної установочної бази (рисунк 52, в).

На всіх розглянутих схемах установочна база позначена буквою **У**. Напрямок похибки встановлювання δ_y показано збіжним з напрямком координуючого розміру для простоти побудови схем, взагалі ж похибка може мати будь-який напрямок.

Координуюча база показана у вигляді точки **n** також для ясності схем. Ця точка може, наприклад, належати плоскій поверхні, що є координуючою базою, може зображувати вісь або одну з твірних циліндричної поверхні і т. д. Оброблювана поверхня **М** зображена плоскою за тими ж міркуваннями, взагалі ж вона може мати будь-яку форму.

Загальні формули для розрахунку похибки **P**

1. Випадок несуміщення баз. На рисунку 53 зображено спрощену схему такого випадку. Щоб не затемнювати креслення, установочна база і

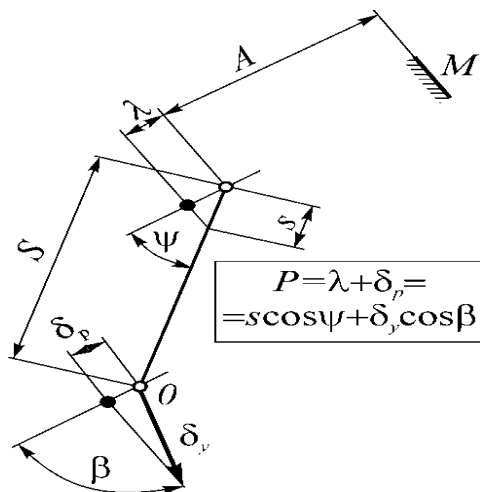


Рисунок 53 – Похибка при несуміщенні баз

установочні елементи на схемі не показано. Їх відображає похибка встановлювання δ_y , яку вони створюють.

На схемі видно, що зсув координуючої бази (точка **n**), у результаті якого виникає похибка оброблення **P**, складається із двох зсувів. Перший зсув відбувається внаслідок похибки взаємного положення установочної (точка **0**) і координуючої (точка **n**) баз. Його найбільша величина може дорівнювати допуску на розмір (або розміри), що зв'язує бази (на схемі – розмір **S**). Другий зсув обумовлено похибкою встановлювання δ_y .

Припустивши, що похибка встановлювання відсутня ($\delta_y = 0$), одержимо величину похибки **P** як проекцію допуску **s** (у вигляді відрізка) на напрямок координуючого розміру: $P = \lambda = s \cdot \cos \psi$, де ψ – гострий кут між напрямком розміру, що зв'язує бази, і напрямком координуючого розміру.

Припустивши абсолютно точним взаємне положення баз (**s** = 0), аналогічно одержимо $P = \delta_p = \delta_y \cdot \cos \beta$, де β – гострий кут між напрямками похибки встановлення координуючого розміру. Таким чином, за наявності **s** і δ_y величину похибки **P** визначимо рівнянням

$$P = \lambda + \delta_p = s \cdot \cos \psi + \delta_y \cdot \cos \beta.$$

Складова λ називається похибкою від *несуміщення установочної та координуючої баз*. Вона не залежить від пристрою.

Складова δ_p називається *розрахунковою похибкою встановлювання*. Будучи функцією похибки встановлювання і напрямку кута P , її можна регулювати при проектуванні установочних елементів пристрою.

Через взаємну незалежність факторів, що викликають виникнення складових λ і δ_p , ці дві складові не можуть компенсувати одна одну, тобто незалежно від напрямку і знака допуску s треба вважати $P = |\lambda| + |\delta_p|$ (рідко зустрічається несуттєве виключення, яке відзначається в спеціальній літературі в розрахунках пристроїв).

2. Випадок суміщення баз. Принципову схему цього випадку координатії оброблюваної поверхні показано на рисунку 54.

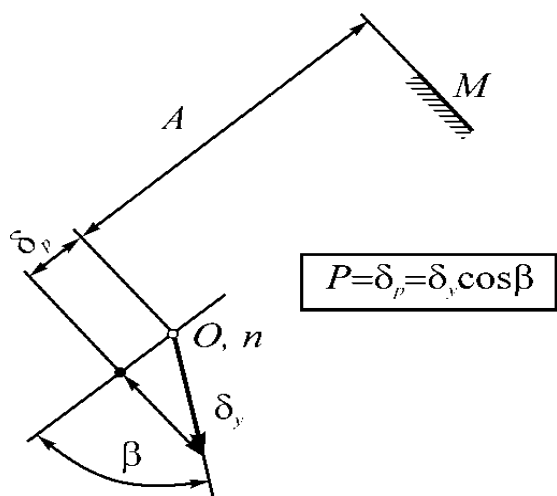


Рисунок 54 – Похибка P при суміщенні баз

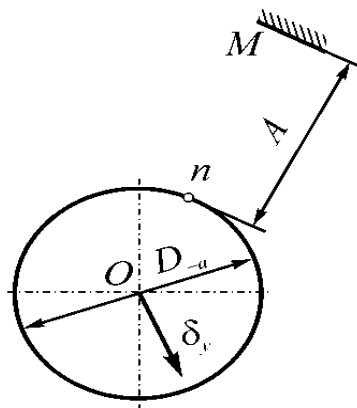


Рисунок 55 – Неповне суміщення баз

При суміщенні баз похибка λ (від несуміщення баз) зникає і тоді

$$P = \delta_p = \delta_y \cdot \cos \beta.$$

3. Випадок неповного суміщення баз. Похибку P можна подати як результат двох зсувів координуючої бази (рисунок 55).

Перший зсув – це зміна положення твірної n щодо осі бази O внаслідок допуску на діаметр бази. Величина його дорівнює половині допуску на базу ($0,5a$), а напрямок завжди є радіальним (до осі бази, якщо база – вал, та від осі, якщо вона – отвір відповідно до умови про номінальні розміри баз) (рисунок 56). Другий зсув спричиняється похибкою встановлювання.

Оскільки від циліндричної поверхні координуючий розмір проставляють у радіальному напрямку, то перший зсув ($0,5a$) впливає на цей розмір. Вплив же похибки встановлювання δ_y , як і при інших способах

координаті оброблюваної поверхні, буде залежати від кута β і визначиться величиною $\delta p = \delta y \cdot \cos \beta$ (рисунок 57).

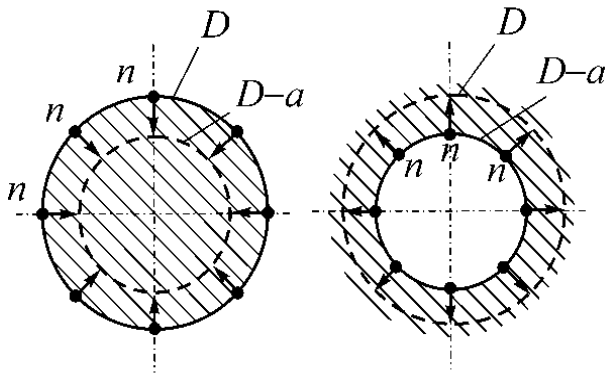


Рисунок 56 – Вплив допуску на базу

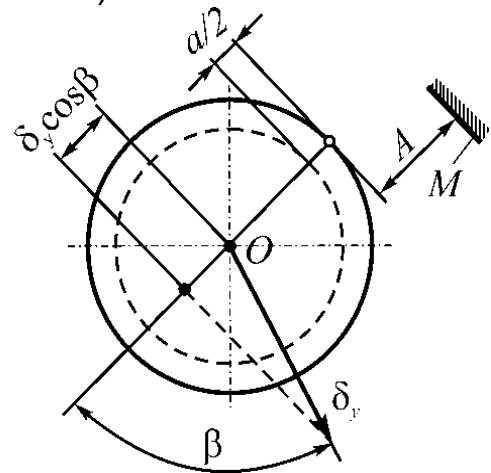


Рисунок 57 – Ступінь впливу допуску на базу та похибки встановлювання

Особливістю неповного суміщення баз є можливість взаємної компенсації цих двох зсувів. Можна пристрій для деталі створити таким, що зсуви δp і $0,5a$ можна буде підсумовувати: $P = \delta p + 0,5a$ або віднімати: $P = \delta p - 0,5a$ (або $P = 0,5a - \delta p$, якщо додатним уважати напрямок $0,5a$, що не має значення).

На рисунку 58, а видно, що зсуви δp і $0,5a$ мають єдиний напрямок, у цьому випадку їх можна підсумовувати.

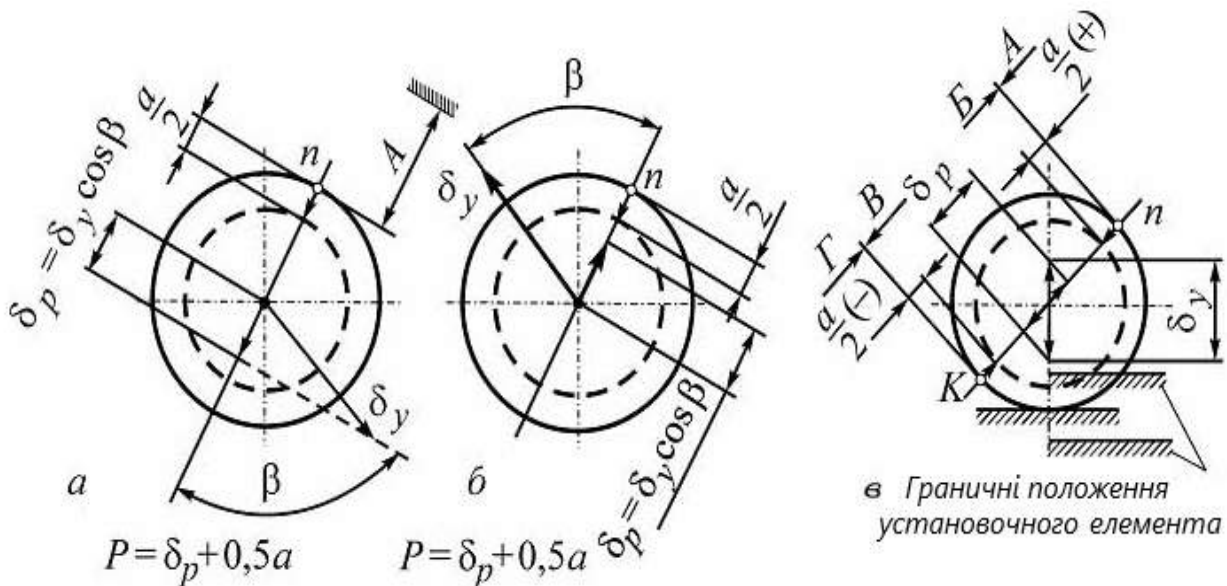


Рисунок 58 – Визначення знака похибки $0,5a$

На рисунку 58, б – напрямки зсувів протилежні, тому що змінено напрямок похибки встановлювання (змінено пристрій для встановлювання деталі), і їх можна віднімати. Таким чином, при неповному суміщенні баз величину похибки P можна регулювати при проектуванні пристрою.

Прийнявши напрямок δp додатним, при неповному суміщенні баз

$$P = \delta p \pm 0,5a = \delta y \cdot \cos \beta \pm 0,5a.$$

Користуючись цією загальною формулою, знак похибки $0,5a$ (плюс або мінус) вибирають за такими правилами:

1. Похибка $0,5a$ є додатною (+), якщо її напрямок збігається з напрямком δp , і від'ємною (–), якщо він протилежний цьому напрямку (рисунок 58, а і б).

2. Якщо напрямки похибки встановлювання δy і відповідно δp взаємно протилежні, то похибка $0,5a$ є додатною (+), коли її напрямок збігається із частиною δp , спрямованою у бік контакту бази з установочним елементом (тобто на установочний елемент).

Так, на рисунку 58, в для розміру **A** або **Б** (координуюча база **n**)

$$P_A = P_B = \delta p + 0,5a.$$

Для розміру **B** та **Г** (координуюча база **K**) $P_G = P_B = \delta p - 0,5a$.

3. Якщо установочний пристрій має забезпечувати контакт бази з установочним елементом у всіх напрямках, то напрямок похибки встановлювання передбачати неможливо (рисунок 59, а). Зважаючи на гірший варіант, слід приймати $\beta = 0$ ($\cos \beta = 1$) і відповідно $\delta p = \delta y$, а похибку $0,5a$ – зі знаком плюс, тобто

$$P = \delta p + 0,5a.$$

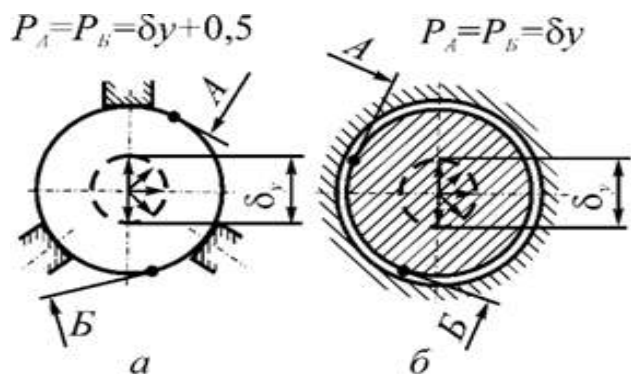


Рисунок 59 – Визначення знаку похибки $0,5a$

4. Якщо установочний пристрій не має забезпеченого контакту бази з установочним елементом у жодному з напрямків (база може належати до будь-якого елемента своєї твірної або зовсім не належати до нього), то, як і вище, $\delta p = \delta y \cdot (\cos \beta = 1)$, але похибку $0,5a$ враховувати не слід.

У цьому випадку (рисунок 59, б) $P = \delta y$. Якщо існує:

- несуміщення баз, то $P = \delta y \cdot \cos \beta + s \cdot \cos \psi = \delta p + \lambda$;
- суміщення баз, то $P = \delta y \cdot \cos \beta = \delta p$;
- неповне суміщення баз, то $P = \delta y \cdot \cos \beta \pm 0,5a = \delta p \pm 0,5a$.

Як можна бачити, у кожному із цих виразів головним членом є похибка встановлювання δy .

Оскільки принципово різних установочних елементів існує небагато, визначення величини δy не завдасть труднощів.

1.5 Підсумовування складових очікуваної похибки

Розрахунковий метод визначення очікуваної похибки оброблення пов'язано з необхідністю підсумовувати її складові. Підсумовувати доводиться не тільки деякі великі складові, але, що більш важливо, численні дрібні, з яких складається кожна велика (рисунок 60).

Давно вже доведено, що просте арифметичне додавання великого числа складових похибки призводить до результату завищеного, явно неправильного [28]. Фактично, виробничі похибки, будучи різними за напрямками, діючи спільно, значною мірою компенсують одна одну. Тому і складові похибки оброблення, очікувані від їхньої дії, не можна підсумовувати арифметично.

Існують такі основні правила додавання похибок:

1. Систематичні похибки підсумовують алгебрично, тобто з урахуванням їх знака (напрямку).

2. Систематичну похибку із випадковою підсумовують арифметично, тому що знак (напрямок) випадкової не можна передбачати і потрібно зважати на гіршу можливість.

3. Випадкові похибки підсумовують за формулою

$$\delta_{\Sigma} = \sqrt{(k_1\delta_1)^2 + (k_2\delta_2)^2 + \dots + (k_n\delta_n)^2},$$

де $k_1, k_2, \dots, k_n$ – коефіцієнти, що залежать від форми кривої розподілу складової похибки. При однакових законах розподілу $k_1 = k_2 = \dots = k_n$

$$\delta_{\Sigma} = \sqrt{(k_1\delta_1)^2 + (k_2\delta_2)^2 + \dots + (k_n\delta_n)^2}.$$

Коефіцієнт k приймають залежно від закону розподілу похибок.

За законом Гауса (нормальним розподілом) $k = 1$ (рисунок 61, ліворуч). За законом Сімпсона (розподілом за трикутником) $k = 1,22$ (рисунок 61, у центрі). За законом рівної ймовірності $k = 1,73$ (рисунок 61, праворуч).

Цих правил необхідно завжди дотримуватися. Однак у виробничій обстановці при вирішенні практичних завдань закони розподілу похибок, що підсумовуються, звичайно невідомі; їх можна лише приблизно припускати, а потім уточнювати шляхом відповідних експериментів.

У зв'язку із цим існує рекомендація: орієнтуючись на найгіршу можливість, приймати невідомий розподіл за рівноймовірний. Ця загальна рекомендація потребує деякого уточнення. У зв'язку з тим, що коефіцієнти k правильні лише тоді, коли розподіл сумарної похибки підпорядковується

закону Гауса, а це може бути тільки при досить великій кількості однакових за величиною складових.

База	Установочний елемент	Схема встановлювання	Похибка встановлювання
			$\delta_y=0$
			$\delta_y=a+\Delta+a_y$
			$\delta_y=0$
			$\delta_y=0$
			$\delta_y=0$
			$\delta_y=\alpha+\Delta+\alpha_y$
			$\delta_y=\frac{a}{2\sin\gamma}$
			$\delta_y=\frac{a+a_y}{2}$
			$\delta_y=0$
			$\delta_y=0,5a$
			$\delta_y=0$

Рисунок 60 – Теоретичні значення похибки встановлювання δ_y щодо плоскої і циліндричної поверхонь

Для будь-якої кількості будь-яких складових є правильною теоретична формула

$$\delta_{\Sigma} = \frac{1}{k_{\Sigma}} \sqrt{(k_1 \delta_1)^2 + \dots + (k_n \delta_n)^2}.$$

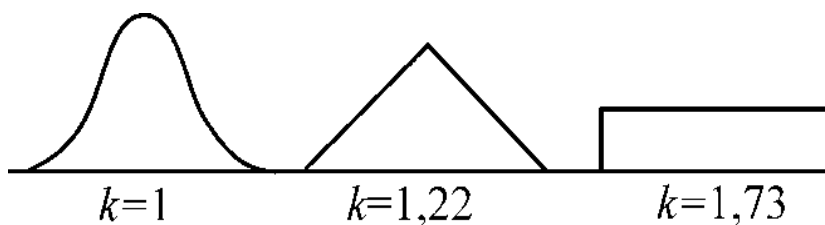


Рисунок 61 – Додавання похибок

Однак коефіцієнт k_{Σ} , що враховує невідповідність розподілу сумарної похибки закону Гауса, у практичних розрахунках знати неможливо.

На рисунку 62 зображено схему, що ілюструє вплив методу підсумовування на результат. Як приклад застосоване визначення величини похибки встановлювання $\delta_y = a + \Delta + a_y$ (див. також схеми на рисунку 60).

Для більшої наочності величина гарантованого зазору Δ (постійна похибка) і допуски a та a_y на базу та гніздо (змінні складові) прийнято такими, що кожний із них дорівнює одиниці.

Відомо, що додавання двох рівноймовірних похибок приводить до розподілу сумарної за трикутником (закон Сімпсона – див. рисунок 39, з), тобто явно відрізняється від нормального. Відповідно до цього (рядок 4 на рисунку 62) результат підсумовування $1,73\sqrt{1^2 + 1^2} = 2,4$ є неправильним, а загальний результат $(1 + 2,4 = 3,4)$ – явно помилковим.

Додаванням трьох рівноймовірних похибок (рядок 5) одержуємо трикутник зі скривленими сторонами, що ближче підходить до кривої Гауса, але все ще є далеким до неї. Результат збігається з результатом арифметичного додавання складових.

При збільшенні кількості складових розподіл сумарної похибки досить швидко прирівнюють до нормального, але все-таки не так швидко, як хотілося б. Тому, підсумовуючи похибки, обов'язково враховують таке:

1. Мета розрахунку – важливість можливих наслідків, якщо результат буде завищеним або заниженим.

2. Кількість похибок, що додаються:

а) коефіцієнт $k = 1,73$ практично є досить правильним при кількості не менше чотирьох-п'яти складових (коефіцієнт $k = 1,22$ є задовільним уже при трьох складових з розподілом за трикутником);

б) чим більше складових, тим менш можливо, що кожен з них дійсно буде мати рівноймовірний розподіл, а не більш сприятливий. Тому, чим більше складових, тим ближчим до одиниці можна приймати коефіцієнт k (у межах від 1,73 до 1);

в) при трьох складових, у припущенні найгіршої можливості, практично завжди є виправданим арифметичне підсумовування (результати в рядках 1 і 5 однакові).

3. Величини складових. Додатки мають бути приблизно однаковими за величиною. Ясно, наприклад, що спільне підсумовування 10 рівномірних похибок, з яких одна дорівнює 1, а інші – 0,01, буде неправильним:

$$\delta_{\Sigma} = 1,73\sqrt{1^2 + 9(0,01)^2} = 1,75.$$

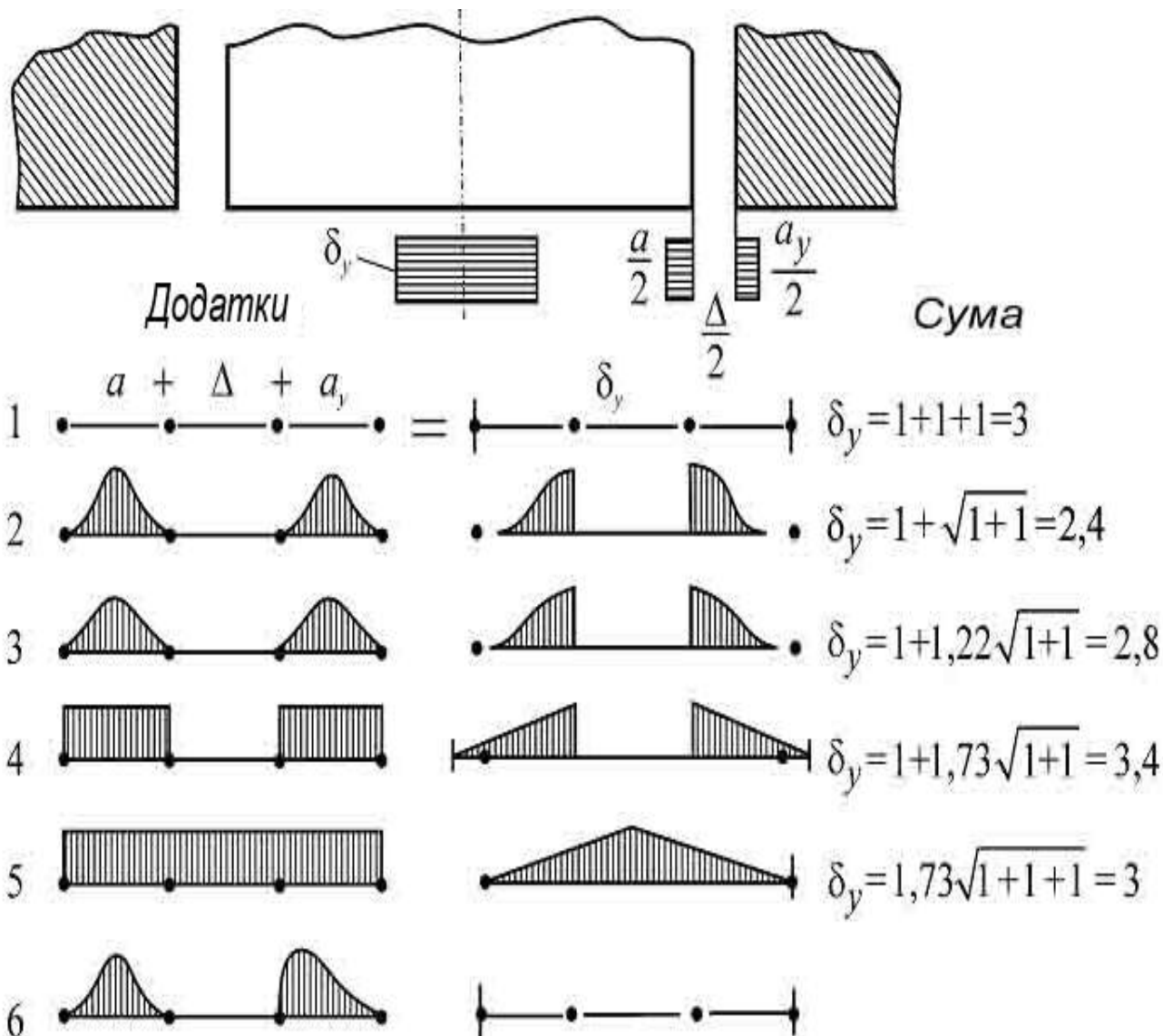


Рисунок 62 – Додавання похибок

Тим часом у практиці різновеликі складові зустрічаються як звичайне явище. Крім них можуть бути різні інші, пов'язані з конкретними умовами. Наприклад, у наведеному випадку визначення похибки встановлювання δ_y можна було б урахувати ще й такі обставини:

- *установочна база належить деталі.*

Якщо деталь виготовляють у великих кількостях, то можливо, що при обробленні бази буде автоматично одержано її діаметр (безперечно судити про це, можна тільки знаючи процес). Отже, можна сподіватися, що розподіл похибки a буде не рівноймовірним, а більш сприятливим. Якщо до того ж деталь із кольорового сплаву або інструмент переточується не часто (знос інструмента дуже малий), то наближення до нормального розподілу буде ще більшим. При цьому буде ще більше підстав вважати невідомий розподіл a за нормальний (рядок 6 на рисунку 62);

- *установочне гніздо належить пристрою.*

Тому, і тим більше, що воно обробляється шліфуванням, його діаметр обов'язково буде формуватись методом пробних проходів і промірювань. При такому методі оброблення отвору, уникаючи браку, намагаються використовувати інструмент меншого розміру. Отже, якби гнізд було багато, можна чекати розподіл похибки a_y близьким до несиметричного трикутника (рядок 6).

Таким чином, у конкретних умовах можуть бути причини не приймати невідомий розподіл за рівноймовірний.

Продовжуючи аналіз наведеного прикладу, далі треба було б вважати, що умови суміщення бази й гнізда принципово відрізняються від звичайних умов складання деталей. У цьому випадку деталей (баз) багато, але гніздо одне (те ж саме для всіх деталей). Тому в сукупності похибок a і a_y останню не можна розглядати як звичайну змінну. Її невідоме дійсне значення (у межах величини a_y) буде тим самим (постійним) при встановленні всіх деталей.

Таким чином, правильне підсумовування похибок пов'язано з урахуванням багатьох обставин, у різних випадках воно різне. При цьому відмова від арифметичного підсумовування потребує особливої обережності, якщо похибок менше чотирьох, і тим більшої, чим важливішою є мета розрахунку.

Основною метою технологічного процесу є забезпечення заданих характеристик якості виробів найбільш продуктивним шляхом при мінімальних витратах. Звідси виникає необхідність у визначенні двох головних критеріїв оптимальності: максимальної продуктивності і мінімальної собівартості.

Однак слід мати на увазі, що оптимальний технологічний процес – не ідеальний, котрий задовольняє умовам оптимальності всіх шуканих параметрів, а найкращий тільки за одним або двома критеріями оптимальності. Наприклад, потрібно забезпечити максимальну продуктивність або мінімальну витрату матеріалу, або найвищу точність

формоутворення поверхонь, тому при проектуванні нової технології необхідно чітко визначитися з вибором критерію оптимальності, який має враховувати специфіку підприємства, умови виробництва і задачі, що ставляться перед ним.

Наприклад, якщо завод має труднощі з виготовленням різального і вимірювального інструменту, технологічного оснащення, то як критерій оптимальності на перший план виходять мінімальні витрати. Критерій оптимальності постає у вигляді функції, що називають функцією мети або цільовою функцією.

Розрізняють два види оптимізації технологічних процесів: *структурну* і *параметричну*.

Структурна оптимізація характеризує вибір оптимальної структури технологічного процесу. Наприклад, вибір та обґрунтування оптимального маршруту формоутворення та забезпечення характеристик поверхонь деталі згідно з вимогами робочого креслення, починаючи з обґрунтування оптимальних методів, способів та засобів виготовлення заготовки і виконання всіх потрібних операцій. *Параметрична* оптимізація забезпечує витримування всіх технологічних, конструкторських і фізико-хімічних параметрів – визначення та обґрунтування режимів формоутворення, стійкості інструмента, припусків на оброблення, операційних розмірів з допусками і т. д.

Любий технологічний процес являє собою структуру, що складається з окремих блоків і зв'язків між ними. Під структурою розуміють не будь-яке сполучення блоків і зв'язків, а тільки ту частину з них, що забезпечує виконання необхідної функції. Процес створення структури і визначення параметрів об'єкта в загальному випадку є процесом керування. У свою чергу, оптимізація як метод керування технологічним процесом може бути кількісною і якісною. Якісну оптимізацію оснований на суб'єктивному досвіді, здоровому глузді, логічному аналізі типових рішень і довідкових даних. Поняття якісної оптимізації є умовним, тому що будь-яке рішення можна подати кількісно (наприклад, шляхом визначення собівартості порівнюваних варіантів). При проектуванні технології в ряді випадків виникає необхідність розв'язання цілого ряду задач, що не підлягають аналітичному розрахунку. Наприклад, вибір та обґрунтування схем базування, устаткування, призначення послідовності видалення припусків, причому ці задачі мають також безліч варіантів розв'язання.

Оптимальний зміст операції залежить від кількості операцій і переходів, методів налагодження верстатів та оснащення, числа підналагоджень, технологічних можливостей робочих місць і т. д.

При формуванні структури операції необхідно виконати такі завдання:

- упорядкувати загальну сукупність операцій і переходів;
- визначити місце термічних і хіміко-термічних операцій;

- мінімізувати кількість установлень заготовки, холостих рухів інструмента та інших допоміжних переходів;
- при кожному переході розрахувати й обґрунтувати припуски на оброблення і допуски операційних розмірів, очікувані глибини різання;
- для кожного технологічного переходу розрахувати й обґрунтувати такі частоту обертання шпинделя і величину подачі, що гарантовано забезпечують необхідну точність формоутворення і шорсткість поверхонь.

Оптимізація технологічних параметрів може виконуватися в детермінованій (статичній) постановці, тобто при постійних значеннях усіх вхідних у модель параметрів і в стохастичній (динамічній) постановці з урахуванням імовірності зміни цільової функції.

Наприклад, відомо, що при розробленні операції шліфування в детермінованій (статичній) постановці при постійних значеннях усіх вхідних у математичну модель параметрів надійність цільової функції досягає рівня довірчої ймовірності не більше 0,5...0,6. При цьому спостерігається значна ймовірність відмов, тобто невиконання обмежень щодо стійкості різальної здатності інструментів, точності, шорсткості оброблених поверхонь і т. д. Для підвищення надійності операції шліфування потрібна діагностика і застосування додаткової (внутрішньої) оптимізації на етапі здійснення операції, тобто при обробленні.

Величина теплової деформації ходового гвинта при шліфуванні різьб визначається за детермінованою моделлю. Вона має бути зіставлена з величиною, зміряною датчиком наприкінці проходу. Виявлене при цьому розходження має бути використано для корекції математичної моделі, тобто на основі отриманої різниці розрахункових і експериментальних значень деформації ходового гвинта слід скоректувати розрахункову формулу для визначення теплової деформації на наступних проходах.

На етапі проектування оптимізація здійснюється на основі певних розрахунково-аналітичних залежностей. На етапі оброблення фактичні показники в ряді випадків відрізняються від розрахункових. Така невідповідність пов'язана з тим, що на етапі проектування неможливо врахувати індивідуальні особливості оброблюваних деталей.

Для усунення зазначеного недоліку необхідно поширити (продовжити) оптимізацію на етапі оброблення у формі додаткових інформаційно-регулюючих впливів на процес. Термін "інформаційно-регулюючий вплив" означає, що такий вплив обумовлено інформацією про поточний (фактичний) і необхідний (заданий) стани процесу. Отже, для оптимізації процесу слід застосовувати системний підхід та інформаційні технології типу CAD / CAM / CAT (Computer Aided Development / Computer Aided Machining / Computer Aided Training).

Сутність даного підходу й оптимізації технологічних процесів полягає в тому, що при відомих процедурах формоутворення та забезпечення характеристик поверхонь деталі згідно з вимогами робочого креслення, етапи розроблення (CAD) і реалізації операції (CAM) розглядаються як послідовні етапи попереднього (CAD) і остаточного (CAM) керування процесом.

При цьому на етапі розроблення вирішуються задачі стабілізації цих параметрів з урахуванням індивідуальних особливостей кожної деталі, які забезпечуються на додатковому етапі керування (CAT), де CAT – автоматизоване навчання (Training) технологічної системи формоутворення поверхонь [45].

Дана методологія розроблення і використання інтегрованих технологічних систем потребує створення математичних моделей, що слід використовувати при проектуванні, діагностиці і регулюванні процесів механічного оброблення.

Методологія проектування сучасних інтегрованих виробничих систем має бути побудована згідно із загальною теорією керування, відповідно до якої керування на основі поставленої мети є необхідним багатоетапним процесом наближення до мети. Для організації керування (менеджменту) потрібно розробити (або використати) наявну інформаційну (математичну) модель, що враховує конструкторські, технологічні, організаційні й економічні властивості об'єкта. Нарешті потрібно розробити і оптимізувати алгоритми функціонування об'єкта керування, який дозволяє забезпечити досягнення поставленої мети з мінімальними витратами в конкретних виробничих умовах [40].

Сформульовану задачу керування слід розв'язувати в ітераційному режимі з перевіркою можливості досягнення поставленої мети і оцінюванням відповідних виробничих витрат. У випадку зміни параметрів або номенклатури виробів, що випускаються, змінюються вихідні дані на вході оптимізаційної моделі. В ітераційному режимі здійснюється перевірка змін параметрів у всіх підсистемах інформаційної моделі виробництва. Інформаційна модель відображає структуру підприємства. Вона містить всі необхідні підсистеми, наприклад, конструкторсько-технологічна класифікація номенклатури виробів, технологічне проектування процесів і операцій, розроблення розрахунково-технологічних карт для верстатів з ЧПК, розмірний аналіз, розрахунки параметрів оброблення, нормування технологічних процесів, собівартості продукції, розрахунки кількості і складу виробничого персоналу, витрат виробництва і т. д. [26].

Перевірка змін параметрів у підсистемах інформаційної моделі виробництва наукоємної продукції дозволяє оперативно вирішувати проблеми щодо випуску конкурентоздатної авіаційної та ракетно-космічної техніки на самому ранньому етапі її життєвого циклу – етапі маркетингових досліджень.

1.6 Розмірний аналіз точності формоутворення торцевих поверхонь і визначення технологічних розмірів-координат

Головна задача розмірного аналізу технологічного процесу – правильне і обґрунтоване визначення проміжних та остаточних розмірів і допусків на них. Особливо цього потребують проміжні розміри, що з'єднують протилежні поверхні. Визначення припусків на такі поверхні розрахунково-аналітичним або табличним методом є дуже ускладненим. В той же час робота на налагоджених верстатах потребує детального пророблення всіх проміжних розмірів з тим, щоб на заключних операціях (переходах) автоматично забезпечувались остаточні розміри. Правильне вирішення цієї проблеми забезпечує розмірний аналіз технологічного процесу, який складається з ряду етапів. Розглянемо ці етапи детальніше.

Розроблення розмірної схеми формоутворення торцевих поверхонь і виявлення, розрахунки і оптимізація технологічних розмірних ланцюгів

Розмірну схему технологічного процесу формоутворення торцевих поверхонь рекомендується складати і оформляти так. На спрощеному символічному ескізі потовщеною лінією показують торцеві поверхні готової деталі, тонкими лініями – вертикальні лінії відповідних шарів операційних припусків і потовщеною пунктирною лінією – контур заготовки.

Для тіл обертання достатньо однієї проекції. Для корпусних деталей можуть знадобитися дві або навіть три проекції залежно від розташування розмірів-координат деталі. Приклад побудови розмірної схеми показано на рисунку 63. Для зручності складання розмірних ланцюгів конструкторські розміри з допусками вказують над деталлю буквами ***A_{дет}***, ***B_{дет}***, ..., ***T_{дет}***. Усі поверхні *заготовки–напівфабрикату–деталі* нумерують зліва направо. Через нумеровані поверхні проводять тонкі вертикальні лінії шарів операційних припусків формоутворення торців ***Z_{м-н}***, де ***м*** і ***н*** – відповідні номери поверхонь, між якими знаходиться припуск.

Між вертикальними лініями знизу вгору, від заготовки до деталі, вказують технологічні розміри, які витримують при виконанні кожної технологічної операції. Технологічні розміри позначають ***A_{№оп}***, ***B_{№оп}***, ..., ***T_{№оп}***, де ***№оп*** – номер відповідної операції над орієнтованою стрілкою (потовщеною крапкою операційний розмір наносимо на установочну поверхню, а стрілкою – на формоутворену поверхню).

Розміри заготовки позначають буквами ***A_{заг}***, ***B_{заг}***, ..., ***T_{заг}***. Справа від розмірної схеми для кожної операції складають схеми конструкторсько-технологічних розмірних ланцюгів, в яких замикаючі ланки беруть у квадратні дужки, всі розміри вказують з допусками.

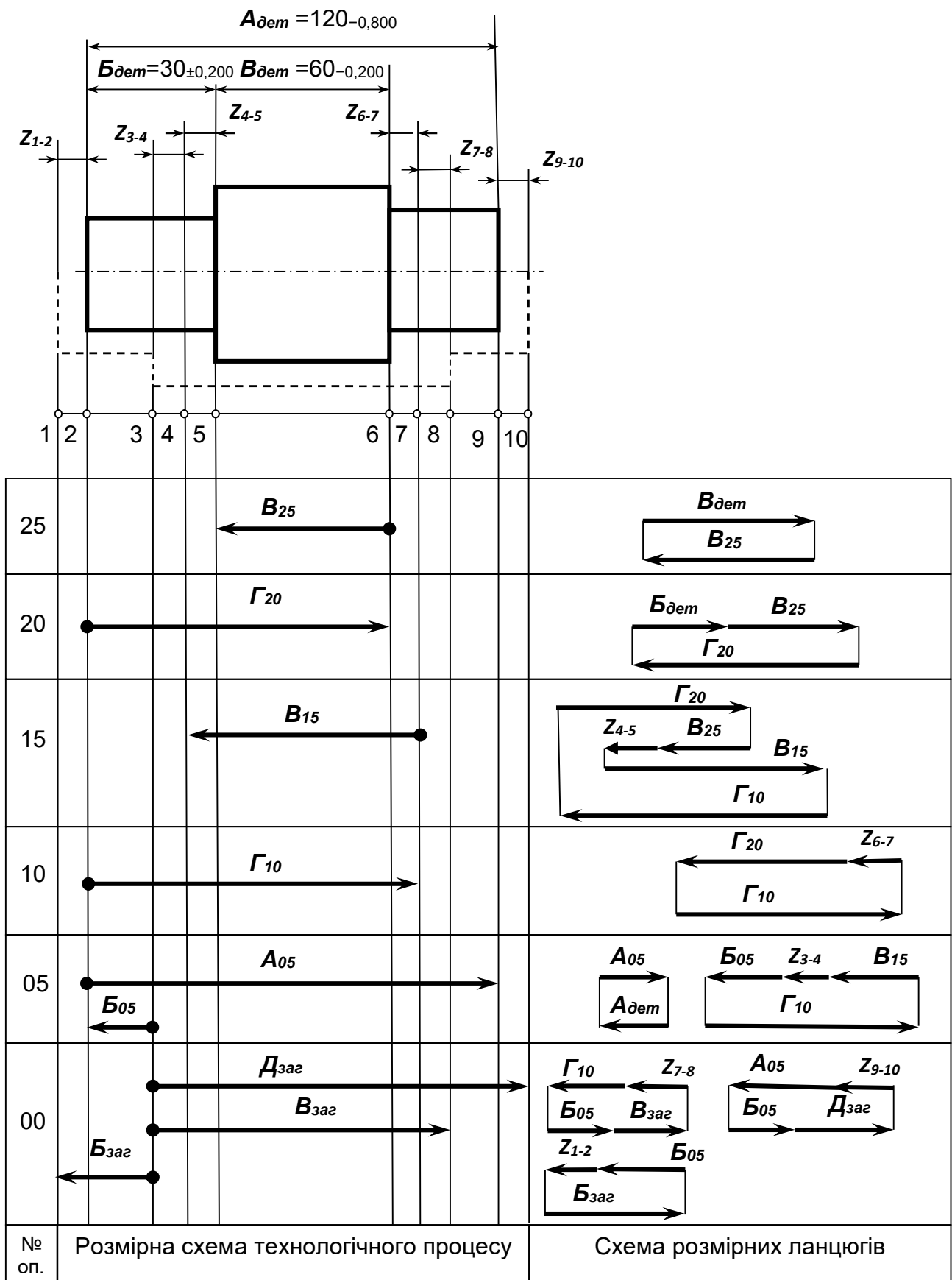


Рисунок 63 – Розмірна схема технологічного процесу оброблення вала

Якщо технологічний розмір збігається з конструкторським, то отримують дволанковий розмірний ланцюг.

Виявлення розмірних ланцюгів за розмірною схемою починають з останньої операції, тобто за схемою згори вниз. У такій же послідовності розраховують розмірні ланцюги. При цьому необхідно, щоб у кожному новому ланцюзі був невідомим тільки один розмір.

У прикладі, що розглядається (рисунок 63), на останній операції 25 отримують розмір **B₂₅**, який збігається з конструкторським розміром **B_{дем}**, тому для його визначення складають дволанковий розмірний ланцюг.

Технологічний розмір **Г₂₀** разом із розміром **B₂₅** та конструкторським розміром **B_{дем}** складають замкнений контур, тобто розмірний ланцюг. У ньому розмір **B₂₅** вже був виконаний, розмір **Г₂₀** виконується на цій операції, а розмір **B_{дем}** вийде сам собою, тобто і є замикальною ланкою.

У результаті розрахунку цього ланцюга одержують розмір, допуск та граничні відхилення розміру **Г₂₀**.

Технологічний розмір **B₁₅** визначають з розмірного ланцюга, що являє собою замкнений контур розмірів **Г₂₀**, **B₂₅**, **B₁₅**, **Г₁₀** та **Z₄₋₅**. Замикальною ланкою цього ланцюга є припуск **Z₄₋₅**. Однак до цього розмірного ланцюга входить розмір **Г₁₀**, який необхідно попередньо визначити.

Розмір **Г₁₀** визначають з технологічного розмірного ланцюга для операції 10, що складається з розмірів **Г₂₀**, **Г₁₀** та **Z₆₋₇**. Замикальною ланкою цього ланцюга є розмір припуску **Z₆₋₇**.

Технологічний розмір **A₀₅** збігається з конструкторським розміром **A_{дем}**, його визначають з дволанкового розмірного ланцюга. Для одержання розміру **B₀₅** складено розмірний ланцюг з розмірів **B₀₅**, **B₁₅**, **Г₁₀** та **Z₃₋₄**, його замикальною ланкою є припуск **Z₃₋₄**.

Аналогічно виявляють розмірні ланцюги і складають схеми для визначення розмірів заготовки **D_{заг}**, **B_{заг}**, **B_{заг}**.

Правомірність вказаного на рисунку 63 проставлення розмірів заготовки зумовлена використанням на першій операції чорнової опорної бази 3, від якої проставлено розмір **B_{заг}** (вліво) та розміри **D_{заг}** і **B_{заг}** (вправо).

Спираючись на схеми розмірних ланцюгів, визначають типи ланок та складають вихідні рівняння, а потім їх розраховують.

Виявлення технологічних розмірних ланцюгів за розмірною схемою технологічного процесу в ряді випадків може виявитись дуже трудомістким, оскільки технологічні розмірні ланцюги часто є зв'язаними. Тому при їх побудові необхідно, щоб у кожному розмірному ланцюзі був лише один конструкторський розмір чи один розмір припуску, який є замикальною ланкою технологічного розмірного ланцюга.

Прикладом такого важкого для виявлення розмірного ланцюга є ланцюг із замикальною ланкою **Z₄₋₅**. Нижче наведені вихідні рівняння в послідовності їх розрахунку (таблиця 3).

Таблиця 3 – Вихідні рівняння в послідовності їх розрахунку

Вихідні рівняння	Визначуваний розмір
1. $B_{дет} = B_{25}$	B_{25}
2. $B_{дет} = \Gamma_{20} - B_{25}$	Γ_{20}
3. $Z_{6-7} = \Gamma_{10} - \Gamma_{20}$	Γ_{10}
4. $Z_{4-5} = \Gamma_{20} + B_{15} - B_{25} - \Gamma_{10}$	B_{15}
5. $A_{дет} = A_{05}$	A_{05}
6. $Z_{3-4} = \Gamma_{10} - B_{05} - B_{15}$	B_{05}
7. $Z_{1-2} = B_{заг} - B_{05}$	$B_{заг}$
8. $Z_{7-8} = B_{05} + B_{заг} - \Gamma_{10}$	$B_{заг}$
9. $Z_{9-10} = B_{05} + D_{заг} - A_{05}$	$D_{заг}$

Складності виявлення технологічних розмірних ланцюгів за розмірною схемою пояснюються тим, що вони означаються на схемах не явно, а у прихованому вигляді. Тому їх виявлення має чисто розумовий характер.

Виявлення технологічних розмірних ланцюгів можна значно спростити і полегшити, скориставшись теорією графів.

Виявлення технологічних розмірних ланцюгів за допомогою графів

Теорія графів — одна з математичних дисциплін, яка вивчає складні структури і системи, що складаються з багатьох елементів і зв'язків між ними. Деталь у процесі її виготовлення можна розглядати як геометричну структуру, яка складається з багатьох поверхонь та зв'язків (розмірів) між ними. Тому таку структуру доцільно вивчати за допомогою графів (рисунок 64).

Граф — це фігура, яка складається із точок і ліній, що з'єднують ці точки. Точки називаються вершинами, а лінії, що їх з'єднують, — дугами або ребрами графа. Ребро вважається орієнтованим, якщо на ньому є стрілка, що вказує, з якої вершини воно виходить і в яку вершину входить. Якщо такої стрілки на ребрі немає, то воно вважається неорієнтованим.

На рисунку 64, а наведено приклади орієнтованого і неорієнтованого ребра *E*. Граф є орієнтованим чи неорієнтованим залежно від назви ребер.

Якщо пару вершин з'єднати кількома ребрами, то такі ребра називаються *кратними* (рисунок 64, б).

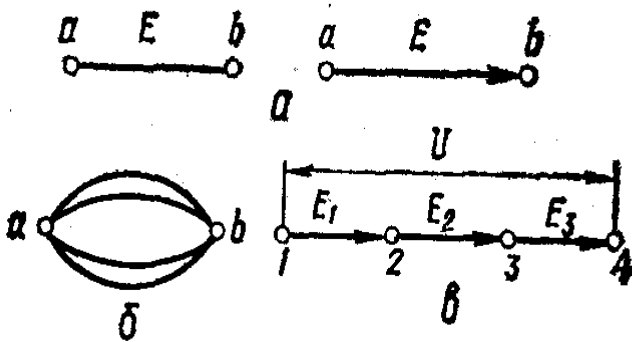


Рисунок 64 – Граф

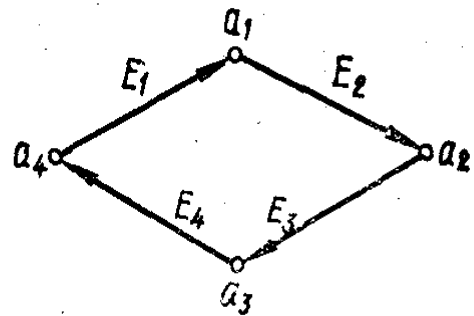
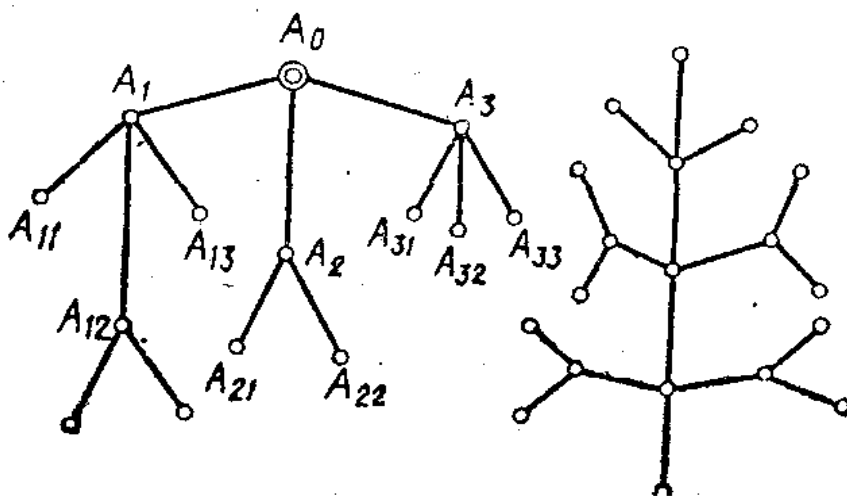


Рисунок 65 – Схема циклічного маршруту

Послідовність ребер E , в якій два сусідніх ребра мають спільну вершину, називається *маршрутом* U (рисунок 64, в). Ребра E_1 і E_2 мають спільну вершину 2, а ребра E_2 і E_3 – вершину 3. Маршрут $U = E_1 + E_2 + E_3$. Якщо початок і кінець маршруту знаходяться в одній вершині, то такий маршрут називається *циклічним* (рисунок 65). Якщо в кожному маршруті кожне ребро зустрічається один раз, то такий маршрут називається *ланцюгом*. Якщо ланцюг замкнений, тобто починається і закінчується в одній вершині, його називають *циклом*. Коли кожен вершину можна з'єднати з будь-якою іншою вершиною деяким ланцюгом, то граф є зв'язаним.

Зв'язаний граф, що не має циклів та кратних ребер, називається *деревом*. Для кожної пари вершин існує єдиний з'єднуючий їх ланцюг. Для того, щоб побудувати дерево, необхідно вибрати будь-яку вершину A_0 (рисунок 66) і з неї провести ребра до вершин A_1 , A_2 та A_3 , а вже з них провести ребра до A_{11} , A_{12} , A_{13} і т. д.



Вибрана спочатку вершина A_0 називається *коренем дерева*. Побудова дерева може починатися з будь-якої вершини, тому будь-яка вершина може бути коренем дерева. Оскільки дерево не має циклів, то різні ланцюги (гілки), що

виходять з A_0 , будуть

Рисунок 66 – Два види графа-дерева

ізолювані один від одного як гілки справжнього дерева.

Кожна гілка такого графа повинна мати останнім ребро із кінцевою вершиною, з якої вже не виходить жодне з ребер. Тому дерево з n вершинами має завжди $(n - 1)$ ребер.

Якщо вважати поверхні заготовки і деталі за вершини, зв'язки між ними (розміри) – за ребра, то креслення деталі з конструкторськими і технологічними розмірами можна подати у вигляді двох дерев. Дерево з конструкторськими розмірами і розмірами припусків на оброблення називається *вихідним*, а дерево з технологічними розмірами – *похідним* або *технологічним*.

Якщо тепер обидва дерева сумістити, то такий суміщений граф дає змогу в закодованій формі навести геометричну структуру технологічного процесу оброблення деталі. В такому графі всі розмірні зв'язки та технологічні розмірні ланцюги з неявних перетворюються на явні. У ньому ребро вихідного дерева є замикальною ланкою, а ребра технологічного дерева – складовими ланками. В термінах теорії графів розмірний ланцюг – це шлях у похідному дереві, що заданий ребром вихідного дерева. Для того, щоб вказати шлях, слід перелічити ребра, за якими треба йти.

Якщо є відомою довжина ребер (розміри, допуски) похідного дерева в даному ланцюзі, то можна знайти і довжину шляху, тобто розмір чи допуск замикальної ланки. Кожний розмірний ланцюг створює цикл. У будь-якому розмірному ланцюзі одне ребро має бути ребром вихідного дерева (конструкторським розміром або припуском), а інші – ребрами похідного дерева, тобто технологічними розмірами. Найкоротшим є цикл, що складається з двох ребер. Йому відповідає дволанковий розмірний ланцюг, в якому ребро вихідного дерева (конструкторський розмір) є замикальною ланкою, а ребро похідного дерева (технологічний розмір) – складовою ланкою.

Для побудови графа розмірних ланцюгів необхідно попередньо побудувати розмірну схему технологічного процесу формоутворення торцевих поверхонь деталі з відповідними розмірами-координатами (див. рисунок 63). Покажемо в цій схемі порядок побудови графа розмірних ланцюгів (рисунок 67). Спочатку будують похідне (див. рисунок 63, а), потім вихідне дерево і після цього дерева суміщують. Так вибудовують граф технологічних розмірних ланцюгів. Вершини (поверхні) позначають кружечками, всередині вказують їх номери. Ребра похідного дерева зображають прямими лініями зі стрілками на кінці, що показують, в яку вершину вони входять. Ребра вихідного дерева зображають у вигляді дуг, коли вони є конструкторськими розмірами, або у вигляді хвилястих ліній, коли вони є розмірами припусків. При побудові похідного дерева коренем вибирають вершину (поверхню), до якої за розмірною схемою процесу не підходить жодна стрілка. Такою вершиною є поверхня 3.

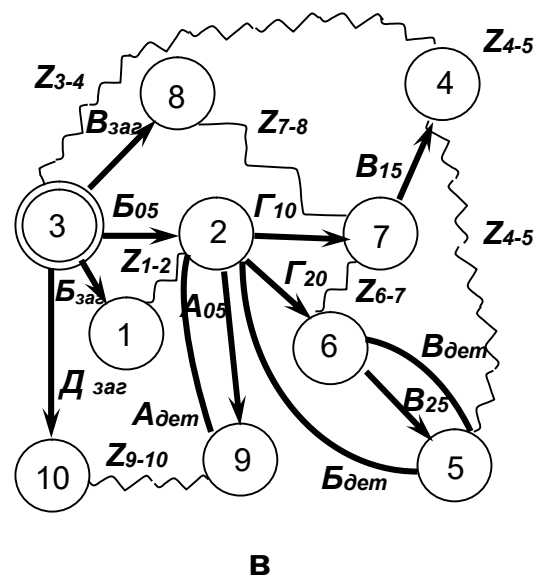
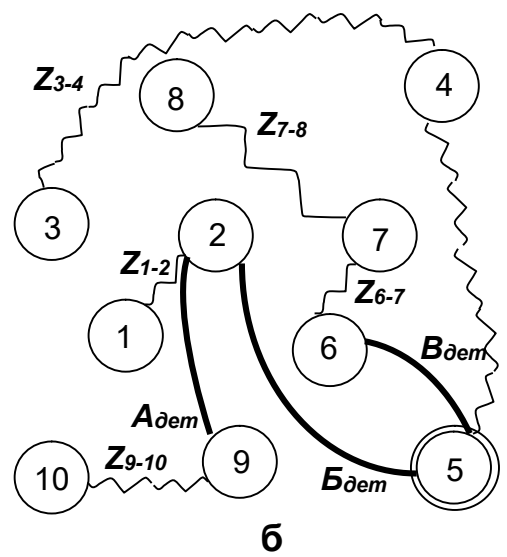
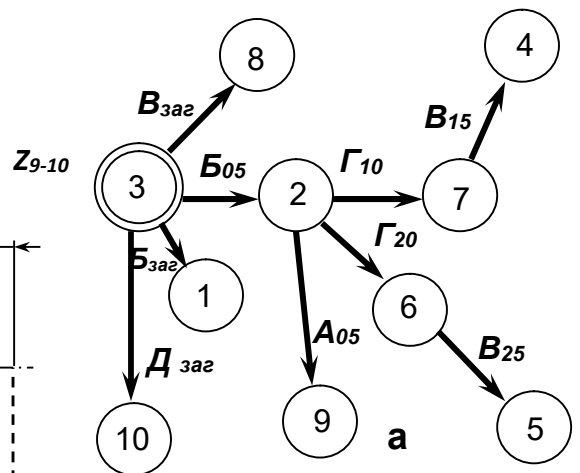
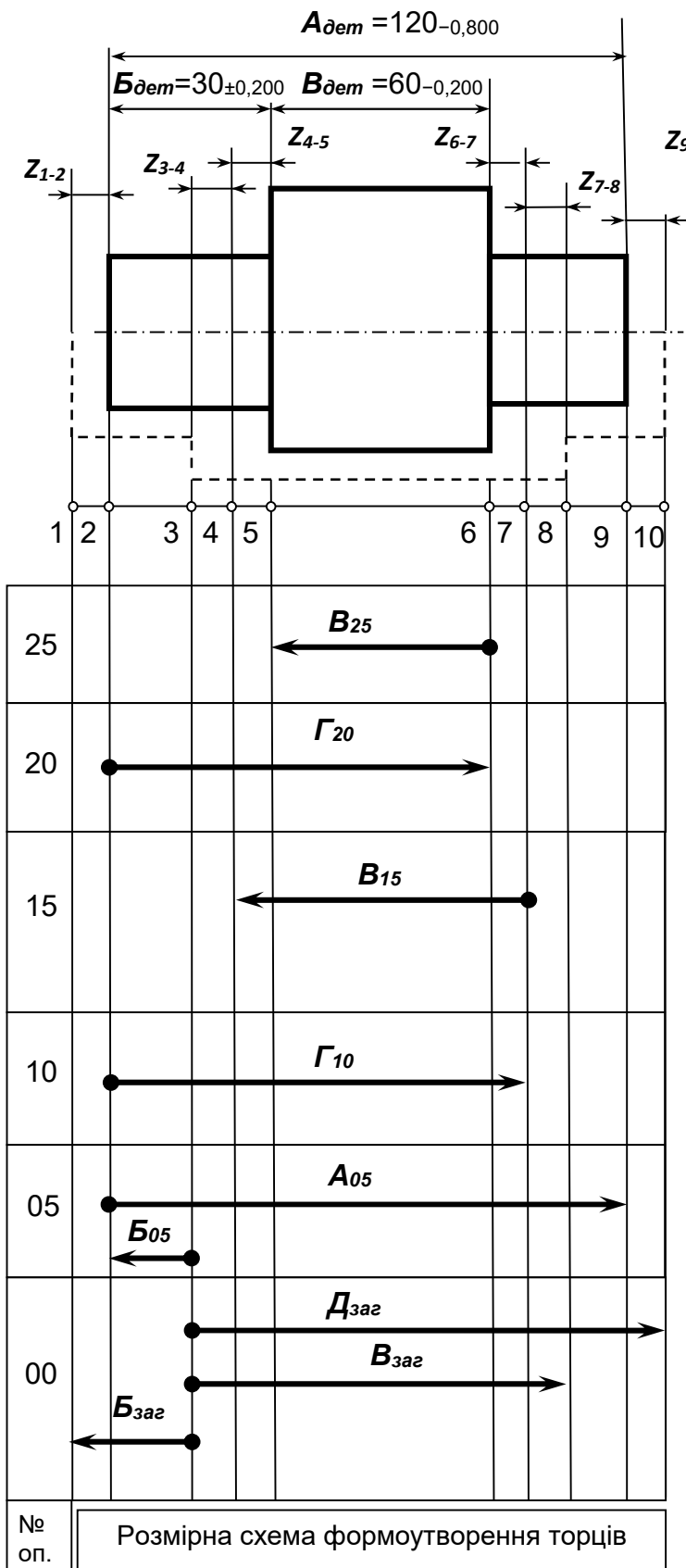


Рисунок 67 – Розмірна схема формоутворення торців
та порядок побудови графа

Вершину 3 слід позначити подвійним кружком і провести з неї ті ребра, що дотикаються до неї своїми неорієнтованими кінцями. Ними є ребра (розміри) **Б₀₅**, **Б_{3а2}**, **В_{3а2}** та **Д_{3а2}** (рисунок 67, а). На орієнтованих кінцях цих ребер слід вказати кружечками вершини (поверхні), в які вони впираються своїми стрілками. Такими вершинами є поверхні 1, 2, 8 і 10. З вершин 1, 8 та 10 ребра не виходять, а з вершини 2 виходять ребра **А₀₅**, **Г₁₀** та **Г₂₀**.

Ребро **А₀₅** впирається своїм орієнтованим кінцем у вершину 9, з якої ребра не виходять. З вершини 2 виходять ребра **Г₂₀** і **Г₁₀**, що впираються своїми орієнтованими кінцями відповідно у вершини 6 і 7. З вершин 6 і 7 виходять ребра **В₂₅** та **В₁₅**, які впираються своїми орієнтованими кінцями у вершини 5 і 4. З вершин 5 і 4 ребра не виходять.

На цьому побудова похідного дерева закінчується. Аналогічно будують вихідне дерево (рисунок 67, б). Його ребра можна не орієнтувати, тому при побудові можна вибирати коренем будь-яку вершину, тобто поверхню на кресленні готової деталі.

У прикладі, що розглядається, за корінь вихідного дерева взята поверхня (вершина) 5. Порядок розташування вершин на вихідному дереві має бути таким самим, як і на похідному. Дуги означають конструкторські розміри, а хвилясті лінії – розміри припусків. Оскільки ребра вихідного дерева не орієнтовані, то вони вказують лише на те, які вершини дерева з'єднані між собою конструкторськими розмірами або розмірами припусків. У прикладі, який розглядається, поверхня 5 зв'язана з поверхнею 2 розміром **Б_{дем}**, поверхня 5 – з поверхнею 6 розміром **В_{дем}**. Тому на графі вихідного дерева вершина 5 з'єднана з вершиною 2 дугою **Б_{дем}**, а з вершиною 6 – дугою **В_{дем}**. Поверхня 2 на кресленні деталі зв'язана з поверхнею 9 розміром **А_{дем}**, тому на графі вершина 2 з'єднана з вершиною 9 дугою **А_{дем}**. Поверхні 5 і 4, а потім поверхні 4 і 3 зв'язані між собою розмірами припусків **З₄₋₅** та **З₃₋₄**. Тому на графі вихідного дерева вершина 5 з'єднана з вершиною 4 ребром у вигляді хвилястої лінії, позначеної **З₄₋₅**, а вершина 4 – з вершиною 3 ребром **З₃₋₄**. Аналогічно позначають на графі зв'язок вершини 6 з вершиною 7 ребром **З₆₋₇**, вершини 7 з вершиною 8 ребром **З₇₋₈**, вершини 2 з вершиною 1 ребром **З₁₋₂**, вершини 9 з вершиною 10 ребром **З₉₋₁₀**.

Після побудови кожного дерева перевіряють правильність його побудови за такими ознаками:

1. Кількість вершин кожного дерева має дорівнювати числу поверхонь на розмірній схемі технологічного процесу.
2. Кількість ребер кожного дерева має бути однаковою і дорівнювати числу вершин, зменшеному на одиницю.

3. До кожної вершини похідного дерева, крім кореневої, має підходити лише одна стрілка орієнтованого ребра, а до кореневої вершини – жодної.

4. Древа не повинні мати замкнених контурів та розривів.

Після перевірки правильності побудови дерев їх суміщають так, щоб вершини з однаковими порядковими номерами збігалися. На практиці два дерева окремо не будують, а роблять так: спочатку будують похідне дерево, а потім на ньому ж – вихідне, в результаті чого замикання дерев відбувається само собою.

При побудові дерев вершини слід розташовувати так, щоб при їх суміщенні не перетинались ребра.

Суміщений граф похідного та вихідного дерев (рисунок 67, в) і буде графом технологічних розмірних ланцюгів.

Будь-який замкнений контур суміщеного графа створює розмірний ланцюг, у якого ребро вихідного дерева є замикальною ланкою, а ребра похідного дерева – складовими ланками.

Наприклад, на рисунку 67, в ребра **B_{3a2}**, **B₀₅**, та **Z₁₋₂** створюють замкнений контур, тобто розмірний ланцюг, у якого ребра **B_{3a2}** та **B₀₅** – складові ланки, а ребро **Z₁₋₂** – замикальна ланка. Замкнений контур з ребер **B_{дем}**, **B₂₅** та **Г₂₀** – це новий розмірний ланцюг, в якому замикальною ланкою є ребро **B_{дем}**, а складовими ланками – ребра **B₂₅** та **Г₂₀**.

Оскільки в розмірному ланцюзі лише одна ланка може бути замикальною, а як такою в технологічному розмірному ланцюзі є лише конструкторський розмір чи припуск, то при виявленні розмірних ланцюгів за графом необхідно вибирати такі контури, в яких би було лише по одному ребру вихідного дерева, а інші ребра належали б похідному дереву.

Наприклад, на рисунку 67, в ребра **Z₄₋₅**, **B₂₅**, **B₁₅**, і **Z₆₋₇** створюють замкнений контур, але в ньому два ребра **Z₄₋₅** і **Z₆₋₇** належать вихідному дереву, тому такий контур не слід використовувати як технологічний розмірний ланцюг.

У цьому разі слід розглянути два контури або два розмірних ланцюги, а саме: замкнений контур з ребер **Z₇₋₈**, **B_{3a2}**, **B₀₅** та **Г₁₀** і контур з ребер **Z₆₋₇**, **Г₁₀** і **Г₂₀**. Так само ланцюг, що складається з ребер (ланок) **Z₃₋₄**, **B_{3a2}**, **Z₇₋₈** і **B₁₅**, слід розбити на два ланцюги, в одному з яких замикальною ланкою є **Z₇₋₈**, а у іншому – **Z₃₋₄**.

Загальне число розмірних ланцюгів на графі має дорівнювати числу технологічних розмірів на розмірній схемі процесу.

Разом з виявленням технологічних розмірних ланцюгів потрібно за графом визначити також знаки складових ланок за таким правилом: замикальній ланці присвоюють знак «—» і, починаючи з цієї ланки, обходять замкнений контур у певному напрямі.

Оскільки ребро замикальної ланки з'єднує дві вершини, з яких одна має менший, а друга – більший порядковий номер, то обхід ланцюга починають із вершини з меншим номером. Якщо в напрямі обходу наступне ребро ланцюга буде з'єднувати вершину меншого порядкового номера з вершиною більшого номера, то ребру присвоюють знак «+», якщо ж ребро з'єднує вершину більшого номера з вершиною меншого номера, то йому присвоюють знак «–».

Одночасно з визначенням знаків розмірного ланцюга складають розрахункові рівняння з умови, що алгебрична сума всіх ланок розмірного ланцюга, включаючи й замикальну, дорівнює нулю. Потім ці рівняння перебудовують у вихідні, тобто складають відносно замикальної ланки. В початковому (вихідному) рівнянні (в правій частині) ланки, що мають знак «+», є збільшувачими, а ті, що мають знак «–», – зменшувачими.

Розглянемо проставлення знаків ланок (рисунк 67, в) ланцюга, що складається з ребер $B_{\text{дем}}$, Γ_{20} та B_{25} . Замикальній ланці присвоїмо знак «–», обхід ребер почнемо з вершини 2. Ребро Γ_{20} з'єднує вершину 2 з вершиною 6, тобто вершину меншого порядкового номера з вершиною більшого порядкового номера, тому ребру необхідно присвоїти знак «+». Ребро B_{25} з'єднує вершину 6 із вершиною 5, тобто вершину більшого номера з вершиною меншого, тому йому необхідно присвоїти знак «–». Отже рівняння розмірного ланцюга буде мати вигляд:

$$-B_{\text{дем}} + \Gamma_{20} - B_{25} = 0,$$

а вихідне рівняння, тобто складене відносно замикальної ланки, запишемо як $B_{\text{дем}} = \Gamma_{20} - B_{25}$. Для розмірного ланцюга, утвореного ребрами Z_{7-8} , Γ_{10} , B_{05} та B_{3a2} , вихідне рівняння має вигляд

$$Z_{7-8} = B_{05} + B_{3a2} - \Gamma_{10}.$$

Виявлення і розрахунок технологічних ланцюгів за графом починають з дволанкових ланцюгів, а потім у такій послідовності, щоб у кожному ланцюзі була лише одна невідома за величиною ланка, а інші ланки були б визначені в розрахунках попередніх розмірних ланцюгів.

Для виконання цієї умови слід починати виявлення і розрахунок розмірних ланцюгів у послідовності, зворотній виконанню операцій та переходів, тобто починати з останньої операції й останнього переходу і закінчувати першим переходом чи розміром заготовки.

Для графа (рисунк 67, в) послідовність виявлення і розрахунку розмірних ланцюгів із вказівкою їх розрахункових та вихідних рівнянь і визначеного розміру наведено в таблиці 4.

Граф технологічних розмірних ланцюгів не лише полегшує виявлення ланцюгів, але й дає змогу виявити помилки в технології або кресленні. Наприклад, якщо при складанні похідного чи вихідного дерева виявиться розрив між вершинами або з'явиться замкнений контур, то це вказує в

першому випадку на відсутність потрібних розмірів у прийнятій технології, а в другому – на наявність зайвих розмірів.

Таблиця 4 – Рівняння для розрахунку технологічних розмірних ланцюгів

№ п.п	Розрахункове рівняння	Вихідне рівняння	Визначуваний розмір
1	$-A_{\text{дем}} + A_{05} = 0$	$A_{\text{дем}} = A_{05}$	A_{05}
2	$-B_{\text{дем}} + B_{25} = 0$	$B_{\text{дем}} = B_{25}$	B_{25}
3	$-B_{\text{дем}} + \Gamma_{20} - B_{25} = 0$	$B_{\text{дем}} = \Gamma_{20} - B_{25}$	Γ_{20}
4	$-Z_{6-7} - \Gamma_{20} + \Gamma_{10} = 0$	$Z_{6-7} = \Gamma_{10} - \Gamma_{20}$	Γ_{10}
5	$-Z_{4-5} + B_{15} - \Gamma_{10} + \Gamma_{20} - B_{25} = 0$	$Z_{4-5} = \Gamma_{20} + B_{15} - \Gamma_{10} - B_{25}$	B_{15}
6	$-Z_{3-4} - B_{05} + \Gamma_{10} - B_{15} = 0$	$Z_{3-4} = \Gamma_{10} - B_{05} - B_{15}$	B_{05}
7	$-Z_{1-2} + B_{\text{заг}} - B_{05} = 0$	$Z_{1-2} = B_{\text{заг}} - B_{05}$	$B_{\text{заг}}$
8	$-Z_{7-8} - \Gamma_{10} + B_{05} + B_{\text{заг}} = 0$	$Z_{7-8} = B_{05} + B_{\text{заг}} - \Gamma_{10}$	$B_{\text{заг}}$
9	$-Z_{9-10} - A_{05} + B_{05} + D_{\text{заг}} = 0$	$Z_{9-10} = B_{05} + D_{\text{заг}} - A_{05}$	$D_{\text{заг}}$

Розрахунок технологічних розмірних ланцюгів

У технологічних розмірних ланцюгах число складових ланок n рідко буває більшим чотирьох. Тому їх розрахунок, як правило, проводиться за методом максимуму і мінімуму. Якщо $n \geq 5$, використовують імовірнісний метод. Він може бути використаний і тоді, коли $n < 5$, якщо виникає необхідність розширити допуски на складові ланки.

Методика розрахунку технологічних розмірних ланцюгів залежить від того, чи є замикальною ланкою ланцюга розмір припуску або конструкторський розмір деталі за кресленням. Якщо замикальною ланкою є припуск Z , залишений для останнього переходу, то спочатку визначають його мінімальну величину $Z_{\min}$ за таблицями з довідника технолога [44] або розрахунком за формулою.

Визначивши $Z_{\min}$, складають початкове рівняння розмірного ланцюга відносно $Z_{\min}$:

$$Z_{\min} = \sum_{j=1}^{n_j} S_{j \min} - \sum_{q=1}^{n_q} S_{q \max}, \quad (21)$$

де $S_{j \min}$ – найменший граничний розмір збільшувальної ланки розмірного ланцюга; $S_{q \max}$ – найбільший граничний розмір зменшувальної ланки розмірного ланцюга; n_j – число збільшувальних ланок; n_q – число зменшувальних ланок розмірного ланцюга.

Оскільки в кожному технологічному розмірному ланцюзі є тільки одна невідома складова ланка, то задача зводиться до розв'язання рівняння з одним невідомим, що є найбільшим або найменшим граничним розміром шуканої складової ланки. Позначимо розмір, що визначається, через S_x . Якщо шуканий розмір є зменшувальною ланкою, то

$$S_{x \max} = \sum_{j=1}^{n_j} S_{j \min} - \sum_{q=1}^{n_q-1} S_{q \max} - Z_{\min}. \quad (22)$$

Якщо ж шуканий розмір є збільшувальною ланкою, то

$$S_{x \min} = \sum_{j=1}^{n_j-1} S_{j \min} + \sum_{q=1}^{n_q} S_{q \max} + Z_{\min}. \quad (23)$$

Визначивши величину $S_{x \max}$ або $S_{x \min}$, на розмір S_x встановлюють допуск δ_x залежно від призначення технологічного переходу (чорнове чи чистове оброблення). Як правило, для чорнового оброблення допуск призначають за 12...14-м квалітетами, а для чистового оброблення – за 11-м квалітетом. Граничні відхилення визначають за полями h, H або j_s (ДСТУ 2500-94).

За величиною встановленого допуску δ_x та за його розташуванням відносно S_x (h, H чи j_s) визначають номінальний розмір S_x за однією з таких формул:

$$\begin{aligned} S_{xq} &= S_{x \max} - \Delta_x^B; \\ S_{xj} &= S_{x \min} - \Delta_x^H, \end{aligned} \quad (24)$$

де Δ_B, Δ_H – верхнє та нижнє граничні відхилення відповідної ланки.

Далі визначають номінальний розмір припуску та його найбільший граничний розмір $Z_{\max}$. Для цього складають початкове рівняння розмірного ланцюга відносно Z із зазначенням для всіх складових ланок граничних відхилень. На основі цього рівняння складають номінальні розміри та граничні відхилення окремо для зменшувальних та збільшувальних ланок:

$$Z = \left(\sum_{j=1}^{n_j} S_j \right)_{\Sigma \Delta_j^H}^{\Sigma \Delta_j^B} - \left(\sum_{q=1}^{n_q} S_q \right)_{\Sigma \Delta_q^H}^{\Sigma \Delta_q^B}. \quad (25)$$

За різницею номінальних розмірів визначають номінальний розмір припуску

$$Z = \sum_{j=1}^{n_j} S_j - \sum_{q=1}^{n_q} S_q, \quad (26)$$

а за різницею сум граничних відхилень збільшувальних і зменшувальних

ланок – граничні відхилення розмірів припуску і, отже, для Z_{max} :

$$\begin{cases} \Delta_z^B = \sum \Delta_j^B - \sum \Delta_q^H \\ \Delta_z^H = \sum \Delta_j^H - \sum \Delta_q^B \end{cases} \quad (27)$$

тобто граничні відхилення слід визначати за схемою «хрест-навхрест» (25).

Використовуючи викладені вище методи, проведемо розрахунок розмірної схеми і графа, зображених на рисунку 67.

Нехай конструкторські розміри деталі і розміри припусків на оброблення мають такі значення:

$$B_{дет} = 30_{-0,400} \text{ мм};$$

$$B_{дет} = 60_{-0,200} \text{ мм};$$

$$A_{дет} = 120_{-0,800} \text{ мм};$$

$$Z_{4-5min} = Z_{6-7min} = 0,100 \text{ мм};$$

$$Z_{1-2min} = Z_{3-4min} = Z_{7-8min} = Z_{9-10min} = 0,400 \text{ мм}.$$

Ланцюги 1 і 2 (див. таблицю 4) є дволанковими, тобто технологічні розміри в них збігаються з конструкторськими, тому

$$A_{05} = 120_{-0,800} \text{ мм і } B_{25} = 60_{-0,200} \text{ мм}.$$

Відзначимо, що при розв'язанні цих дволанкових ланцюгів відносно точності технологічного розміру як його допуск призначають весь допуск замикальної ланки. Так діють тоді, коли цей технологічний розмір не бере участі в забезпеченні точності інших, більш довгих ланцюгів, замикальними ланками яких є розміри, задані конструктором.

Якщо ж це існує (паралельно з'єднані розмірні ланцюги), то як допуск на технологічний розмір, присутній у дволанковому та багатоланковому ланцюгах, призначають лише частину допуску конструкторського розміру, що замикає багатоланковий ланцюг. Визначений таким чином більш жорсткий допуск розташовують у межах частини допуску технологічного (конструкторського) розміру, що замикає дволанковий ланцюг.

Ланцюг 3

Початкове рівняння

$$B_{дет} = \Gamma_{20} - B_{25}, \text{ або } 30 = \Gamma_{20} - 60, \text{ звідки } \Gamma_{20} = 90 \text{ мм}.$$

Для визначення граничних відхилень розміру Γ_{20} складемо рівняння

$$30_{-0,400} = 90_{\Delta_{H90}^{B90}} - 60_{-0,200},$$

$$\text{звідки } \Delta_{30}^B = \Delta_{90}^B - \Delta_{60}^H, \text{ або } 0 = \Delta_{90}^B - (-0,200) \text{ і } \Delta_{90}^B = -0,200 \text{ мм};$$

$$\Delta_{30}^H = \Delta_{90}^H - \Delta_{60}^B, \text{ чи } -0,400 = \Delta_{90}^H - 0 \text{ і } \Delta_{90}^H = -0,400 \text{ мм};$$

$$\text{отже, } \Gamma_{20} = 90_{-0,400}^{-0,200} \text{ мм, або } 89,800_{-0,200} \text{ мм}.$$

Ланцюг 4

Початкове рівняння $Z_{6-7} = \Gamma_{10} - \Gamma_{20}$.

Для $Z_{6-7 \min}$ воно має вигляд

$$Z_{6-7 \min} = \Gamma_{10 \min} - \Gamma_{20 \max}, \text{ або } +0,100 = \Gamma_{10 \min} - 89,800,$$

звідки $\Gamma_{10 \min} = 89,900$ мм. Визначимо допуск на розмір Γ_{10} за 12-м квалітетом, а граничні відхилення як h , тобто

$$\delta\Gamma_{10} = 0,350 \text{ мм}; \Delta_{В.\Gamma_{10}} = 0; \Delta_{Н.\Gamma_{10}} = -0,350 \text{ мм}.$$

Тоді номінальний розмір

$$\Gamma_{10} = 89,900 + 0,350 = 90,250 \text{ мм}.$$

Остаточно на операційному ескізі

$$\Gamma_{10} = 90,250_{-0,350} \text{ мм}.$$

Ланцюг 5

Початкове рівняння

$$Z_{4-5} = \Gamma_{20} + B_{15} - \Gamma_{10} - B_{25}.$$

Для $Z_{4-5 \min}$ воно має вигляд

$$Z_{4-5 \min} = \Gamma_{20 \min} + B_{15 \min} - \Gamma_{10 \max} - B_{25 \max},$$

або $0,100 = 89,600 + B_{15 \min} - 90,250 - 60$,
звідки

$$B_{15 \min} = 90,250 + 60 + 0,100 - 89,600 = 60,750 \text{ мм}.$$

Визначимо допуск на розмір B_{15} за 12-м квалітетом з відхиленням h :

$$\delta B_{15} = 0,300 \text{ мм}; \Delta_{В.B_{15}} = 0; \Delta_{Н.B_{15}} = -0,300 \text{ мм}.$$

Номінальний розмір $B_{15} = 60,750 + 0,300 = 61,050$ мм. Таким чином, $B_{15} = 61,050_{-0,300}$ мм. Номінальний розмір та граничні відхилення припуску Z_{4-5} визначаємо з рівняння

$$Z_{4-5} = 89,800_{-0,200} + 61,050_{-0,300} - 90,250_{-0,350} - 60_{-0,200} = 0,600_{-0,500}^{+0,550} \text{ мм}.$$

Ланцюги 6, 7, 8, 9 розв'язуємо аналогічно, але допуски і граничні відхилення на розміри заготовки, тобто на $B_{заг}$, $B_{заг}$ і $D_{заг}$, призначаються за відповідними стандартами, а саме:

$$\delta B_{заг} = 2,500 \text{ мм}; \Delta_{В.B_{заг}} = +1,700 \text{ мм}; \Delta_{Н.B_{заг}} = -0,800 \text{ мм};$$

$$\delta B_{заг} = 2,700 \text{ мм}; \Delta_{В.B_{заг}} = +1,800 \text{ мм}; \Delta_{Н.B_{заг}} = -0,900 \text{ мм};$$

$$\delta D_{заг} = 3 \text{ мм}; \Delta_{В.D_{заг}} = +2 \text{ мм}; \Delta_{Н.D_{заг}} = -1 \text{ мм}.$$

Результати розрахунків технологічних розмірів та розмірів заготовок наведено в таблиці 5.

Таблиця 5 – Розрахунки та оптимізація припусків на оброблення і технологічних розмірів-координат формоутворення торцевих поверхонь

Вихідний розмір		Вихідне рівняння	Розмір, що визначається, мм			
Позначення	Значення, мм		Номінальний	Допуск	Технологічний	Граничне значення припуску
$A_{дет}$	120 $-0,800$	$A_{дет} = A_{05}$	$A_{05} = A_{дет} = 120$	0,800	$A_{05} = 120-0,800$	–
$B_{дет}$	60 $-0,200$	$B_{дет} = B_{25}$	$B_{25} = B_{дет} = 60$	0,200	$B_{25} = 60-0,200$	–
$B_{дет}$	30 $-0,400$	$B_{дет} = \Gamma_{20} - B_{25}$	$\Gamma_{20} = B_{дет} + B_{25} = 30 + 60 = 90$	0,200	$\Gamma_{20} = 89,800-0,200$	–
Z_{6-7min}	0,100	$Z_{6-7min} = \Gamma_{10min} - \Gamma_{20max}$	$\Gamma_{10min} = \Gamma_{20max} + Z_{6-7min} = 89,800 + 0,100 = 89,900;$ $\Gamma_{10max} = 89,900 + 0,350 = 90,250$	0,350	$\Gamma_{10} = 90,250-0,350$	$Z_{6-7} = 90,250-0,350 - 89,800-0,200 = 0,450^{+0,200}_{-0,350}$
Z_{4-5min}	0,100	$Z_{4-5min} = \Gamma_{20min} + B_{15min} - \Gamma_{10max} - B_{25max}$	$B_{15min} = \Gamma_{10max} + B_{25max} - \Gamma_{20min} + Z_{4-5min} = 90,250 + 60 - 89,600 + 0,100 = 60,750;$ $B_{15max} = 60,750 + 0,300 = 61,050$	0,3 00	$B_{15} = 61,050-0,300$	$Z_{4-5} = 89,800-0,200 + 61,050-0,300 - 90,250-0,350 - 60-0,200 = 0,600^{+0,550}_{-0,500}$
Z_{3-4min}	0,400	$Z_{3-4min} = \Gamma_{10min} - B_{05max} - B_{15max}$	$B_{05max} = \Gamma_{10min} - B_{15max} - Z_{3-4min} = 89,900 - 61,050 - 0,400 = 28,450;$ $B_{05min} = 28,240$	0,210	$B_{05} = 28,450-0,210$	$Z_{3-4} = 90,250-0,350 - 28,450-0,210 - 61,050-0,300 = 0,750^{+0,510}_{-0,350}$
Z_{1-2min}	0,400	$Z_{1-2min} = B_{заг min} - B_{05max}$	$B_{заг min} = B_{05max} + Z_{1-2min} = 28,450 + 0,400 = 28,850;$ $B_{заг.ном} = 28,850 + 0,800 = 29,650$	+1,700 -0,800	$B_{заг} = 29,650^{+1,700}_{-0,800}$	$Z_{1-2} = 29,650^{+1,700}_{-0,800} - 28,450-0,210 = 1,200^{+1,910}_{-0,800}$
Z_{7-8min}	0,400	$Z_{7-8min} = B_{05min} + B_{заг.min} - \Gamma_{10max}$	$B_{заг min} = \Gamma_{10max} - B_{05min} + Z_{7-8min} = 90,250 - 28,240 + 0,400 = 62,410;$ $B_{заг.ном} = 62,410 + 0,900 = 63,310$	+1,800 -0,900	$B_{заг} = 63,310^{+1,800}_{-0,900}$	$Z_{7-8} = 28,450-0,210 + 63,310^{+1,800}_{-0,900} - 90,250-0,350 = 1,510^{+2,150}_{-1,110}$
$Z_{9-10min}$	0,400	$Z_{9-10min} = B_{05min} + D_{заг.min} - A_{05max}$	$D_{заг min} = A_{05max} - B_{05min} + Z_{9-10min} = 120 - 28,240 + 0,400 = 92,160;$ $D_{заг.ном} = 92,160 + 1 = 93,160$	+2,000 -1,000	$D_{заг} = 93,160^{+2,000}_{-1,000}$	$Z_{9-10} = 28,450-0,210 + 93,160^{+2,000}_{-1,000} - 120-0,800 = 1,610^{+2,800}_{-1,210}$

1.7 Розрахунково-технологічні вправи визначення параметрів точності формоутворення поверхонь і браку деталей [3]

Для набуття практичних навичок розрахунково-технологічного визначення параметрів точності формоутворення поверхонь деталей рекомендуються вправи за двома темами.

Тема 1. Визначення вірогідності браку у формоутворюючих операціях, що виконуються в умовах несуміщення баз

Мета роботи:

1. Набуття навичок розмірного аналізу формотвірних технологічних операцій з урахуванням заданого креслення деталі, ескізу встановлення і оброблення заготовки.
2. Набуття навичок аналізу схем базування корпусних деталей в умовах несуміщення баз.
3. Набуття навичок визначення вірогідності браку в умовах несуміщення баз при різних законах розсіювання розмірів: нормальному, трикутному і рівної ймовірності.

Початкові дані: ескіз деталі та ескіз оброблення (рисунки 68 і 69).

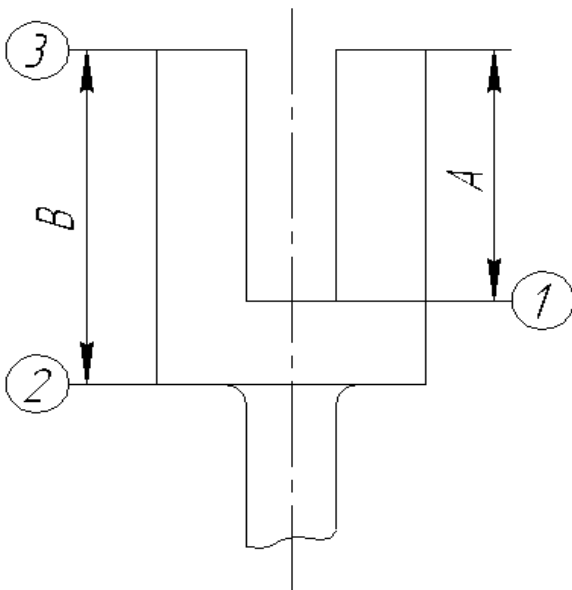


Рисунок 68 – Ескіз деталі

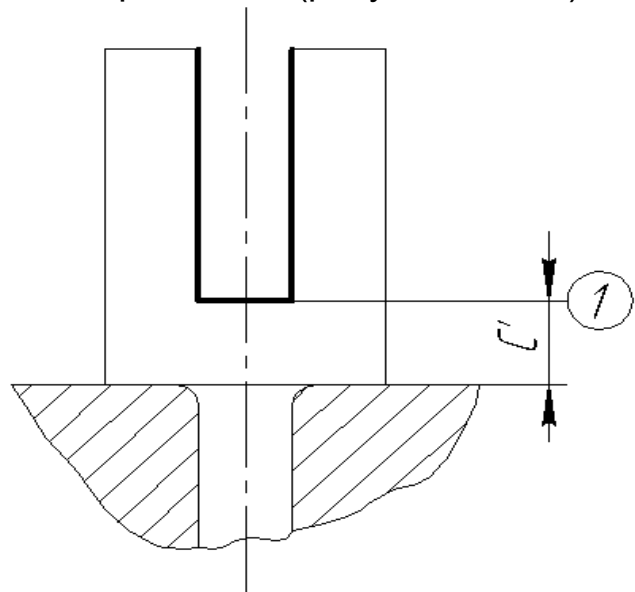


Рисунок 69 – Ескіз оброблення деталі

У процесі оброблення партії заготовок на налагоджених верстатах їх розміри безперервно коливаються в певних межах, відрізняючись один від одного і від настроювального розміру на величину випадкової похибки.

Випадкова похибка – це така похибка, яка для різних заготовок даної партії має різні значення, причому її поява не підлягає ніякій очевидній закономірності за відсутності домінуючого чинника.

У результаті виникнення випадкових похибок відбувається розсіювання розмірів заготовок, оброблених за одних і тих же умов.

Розсіювання розмірів викликається сукупністю багатьох причин випадкового характеру, не підвладних точному попередньому визначенню, що проявляють свою дію незалежно один від одного. До таких причин належать коливання твердості оброблюваного матеріалу; припуску, що знімається; положення початкової заготовки в пристосуванні, пов'язані з похибками базування і закріплення; коливання температурного режиму оброблення; затуплення інструменту; коливання елементів технологічної системи під впливом непостійних сил різання та ін.

Для виявлення і аналізу закономірностей розподілу розмірів заготовок при їх розсіюванні успішно застосовують методи математичної статистики, що базуються на теорії ймовірності. За різних умов оброблення заготовок розсіювання їх дійсних розмірів підлягає різним математичним законам. У технології авіабудування велике практичне значення мають такі закони: закон нормального розподілу (закон Гауса), закон трикутного розсіювання, закон Сімпсона, закон ексцентриситету (закон Релея), закон рівної ймовірності і функції розподілу.

Закон нормального розподілу

Крива, що характеризує закон нормального розподілу, показана на рисунку 70. Середнє арифметичне $L_{\text{сер}}$ дійсних розмірів деталей цієї партії характеризує положення центра групування розмірів. Приймемо, що крива нормального розподілу симетрична відносно осі ординат ($L_i = L_{\text{сер}}$) і асимптотично наближається до осі абсцис.

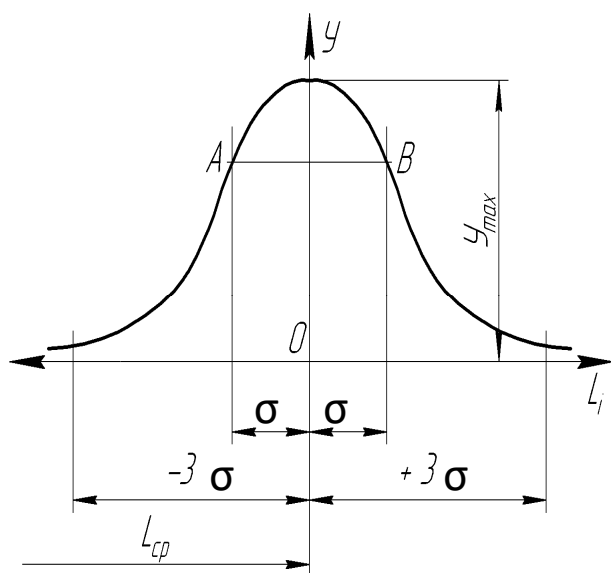


Рисунок 70 – Крива нормального розподілу

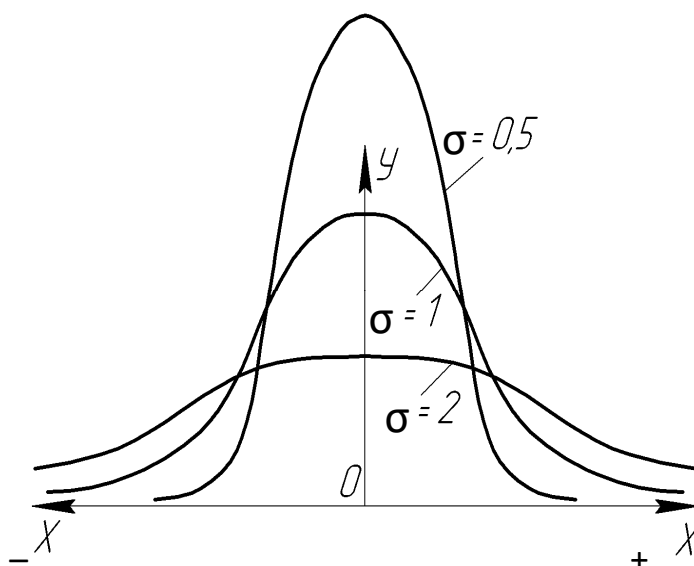


Рисунок 71 – Вплив σ на форму кривої розподілу

Практично прийнято вважати, що на відстані $\pm 3\sigma$ від вершини кривої її гілки перетинаються з віссю абсцис і в цих межах розміщена вся площа кривої (100 %). Середньоквадратичне відхилення показує, наскільки тісно згруповані можливі значення дійсних розмірів заготовки біля центра групування. У цьому сенсі середньоквадратичне відхилення є мірою розсіювання, або мірою точності. Чим воно менше, тим незначніше розсіювання розмірів і вище точність оброблення. Вплив σ на форму кривої нормального розподілу показано на рисунку 71. Закон нормального розподілу у більшості випадків виявляється справедливим при обробленні заготовок різанням з точністю 8-го квалітету і грубіше. Фактичне поле R розсіювання розмірів заготовок дорівнює 6σ .

Закон рівної ймовірності

Якщо розсіювання розмірів залежить тільки від змінних систематичних похибок (наприклад, від зносу різального інструменту), то розподіл дійсних розмірів партії оброблених заготовок підлягає закону рівної ймовірності. При цьому зміна розмірів оброблюваних заготовок на величину $2L = b - a$ за період $T_2 - T_1$ відбувається за законом прямої лінії (рисунок 72). Розподіл розмірів заготовок в інтервалі від a до b за законом рівної ймовірності зображується прямокутником (рисунок 73) з основою $2L$ і заввишки $0,5L$. Площа прямокутника дорівнює одиниці, що означає 100-відсоткову вірогідність появи розміру в інтервалі від a до b .

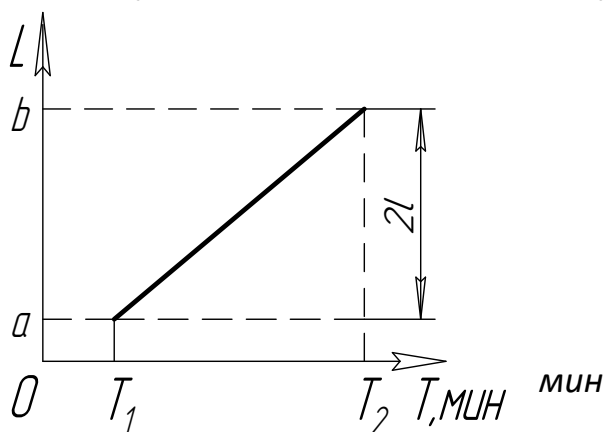


Рисунок 72 – Характер змін розмірів у часі

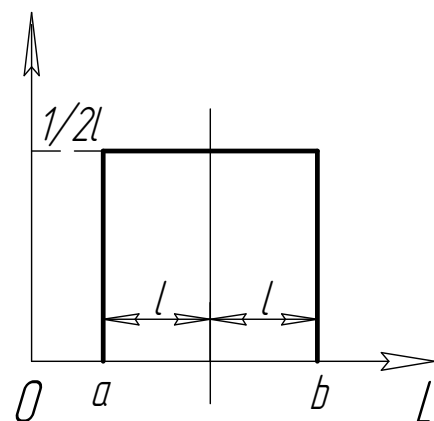


Рисунок 73 – Закон рівної ймовірності

Закон рівної ймовірності поширюється на розподіл розмірів заготовок підвищеної точності (квалітет 6 і вище) при їх обробленні методом пробних проходів і промірів. Через складність витримування розмірів дуже високої точності вірогідність попадання розміру заготовки у вузькі межі допуску за середнім, найбільшим і найменшим його значеннями стає однаковою.

Вивчення точності оброблення заготовок на налагоджених верстатах методами математичної статистики зазвичай зводиться до зіставлення поля фактичного розсіювання розмірів заготовок цієї партії з допуском на креслярський розмір і визначення кількості заготовок, що виходять за межі встановленого допуску.

У тих випадках, коли поле розсіювання розмірів заготовок на цій операції перевершує поле допуску ($\Delta \geq \delta$), умова оброблення без браку не виконується, і брак заготовок стає неминучим.

Вірогідний відсоток браку всієї партії оброблених заготовок обчислюють таким чином: приймають, що всі заготовки мають дійсні розміри в межах поля розсіювання $6\sigma = L_{д.макс} - L_{д.мін}$.

Вважають, що площа, обмежена кривою нормального розподілу і віссю абсцис (рисунок 74), дорівнює одиниці і відповідає 100 % заготовок партії. Тоді площа заштрихованих ділянок кривої є кількістю (у долях одиниці або у відсотках) заготовок, що виходять своїми розмірами за межі допуску d .

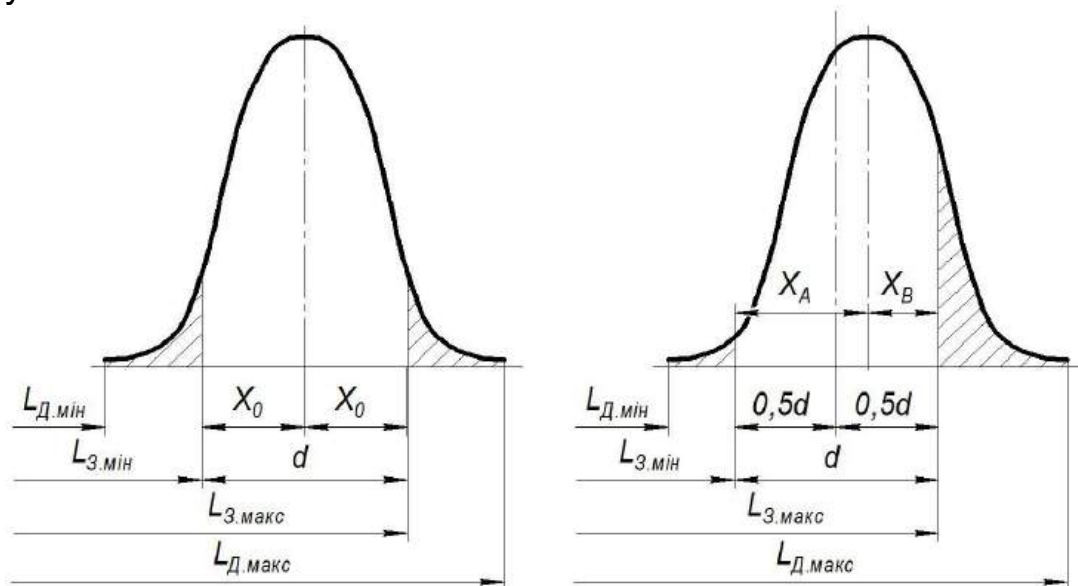


Рисунок 74 – Розрахункові криві розподілу розмірів

Для визначення кількості кондиційних заготовок необхідно знайти площу, обмежену кривою і віссю абсцис на довжині, що дорівнює допуску

$$\delta = L_{з.макс} - L_{з.мін},$$

де $L_{з.макс}$ – максимальне значення заданого розміру L ;

$L_{з.мін}$ – мінімальне значення заданого розміру L .

Слід знайти значення інтеграла, що визначає площу, обмежену кривою Гауса і абсцисою X . Розв'язання функції Лапласа (див. далі) залежить не від конкретних значень x_0 і σ , а від їх відношення $z = x_0 / \sigma$.

Значення цієї функції є табульованими залежно від величини z . Таким чином, розрахунок кількості кондиційних оброблених заготовок зводиться до встановлення величини z і визначення $\Phi(z)$ з подальшим перерахунком отриманих значень у відсотках або кількості штук заготовок.

Розглянемо методику визначення браку відповідно до трикутного закону розсіювання і закону рівної ймовірності (рисунок 75).

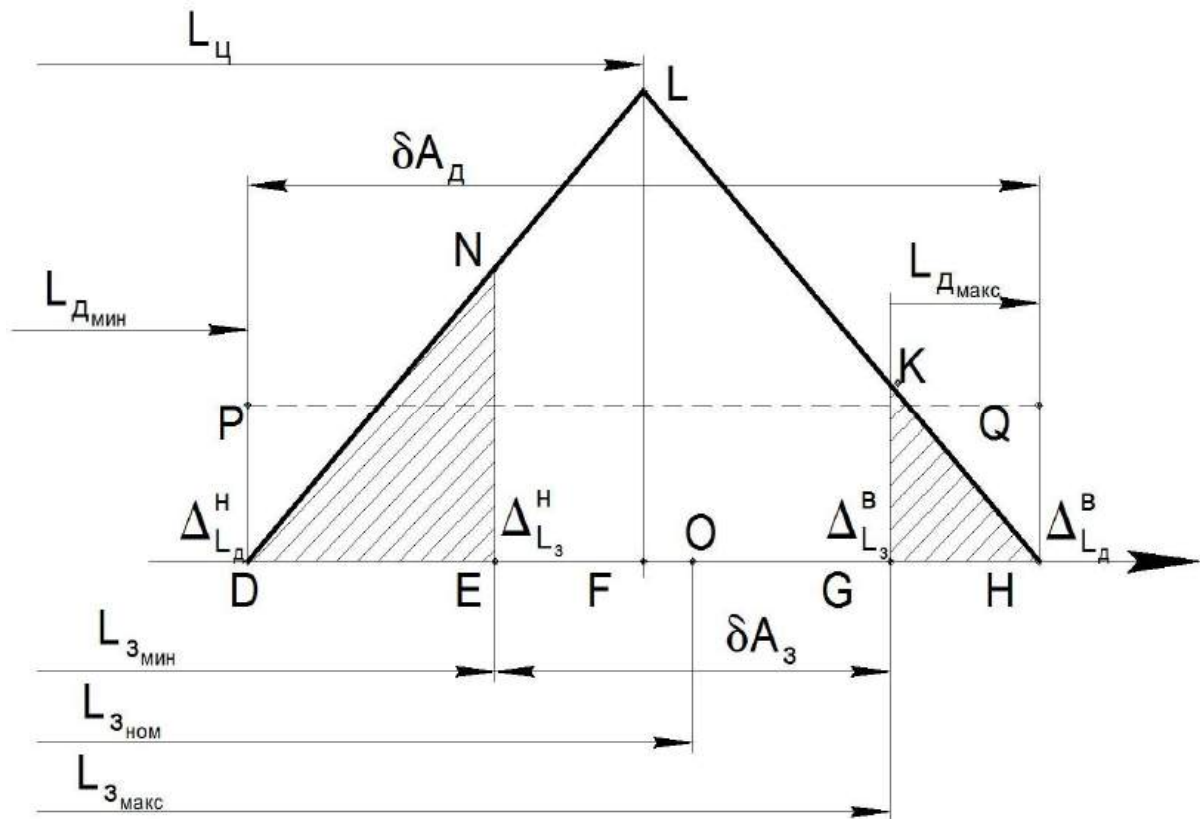


Рисунок 75 – Розрахункова схема визначення браку

На числовій осі відкладаємо значення заданих граничних розмірів L_3 ($L_{3.мін}$ і $L_{3.макс}$), поле допуску δL_3 , верхнє $\Delta^e L_3$ і нижнє $\Delta^H L_3$ відхилення заданих розмірів, значення очікуваних (дійсних) розмірів L_δ , поле розсіювання (поле допуску технологічного розміру δL_δ), верхнє $\Delta^e L_\delta$ і нижнє $\Delta^H L_\delta$ відхилення дійсних розмірів і координату середини поля розсіювання (центра групування) L_ψ .

Характер розсіювання на розрахунковій схемі показано рівностороннім трикутником довільної висоти з основою від $\Delta^H L_\delta$ до $\Delta^e L_\delta$. Заштриховані області відповідають браку деталей. Координата центра групування L_ψ не збігається з номінальним значенням L_δ . Відсоткове відношення площ трикутників DEN до DFL і GHK до FHL відповідає вірогідності браку. У подібних трикутниках відношення їх площ дорівнює відношенню квадратів відповідних катетів.

Тоді вірогідність браку згідно із законом трикутника

$$W_T = 0,5(DE^2 / DF^2 + GH^2 / FH^2) \cdot 100 \%$$

Вірогідність браку згідно із законом рівної ймовірності (лінія PQ)

$$W_{Pi} = ((DE + GH) / DH) \cdot 100 \%$$

Порядок виконання розрахунків

Аналіз ескізу деталі і операційного ескізу встановлення і оброблення їх дає наступне. Розглядаємо один напрям координуючого розміру – по осі ординат. У цьому напрямі необхідно сформулювати паз у деталі типу "вилка тяги" глибиною A від верхнього торця 3. Розміром B координовано положення протилежного торця 2, використовуюваного як координуюча (KpB) і установочна ($УБ$) бази в операційному ескізі.

Таким чином, як конструкторська база (KB) дна паза в кресленні деталі використовується поверхня 3, а як координуюча і установочна бази координатії розміру (відстані дна) паза C – одна і та ж поверхня 2. Таким чином, установочна база співпадає з координуючою, але не співпадає з конструкторською, тобто $УБ = KpB$, але $KB \neq УБ = KpB$.

Звідси похибки взаємного розташування KB відносно KpB (S_{KKp}) і KB відносно $УБ$ ($S_{УК}$) рівні між собою і відповідають допуску на розмір B :

$$S_{KKp} = S_{УК} = \delta B.$$

Виходячи з умови витримування розміру B для виконання даної операції, що забезпечує технологічний розмір C' , заданий креслярський розмір A в даній операції формується "сам собою", тобто стає замикальною ланкою (технологічним розміром) A' в ланцюзі $A' = B - C'$.

З основного рівняння розмірного аналізу виходить, що допуск замикальної ланки A' дорівнює сумі допусків збільшувальної ланки B і зменшувальної ланки C' (допуски – величини арифметичні, а відхилення – алгебричні): $\delta A' = \delta B + \delta C'$.

Верхнє відхилення замикаючої ланки A' дорівнює різниці верхнього відхилення ланки B і нижнього відхилення ланки C' : $\Delta^B_{A'} = \Delta^B_B - \Delta^H_{C'}$.

Відповідно нижнє відхилення ланки A' дорівнює різниці нижнього відхилення ланки B і верхнього відхилення ланки C' : $\Delta^H_{A'} = \Delta^H_B - \Delta^B_{C'}$.

Порівнюючи заданий креслярський розмір A з очікуваним значенням технологічного розміру A' , можна встановлювати відповідність останнього вимогам креслення і вірогідність браку для деяких законів розсіювання розмірів. Методика визначення вірогідності браку при деяких законах розсіювання розглянута вище.

Наприклад, при значеннях $B = 121 \pm 0,030$, $C' = 51_{-0,055}$ необхідно в заготовці вилки тяги (рисунки 76 і 77) виконати паз глибиною $A = 70^{+0,050}$.

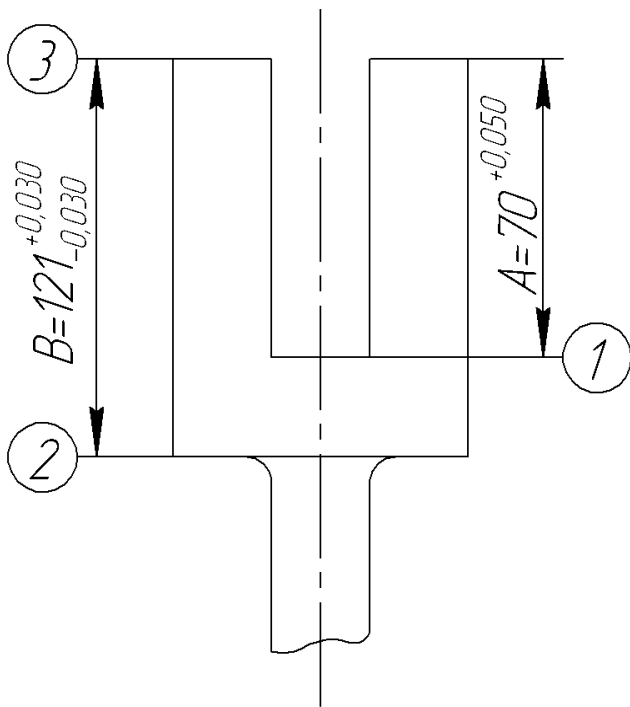


Рисунок 76 – Ескіз деталі

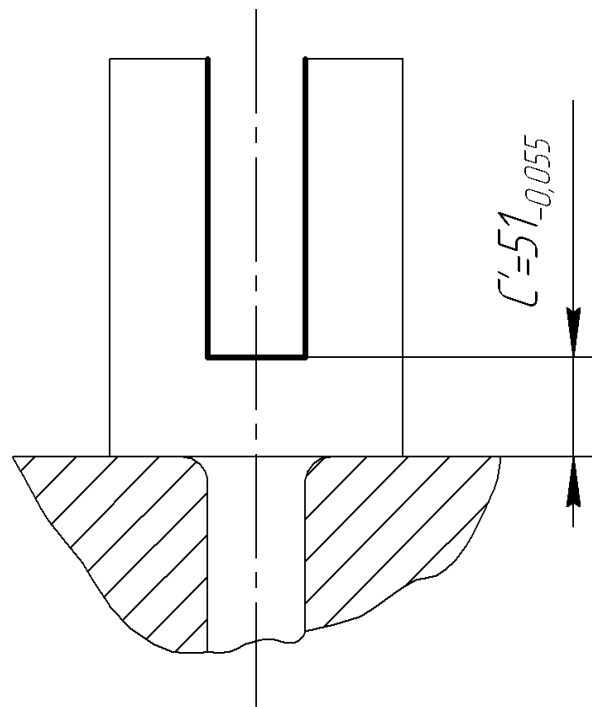


Рисунок 77 – Ескіз оброблення деталі

Технологічна операція виконується в умовах несуміщення **КБ** з **КрБ** і **УБ**. Похибка взаємного розташування **КБ** і **КрБ** ($S_{крк}$) становить величину допуску на розмір, що їх сполучає: $S_{крк} = S_{ук} = \delta B = 0,060$ мм.

Виходячи з умови отримання розміру **B** до виконання даної операції, що забезпечує розмір **C'**, заданий креслярський розмір **A** існує в операції "сам собою", тобто стає замикальною ланкою (технологічним розміром) **A'** в ланцюзі $A' = B - C' = 121 - 51 = 70$ мм.

З основного рівняння розмірного аналізу виходить, що допуск замикальної ланки **A'** дорівнює сумі допусків збільшувальної ланки **B** і зменшувальної ланки **C'** (допуски – величини арифметичні, а відхилення – алгебричні): $\delta A' = \delta B + \delta C' = 0,060 + 0,055 = 0,115$ мм.

Верхнє відхилення замикальної ланки **A'** дорівнює різниці верхнього відхилення ланки **B** і нижнього відхилення ланки **C'**:

$$\Delta^B_{A'} = \Delta^B_B - \Delta^H_{C'} = +0,030 - (-0,055) = +0,085 \text{ мм.}$$

Відповідно нижнє відхилення ланки **A'** дорівнює різниці нижнього відхилення ланки **B** і верхнього відхилення ланки **C'**:

$$\Delta^H_{A'} = \Delta^H_B - \Delta^B_{C'} = -0,030 - 0 = -0,030 \text{ мм.}$$

Порівнявши заданий креслярський розмір **Aз** з очікуваним значенням технологічного розміру **A'**, можна встановити відповідність і вірогідність браку. В результаті отримуємо дійсний (технологічний) розмір $A_\partial = 70^{+0,085}_{-0,030}$ (рисунок 78).

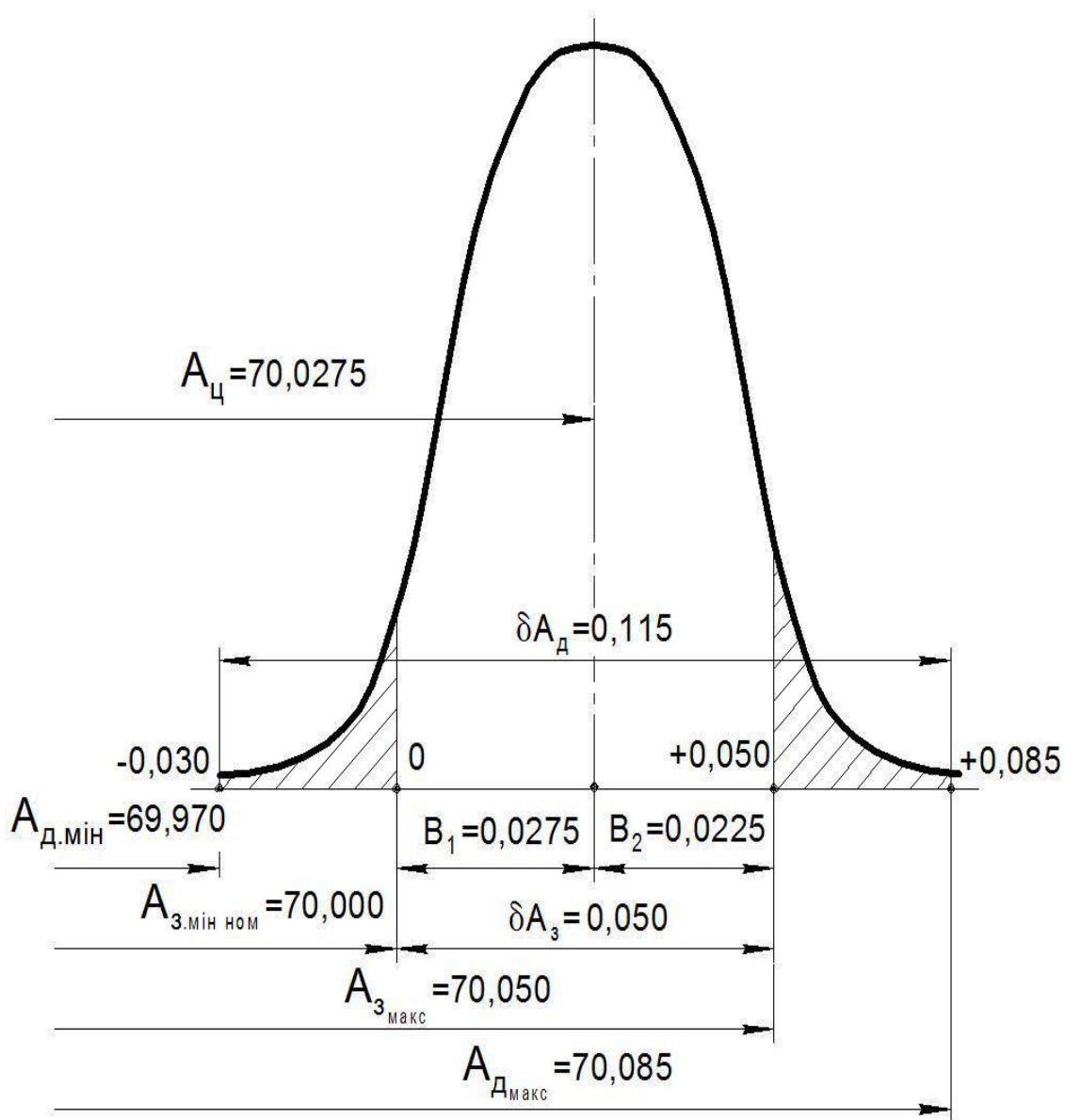


Рисунок 78 – Розрахункова схема нормального закону розподілу

Для нормального закону розподілу відстані від центра групування до меж поля допуску:

$$B_1 = A_{\text{ц}} - A_{\text{з.ном}} = 70,0275 - 70,000 = 0,0275 \text{ мм};$$

$$B_2 = A_{\text{з.макс}} - A_{\text{ц}} = 70,050 - 70,0275 = 0,0225 \text{ мм}.$$

Приймаючи $\delta A_{\sigma} = 6\sigma$, маємо $\sigma = 0,115 : 6 = 0,01917 \text{ мм}$.

Тоді величини параметрів (z_1 і z_2) нормованої функції Лапласа

$$z_1 = B_1 : \sigma = 1,4345; \quad z_2 = B_2 : \sigma = 1,1738.$$

За таблицею значень нормованої функції Лапласа $\Phi(z)$ знаходимо її значення для відповідних z_1 і z_2 :

$$\Phi(z_1) = 0,42396; \quad \Phi(z_2) = 0,37872.$$

$$W = 1 - (\phi(z_1) + \phi(z_2)) = 1 - (0,42396 + 0,37872) = 0,19732 \approx 19,7 \, \%.$$

Згідно з трикутним законом брак

$$W_T = 0,5 \cdot (DE^2 / DF^2 + GH^2 / FH^2) \cdot 100 \% =$$

$$= 0,5 \cdot (0,030^2 / 0,0575^2 + 0,035^2 / 0,0575^2) \cdot 100 \% = 32,1 \ \%.$$

$$W_{PI} = ((DE + GH) / DH) \cdot 100 \% = ((0,030 + 0,035) / 0,115) \cdot 100 \% = 56,5 \ \%.$$

111

Таким чином, при ідентичному взаємному розташуванні меж поля розсіювання очікуваного операційного технологічного розміру відносно заданих меж поля допуску на креслярський розмір, тип і характер розсіювання дійсних розмірів істотно відрізняються за впливом на відсоток некондиційних деталей, що необхідно враховувати при проектуванні технологічної підготовки і налагодження операцій для конкретних умов виробництва авіаційної та ракетно-космічної техніки.

Тема 2. Перерахунки і оптимізації операційних розмірів для забезпечення 100 %-ної придатності деталей, які обробляються в умовах несуміщення конструкторських і технологічних баз

Мета роботи:

1. Набуття навичок розмірного аналізу формоутворюючих технологічних операцій з урахуванням топографії розмірів заданого креслення деталі, ескізів встановлення і оброблення.
2. Набуття навичок розмірних розрахунків у технологічних операціях, що виконуються в умовах несуміщення баз.
3. Набуття навичок перерахунків і оптимізації операційних розмірів для забезпечення 100 %-ної придатності деталей, що обробляються в умовах несуміщення баз.
4. Визначення для заданих варіантів значень параметрів номінального технологічного координуючого розміру C' , допуску і граничних відхилень, виходячи зі 100 %-ної придатності деталей.

Початкові дані: ескіз деталі та ескіз оброблення деталі (рисунки 80 і 81).

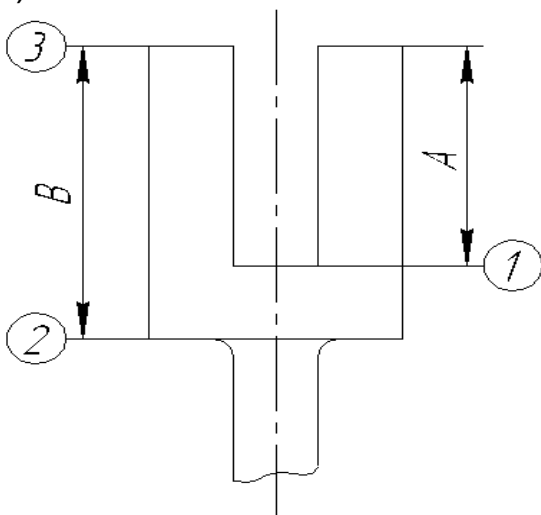


Рисунок 80 – Ескіз деталі

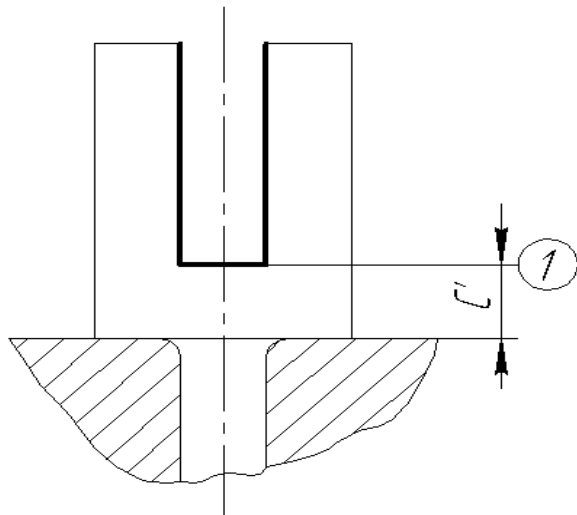


Рисунок 81 – Ескіз оброблення деталі

Зміст і послідовність перерахунків

У заданій операції пропонується в заготовці вилки тяги виконати паз глибиною **A** (див. рисунок 80). Розглядаємо тільки один напрям координуючих розмірів – по осі ординат. Таким чином, на кресленні деталі для дна паза (поверхня 1) поверхня 3 буде конструкторською базою (**КБ**).

Заготовка встановлена в пристрої поверхнею 2, яка забезпечує визначеність положення заготовки у напрямі координуючого технологічного розміру **C'**, що координує положення оброблюваної поверхні 1 відносно необроблюваної в цій операції поверхні 2. Таким чином, поверхня 2 є одночасно координуючою (**КрБ**) і установочною (**УБ**) базою. Отже, технологічна операція виконується в умовах несуміщення баз **КБ** з **УБ** і **КрБ**, тобто **КБ** $\neq$ **УБ** = **КрБ** (див. рисунок 81).

Такий вибір баз примушує зважати на похибки їх положення однієї відносно другої. Поява похибок від несуміщення баз обумовлена не самим процесом оброблення, встановлення або виміру, а виключно вибором баз – в цьому і полягає їх принципова відмінність від усіх інших похибок. Після вибору баз, що не виключає таку похибку, змінити її на цій операції вже неможливо.

Похибка взаємного розташування координуючої і конструкторської баз (**S_{крк}**) становить величину допуску на розмір **B**, що їх сполучає:

$$S_{крк} = S_{ук} = \delta B.$$

Оскільки розмір **B** було отримано в попередній операції, а розмір **C'** забезпечується даною операцією, то креслярський розмір **A'** виходить останнім, причому "сам собою", тобто він стає замикаючою ланкою в ланцюзі

$$A' = B - C'.$$

При цьому розмір **A' = A**, оскільки на операції необхідно забезпечити саме задану точність креслярського розміру. Розмір **B** було витримано раніше. Отже, операційний розмір **C'** є шуканим.

Допуск замикаючої ланки дорівнює сумі допусків складових ланок:

$$\delta A' = \delta B + \delta C'. \quad \text{Звідси } \delta C' = \delta A' - \delta B.$$

1. Якщо величина **$\delta C' > 0$** , то технологічна операція теоретично є можливою;

2. Якщо **$\delta C' = 0$** , то операція теоретично має виконуватися з нульовим допуском на операційний розмір **C'**, що практично є неможливим без браку;

3. Якщо **$\delta C' < 0$** , то це означає, що операція виконуватиметься з браком, величина якого залежатиме від характеру розсіювання розмірів, величини партії деталей, що обробляються з урахуванням конкретного

верстата, різального інструмента і особливостей їх налагодження на операцію.

Для випадку $\delta C' > 0$ граничні відхилення розміру C' ($\Delta^H_{C'}$ і $\Delta^B_{C'}$) визначаються з основного рівняння розмірного аналізу

$$\Delta^B_{A'} = \Delta^B_{B'} - \Delta^H_{C'}; \quad \Delta^H_{A'} = \Delta^H_{B'} - \Delta^B_{C'}; \quad \text{де } \Delta^B_{A'} = \Delta^B_A, \quad \Delta^H_{A'} = \Delta^H_A.$$

Для випадку $\delta C' \leq 0$ необхідно модифікувати значення $\delta B'$ таким чином, щоб точності розмірів B' і C' з урахуванням значень їх номінальних розмірів були досить близькими. Це означає, що допуск на розмір B' має бути зменшеним порівняно з тим, яким він міг бути, якби технологічна операція формування паза виконувалася в умовах суміщення баз, тобто

$$KB = UB = KpB.$$

Наприклад, при значеннях $B = 121 \pm 0,030$, $A = 70^{+0,050}$ необхідно в заготовці вилки тяги (рисунки 82 і 83) виконати паз глибиною $A = 70^{+0,050}$.

Технологічна операція проводиться в умовах несуміщення KB з KpB і UB . Похибка взаємного розташування KpB і KB (S_{KpK}) становить величину допуску на розмір, що їх сполучає:

$$S_{KpK} = S_{yK} = \delta B = 0,060 \text{ мм.}$$

Розмір $B = 121 \pm 0,030$ було витримано раніше виконання даної операції, а розмір C' забезпечується цією операцією. Креслярський розмір A' одержують останнім і він стає замикаючою ланкою (і технологічним розміром) в ланцюзі

$$A' = B - C', \text{ звідки } C' = B - A' = 121 \pm 0,030 - 70^{+0,050} = 51^{+0,030}_{-0,080}.$$

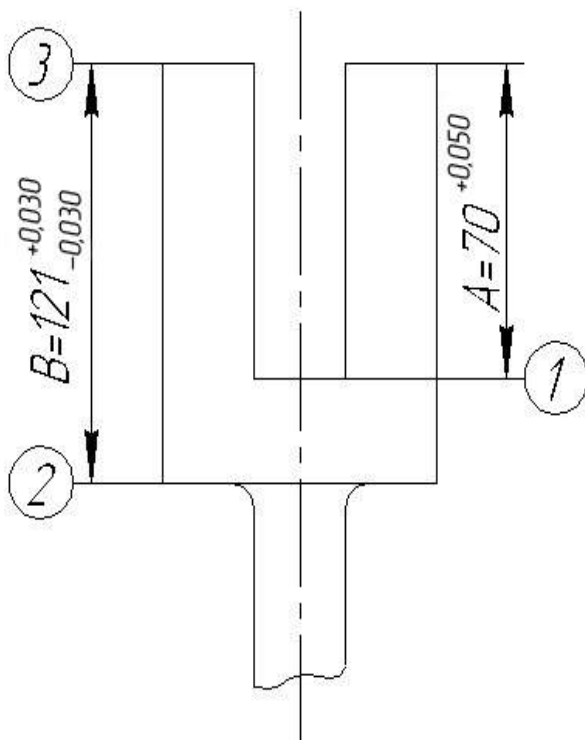


Рисунок 82 – Ескіз деталі

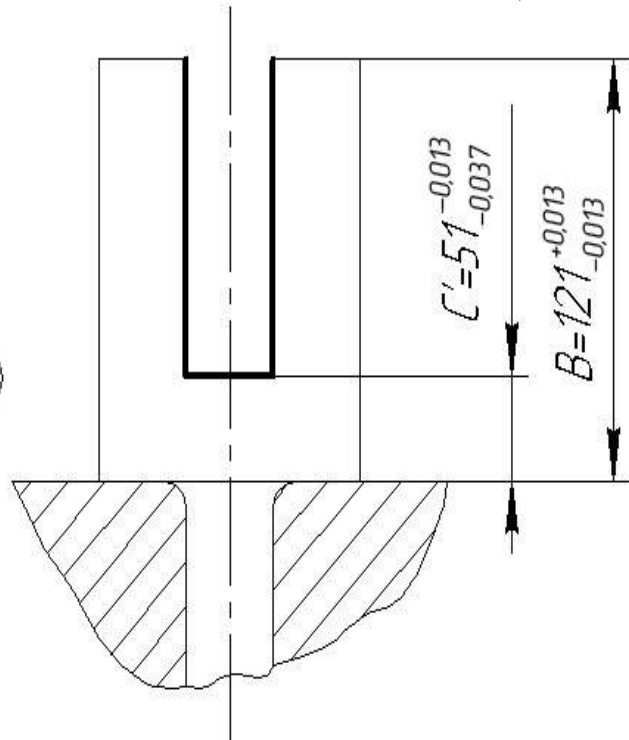


Рисунок 83 – Ескіз оброблення деталі

При цьому розмір $A' = A$, оскільки в технологічній операції необхідно забезпечити точність креслярського розміру.

Розмір B було витримано раніше в попередній операції. Отже, операційний розмір C' є шуканим. З основного рівняння розмірного аналізу маємо $\delta A' = \delta B + \delta C'$, звідки

$$\delta C' = \delta A' - \delta B = 0,050 - 0,060 = -0,010 < 0.$$

Отримали $\delta C' < 0$; а це означає, що точнісні можливості робочого місця вичерпані, і операція виконуватиметься з браком, величина якого залежатиме від характеру розсіювання розмірів, величини партії деталей, що обробляються з урахуванням конкретного устаткування, різального інструмента і особливостей їх налагодження.

Оскільки $\delta C' < 0$, то необхідно модифікувати значення δB таким чином, щоб точність розмірів B' і C' була досить близькою. Це означає, що допуск на розмір B' має бути зменшеним порівняно з тим, яким би він міг бути, якби технологічна операція формування паза виконувалася в умовах суміщення баз:

$$KB = UB = KpB.$$

Приймаємо, наприклад, $\delta B' = 0,026$ мм, тобто $B' = 121 \pm 0,013$ мм. При цьому необхідно дотримуватися формату заданого розміру B . Тоді

$$\delta C' = \delta A' - \delta B' = 0,050 - 0,026 = 0,024 \text{ мм, тобто } \delta C' > 0.$$

Визначаємо граничні відхилення розміру C' ($\Delta^H_{C'}$ і $\Delta^B_{C'}$), використовуючи основне рівняння розмірного аналізу:

$$\begin{aligned} \Delta^B_{A'} &= \Delta^B_B - \Delta^H_{C'}, \text{ звідки } \Delta^H_{C'} = \Delta^B_{B'} - \Delta^B_{A'} = +0,013 - (+0,050) = -0,037 \text{ мм;} \\ \Delta^H_{A'} &= \Delta^H_B - \Delta^B_{C'}, \text{ тоді } \Delta^B_{C'} = \Delta^H_{B'} - \Delta^H_{A'} = -0,013 - 0 = -0,013 \text{ мм,} \end{aligned}$$

де $\Delta^B_{A'}$ – верхнє відхилення модифікованого технологічного розміру A' ;
 $\Delta^H_{A'}$ – нижнє відхилення модифікованого технологічного розміру A' ;
 Δ^B_B – верхнє відхилення модифікованого технологічного розміру B' ;
 Δ^H_B – нижнє відхилення модифікованого технологічного розміру B' ;
 $\Delta^B_{C'}$ – верхнє відхилення модифікованого технологічного розміру C' ;
 $\Delta^H_{C'}$ – нижнє відхилення модифікованого технологічного розміру C' .

$$\text{Оптимізований технологічний розмір } C' = 51_{-0,037}^{-0,013} \text{ мм.}$$

$$\text{Перевірка: } A' = B' - C' = 121 \pm 0,013 - 51_{-0,037}^{-0,013} = 70^{+0,050} = A.$$

Таким чином, зменшення допуску на координуючий розмір ускладнює операцію, переводить її в розряд більш точних з усіма відповідними наслідками. Природно, що, маючи на увазі зниження вартості виготовлення деталі, розробляючи кожну операцію процесу, прагнуть передусім до суміщення баз.

2 АНАЛІЗ, РОЗРАХУНКИ І ОПТИМІЗАЦІЯ БАЗУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ У ФОРМОУТВОРЮЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОПЕРАЦІЯХ

2.1. Загальні відомості про базування

Задачі взаємної орієнтації деталей і складальних одиниць у машинах при складанні розв'язуються за допомогою базування.

Базуванням називається надання заготовці чи виробу необхідного положення щодо вибраної системи координат (ДСТУ 2232-93).

Для виконання технологічної операції потрібно не тільки здійснювати базування заготовки щодо пристрою, але й забезпечувати її нерухомість, що гарантує збереження незмінної орієнтації заготовки щодо баз у процесі оброблення. Отже, при встановленні заготовки в пристрої виконують два завдання: визначають орієнтацію, здійснювану базуванням, і встановлюють нерухомість, що досягається закріпленням заготовок.

Незважаючи на розходження завдань, їх виконують практично однаковим шляхом: накладанням певних обмежень (зв'язків). Щоб виключити можливість переміщення твердого тіла в просторі, необхідно позбавити його шести ступенів вільності: трьох поступальних рухів уздовж осей координат і трьох обертальних рухів навколо цих осей. Це досягається накладанням зв'язків, що обмежують рух заготовок щодо базових поверхонь пристрою. Відповідно до характеру обмежень розрізняють позиційні (геометричні) і кінематичні зв'язки, що обмежують переміщення і швидкості руху відповідно. Щоб зорієнтувати призматичне тіло (рисунок 84) в просторі, необхідно його з'єднати з плоскою прямокутною системою координат xOy недеформованими стрижнями (зв'язками) a_1 , a_2 , a_3 , зберігаючи при цьому можливість переміщення призматичного тіла вздовж осей Ox і Oy .

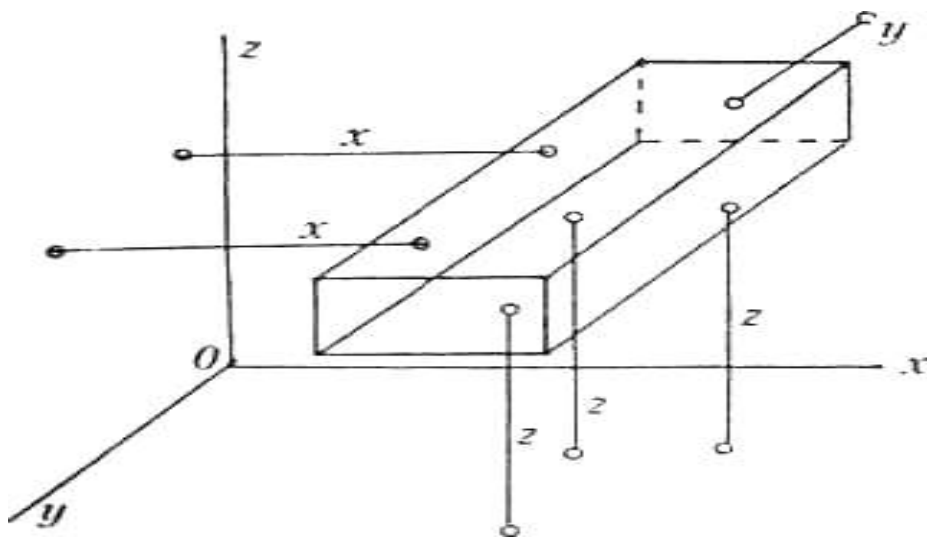


Рисунок 84 – Орієнтування призматичного тіла в просторі

В результаті призматичне тіло позбавляється трьох степенів вільності: руху вздовж осі Oz й обертального руху навколо осей Ox і Oy . Для позбавлення тіла можливості переміщатися вздовж осі Ox і обертання навколо осі Oz необхідно з'єднати бічну поверхню двома зв'язками з площиною yOz . Для повної орієнтації тіла необхідно позбавити його шостого ступеня вільності, тобто можливості переміщення уздовж осі Oy . Для цього поверхню необхідно з'єднати одним зв'язком із площиною xOz .

Поверхні заготовок, які використовуються при базуванні, називають базами. Залежно від числа степенів вільності, що відбираються у призматичній заготовці, розрізняють установочну базу, що знаходиться в контакті з трьома опорними точками (зв'язками), та напрямну, що знаходиться в контакті з двома опорними точками (зв'язками які направляють базу), і опорну базу, що має контакт з однією опорною точкою (рисунок 84). За установочну базу приймають поверхню з найбільшими розмірами, за напрямну – саму довгу поверхню.

Для орієнтації циліндричного вала ($L > D$) в просторі необхідно циліндричну поверхню з'єднати двома двосторонніми зв'язками – координатами z з площиною xOy і двома зв'язками – координатами x з площиною yOz (рисунок 85).

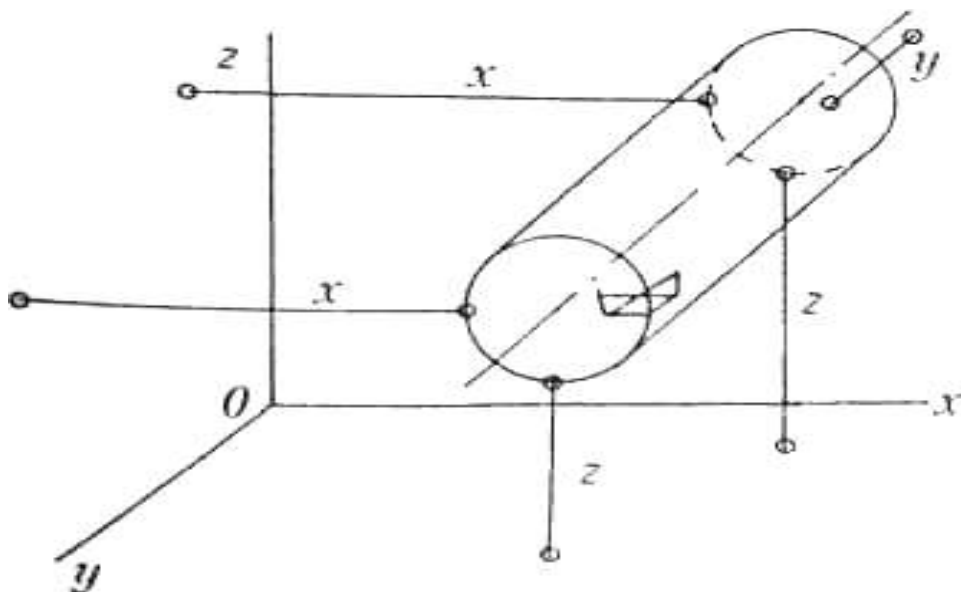


Рисунок 85 – Орієнтування циліндричного тіла

База, що має чотири опорні точки, називається подвійною напрямною базою. П'ята опорна точка розташовується на торці вала і називається опорною базою. Шпонкова канавка є шостою опорною точкою.

При обробленні заготовок на верстатах і їхньому встановленні в пристрої в багатьох випадках немає необхідності в орієнтації заготовки з використанням усього комплексу баз, що контактують із шістьма опорними точками.

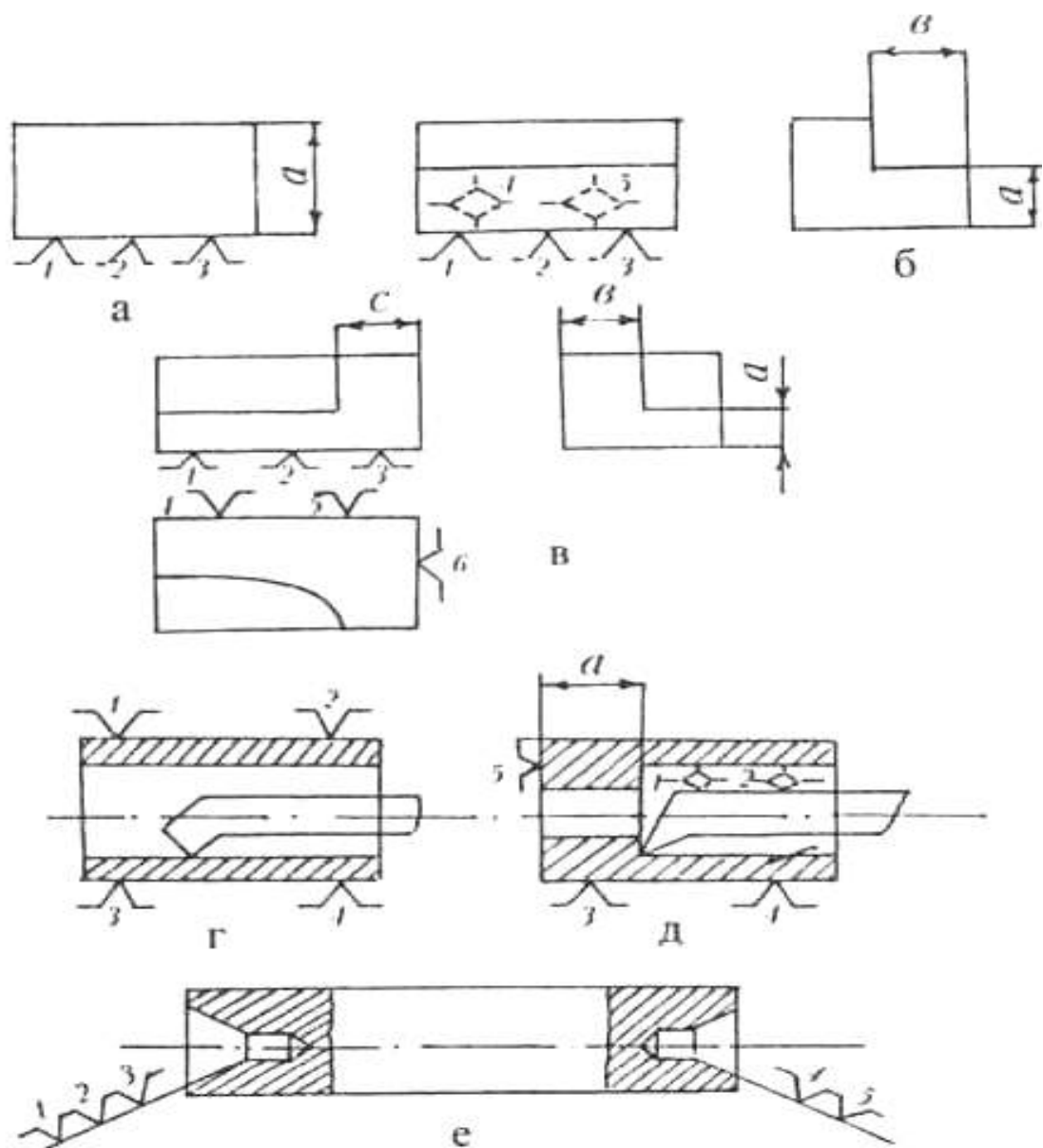


Рисунок 86 – Теоретичні схеми базування однієї (а, е), двох (б, д, е) і трьох (в) баз

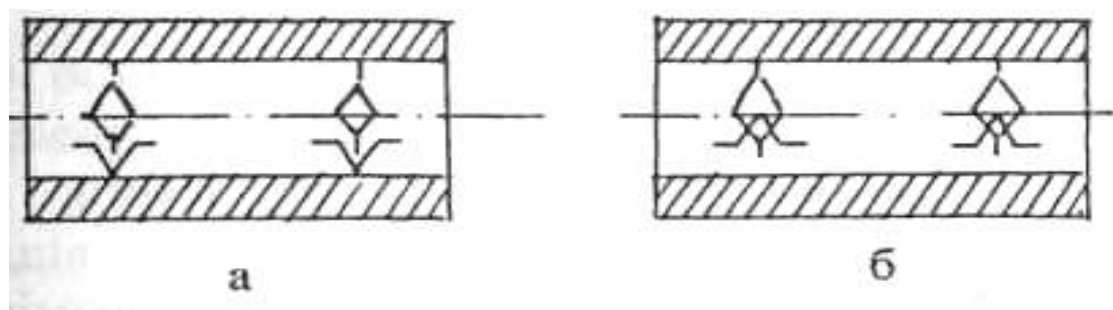


Рисунок 87 – Теоретичні схеми базування втулки на твердій (а) і розтискній (б) оправках

Наприклад, при обробленні площини призматичної заготовки (рисунок 86, а) потрібно забезпечити одержання розміру **a**. Тут необхідне орієнтування здійснюється тільки однією установочною базою. Якщо на заготовці потрібно одержати два розміри (наприклад, **a** і **b**) (рисунок 86, б), то виникає необхідність її орієнтації за допомогою установочної і прямої баз. Якщо на заготовці потрібно забезпечити одержання трьох розмірів (наприклад, **a**, **b**, **c**, рисунок 86, в), то для орієнтації заготовки необхідно використовувати весь комплект із трьох баз.

При наскрізному свердлінні або розточуванні отвору заготовки, закріпленої в патроні верстата, використовується тільки одна подвійна пряма база (рисунок 86, г). При розточуванні східчастого отвору, коли потрібно забезпечити лінійний розмір **a**, необхідно використати дві бази: подвійну пряму і опорну (рисунок 86, д).

При встановленні вала в центрах верстата базування здійснюється по двох центрових отворах.

Передній центр відбирає три степеня вільності, а задній - два (рисунок 86, е). Шостий степінь вільності передбачає можливість обертання шпинделя навколо власної осі. Вона необхідна для здійснення оброблення.

Слід зазначити, що хомутик, призначений для передачі обертального моменту оброблюваної деталі, не є шостою опорною точкою, тому що він не бере участі у базуванні, тобто не орієнтує положення заготовки.

Таким чином, залежно від розв'язання технологічної задачі при базуванні заготовки на верстаті або пристрої можуть бути використані одна, дві чи три бази, що мають три, чотири, п'ять чи шість опорних точок. При проектуванні технологічних операцій на операційному ескізі зображується так звана "теоретична схема базування". Теоретична схема базування являє собою схему розташування на технологічних базах опорних точок, що символізують позиційні зв'язки заготовки із системою координат. Теоретична схема базування є визначеною схемою-інструкцією конструкторів для розроблення пристрою.

Наприклад, зображена схема базування втулки (рисунок 87, а) дозволяє оброблення на твердій циліндричній оправці, а схема базування (рисунок 87, б) – на розтискній цанговій або гідропластовій оправках (беззасорне центрування).

На операційних ескізах зображення декількох однойменних опорних точок може бути замінено одним символом із вказівкою праворуч від нього кількості однойменних опор.

Комплект базових поверхонь заготовки з опорними точками забезпечується створенням необхідних затискних пристроїв. Закріплення позбавляє заготовку всіх шести степенів вільності і ґрунтується на використанні фрикційних зв'язків, реалізованих у затискних пристроях з

різноманітними джерелами прикладання сили (механічними, гідравлічними, пневматичними, магнітними, вакуумними і т. п.).

2.2 Прикладна теорія базування

Базою називається поверхня, лінія або точка деталі, стосовно якої орієнтуються інші деталі чи інші поверхні даної заготовки при проектуванні, складанні або механічному обробленні (ДСТУ 2232-93). За призначенням бази поділяються на конструкторські, вимірювальні і технологічні.

Конструкторською базою називається база, яка використовується для визначення положення деталі або складальної одиниці у виробі. Конструкторські бази поділяються на основні й допоміжні. Основною називається конструкторська база, що належить даній деталі або складальній одиниці, яка використовується для визначення її положення у виробі. Допоміжною називається конструкторська база, що використовується для приєднання до неї інших деталей або складальних одиниць. Наприклад, на рисунку 88 показано вал, що має дві шийки під підшипники **А** і шийку для встановлення зубчастого колеса **Б**. Основною конструкторською базою тут є дві шийки під підшипники **А**, тому що вони визначають положення вала в корпусі.

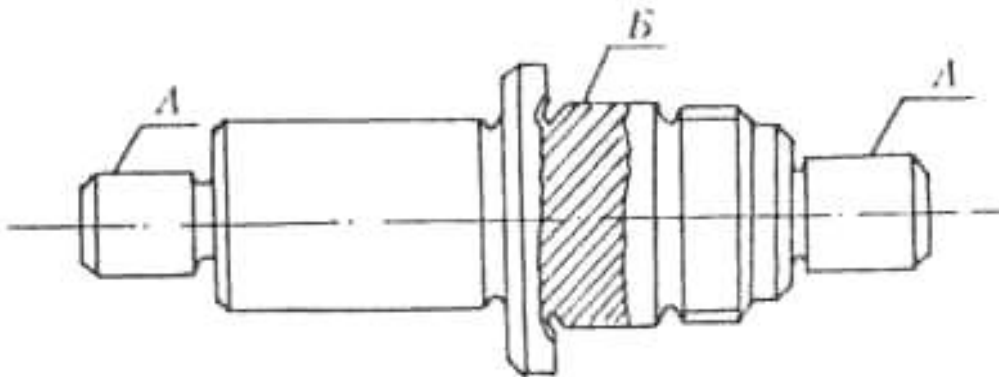


Рисунок 88 – Конструкторські бази: основна **А** і допоміжна **Б**

Допоміжною конструкторською базою є шийка під зубчасте колесо. Вона визначає положення на валу зубчастого колеса.

Вимірювальною базою називається поверхня, лінія або точка, від якої проводиться відлік виконуваних розмірів при обробленні або вимірюванні, а також при перевірці взаємного розташування поверхонь деталей (паралельності, співвісності, перпендикулярності та інше).

Технологічна база – це база, яка використовується для визначення положення заготовки в процесі виготовлення або ремонту.

Базування застосовується на всіх стадіях створення виробів: при конструюванні, виготовленні, вимірюванні і складанні машини. Схематично класифікацію баз можна подати у вигляді схеми (рисунок 89).

Якщо конфігурація заготовок не дає можливості вибрати технологічну базу, що дозволяє зручно і надійно орієнтувати і закріплювати заготовку в пристрої, то застосовують створення штучних технологічних баз. До категорії штучних технологічних баз належать такі технологічні бази, які з метою підвищення точності базування оброблюваної заготовки в пристрої попередньо обробляються з більш високою точністю, чим це потрібно для готового виробу за кресленням.

Типовим прикладом штучних технологічних баз є центрові отвори, що використовуються для встановлення валів на верстаті. Якщо центрові отвори є конструктивно необхідними для роботи елементів вузла, то в цьому випадку вони не є штучними базами. Якщо за умовами експлуатації вала центрові отвори є неприпустимими, то після оброблення вала їх зрізують.

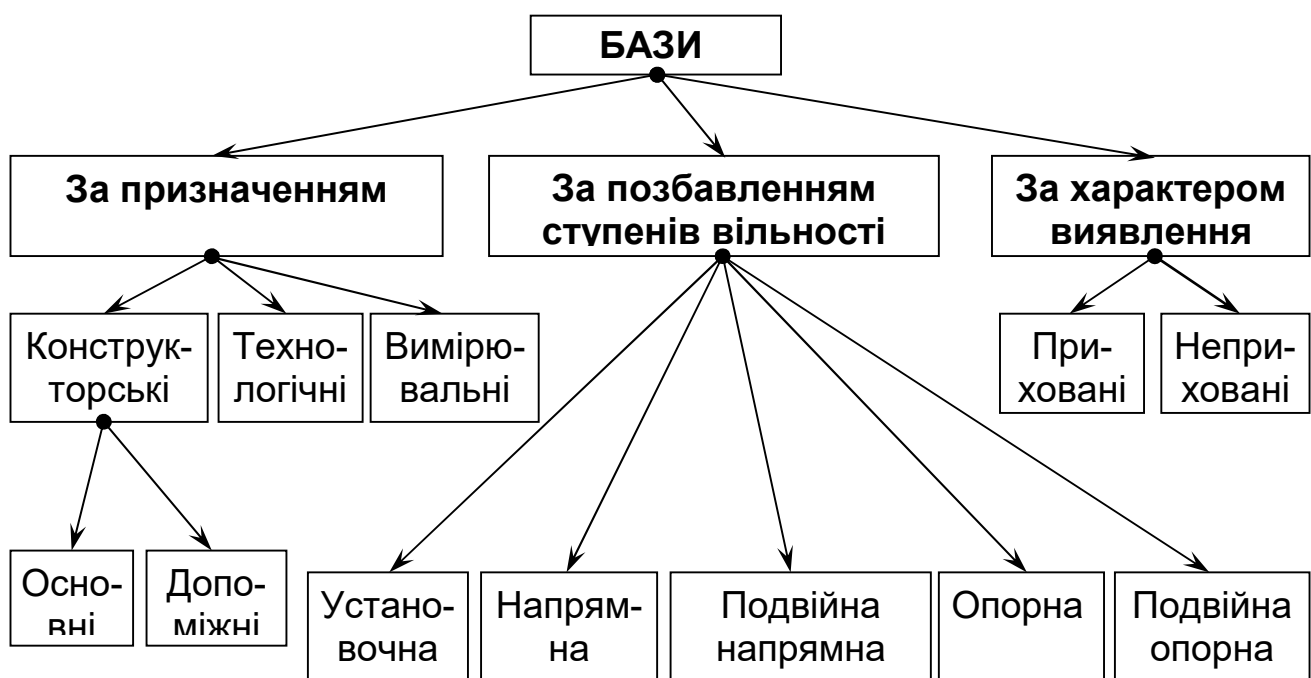


Рисунок 89 – Класифікація баз

При обробленні деталей складної форми, наприклад, газотурбінних лопаток, як технологічні бази використовують спеціально створені приливи, що після механічної оброблення пера лопатки відрізаються. Наявність шести опорних точок в пристрої дозволяє зорієнтувати заготовку в просторі. Однак при встановленні деталей малої твердості з великими розмірами базування по шести точках не забезпечує необхідну точність оброблення. У цих випадках технолог застосовує додаткові опорні поверхні. Причому додаткові опорні поверхні можуть бути природними, тобто отриманими в процесі оброблення відповідно до вимог креслення, і штучними, створеними спеціально для встановлення і закріплення.

Як приклад можна привести оброблення на токарному верстаті валів великого подовження. Для запобігання прогину вала застосовують спеціальні люнети для підтримки.

По ходу технологічного процесу технологічні бази розділяються на чорнові (попередні), проміжні й остаточні. Чорнові бази застосовують на перших операціях оброблення. Вони служать для створення проміжних технологічних баз, а часто й остаточних. На автоматичних лініях у пристроях-супутниках, на верстатах ЧПК, багатоопераційних верстатах оброблення може бути закінчено при одному встановленні заготовки.

Чорнова технологічна база може бути використана тільки для одного встановлення. Повторне її використання порушує взаємне розташування оброблюваних поверхонь.

Теорією базування називається частина вчення про точність, яка займається взаємними зв'язками поверхонь деталей.

Обробляючи поверхню, у загальних випадках витримують дві характеристики точності і, відповідно, два види розмірів: розмір самої поверхні і координуючий розмір. Перший зв'язує між собою елементи оброблюваної поверхні, що забезпечується обраним методом оброблення і до задач про базування відношення не має. Другий зв'язує оброблювану поверхню з технологічною базою, що належить до необроблюваної (обробленої раніше) частини деталі, і забезпечується завдяки певному установленню деталі в пристрої. В установленні беруть участь: з боку деталі – установочна база, з боку пристрою – установочна поверхня.

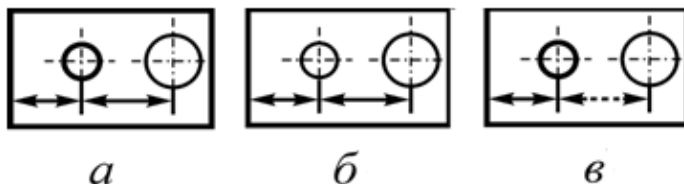


Рисунок 90 - Координація поверхонь:

а – неприпустима в операційній карті;

б – звичайна у кресленні;

в – одна з можливих в операційній карті

В операційній карті не допускають більше одного координуючого розміру (однієї координуючої бази) в одному напрямку координації поверхні (рисунок 90, а), інакше виконання операції стає неможливим. У робочому кресленні, оскільки воно зображує деталь у готовому

вигляді, обмеження кількості конструкторських баз стосовно однієї поверхні не існує (рисунок 90, б). Зі сказаного випливає, що, обробляючи поверхню, зв'язану в кресленні з декількома базами, лише одну з них можна використовувати як координуючу базу (рисунок 90, в). При цьому в операції мають бути забезпечені такі умови, щоб необхідне положення поверхні щодо інших баз (на схемі – розмір, показаний пунктиром) виходило «само собою». Задачі, що виникають при зіставленні різних умов і забезпеченні найкращих умов шляхом доцільного вибору послідовності операцій у технологічному процесі, належать до теорії базувань.

Установочна і вимірювальна бази обов'язково повинні бути «реальними», тоді як до конструкторських і координуючих баз така вимога не ставиться. Це означає, що не всяку конструкторську базу можна використовувати як базу установочну чи вимірювальну. Задачі про взаємозв'язки баз, про доцільний вибір їх також відносяться до теорії базування.

Підвищення ступеня концентрації операцій у технологічному процесі з метою зменшення кількості потрібних пристроїв, використання високопродуктивних автоматичних ліній, багатошпindelних або верстатів з ЧПК, також буває зв'язано з задачами, що належать до теорії базування. Наприклад, треба обробити в одній операції поверхні 1 і 2, тим самим уникнути необхідності застосування двох пристроїв, є неможливим, тому що деталь неможна встановити з потрібною для цього точністю (рисунок 91). Створення такої можливості пов'язано з визначенням величини необхідного підвищення точності взаємного розташування баз (поверхонь 3 і 4), з вибором доцільного способу встановлення деталі.

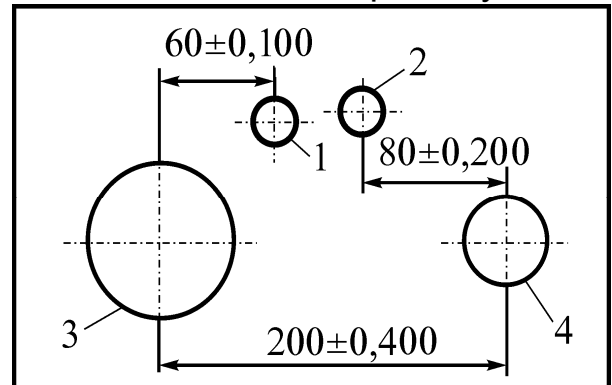


Рисунок 91 – Приклад неможливості оброблення двох поверхонь в одній операції (за допомогою одного пристрою).

До теорії базування відносяться також усі задачі з так званого розподілу (розполовинювання) похибок, до якого часто вдаються при установленні деталей. Узагалі під розподілом похибок у взаємному розташуванні двох елементів **A** і **B** розуміють створення таких умов, у яких вплив цієї похибки на положення **A** і **B** щодо третього елемента **C** поділяється в якому-небудь необхідному відношенні, зокрема, нарівному розполовинюванню. Розподіл похибок, з якими деталь надходить на операцію, буває сприятливим не тільки для спрощення досягнення заданої точності оброблення, але і для зменшення нерівномірності припусків, що знімаються при обробленні. Наприклад, допуск **a** на взаємне розташування поверхонь **A** і **B** буде цілком впливати на коливання величини дійсного припуску при операції 1 і зовсім не буде позначатися в операції 2 (рисунок 92). При розполовинюванні (схема 3) його вплив розподілиться на обидві операції, тому в кожній з них він

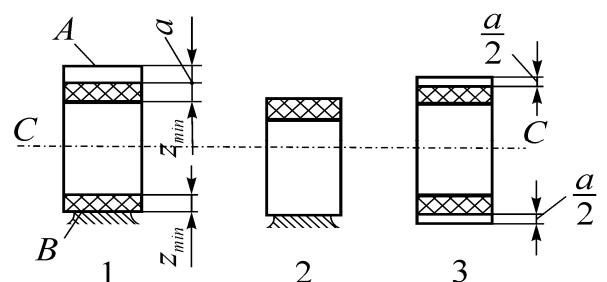


Рисунок 92 – Вплив розполовинювання допуску **a** (схема 3) на величину дійсного припуску

буде меншим, ніж на одну операцію.

Загальне значення задач, що належать до теорії базування, полягає в тому, що правильне їхнє розв'язання веде до підвищення економічності технологічного процесу. Більшість цих задач групується навколо вибору баз, способів установки деталей і способів взаємної координації елементів пристроїв, тому всі вони якоюсь мірою взаємозалежні.

На сьогодні теорія базування внаслідок її складності розроблена недостатньо – у ній ще дуже мало узагальнень. У практичній роботі вона виступає у вигляді деяких рекомендацій і загальних (до деякої міри) правил, керуючись якими, спрощують досягнення заданої точності взаємного розташування поверхонь деталі при автоматичному дотримуванні цієї точності. Найбільш загальним і важливим з таких правил є так званий принцип суміщення баз.

2.3 Принцип суміщення баз

2.3.1 Основні терміни, поняття і визначення

Принципом суміщення баз керуються при проектуванні кожної окремої операції і при призначенні послідовності операцій у ході процесу. Дотримання його при обробленні, що виконується без вивірення деталі і пробних проходів і промірів, спрощує досягнення необхідної точності положення поверхні, а при контролі положення обробленої поверхні – вимірювання деталей. У загальному випадку поверхні деталі проходять кілька етапів оброблення. Принцип суміщення баз справедливий стосовно будь-якого етапу технологічного процесу, але, природно, більш важливий для операцій точних, а не грубих. Тому покажемо його стосовно до фінішного етапу процесу. Це дозволить також, описуючи принцип, зіставляти операційний ескіз з робочим кресленням деталі, а не операційні ескізи один з одним, що менш зручно в чисто термінологічному відношенні.

Розглянемо суть цього принципу.

Описані раніше чотири види баз відповідають чотирьом положенням однієї й тієї ж поверхні, що фіксуються (або здатні бути зафіксованими – це залежить від того, як докладно розробляють операції процесу, тобто використовується термін ступінь деталізації проектування операції) у документах, за якими виготовляють деталь:

конструкторська база (КБ) – креслення деталі – положення поверхні, задане в кресленні;

координуюча база (КрБ) – ескіз оброблення (операційна карта) – положення поверхні, що витримується при її формоутворенні;

установочна база (УБ) – ескіз установлення (операційна карта) – положення деталі, при якому витримується положення поверхні, задане в ескізі оброблення;

вимірювальна база (ВБ) – ескіз контролю (карта контролю) – положення поверхні, контрольоване після її формоутворення.

У самому загальному вигляді принцип суміщення баз стосовно якої-небудь поверхні полягає в тому, щоб **використовувати як конструкторську, координуючу, установочну і вимірювальну бази стосовно цієї поверхні той самий елемент деталі.**

Якщо розглядати всю роботу зі створення деталі, починаючи від креслення і закінчуючи контролем готової деталі, то принцип суміщення баз на різних стадіях цієї роботи з'являється в різній формі, тому що рішення, прийняті на попередніх стадіях, визначають наступні рішення.

Першим на шляху створення деталі є робоче креслення деталі і, отже, усі конструкторські бази деталі. Від того, як будуть взаємно координовані поверхні деталі в кресленні – якими будуть конструкторські бази – залежить можливість використання їх як баз технологічних. Тому *для конструктора деталі* принцип суміщення баз постає у своїй самій загальній і повній формі.

Для *технолога* конструкторська база завжди є заданою, тому що він працює використовуючи креслення деталі. Для нього цей принцип полягає в тому, щоб використовувати як технологічні бази (координуючу, установочну і вимірювальну) конструкторську базу.

Призначаючи в операційній карті установочну базу, технолог вдається до області роботи конструктора верстатних пристроїв. Для *конструктора пристрою* цей же принцип полягає у тому, щоб застосовувати як установочну базу координуючу базу.

З позиції конструктора спеціального вимірювального приладу і з *позицій контролера*, що перевіряє положення поверхні після її формоутворення, цей принцип полягає в тому, щоб використовувати її як вимірювальну базу:

а) координуючу базу, якщо контролюється положення поверхні, задане координуючим розміром, тобто контроль є проміжним;

б) конструкторську базу, якщо контроль є остаточним і виконується за кресленням деталі.

2.3.2 Принцип суміщення баз при розробленні операції

На рисунку 93 показано приклади суміщення (вгорі) і несуміщення (внизу) всіх чотирьох баз по відношенню поверхні **П** деталі, креслення якої (схему) зображено ліворуч (передбачається, що операція є остаточною і останньою в процесі). Конструкторською базою стосовно поверхні **П** є поверхня **К**, тому що саме відносно неї координовано в робочому кресленні положення поверхні **П** (розмір **А**).

Розроблення операції, показаної вгорі, цілком відповідає принципу суміщення баз і є найкращою з можливих. Воно характерне тим, що конструкторська база **К** використана як координуюча база для

координації оброблюваної поверхні, як установочна база – при установленні деталі і як вимірювальна база – для контролю положення поверхні **П** після оброблення.

Розроблення операції, показаної внизу, ілюструє повне порушення принципу суміщення баз і є найгіршим з можливих. Воно характерне тим, що жодна з баз не суміщена з іншою.

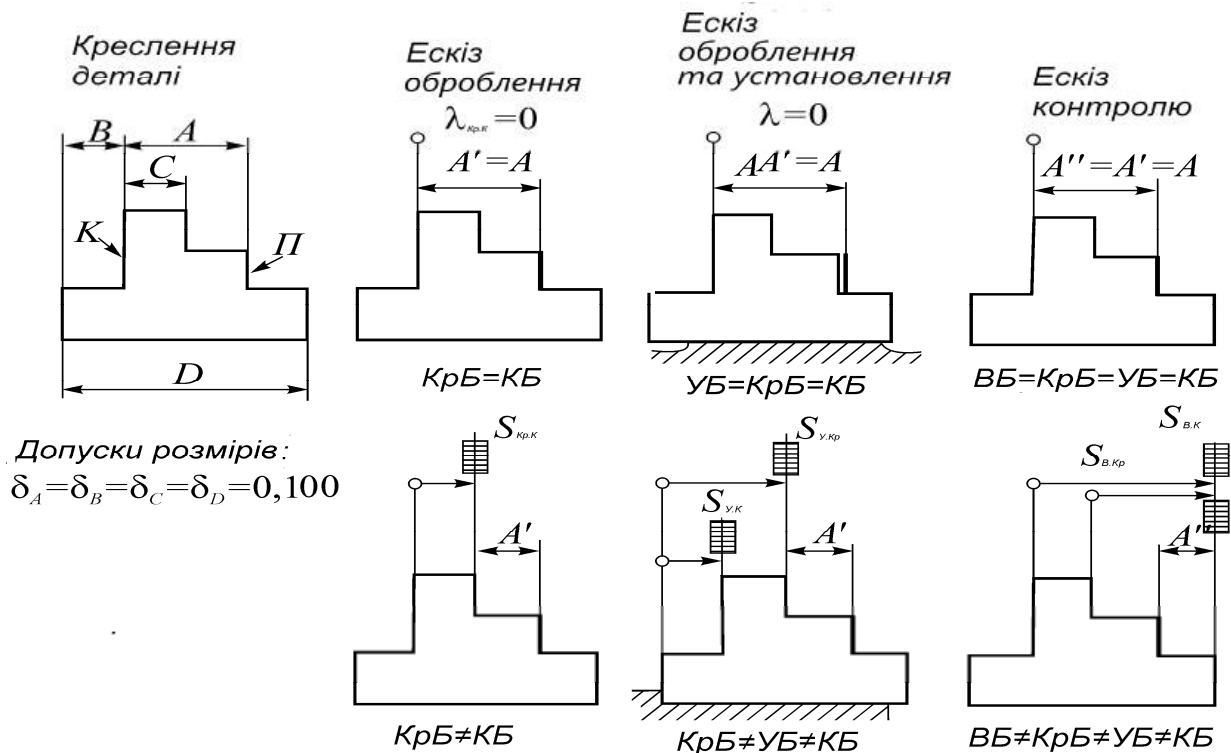


Рисунок 93 – Суміщення (вгорі) і несуміщення (внизу) всіх чотирьох баз:

KB – конструкторська; KpB – координуюча; UB – установочна;

VB – вимірювальна

Використання як баз стосовно однієї і тієї ж поверхні різних елементів деталі змушує зважати на похибки взаємного розташування цих елементів – баз. Так, зіставляючи креслення і схеми, показані внизу (див. рисунок 93), можна бачити, що зробленим вибором технологічних баз визначено такі величини похибок взаємного розташування баз:

1) вибором координуючої бази:

KpB і KB – похибка $s_{кр.к} = \delta_C = 0,100$ мм;

2) вибором установочної бази:

UB і KB – похибка $s_{у.к} = \delta_B = 0,100$ мм;

UB і KpB – похибка $s_{у.кр} = \delta_B + \delta_C = 0,200$ мм;

3) вибором вимірювальної бази:

VB і KB – похибка $s_{в.к} = \delta_D + \delta_B = 0,200$ мм;

VB і KpB – похибка $s_{в.кр} = \delta_D + \delta_C = 0,300$ мм.

Похибки взаємного розташування баз є виробничими і вони обумовлюють виникнення похибок від несуміщення баз, що відіграють роль складових похибок оброблення (при обробленні) або похибок вимірювання (при контролі).

Дуже важливо, що появу похибок від несуміщення баз обумовлено не самим процесом оброблення, чи установленням, вимірюванням, а тільки вибором баз. У цьому полягає їх принципова відмінність від усіх інших похибок. Після вибору баз, що не виключили таку похибку, змінити її величину в ході даної операції вже неможливо. Це зобов'язує компенсувати таку похибку підвищенням точності самого процесу. У цьому сенсі похибки від несуміщення баз завжди є шкідливими, як би паразитичними, і тому особливо небажаними.

Розглянемо наслідки різних видів несуміщення баз при обробленні поверхні і її контролі.

Несуміщення баз при обробленні. Автоматичне одержання операційних розмірів на попередньо налагодженому обладнанні виключає необхідність вимірювання їх при виконанні операції. Тому при обробленні мають значення конструкторська, координуюча і установочна бази.

Конструкторська база і креслярський розмір є підставою, на якій будується операція. Їх в операційній карті не вказують, але технолог керується ними. Для нього креслярський розмір відіграє роль розпорядження, яке він зобов'язаний виконати. Виконуючи це «розпорядження», технолог проставляє в карті координуючий розмір, тобто вказує координуючу базу і величину розміру. Ця вказівка, у свою чергу, є обов'язковим розпорядженням для виконавця операції.

Якби раніше ми не обумовили, що розглядаємо як приклад останню операцію останнього етапу процесу, то зараз довелося б сказати не «креслярський розмір», а «креслярський розмір з урахуванням припусків по цьому розмірі, передбачених на подальше оброблення, як самої бази, так і поверхні, оброблюваної в даній операції». Багато подібних застережень знадобилося б і далі. Якби взяти приклад не з плоскими поверхнями, а з циліндричними, то при розмірах, що з'єднують осі, можна було про припуски не згадувати, але схеми були б менш наочними.

Для автоматичного одержання координуючого розміру необхідна установочна база. Вказуючи її в операційній карті, технолог тим самим визначає положення, що займе координуюча база в робочій зоні верстата.

Результат не суміщення баз стосовно якої-небудь оброблюваної поверхні (наприклад, **П** на рисунку 93) завжди той самий: зменшення допуску на координуючий розмір порівняно з тим, яким він може бути при суміщенні цих баз. До цього можуть бути дві різні причини в залежності від вигляду несуміщення баз:

1) необхідність уникнути браку по креслярському розміру **А**, якщо координуюча база не суміщена з конструкторською базою (рисунок 94, а);

2) необхідність уникнути браку по координуючому розміру A , якщо координуюча база не суміщена з установочною (рисунок 94, б).

Несуміщення всіх трьох баз (рисунок 94, в) являє собою одночасно два зазначених вище основних види несуміщення баз.

Несуміщення координуючої бази з конструкторською – це перший вид несуміщення баз (рисунок 94, а) – викликає в креслярському розмірі A похибку $\lambda_{кр.к}$ від несуміщення цих баз. Тому щоб уникнути браку по креслярському розміру A допуск $\delta_{A'}$ на координуючий розмір A' має бути менше допуску δ_A на величину $\lambda_{кр.к}$, тобто треба призначати $\delta_{A'} \leq \delta_A - \lambda_{кр.к}$.

Для деталі, схема якої показана на рисунку 93, допуск $\delta_A = 0,100$ мм. При координуючій базі, згідно з рисунком 94, а, величина $\lambda_{кр.к} = S_{кр.к} = \delta_C = 0,100$ мм. У результаті виходить $\delta_{A'} \leq \delta_A - \lambda_{кр.к} \leq 0,100 - 0,100 \leq 0$, тобто в даному випадку потрібно абсолютно точне дотримання координуючого розміру A' . Оскільки це неможливо, то неможливе дотримання і креслярського розміру A . Для того щоб зменшити $\lambda_{кр.к}$, потрібно зменшити допуск на розмір деталі C , що витримується в попередніх операціях. Якщо зменшити δ_C з 0,100 до 0,050 мм, то можна призначити на координуючий розмір допуск $\delta_{A'} \leq \delta_A - 0,050 \leq 0,050$ мм.

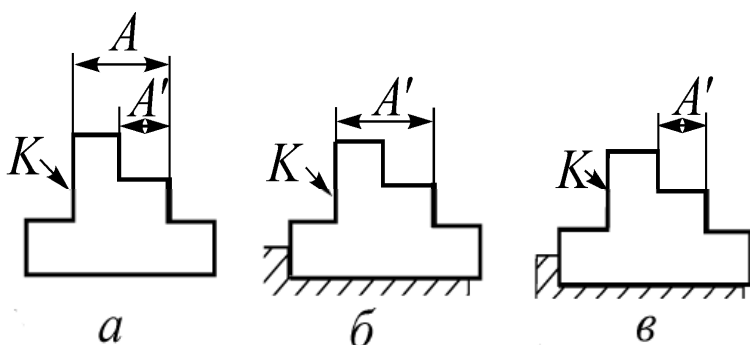


Рисунок 94 – Схеми несуміщення баз

а – КрБ $\neq$ УБ; б – КрБ $\neq$ УБ; в – ВБ $\neq$ КБ $\neq$ УБ

Несуміщення координуючої бази з установочною базою – другий основний вид несуміщення баз (рисунок 94, б) – викликає у координуючому розмірі A' похибку δ_A від несуміщення цих баз. Тому для уникнення браку деталей по координуючому розміру A' допуск δ_A на цей розмір має бути зменшеним на

величину $\lambda_{кру}$ порівняно з тим, яким він міг бути при суміщенні цих баз (тобто при $\lambda_{кру} = 0$). У даному випадку (операція остання в процесі) він міг би дорівнювати креслярському допуску $\delta_A = 0,100$ мм. Однак, $\lambda_{кру} = S_{кру} = \delta_B = 0,100$ мм, і виходить, що за умови $\delta_{A'} \leq \delta_A - \lambda_{кру}$ він не може бути більше, ніж $\delta_{A'} = \delta_A - \lambda_{кру} = 0,100 - 0,100 = 0$. (Числовий результат вийшов таким, що дорівнює попередньому – див. вище несуміщення координуючої бази з конструкторською – випадково, тільки тому, що на кресленні деталі $\delta_C = \delta_B = \delta_A$).

Для того щоб зменшити величину $\lambda_{\text{кру}}$, потрібно зменшити допуск на розмір B деталі, що витримується в попередніх операціях. Наприклад, якщо знизити δ_B з 0,100 до 0,050 мм, то можна буде призначити на координуючий розмір допуск $\delta_A' \leq \delta_A - 0,050 \leq 0,050$ мм.

Не суміщення усіх трьох баз (див. рисунок 82, в) викликає в креслярському розмірі A похибку $\lambda_{\text{крк}}$ і одночасно у координуючому розмірі A' – похибку $\lambda_{\text{кру}}$. У такому випадку допуск δ_A' на координуючий розмір приходить зменшувати порівняно з креслярським допуском δ_A на величину, завжди більшу, ніж $\lambda_{\text{крк}}$ або величину $\lambda_{\text{кру}}$ взяту окремо.

За умови, що $\lambda_{\text{крк}}$ і $\lambda_{\text{кру}}$ залежать від різних розмірів, що витримуються в попередньому обробленні деталі, допуск δ_A' потрібно зменшити порівняно з δ_A двічі: спочатку на величину $\lambda_{\text{крк}}$, а потім ще на величину $\lambda_{\text{кру}}$, тобто $\delta_A' \leq \delta_A - (\lambda_{\text{крк}} + \lambda_{\text{кру}})$.

У даному випадку (рисунки 93 і 94, в) взаємне розташування трьох баз таке, що $\lambda_{\text{крк}} = \delta_C$ і $\lambda_{\text{кру}} = \delta_B + \delta_C$, тобто похибка розміру C входить і в $\lambda_{\text{крк}}$ і в $\lambda_{\text{кру}}$. Через те, що кожен виробничу похибку стосовно того самого розміру не слід враховувати двічі, допуск δ_A' має бути менше допуску δ_A тільки на величину $\delta_B + \delta_C$. Але і ця величина ($\delta_B + \delta_C = 0,100 + 0,100 = 200$ мкм) удвічі перевищує допуск $\delta_A = 0,100$ мм.

Для того, щоб одержати $\delta_A' > 0$, потрібно відповідно зменшити допуски δ_B і δ_C . Наприклад, якщо $\delta_B' = \delta_C' = 0,030$ мм, то на координуючий розмір можна буде призначити допуск

$$\delta_A' \leq \delta_A - (\delta_B + \delta_C) \leq 0,100 - (0,030 + 0,030) \leq 0,040 \text{ мм.}$$

Таким чином, несуміщення координуючої бази з конструкторською або установочною (і тим більше несуміщення усіх трьох баз) потребує зменшення допуску на координуючий розмір порівняно з можливим у випадку суміщення цих баз. Крім того, воно може вимагати також зменшення допусків і в попередніх операціях (див. вище зменшення δ_B' і δ_C'), що не менш важливо, тому що майже завжди неминуче.

Останнє стане очевидним, якщо вважати, що етап процесу формують з операцій однорідних, що мають приблизно однакові операційні допуски (у приведеному вище прикладі це спрощено подано рівністю $\delta_A = \delta_B = \delta_C = \delta_D = 0,100$ мм). Унаслідок цього похибка від несуміщення баз виходить одного порядку з величиною операційного допуску (чи навіть більше його). Тому не зменшувати її (тобто не зменшувати допуски в попередніх операціях) можна лише тоді, коли яку-небудь грубу операцію (великий

операційний допуск) розміщують у більш точний етап процесу (малі $\lambda_{крк}$ або $\lambda_{крУ}$).

Зменшення допуску на координуючий розмір ускладнює операцію, переводить її в розряд більш точних з усіма відповідними негативними наслідками. Природно, що маючи на увазі зниження вартості виготовлення деталі, розробляючи кожну операцію процесу, прагнуть насамперед до суміщення баз.

Несуміщення баз при контролі. Аналогічну і негативну роль, але не в процесі оброблення, а в процесі контролю положення обробленої поверхні, відіграє несуміщення вимірювальної бази з тією базою (конструкторською – при остаточному контролі, або з координуючою – при проміжному контролі), щодо якої задано (і має бути перевірено) це положення. Виникаюча від несуміщення цих баз похибка входить як одна зі складових у похибку виміру. Наприклад, при контролі положення поверхні Π (див. рисунок 93) відповідно до схеми, показаної внизу праворуч (розмір A''), похибка виміру від несуміщення баз буде такою:

а) за креслярським розміром A

$$\lambda_{B.K} = s_{B.K} = \delta_B + \delta_D = 0,200 \text{ мм};$$

б) за координуючим розміром

$$\lambda_{B.K} = s_{B.Kp} = \delta_B + \delta_C + \delta_D = 0,300 \text{ мм}.$$

Очевидно, що в даному випадку замінити безпосередній вимір, наприклад, розміру A' (чи A) безпосереднім виміром розміру A'' неможливо. Вибрана як вимірювальна база поверхня не може відігравати таку роль при контролі розміру A' (чи A) через дуже велику похибку від несуміщення баз $s_{B.Kp}$ (чи $s_{B.K}$).

Контроль розміру A' (чи A) виміром розміру A'' був би можливим за умови, що $\lambda_{B.Kp}$ (чи $\lambda_{B.K}$) істотно менше допуску $\delta_{A'}$ (чи δ_A). Однак і в цьому випадку він має потребу в особливому підході. Деталі, забраковані за розміром A' (чи A), не можна бракувати остаточно. Усі вони мають бути знову перевірені за розміром A' (чи A) іншим методом, що виключає похибки вимірів від несуміщення баз $\lambda_{B.Kp}$ (або $\lambda_{B.K}$).

2.3.3 Принцип суміщення баз і послідовність операцій

В основі вирішення задач про доцільну послідовність операцій усередині етапу технологічного процесу також лежить принцип суміщення баз. Виявляється, що для запобігання похибок від несуміщення баз послідовність операцій має бути погоджена із взаємною координацією поверхонь (топографією розмірів) на кресленні деталі. Це впливає з таких міркувань.

1. Кожна з двох поверхонь, зв'язаних на кресленні деталі одним розміром, є конструкторською базою стосовно іншої. Отже, при обробленні однієї з них роль установочної і координуючої бази має відігравати інша (принцип суміщення баз).

2. Поверхня вже оброблена (у даному етапі) і має точність більшу, ніж кожна з тих, що ще не оброблялися. Отже, саме вона має бути установочною і координуючою базами на наступній операції. Але відповідно до положення 1 у наступній операції має бути оброблена не будь-яка поверхня, а та, з якою оброблена поверхня безпосередньо зв'язана.

3. На основі викладених вище положень 1 і 2 третьою можна обробляти лише поверхню, з'єднану з однією з двох вже оброблених. Четвертою потрібно обробляти поверхню, зв'язану з третьою або з однією з двох раніше оброблених і так далі всі поверхні деталі.

4. Таким чином, порядок оброблення поверхонь (послідовність операцій в етапі процесу) не може бути довільним, а має відповідати координації поверхонь (*топографії розмірів*) на кресленні деталі. На рисунку 95 показано один з можливих способів взаємної координації п'яти поверхонь деталі і декілька відповідних йому порядків оброблення цих поверхонь (починаючи з поверхні 1).

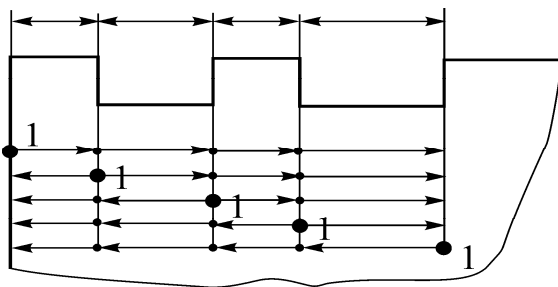


Рисунок 95 – Координація поверхонь на кресленні і необхідна послідовність їхнього оброблення

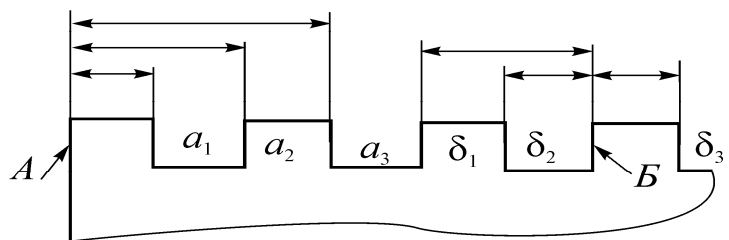


Рисунок 96 – Поверхня **A**, яку слід обробити раніше, ніж поверхні **a1**, **a2**, і **a3**, а поверхню **B** раніше, ніж поверхні **b1**, **b2**, і **b3**

5. У випадках, коли одна поверхня деталі зв'язана не з однією, а з декількома іншими (наприклад, поверхня **A** чи **B** на рисунку 96), з положення 1 випливає, що базами при її обробленні мають бути одночасно всі ці інші поверхні (**a1**, **a2** і **a3** при обробленні поверхні **A** і **b1**, **b2**, і **b3** – при обробленні **B**). Однак це неможливо. Установочною і координуючою базами може служити лише яка-небудь одна з них. При цьому неминуче порушується принцип суміщення баз (положення 1) стосовно інших. Наслідки цього тим менш істотні, чим більші припуски мають згадані інші поверхні. Звідси випливає одне з головних правил розроблення технологічного процесу:

у сукупності взаємозв'язаних поверхонь має бути оброблена в першу чергу та поверхня, з якою зв'язано найбільше число інших.

Після оброблення такої поверхні (**A** чи, наприклад **B** на рисунку 96) всі інші з нею зв'язані (**a₁**, **a₂** і **a₃** після **A** чи **b₁**, **b₂** і **b₃** – після **B**) можуть оброблятися в довільному порядку. При цьому установочною і координуючою базами для кожної з них має бути поверхня, оброблена в першу чергу (**A** – для **a₁**, **a₂** і **a₃** і **B** – для **b₁**, **b₂** і **b₃**).

6. З викладеного виходить, що зміна координатії поверхонь (топографії розмірів) на кресленні деталі потребує іншої послідовності операцій у технологічному процесі. Наприклад, для координатії **A** поверхонь умовної деталі, найкращою послідовністю операцій буде варіант **a** показаний на рисунку 97, у той час як для координатії **B** кращим буде варіант **б**. Зіставляючи схеми, можна бачити, що варіант оброблення **a** не придатний (буде грубо помилковим) для координатії **B** через несуміщення установочної і координуючої баз на операціях № 1, 2 і 4; варіант оброблення **б** не придатний для координатії **A**, тому що таке ж порушення принципу суміщення баз буде мати місце на операціях № 3 і 4.

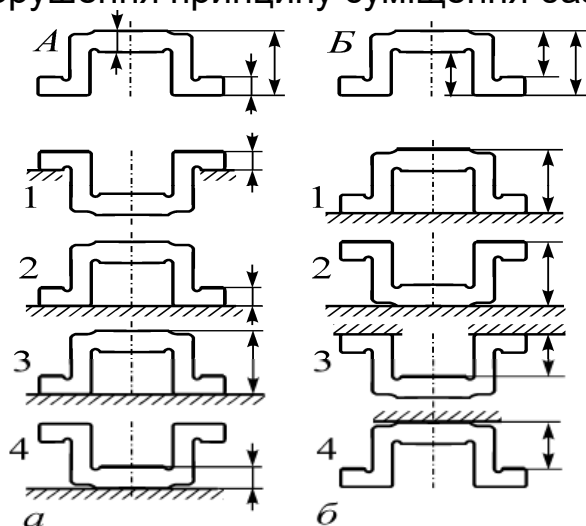


Рисунок 97 – Зміна координатії поверхонь: а - варіант процесу, що відповідає координатії **A**, але є грубо помилковим для координатії **B**; б - варіант процесу, що відповідає координатії **B**, але є помилковим для координатії **A**.

2.4. Вибір та обґрунтування установочної бази

2.4.1. Загальні умови

Установочна база – найважливіша з технологічних баз у тому значенні, що вимоги до неї є найскладнішими. Тому її вибирають раніш інших – найпершою.

Взагалі можна так сформулювати умови, якими керуються при виборі та обґрунтуванні установочної бази:

1. Установочною базою має бути та поверхня деталі, від якої в кресленні деталі є координуючою оброблювана поверхня (суміщення установочної бази з базою конструкторською).

2. Точність, форма і розміри установочної бази мають забезпечувати надійну стійкість деталі на установочних елементах пристрою і простоту закріплення деталі (простота необхідного пристрою). Таким чином, вибираючи установочну базу, насамперед, з'ясовують, чи придатна для такої ролі конструкторська база.

Позитивна відповідь означає, що задача вирішена – установочна база вибрана. Залишається вказати цю базу в операційній карті і проставити від неї координуючий розмір, тобто сумістити з нею базу координуючу.

Однак таке найкраще і просте рішення є можливим не завжди, тому що конструкторська база не завжди придатна для виконання функцій установочної бази. Один з таких прикладів показано на рисунку 98 угорі. На кресленні деталі (схема а) координата дна паза (розмір **A**) задана так, що для операції фрезерування паза потрібно встановлювати деталь за схемою б.

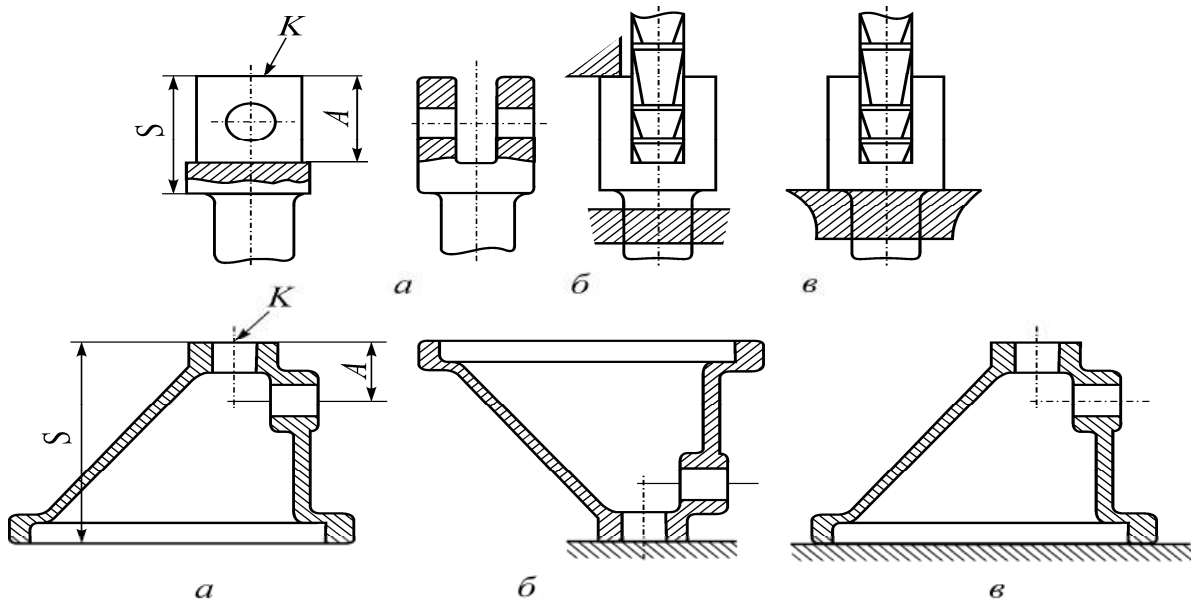


Рисунок 98 – Приклади «поганої» конструкторської бази:

а – креслення деталі; б – установочна база суміщена з конструкторською базою; в – установочна база не суміщена з конструкторською базою.

Однак торець **K** мало придатний для ролі установочної бази – його використання в цій ролі серйозно ускладнить необхідні пристрої (деталь «висить»). Цього можна уникнути, якщо встановлювати деталь за схемою в, тобто відмовитися від суміщення баз. Аналогічний випадок зображено на тому ж рисунку внизу. Базы будуть суміщені при установленні деталі за схемою б. Однак здійснити це важко (стійкість деталі виходить дуже низькою). Відмовлення від суміщення баз (схема в) дозволяє застосовувати значно простіші пристрої.

Подібних, явно несприятливих і сумнівних випадків порівняно з такими, коли доцільність суміщення баз очевидна – не дуже багато, але вони зустрічаються, і тоді в технолога можуть виявитися вагомими причини для відмовлення від суміщення баз. Вирішивши так, він тим самим ставить перед собою нову задачу: вибрати установочну базу з числа інших поверхонь деталі. У таких умовах похибка від несуміщення баз стає неминучою. Вибираючи базу, завжди керуються однією й тією ж метою: зменшити шкідливі наслідки несуміщення баз.

2.4.2. Вибір в умовах відмовлення від суміщення баз

Шлях до мети зменшення шкідливих наслідків несуміщення баз залежить від конкретних умов, а виникаючі задачі не завжди прості. Нижче наведено деякі правила і загальні положення, що належать до вирішення таких задач (п.п. 1, 2, 3 і 4).

1. Правило першочерговості оброблення кращої з двох баз. Воно полягає в тому, що з двох взаємозв'язаних поверхонь деталі має бути в першу чергу оброблена та, котра більш придатна для ролі установочної бази. Правило базується на тому, що з двох операцій оброблення двох взаємозв'язаних поверхонь наступна операція завжди відповідальніша (точніша) попередньої; отже, вона має більшу потребу в кращій установочній базі. Ілюструючи це правило (як і інші, описувані нижче), будемо мати на увазі оброблення кожної поверхні відразу начисто.

У деталі, показаної на рисунку 99, площина – база гарна, а пов'язаний з нею отвір – дуже погана. За правилом у першу чергу слід обробити площину.

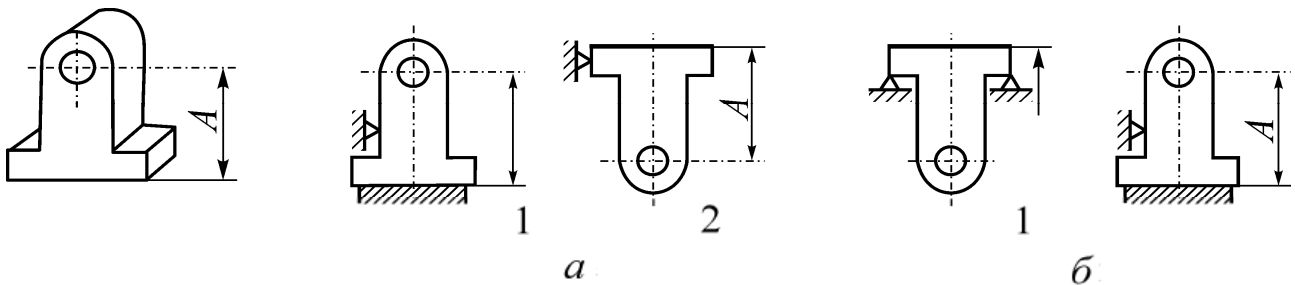


Рисунок 99 – Два варіанти послідовності операцій:
а – поганий варіант; *б* – кращий варіант

У варіанті *а* правило порушено, внаслідок чого друга (більш точна) операція виконується на поганій базі. Якщо це неприпустимо, тоді поліпшення умов базування треба шукати не у відмовленні від суміщення баз на цій операції, а в дотриманні правила. Якщо виконати його без порушення принципу суміщення баз неможливо (наприклад, тому, що отвір, не будучи створеним, узагалі не може бути базою), то виникає варіант *б*. У цьому варіанті розмір *А* витримується не тільки в умовах суміщення баз, але і на кращій установочній базі.

Похибка від несуміщення баз на операції 1 буде виявлятися не на точності розміру *А*, а на коливанні величини припуску на формоутворення отвору, що менш істотно. Описане правило відображає тільки одну з двох взаємозв'язаних поверхонь деталі.

Тому якщо не одна, а кілька поверхонь мають загальну конструкторську базу, не придатну для використання як установочна база, то правило дозволяє використати в умовах суміщення баз лише який-небудь один із креслярських розмірів (рисунок 100).

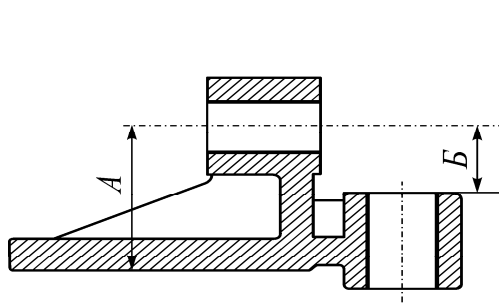


Рисунок 100 – Дві поверхні зв'язані з однією, непридатною для ролі установочної бази

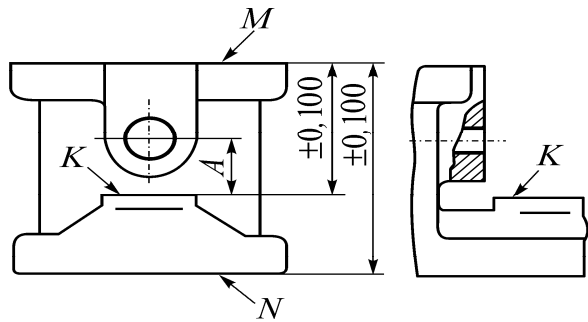


Рисунок 101 – Поверхня **K** непридатна для використання в ролі установочної бази; поверхня **M** буде кращою установочною базою, чим поверхня **N**

Наприклад, із трьох поверхонь деталі, зв'язаних розмірами **A** і **B**, вимозі до установочної бази (стійкості деталі, простоті закріплення) краще всіх відповідає плоска поверхня (стосовно розміру **A**), гірше – торець бобишки (стосовно розміру **B**) і ще гірше – отвір у горизонтальній бобишці (як стосовно розміру **A**, так і розміру **B**). Однак саме з цією останньою поверхнею зв'язані дві інші.

Припустимо, що цей отвір зовсім не може бути установочною базою. Тоді, відповідно до правила першочерговості оброблення кращої з двох баз, можна спочатку обробити плоску поверхню, а потім – отвір, витримавши креслярський розмір **A** в умовах суміщення баз. Однак після цього такий же прийом стосовно розміру **B** стає неможливим (отвір вже оброблено і він займає певне положення в робочій зоні верстата).

Замість плоскої поверхні можна спочатку обробити торець бобишки, потім – отвір, витримавши в умовах суміщення баз розмір **B**, але тоді цей прийом стане неможливим стосовно розміру **A**.

Таким чином, лише один із двох креслярських розмірів (**A** чи **B**) можна витримати в умовах суміщення баз. Іншу (чи інші – якби з отвором було зв'язано більше двох поверхонь) неминуче прийдеться витримувати в умовах несуміщення баз. Установочну базу для забезпечення цього розміру потрібно вибирати з числа інших поверхонь деталі.

Природно, що правило першочерговості оброблення кращої з двох баз не може допомогти і у тих випадках, коли жодна з двох взаємозв'язаних поверхонь не може бути установочною базою. Навіть наведені найпростіші приклади показують, що після відмовлення від суміщення баз у даній операції вибір установочної бази ускладнюється необхідністю робити його в тісному зв'язку з вибором баз для інших операцій.

2. Умова одержання найменшої похибки від несуміщення баз. Це саме загальна (найбільш поширена) умова, якою керуються, вибираючи установочну базу, коли немає змоги сумістити її з конструкторською. У випадку суміщення баз похибка від несуміщення баз відсутня (дорівнює нулю).

Природно, що після відмовлення від суміщення баз потрібно *використовувати як установочну базу ту з поверхонь деталі, що найбільш точно розташована відносно конструкторської бази.*

Наприклад, відмовляючись використовувати як установочну базу в операції оброблення отвору (рисунок 101) конструкторську базу (поверхня **K**), потрібно скористатися поверхнею **M** ($\lambda = 0,200$ мм), а не поверхнею **N** ($\lambda = 0,400$ мм). Цією загальною умовою зручно керуватися, вибираючи установочну базу по кресленню деталі на стиках етапів технологічного процесу. Однак, орієнтуючись на нього при розробленні операцій, всередині етапів процесу легко допустити промах – помилку.

Останнє обумовлено тим, що в кожний момент технологічного процесу точність положення різних поверхонь деталі не однаково близька до точності, заданої в кресленні. Є поверхні, що вже пройшли той етап, якого ще чекають інші, зменшення допусків (наприклад, через несуміщення баз) стосувалося одних параметрів, але не стосувалося інших і т. д.

Унаслідок цього поверхня, що відповідає умові 2 (найбільш точно розташована відносно конструкторської бази) на кресленні (у готової деталі), може не бути такою у напівфабрикаті, що надходить на дану операцію. Ця обставина може уникнути уваги технолога, тому що параметри напівфабрикату розкидані в багатьох операційних картах попередніх операцій. З цієї причини, орієнтуючись на умову 2 і користуючись нею для самоконтролю, виконують насамперед менш універсальне, але більш просте правило. Для стислості можна назвати його правилом єдиної установочної бази.

3. Правило єдиної установочної бази. Правило полягає у тому, що дві поверхні – дана і поверхня, що є стосовно неї конструкторською базою – обробляють, користуючись єдиною (однією й тією ж) установочною базою.

Правило враховує одну із загальних закономірностей утворення похибок в умовах несуміщення баз. Вона полягає в тому, що у випадку оброблення двох будь-яких поверхонь деталі на різних установочних базах, похибка взаємного положення оброблених поверхонь виходить більшою, ніж після оброблення їх на одній базі, на величину похибок взаємного розташування цих баз. Звідси випливає, що для одержання найменшої похибки від несуміщення баз у розмірі, що зв'язує поверхні, необхідно обидві обробляти з єдиної бази. Дотримання такого правила «автоматично» забезпечує загальну умову 2. Наприклад звернемося до рисунку 102, на якому вгорі зображена схема (креслення) тієї ж деталі, що і на рисунку 101. Припустивши, що поверхні **M** і **N** вже оброблені, розглянемо три варіанти (а, б і в) оброблення отвору (операція № 2) і плоскої поверхні **K**, що є відносно отвору конструкторською базою (операція № 1). Для простоти в обох операціях у всіх трьох варіантах показано однакову точність оброблення, що витримується $\pm 0,050$ мм.

Якість вибору установочної бази в операції № 2 (оброблення отвору) будемо оцінювати за величиною очікуваної похибки оброблення для розміру **A**, що координує отвір на кресленні деталі.

Варіант а. Установочною базою при обробленні отвору буде поверхня **M** (дотримана умова 2). Поверхня **K** обробляється також відносно **M** (дотримано правило 3 – поверхня **M** є єдиною установочною базою). Очікувана похибка оброблення для розміру **A** дорівнює $\pm 0,100$ мм (ескіз а3). Припустимо, що в операції № 1 поверхня **M** не може бути установочною базою (наприклад, тому, що для оброблення поверхні **K** таке положення деталі на верстаті є неприйнятним). Допустимо, що тому поверхню **M** замінили поверхнею **N** (ескіз б1), але в операції № 2 таку заміну не зробили (ескіз б2). Тоді буде варіант б.

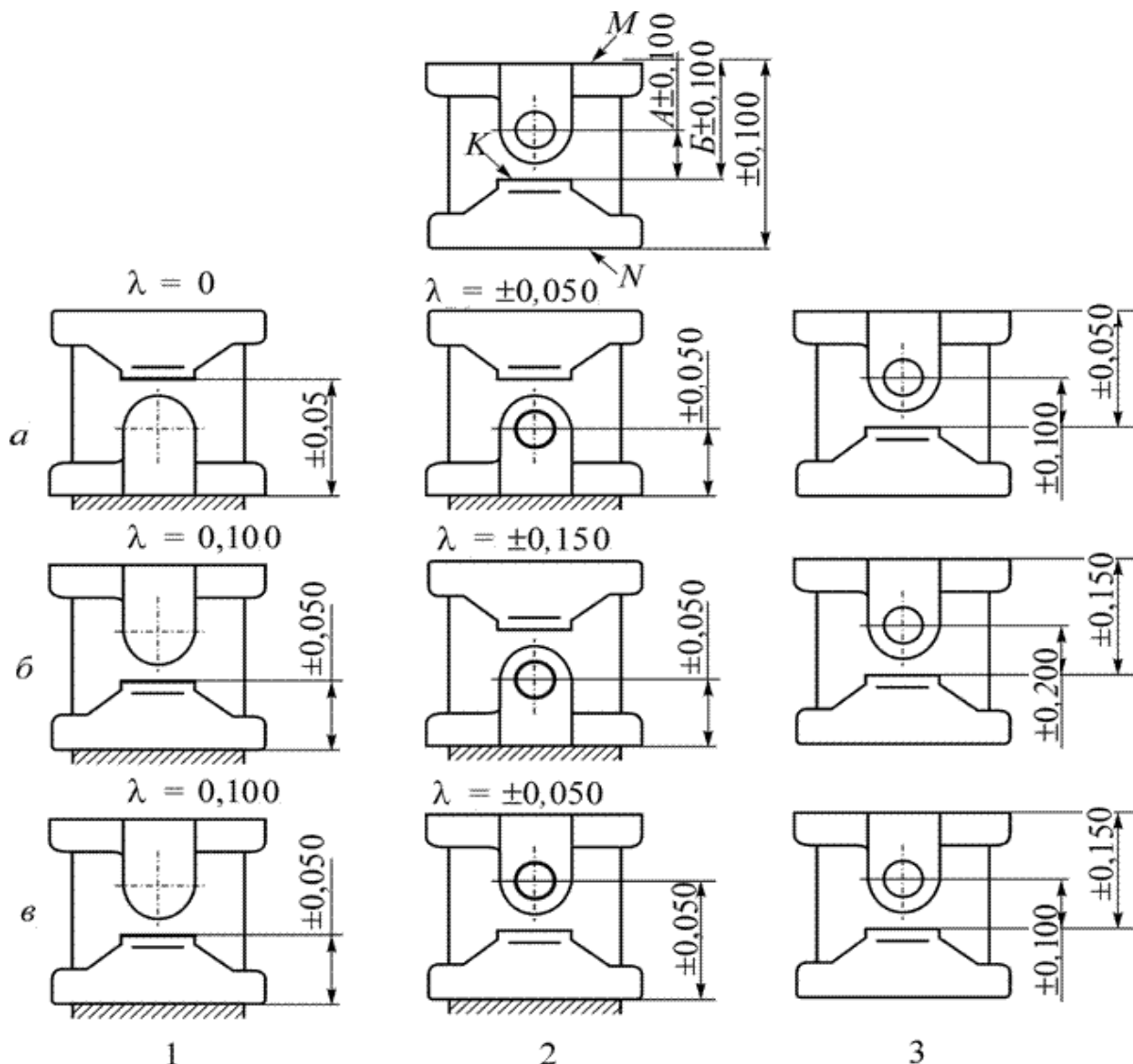


Рисунок 102 – Вибір установочної бази:

а – оброблення двох поверхонь з однієї установочної бази (**M**);
б – оброблення з двох різних баз (**M** і **N**); **в** – оброблення з однієї бази (**N**).

Варіант б. Установочною базою при обробленні отвору є поверхня **М**. Поверхня **К** обробляється відносно поверхні **Н**. Очікувана похибка оброблення для розміру **А** зростає з $\pm 0,100$ до $\pm 0,200$ мм (ескіз б3).

Перевірка варіанта на правило єдиної установочної бази (правило 3) легко виявляє допущену помилку. Зіставивши ескізи б1 і б2 легко бачити, що отвір і поверхня **К** (конструкторська база стосовно нього) обробляються з різних установочних баз. Правило порушено, а разом з ним порушена й умова про найменшу похибку від несуміщення баз (умова 2). Цим пояснюється зростання очікуваної похибки для розміру **А**.

Перевірка операції б2 безпосередньо за умовою 2 потребує більшої уважності, але приводить до того ж висновку. Справді, поверхня **М**, призначена установочною базою при обробленні отвору, найбільш точно розташована щодо конструкторської бази **К** на кресленні. Але розглянувши ескізи, можна бачити, що після операції б1 найбільш точно розташованою відносно **К** виявляється не ця поверхня, а поверхня **Н**.

Варіант в. Помилку, допущену в операції б1, виправлено. Обидві поверхні (отвір і поверхня **К**) обробляються з єдиної установочної бази **Н**. Правило 3 виконано. Очікувана похибка для розміру **А** дорівнює $\pm 0,100$ мм (ескіз в3), тобто така ж, як у варіанті а.

Можна бачити, що виконання правила забезпечує найменшу похибку від несуміщення баз *незалежно від того, яка з поверхонь деталі буде вибрана як єдина база*. Незважаючи на те, що у варіанті а такою базою була поверхня **М**, а у варіанті в – поверхня **Н**, результати є однаковими. Однак можна також бачити, що варіанти а і в рівноцінні тільки стосовно операції № 2 (стосовно розміру **А**). Відносно ж операції № 1 (розмір **Б**) вони неоднакові. У варіанті в очікувана похибка ($\pm 0,150$ мм) для розміру **Б** більше, ніж похибка ($\pm 0,050$ мм) у варіанті а. Це сталося тому, що в операції в1 поверхня **К** виявилася оброблюваною в умовах несуміщення баз, тоді як в операції а1 бази суміщені.

Таким чином, правило єдиної бази охоплює тільки дві взаємозв'язані поверхні: одна з них – та, що розглядається, а друга – конструкторська база стосовно неї. Однак це не виключає можливих труднощів у дотриманні інших розмірів (наприклад, розмір **Б** на рисунку 103). Подібних труднощів виникає в технологічному процесі тим більше, чим більше в ньому операцій, що не допускають суміщення баз. Якщо число таких операцій є значним, то правило єдиної установочної бази розширюють, тоді воно перетворюється в принцип постійності установочної бази.

4. Принцип постійності установочної бази. У найбільш повній формі принцип полягає в тому, що *обробку всіх поверхонь деталі виконують, користуючись на всіх операціях однією і тією ж (постійною) установочною базою*. Практично цей принцип застосовують тільки для більшої чи меншої групи поверхонь, у залежності від конкретних умов.

Наприклад, у робочих кресленнях поршнів (рисунок 103) бічна поверхня й отвір під палець завжди зв'язані умовою перетинання їхніх осей. Завжди пов'язані між собою днище й отвір під палець (розмір A).

З цими трьома головними поверхнями (кожна з яких малопридатна для використання як установочна база) пов'язана більшість інших поверхонь деталі (наприклад, розміри B , B , Γ , Δ , овал на бічній поверхні та ін.).

Серед інших поверхонь є багато пар таких, котрі також неможливо або важко обробити в умовах суміщення баз (наприклад, пари, пов'язані розмірами E , $Ж$, $З$).

Тобто виявляється, що в технологічному процесі буде дуже багато операцій, для яких суміщення баз неможливо чи нераціонально.

Головне ж, що в число таких операцій попадають не тільки другорядні (за точністю і трудомісткістю), але й серйозні операції, що визначають характер процесу. У подібних випадках, *визнавши неминучість порушення принципу суміщення баз у багатьох операціях*, застосовують принцип постійності установочної бази. Зокрема, майже всі операції оброблення поршня виконують, користуючись як установочними базами торцем боковини (встановлення в напрямку осі бічної поверхні) і циліндричною виточкою у боковині.

Принцип постійності установочної бази є ефективним лише при дотриманні особливих вимог до точності установлення бази, тому що виконання його зменшує лише похибку λ від несуміщення баз, тобто тільки одну зі складових похибки P , пов'язаної з установленням деталі. Величина другою складової δP , що є функцією похибки установлення δy , як і завжди буде залежати від якості самої бази і установочних елементів. Це ілюструють схеми на рисунку 104.

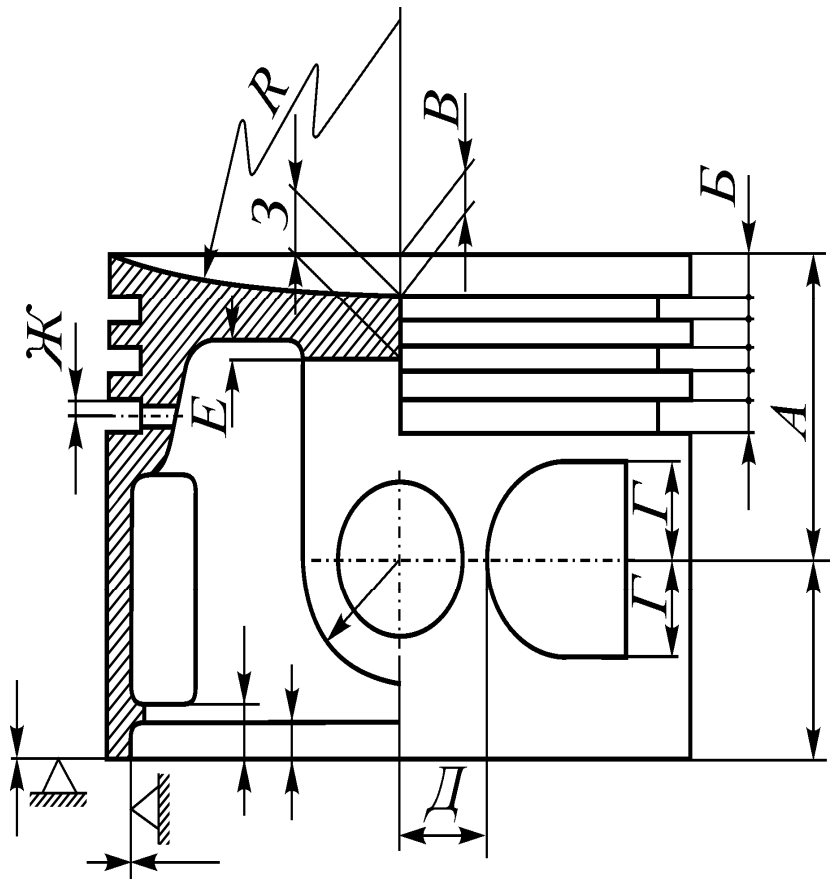


Рисунок 103 – Ескіз поршня

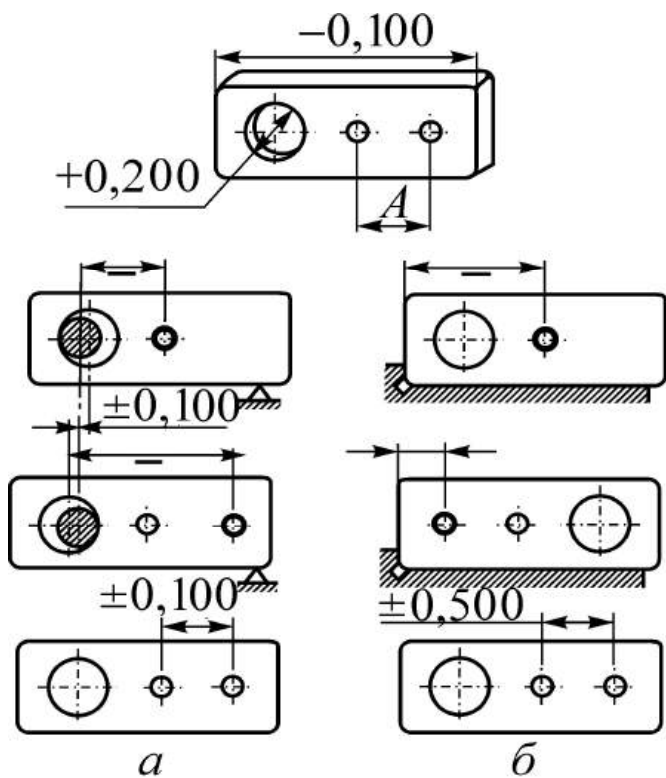


Рисунок 104 – Оброблення двох поверхонь в умовах несуміщення баз:
 а – оброблення при постійній установочній базі; б – оброблення з різних установочних баз

На ескізах унизу показано величини похибок взаємного положення двох оброблених поверхонь, які потрібно очікувати при однакових методах оброблення (τ) і однаковій точності зв'язку пристрою з верстатом ($\delta\eta$) (для ясності прийнято нібито $\tau + \delta\eta = 0$). Можна бачити, що варіант а (постійність установочної бази) забезпечує нижчу точність баз. Такий результат обумовлено тим, що в даному випадку точність установлення постійної бази є занадто низькою. Змінна за напрямком похибка встановлення деталі ($\delta y = \pm 0,100$ мм) впливає на розмір А більшою мірою, ніж зміна установочної бази у випадку б. Потрібно ж, щоб було навпаки.

Очевидно, що принцип постійної установочної бази

виправдає себе, якщо виконувати одну з двох умов:

1) забезпечувати на кожній операції похибку встановлення постійної бази, близьку до нуля: $\delta y = 0$;

2) допускати похибку встановлення δy як завгодно великою, але однаковою за величиною і напрямком при кожному новому встановленні деталі.

У таких умовах незалежно від числа встановлень деталі (від кількості операцій) для всіх оброблюваних поверхонь деталі створюються такі ж умови, ніби всі вони оброблялися при одному встановленні деталі (ніби всі координуючі розміри стали внутрішньокмлексними координатами).

Допоміжні установочні бази. Допоміжною установочною базою називають поверхню деталі, створювану спеціально і тільки з метою встановлення деталі в робочій зоні верстата при відсутності інших варіантів задовільного базування наявними поверхнями.

Необхідність у такій базі може виникнути у двох випадках:

а) при здійсненні принципу постійності установочної бази;

б) через відсутність у заготовці деталі задовільної первинної установочної бази.

Постійною установочною базою користуються при проведенні багатьох операцій процесу, і на кожній з них вона має відповідати головній вимозі. Однак ці операції є різними за умовами виконання (верстат, метод оброблення, положення деталі на верстаті, величина сил різання). Тому не у кожній деталі, в процесі виготовлення якої приходить звертатися до принципу постійності установочної бази, можна знайти поверхню, придатну для ролі постійної бази. Буває, що таку поверхню потрібно створити спеціально як допоміжну установочну базу.

Наприклад, з двох постійних баз поршня (див. рисунок 103) циліндрична виточка в боковині є базою допоміжною. Оброблення цієї виточки (при цьому дуже точно) передбачається тільки для встановлення деталі.

Характерним прикладом допоміжних установочних баз є центрові гнізда, які застосовують при обробленні зовнішніх поверхонь деталей типу валів (рисунок 105). Широке застосування центрових гнізд обумовлено тим, що найвища взаємна концентричність (співвісність) групи поверхонь обертання виходить після оброблення їх при одному встановленні (всі поверхні утворюються при обертанні деталі відносно однієї і тієї ж осі). Якщо креслення потребує дотримувати співвісності, то таке оброблення є рівноцінним виконанню принципу суміщення баз, та до того ж ще – при абсолютно точному встановленні деталі. Завдяки відсутності значних щілин між центровими гніздами і центрами верстата, центрові гнізда забезпечують високу точність установлення ($\delta_y \approx 0$). Тому навіть при переустановленнях деталі (гнізда в ролі постійних установочних баз) створюються умови дуже близькі до умов оброблення при одному встановленні.

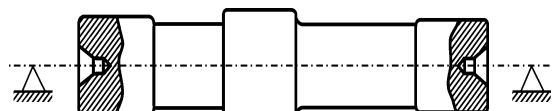


Рисунок 105 – Допоміжні установочні бази для оброблення вала

Первинні установочні бази. Установочну базу, використовувану на першій операції процесу (встановлення заготовки деталі), називають на відміну від інших *первинною* установочною базою.

Первинною базою через її малу точність користуються тільки один раз. Тому вибір її – це вирішення задачі про те, з якої поверхні почати формоутворення поверхонь деталі. Принцип суміщення баз потребує, щоб у першу чергу було оброблено поверхню, відносно якої в кресленні деталі координоване більше число інших поверхонь.

Таким чином, *первинна база має дозволити здійснити оброблення тієї поверхні, що є найбільш важливою установочною базою в наступному обробленні інших поверхонь деталі.*

У достатній мірі, відповідаючи головній вимозі до установочної бази (простоті необхідного пристрою), первинна база, крім того, має бути:

а) однією з необроблюваних поверхонь деталі, якщо деталь не обробляється кругом;

б) поверхнею, що має найменший (порівняно з іншими поверхнями) припуск на оброблення, якщо деталь піддається обробленню кругом;

в) досить точної форми.

На всіх наступних (після першої) операціях деталь встановлюють поверхнями, що пройшли механічне оброблення. Установочні бази відповідно до етапів технологічного процесу, на яких ними користуються, іноді називають *чорновими* і *чистовими*. Однак цей розподіл є цілком умовним: точність бази в чорновому етапі часто потрібна не менше, ніж у чистовому.

2.5 Вибір і обґрунтування координуючої бази

2.5.1 Загальні положення

Якщо установочна база суміщена з базою конструкторською, то рішення сумістити з ними координуючу базу є єдино правильним.

Задача про вибір координуючої бази виникає лише в умовах, коли установочна і конструкторська бази не суміщені. Вона полягає у тому, щоб вирішити – сумістити *координуючу базу з конструкторською або з установочною*. Наприклад, стосовно операції, показаної раніше на рисунку 98 угорі, для випадку встановлення деталі за схемою в (див. рисунок 98, в), завдання полягає в тому, щоб вибирати або координувати дно паза за схемою а або б (рисунок 106). Такий вибір роблять залежно від того, яка з двох баз (конструкторська чи установочна) буде кращою *вимірювальною* базою. Прийняте рішення не впливає на величини похибок від несуміщення баз: величина

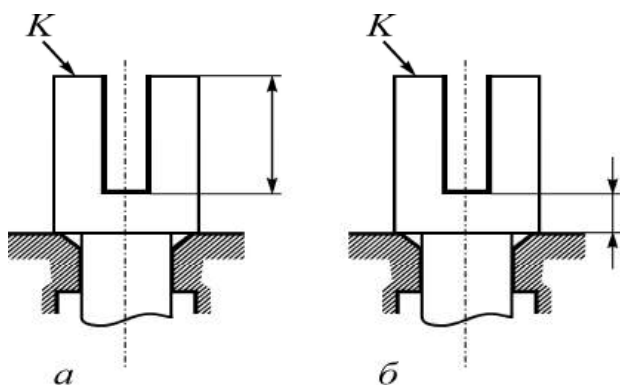


Рисунок 106 – Вибір координуючої бази: а – координуюча база суміщена з базою конструкторською; б – координуюча база суміщена з установочною базою

λ_{к_ру}, якщо буде прийнята схема а ($K_{рБ} = KБ \neq УБ$), буде такою ж, як величина λ_{к_у} для схеми б ($K_{рБ} = KБ \neq УБ$). Різниця полягає лише у тому, що у першому випадку величину λ_{к_ру} прийдеться підраховувати конструкторові пристрою (і відповідно підвищувати точність конструкції), а в другому випадку це робить сам технолог, компенсуючи її зменшенням допуску на координуючий розмір.

Оцінюючи якості координуючої бази як майбутньої вимірювальної бази, враховують, що завжди є два важливих аргументи на користь суміщення її з базою конструкторською (схема а, рисунок 106).

По-перше, при такому проставленні координуючий розмір відрізняється від креслярського розміру тільки на величини припусків на цей розмір, залишених на наступне оброблення. Тому зв'язок між операційним і креслярським розмірами є легко простежуваним при розробленні процесу, аналізі величин припусків, узагалі при будь-якій роботі з розмірами.

По-друге, інше проставлення координуючого розміру призводить до збільшення обсягу післяопераційного контролю деталей. Причини цього можна показати на прикладі остаточної операції, в якій витримується креслярський розмір.

У такому випадку координуючий розмір на схемі **а** буде дорівнювати креслярському розміру; природно, що деталі, які стали бракованими за координуючим розміром, будуть браком і за розміром креслярським. Ця простота зникне при проставленні розміру за схемою **б**. Тут координуючий розмір буде отримано технологом у результаті перерахування розмірів, а допуск на нього буде зменшено порівняно з креслярським на величину похибок від несуміщення баз $\lambda_{кр.к}$. Тим часом ця похибка підпорядковується тим же законам розсіювання, що й інші: її розрахункове значення $\lambda_{кр.к}$ є граничним, котрого досягають лише деякі деталі партії. Тому вихід деталі в брак за координуючим розміром не завжди означає брак і за розміром креслярським. Це можна бачити зі схеми, показаної на рисунку 107, зробленої стосовно схеми **б** (див. рисунок 106). На рисунку 107 розмір $A \pm 0,300$ – креслярський.

Похибка ($\lambda_{кр.к}$) дорівнює допуску на розмір S і становить 0,200 мм. Відповідно, допуск на координуючий розмір A' прийнято технологом таким, що дорівнює $0,600 - 0,200 = 0,400$ мм. Можна визначити, що всі деталі, які вийшли в брак у «мінус» не більше ніж на величину $\lambda_{кр.к}$, виявляться кондиційними за креслярським розміром $A \pm 0,300$, якщо їхні дійсні розміри S будуть найменшими.

Аналогічно будуть кондиційними деталі, що вийшли в брак у «плюс», якщо їхні дійсні розміри S будуть найбільшими.

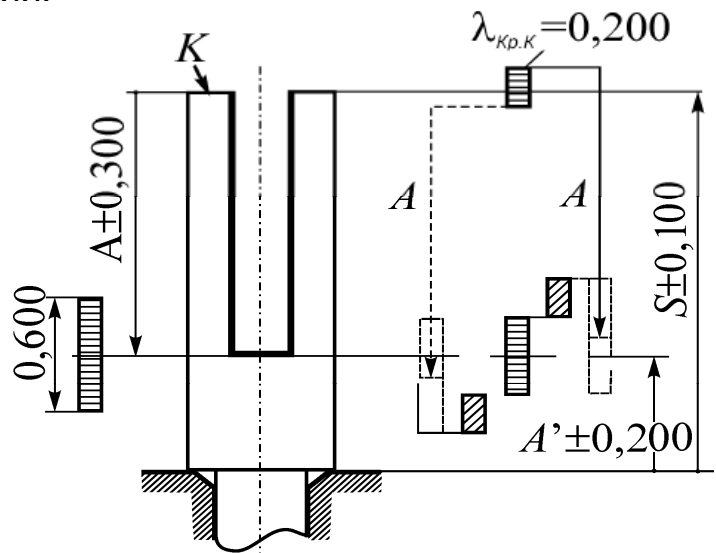


Рисунок 107 – Деталі, що вийшли в брак за координуючим розміром A' , підлягають додатковому контролю методом, що виключає похибку $\lambda_{кр.к}$

Таким чином, при вимірюванні координуючого розміру A' похибка $\Delta_{крк}$ виступає в ролі змінної похибки виміру стосовно креслярського розміру A . Унаслідок цього деталі розміром A' , що мають допуск не більше величини $\Delta_{крк}$ (косе штрихування на рисунку 107), мають бути знову перевірені за креслярським розміром A' методом, що виключає $\Delta_{крк}$. Таким чином, обсяг контролю збільшується. Такий же додатковий контроль буде потрібним і на проміжній операції, тільки тут слід виявити дійсні припуски за креслярським розміром, що залишилися у забракованій деталі, тому що інколи навіть грубий брак можна виправити, перерозподіливши ці припуски. Для цього при подальшому обробленні, що забезпечує креслярський розмір, просте встановлення деталі замінюють встановленням з вивіренням, розрахованим на потрібний для «порятунку» деталі перерозподіл припусків.

Описані два аргументи, з яких особливо вагомим є перший, перетворюють вибір координуючої бази в аналіз умов контролю операції з метою з'ясувати, чи немає ще більш вагомої причини, з якої впливає все-таки необхідність суміщення координуючої бази не з конструкторською базою, а з установочною.

Таких більш вагомих причин буває дві:

- 1) необхідність контролю координуючого розміру в процесі налагодження верстата на проведення операції;
- 2) непридатність конструкторської бази для ролі вимірювальної бази.

Перша причина є більш вагомою завжди. Важливість другої залежить від обсягу післяопераційного контролю деталей. Розглянемо ці дві причини.

Контроль координуючого розміру в процесі налагодження обладнання є необхідним, якщо автоматичне одержання цього розміру забезпечується не тільки пристроями (та установочною базою деталі), але й встановленням інструмента на розмір. У таких операціях координуюча база має бути суміщена з установочною базою, а не з конструкторською.

Наприклад, якщо операція, показана раніше на рисунку 98 унизу, буде виконуватися на розточувальному верстаті (деталь не обертається), то координуюча база має бути суміщена з установочною базою (рисунок 108, а). Якщо ж вона буде виконуватися на токарному верстаті (деталь обертається), то встановлення інструмента на координуючий розмір не потрібне і координуючу базу краще сумістити з конструкторською базою (рисунок 108, б).

Операція фрезерування паза, показана раніше (див. рисунок 106), потребує встановлення інструмента на координуючий розмір, отже, проставлення розміру за схемою **б** ($KpB = UB$) буде правильним, а за схемою **а** ($KpB \neq UB$) – помилковим.

В основі таких висновків лежить вимога до технолога – дати можливість наладчикові або верстатникові контролювати положення встановлюваного інструмента виміром тільки одного розміру деталі, без вимірювань і перерахувань інших розмірів, що не входить до їхніх обов'язків.

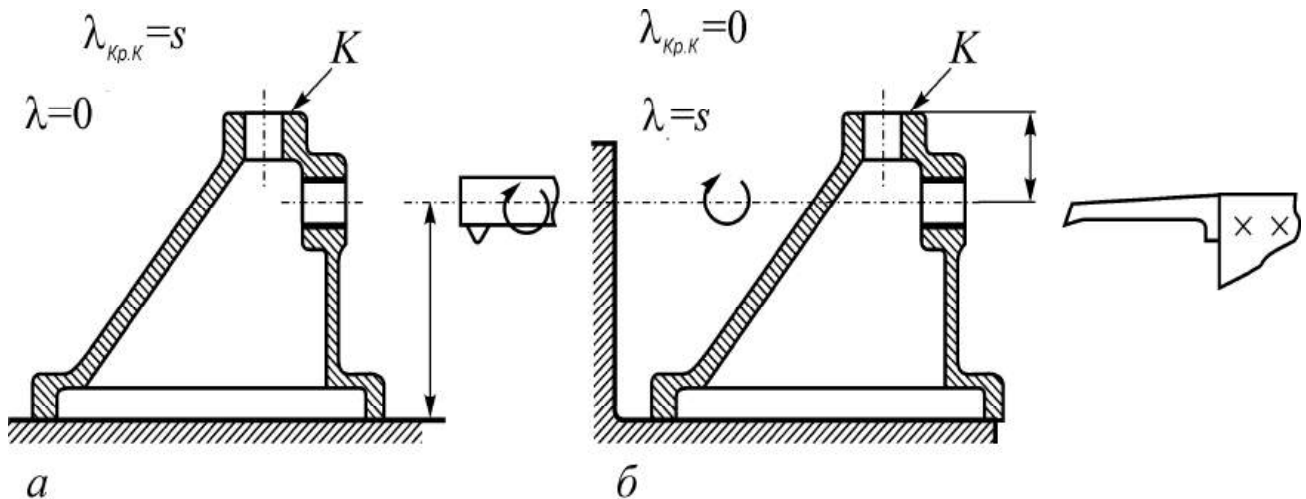


Рисунок 108 – Вибір координуючої бази:

а – виконання операції, що потребує встановлення інструмента на координуючий розмір; **б** – виконання операції, при якому координуючий розмір забезпечується тільки пристроями

У цьому відношенні кращим є проставлення координуючого розміру, при якому $\lambda_{кр.к} = 0$ (схема **б** на рисунку 106 і схема **а** на рисунку 108). У протилежному випадку, тобто при $\lambda_{кр.к} \neq 0$, будуть потрібні розрахунки і додаткові виміри для того, щоб врахувати вплив цієї похибки на координуючий розмір. Технологів не слід завантажувати такою роботою наладчика і тим більше верстатника – виконавця операції. Цей фактор (вимога) є вирішальним.

Друга причина, за якою координуючу базу суміщають з установочною (навіть, якщо перша причина відсутня), – непридатність конструкторської бази бути базою вимірювальною – зв'язана з передбаченим обсягом післяопераційного контролю (відповідна група контролю: всі 100 % деталей підлягають контролю, вибірковий контроль і т. п.) і з його складністю. Об'єктивне оцінювання цих факторів складне, тому в тих самих умовах від різних технологів можна чекати різних рішень.

Наприклад (рисунку 109), геометрична твірна **К**, що є конструкторською базою стосовно плоскої поверхні дна паза, не може виконувати функцію вимірювальної бази. У зв'язку з цим технолог може проставити координуючий розмір за схемою **б** або **в**, або ж зберегти координацію, прийняту в кресленні, – схема **г**. Останнє буде означати, що весь обсяг

післяопераційного контролю деталей він залишає на відділ технічного контролю.

Схема а – координуюча база суміщена з базою конструкторською (несуміщення з установочною – другий основний вид несуміщення баз). При цьому $\lambda_{крк} = 0$; $\lambda_{кру} = 0,100$ мм. Допуск на координуючий розмір дорівнює креслярському допуску. Похибку $\lambda_{кру} = 0,100$ мм враховує конструктор пристрою (при розрахунку величини похибки оброблення P , зв'язаної з установленням деталі в пристрої).

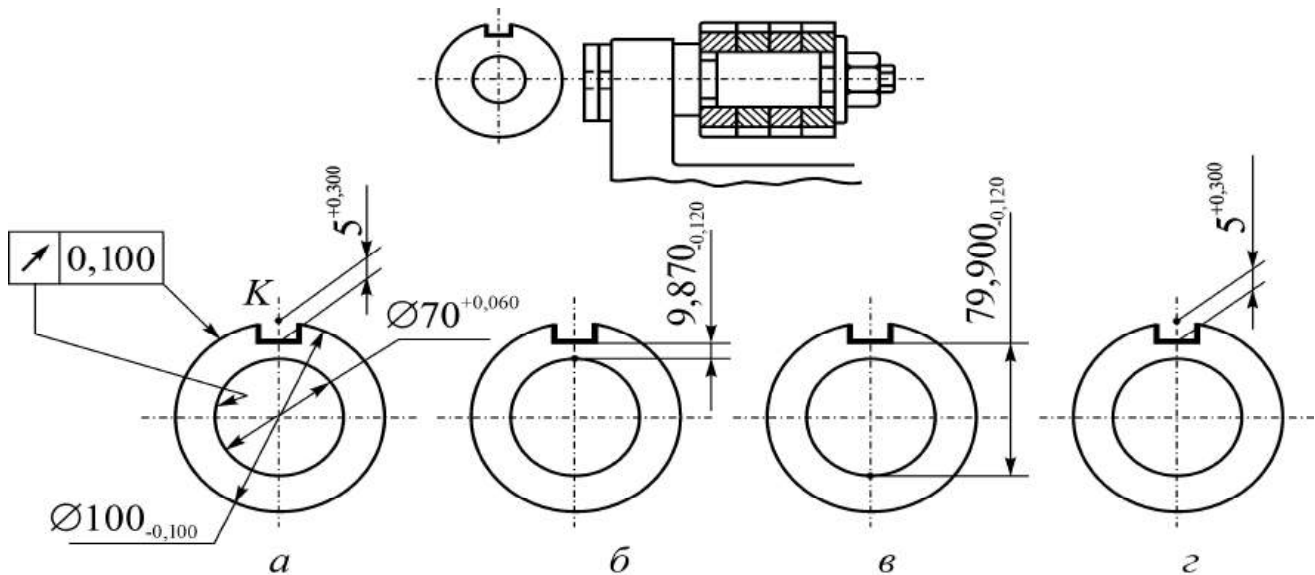


Рисунок 109 – Вибір координуючої бази в умовах, коли конструкторська база не може бути базою вимірювальною

Схема б – координуюча база суміщена з базою установочною (несуміщення з конструкторською – перший основний вид несуміщення баз), тобто $\lambda_{крк} = 0,100$ мм; $\lambda_{кру} = 0$. Допуск на координуючий розмір зменшено технологом порівняно з креслярським на величину $\lambda_{крк} = 0,100$ мм. Конструктор пристрою враховує $\lambda_{кру} = 0$.

Схема в – неповне суміщення координуючої бази з установочною. При цьому $\lambda_{крк} = 0,130$ мм; $\lambda_{кру} = 0$. Допуск на координуючий розмір зменшено технологом на величину $\lambda_{крк} = 0,130$ мм.

Рідко зустрічаються випадки, коли ні конструкторську, ні установочну базу не визнають придатними для ролі вимірювальної бази і тому вибирають як координуючу базу який-небудь третій елемент деталі. Прикладом цього є координація оброблюваної поверхні, що показана на рисунку 110, г. Аналізуючи можливі види координації оброблюваної поверхні в умовах, коли установочна база не суміщена з конструкторською базою, розглянемо схеми, показані на рисунку 110.

Слід відзначити, що через відсутність на операційному ескізі другого координуючого розміру ($R24^{+0,300}$ «для довідки») конструктор пристрою зобов'язаний вважати $\lambda_{кпу} = 0$. Тому половина допуску на установочну базу (0,030 мм) входить у величину $\lambda_{крк}$ і виявляється врахованою двічі. За наявності розміру $R24^{+0,300}$ «для довідки» конструктор зобов'язаний прийняти його за координуючий (звести схему **в** до схеми **а**).

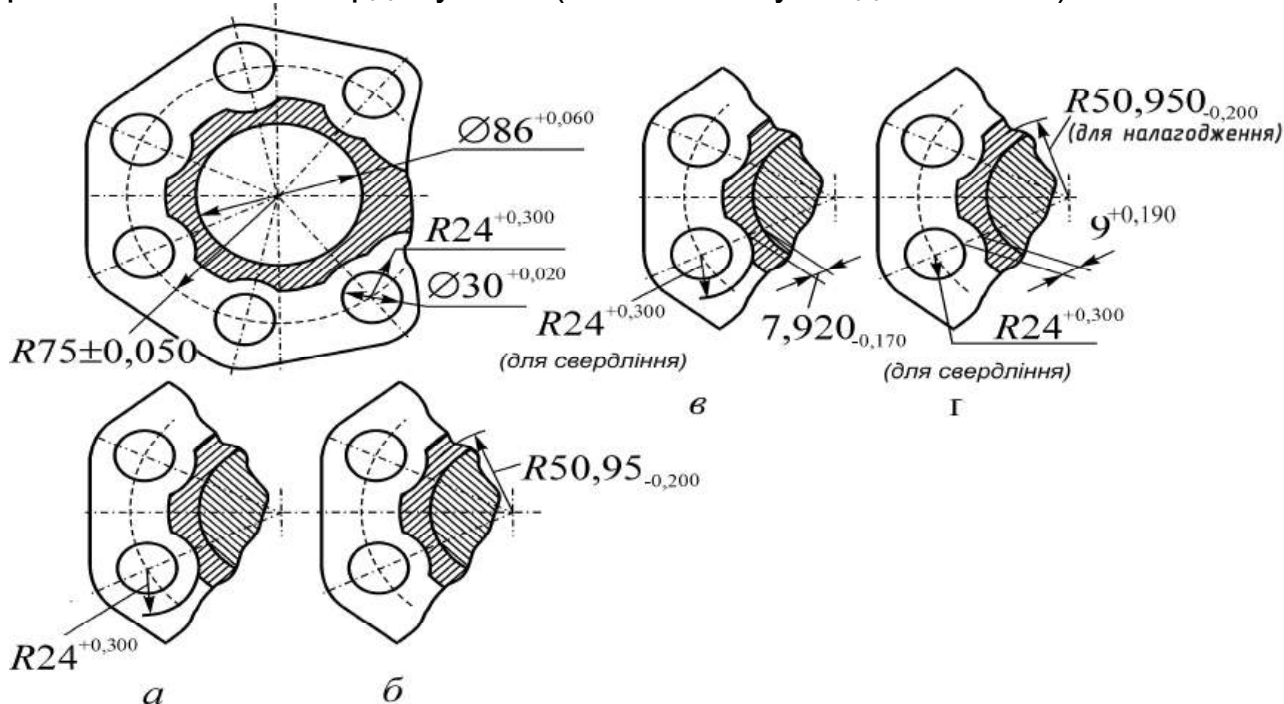


Рисунок 110 – Вибір координуючої бази (загальний огляд):

- а** – координуюча база суміщена з базою конструкторською;
- б** – координуюча база суміщена з базою установочною; **в** – неповне суміщення координуючої бази з установочною; **г** – координуюча база не суміщена ні з конструкторською, ні з установочною

Схема **г** – координуюча база суміщена з третім елементом деталі (несуміщення з конструкторською і з установочною – гірший вид несуміщення баз). При цьому $\lambda_{крк} = 0,010$ мм; $\lambda = 0,110$ мм. Допуск на координуючий розмір, зменшений технологом на величину $\lambda_{крк} + \lambda = 0,120$ мм, за винятком похибки радіуса отвору $\varnothing 30^{+0,020}$ (0,010 мм), що входить одночасно у величину $\lambda_{крк}$ й у величину λ , тобто в загальному на 0,110 мм (несуміщення трьох баз).

Якби на цьому ескізі був відсутнім розмір $R24^{+0,300}$ «для довідки» (і розмір $R50,950_{-0,200}$ «для налагодження»), то конструктор пристрою не знав би, що саме є конструкторською базою стосовно оброблюваної поверхні. Тому йому слід було вважати, що $\lambda = 0,110$ мм, тобто з вини

технолога похибка від несуміщення баз виявилася б врахованою двічі (технологом – як $\lambda = 0,110$ мм і конструктором – як $\lambda = 0,110$ мм).

За наявності розміру **R50,950-0,200** «для налагодження» конструкторів пристрою простіше керуватися цим розміром; у цьому випадку він правильно вважає, що $\lambda = 0$ (схема б). Без цього розміру йому слід виходити з розміру **R50,950-0,200** «для довідки»; при цьому він правильно визначить, що $\lambda = 0$ мм (схема а).

2.5.2 Перерахунок розмірів при виборі координуючої бази

Перерахунок розмірів, необхідний у випадках порушення принципу суміщення баз, ґрунтується на існуванні взаємного зв'язку розмірів оброблюваної деталі. Зв'язок між розмірами відображають так званими

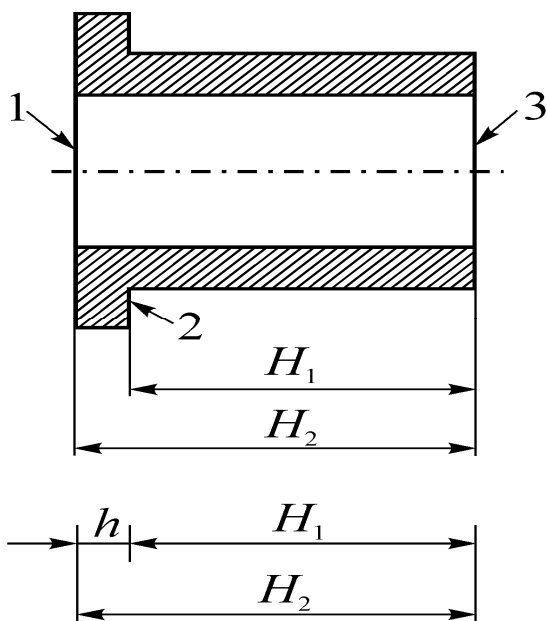


Рисунок 111 – Креслення втулки і розмірний ланцюг

розмірними ланцюгами, розуміючи при цьому розміри, розташовані по замкнутому контуру. У кожному розмірному ланцюзі розрізняють *закриваючий* (результуючий) розмір і *складові* розміри. Закриваючим називають розмір, що безпосередньо не витримують, а одержують у результаті дотримання всіх інших розмірів – складових. При перерахуванні розмірів користуються загальними положеннями теорії розмірних ланцюгів. Про сутність розмірних ланцюгів дає уявлення рисунок 111. У даному випадку ланцюг містить два складових розміри: H_1 і H_2 , а також не проставлений на кресленні розмір h , що є закриваючим (є «сам собою»).

Закриваючий розмір h можна знайти з рівняння розмірного ланцюга $h = H_2 - H_1$.

Складові розміри, при збільшенні яких закриваючий розмір збільшується («збільшуючі розміри»), записують у рівнянні зі знаком плюс і, навпаки, розміри, при збільшенні яких закриваючий розмір зменшується – зі знаком мінус («зменшуючі розміри»).

Щоб знайти граничні значення закриваючого розміру, користуються граничними значеннями складових розмірів. У нашому випадку

$$H_{max} = H_{2max} - H_{1min}; \quad h_{min} = H_{2min} - H_{1max}.$$

Допуск Δh закриваючого розміру, як різниця граничних значень h_{min} і h_{max} , завжди дорівнює сумі допусків складових розмірів: $\Delta h = H_1 + H_2$.

На відміну від розмірного ланцюга на кресленні деталі (його називають конструкторським ланцюгом) розмірний ланцюг, що відображає зв'язок операційних розмірів, називають операційним або технологічним розмірним ланцюгом.

У конструкторському розмірному ланцюзі деталі замикаючий розмір є найменш важливим з точки зору експлуатаційних функцій. На робочих кресленнях деталей замикаючі розміри звичайно не проставляють, бо вони «лишні». У технологічних розмірних ланцюгах замикаючими можуть бути різні розміри, але звичайно ними бувають розміри, задані в кресленні.

Таким чином, розміри, що є складовими в конструкторському ланцюзі, стають замикаючими в технологічному ланцюзі (рисунок 112).

Розрахунок ланцюга є найбільш простим, коли ставиться задача знайти значення замикаючого розміру за заданими значеннями складових розмірів. При розрахунку технологічних розмірних ланцюгів задачі приходить вирішувати майже завжди в зворотній постановці, а саме за заданим значенням замикаючого розміру визначати значення складових розмірів. При такій постановці визначення значень розмірів обов'язково має передувати підбирання величин допусків на складові розміри з тим, щоб їхня сума не перевищувала допуску на замикаючий розмір. Однак і за цієї умови результати не виходять дуже громіздкими, тому що технологічні розмірні ланцюги – це, як правило, короткі ланцюги.

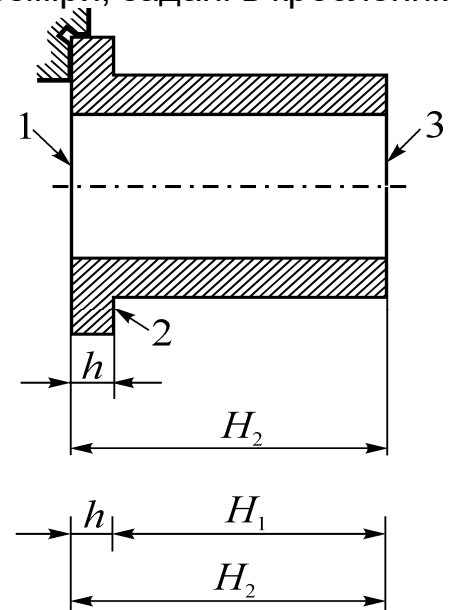


Рисунок 112 –
Операційний ескіз і
технологічний розмірний
ланцюг

Останнє пояснюється тим, що у технологічному розмірному ланцюзі замикаючим стає розмір, що в конструкторському ланцюзі є одним із складових, так що його допуск порівняно невеликий; якщо в технологічному ланцюзі буде багато складових розмірів, то допуски на них виявляться занадто малими.

Одну з характерних задач із перерозрахунку розмірів наведено нижче. Припустимо, що в операції оброблення тієї ж втулки (див. рисунок 111) як координуючу базу при координації поверхонь 2 і 3 буде використано торець 1, що стане установочною базою (рисунок 112).

При цьому стосовно поверхні 3 (розмір H_2) принцип суміщення баз буде витримано і, якщо операція остаточна, координуючий розмір H_2 може бути використаним прямо з креслення деталі.

Однак стосовно поверхні 2 (координуючий розмір h) цей принцип порушується. З креслення деталі (див. рисунок 111) можна бачити, що конструкторською базою стосовно поверхні 2 стає торець 3, тим часом

координуючою базою призначено торець 1 (установочна база), що відповідає першому основному виду несуміщення баз ($\lambda_{крк} = \Delta H_2$).

Щоб уникнути браку за креслярським розміром H_1 , допуск Δh на координуючий розмір h не може бути прийнято дорівнюючим креслярському допуску ΔH_1 . Його потрібно зменшити на величину $\lambda_{крк}$:

$$\Delta h = \Delta H_1 - \lambda_{кр.к} = \Delta H_1 - \Delta H_2$$

і відповідно розрахувати граничні значення координуючих розмірів h і H_2 на операційному ескізі.

Таким чином, сутність цієї задачі полягає в тому, щоб замінити креслярський розмір H_1 таким координуючим розміром h , при якому буде виключено брак за розміром H_1 . Цей розмір H_1 , будучи складовим у конструкторському ланцюзі (див. рисунок 111), стає замикаючим у технологічному розмірному ланцюзі (див. рисунок 112) тому, що при обробленні саме він вийде «сам собою» у результаті дотримання складових розмірів H_2 і h .

Якщо в конструкторському розмірному ланцюзі розмір h був замикаючим і рівняння розмірного ланцюга, написане щодо замикаючого розміру, мало вигляд

$$h = H_2 - H_1 \quad \text{і, отже, було} \quad h = \Delta H_2 + \Delta H_1,$$

то в технологічному розмірному ланцюзі замикаючим став розмір H_1 і, відповідно до цього, рівняння ланцюга, написане щодо замикаючого розміру, буде мати вигляд $H_1 = H_2 - h$, тоді $\Delta H_1 = \Delta H_2 + \Delta h$, звідки знаходимо, що допуск на координуючий розмір h необхідно призначити $\Delta h = \Delta H_2 - \Delta H_1$, але не більшим.

Перевіривши, чи виходить величина Δh достатньою для обраного методу оброблення, і якщо ні, то збільшивши її за рахунок зменшення ΔH_2 (зменшення величини $\lambda_{крк}$), можна після цього знайти граничні значення координуючого розміру h . Для цього в рівняння технологічного ланцюга потрібно підставити відомі граничні значення розмірів H_1 і H_2 :

$$H_{1max} = H_{2min} - h_{min}; \quad H_{1min} = H_{2max} - h_{max}.$$

Звідси

$$h_{min} = H_{2max} - H_{1max}; \quad h_{max} = H_{2min} - H_{1min}.$$

У практиці задачі з перерахування розмірів різноманітні, але викладений метод застосуємо для вирішення кожної з них.

Приведемо ще приклад.

Показаний на схемі шатуна розмір $3 \pm 0,150$ товщини ребра тавра (рисунок 113 угорі) має бути витриманим при послідовному обробленні

двох боків ребра слідом за обробленням торців головок, як показано на ескізах 1, 2 і 3.

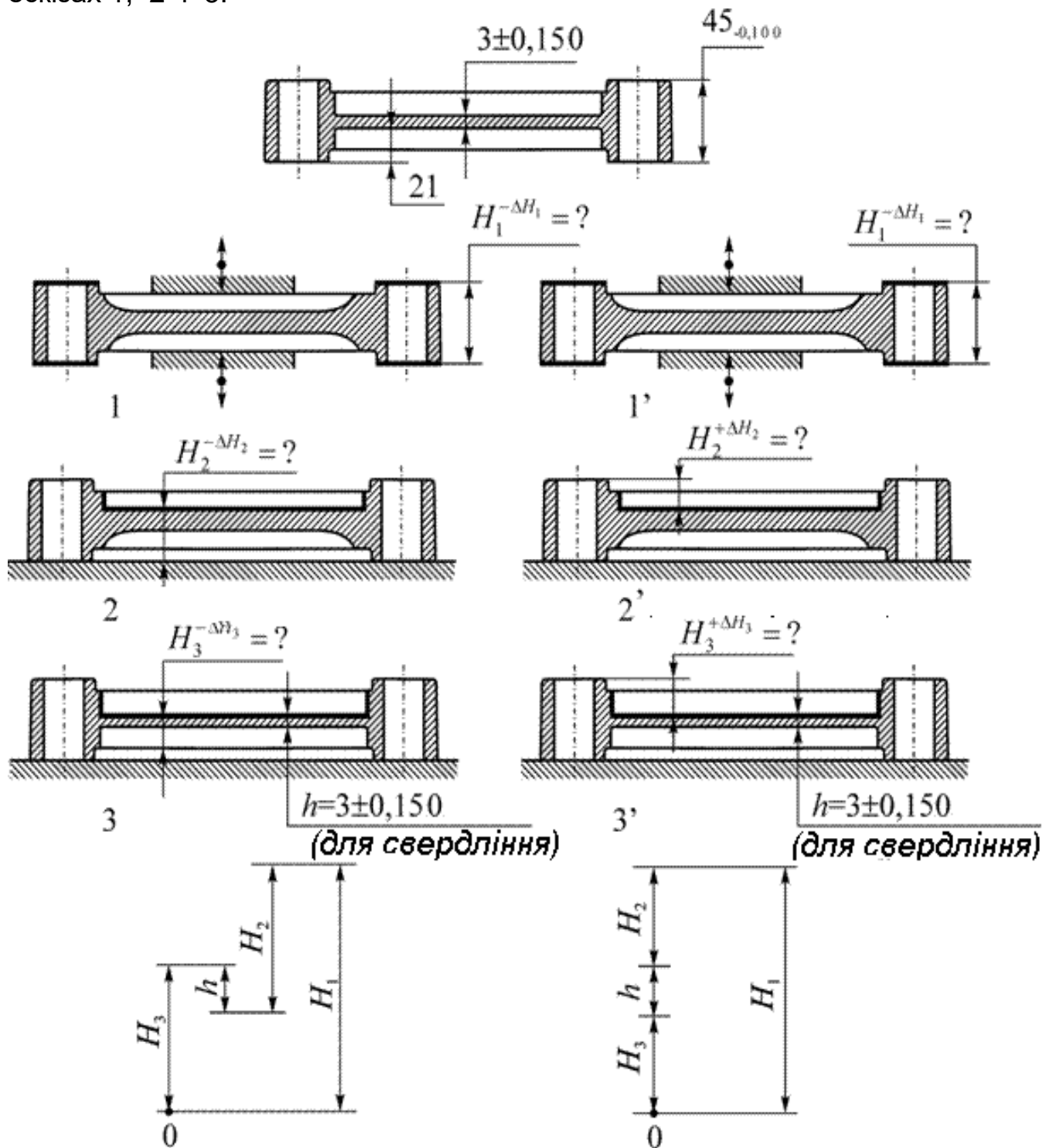


Рисунок 113 – Розрахунок операційних розмірів

На кожній із двох операцій оброблення боків ребра і на операції № 2, і на операції № 3 – установочна база не суміщена з базою конструкторською. Як видно з проставлення розмірів на схемі шатуна (угорі), стосовно кожного боку ребра є дві конструкторські бази.

Першою базою для кожного боку є протилежний бік ребра (боки зв'язані між собою розміром $3\pm 0,150$, виходить, кожна з них служить конструкторською базою стосовно іншої). Другою базою є суміжні торці головок, на що вказує розмір 21 мм. Хоча на кресленні цей розмір зазначено лише з одного боку, ясно, що він відображає вимогу симетричності ребра щодо торців головок.

Таким чином, на операції № 2, де обробляється один бік ребра, для суміщення установочної бази з конструкторською цією установочною базою мав би бути інший бік ребра (що неможливо, тому що він ще не оброблений, тоді як торці головок вже оброблені в операції № 1) або ж торці головок, але не ті, що показано на ескізі 2, а з'єднані з оброблюваною стороною ребра розміром 21 мм, тобто протилежні (що сильно б ускладнило конструкцію пристрою).

На операції № 3 можна використовувати як установочну базу протилежний вже оброблений в операції № 2 бік ребра, і тим самим сумістити установочну базу з конструкторською, але тоді для операції № 3 не можна буде скористатися пристроєм з операції № 2 і прийдеться виготовляти інший пристрій.

Як і завжди при несуміщенні установочної бази з базою конструкторською координуючу базу можна вибрати по-різному. На операціях № 2 і 3 операційні розміри проставлені так, що координуюча база суміщена з установочною, а на операціях № 2' і 3' – з однією з двох конструкторських баз. Однак і в тому, і в іншому випадку операційні розміри прийдеться визначати, виходячи з того, що розмір $h = 3\pm 0,150$ (ескізи 3 і 3') має вийти «сам собою» як замикаючий розмір якогось технологічного розмірного ланцюга. Вирішимо послідовно ці дві задачі.

Насамперед, потрібно виявити ланцюг, у якому замикаючим розміром буде розмір $h = 3\pm 0,150$. Для першого випадку (операції № 1, 2 і 3) технологічний розмірний ланцюг, що відповідає зробленому на цих операціях проставленню розмірів, показано на рисунку 113 унизу. З нього видно, що розмір h залежить від розмірів H_1 , H_2 і H_3 .

При складанні рівняння розмірного ланцюга зручно брати за початок який-небудь з його стиків або послідовно записувати розміри ланцюга, приписуючи їм знаки “плюс” і “мінус” залежно від їхнього напрямку.

У нашому випадку, взявши за початок точку 0 і вважаючи напрямом вгору “плюс”, а вниз – “мінус”, одержимо рівняння

$$H_3 - h + H_2 - H_1 = 0$$

або щодо замикаючого розміру $h = H_2 + H_3 - H_1$.

Маючи на увазі загальне положення про те, що допуск замикаючого розміру дорівнює сумі допусків на складові розміри, і, враховуючи, що в нашому випадку його величина є заданою ($\Delta h = \pm 0,150 = 0,300$), потрібно насамперед перевірити чи можливо його дотриматися, тобто які допуски

прийдеться проставити на складові розміри. Може виявитися, що при заданій величині допуску на замикаючий розмір складових розмірів занадто багато, допуски на них прийдеться призначити дуже жорсткі і виконання операцій при вибраних базах і методах оброблення стане просто неможливим. У нашому випадку має бути

$$\Delta h = \Delta H_2 + \Delta H_3 + \Delta H_1.$$

Уже видно, що ΔH_1 не можна прийняти таким, що дорівнює креслярському допуску на висоту головок (0,300 мм), тому що ΔH_2 і ΔH_3 не можуть дорівнювати нулю, його треба збільшувати.

Припустимо для простоти, що буде правильно призначити однакові допуски на всі складові розміру, тобто $\Delta H_2 = \Delta H_3 = \Delta H_1 = 0,100$ мм і що таку точність (0,100 мм) можна буде витримати у намічених операціях. Таким чином, операційні допуски для намічених операцій № 1, 2 і 3 визначені.

Для визначення граничних значень операційних розмірів потрібно скористатися рівнянням розмірного ланцюга і відомих значень розмірів.

$$\text{Рівняння розмірного ланцюга: } h = H_2 + H_3 - H_1.$$

Відповідно

$$h_{max} = H_{2max} + H_{3max} - H_{1min}; \quad h_{min} = H_{2min} + H_{3min} - H_{1max}.$$

Відомо, що:

$$1) \quad h_{max} = 3^{+0,150} \text{ мм}; \quad h_{min} = 3_{-0,150} \text{ мм};$$

2) номінальне значення розміру H_1 можна взяти з креслення деталі (45 мм); допуск ΔH_1 визначено раніше ($\Delta H_1 = 0,100$ мм), значить, $H_1^{-\Delta H_1} = 45_{-0,100}$ і $H_{1max} = 45$ мм, а $H_{1min} = 44,900$ мм (тут і далі для зручності написання і читання мінусові допуски набрані на місці верхнього граничного відхилення);

3) операційні розміри $H_2^{-\Delta H_2}$ і $H_3^{-\Delta H_3}$ дорівнюють один одному, тому що операції № 2 і 3 подібні і вже призначено $\Delta H_2 = \Delta H_3 = 0,100$ мм.

Підставивши відомі граничні значення розмірів, одержимо:

$$3,150 = H_{2max} + H_{3max} - 44,900; \quad 2,850 = H_{2min} + H_{3min} - 45.$$

Вважаючи, що $H_2^{-\Delta H_2} = H_3^{-\Delta H_3}$, знаходимо

$$H_{2max} = H_{3max} = 24,025 \text{ мм}; \quad H_{2min} = H_{3min} = 23,925 \text{ мм}.$$

Таким чином, знайдено, що для дотримання товщини ребра тавра $3 \pm 0,150$ при висоті головок $45_{-0,100}$ мм операційні розміри на операціях № 2 і 3 мають бути $H_2^{-\Delta H_2} = H_3^{-\Delta H_3} = 24,025_{-0,100}$ мм.

Для другого випадку проставлення операційних розмірів (операції № 1', 2' і 3') рішення є аналогічним.

Рівняння розмірного ланцюга (рисунок 113 внизу справа) (йдемо від точки 0 вгору (+), вниз (–)) буде: $H_3 + h + H_2 - H_1 = 0$, або $h = H_1 - H_2 - H_3$. Як і раніше, має бути

$$\Delta h = \Delta H_2 + \Delta H_3 + \Delta H_1 = 0,300 \text{ мм.}$$

Якщо подібно попередньому призначити:

$$1) \Delta H_1 = \Delta H_2 = \Delta H_3 = 0,100 \text{ мм;}$$

$$2) H_1^{-\Delta H_1} = 45^{-0,100} \text{ мм;}$$

$$3) H_2^{-\Delta H_2} = H_3^{-\Delta H_3},$$

то граничні значення розмірів H_2 і H_1 виходять з рівнянь:

$$h_{\max} = H_{1\max} - H_{2\min} - H_{3\min}; \quad h_{\min} = H_{1\min} - H_{2\max} - H_{3\max}.$$

Підставляючи відомі значення, знаходимо

$$3,150 = 45 - H_{2\min} - H_{3\min}; \quad 2,850 = 44,900 - H_{2\max} - H_{3\max} \text{ або}$$

$$2H_{2\min} = 45 - 3,150 = 41,850 \text{ мм;} \quad 2H_{2\max} = 44,900 - 2,850 = 42,050 \text{ мм;}$$

$$H_{2\min} = H_{3\min} = 20,925 \text{ мм;} \quad H_{2\max} = H_{3\max} = 21,025 \text{ мм.}$$

Таким чином, операційні розміри мають бути такими:

$$\text{на операції № 1' розмір } H_1^{-\Delta H_1} = 45^{-0,100} \text{ мм;}$$

$$\text{на операції № 2' розмір } H_2^{+\Delta H_2} = 20,925^{+0,100} \text{ мм;}$$

$$\text{на операції № 3' розмір } H_3^{+\Delta H_3} = 20,925^{+0,100} \text{ мм.}$$

Викладена загальна методика не є єдиною. При розрахунку технологічних розмірних ланцюгів буває зручно не користатися рівняннями з граничними значеннями розмірів для того, щоб не зосереджувати увагу на правильності написання біля розмірів індексів «max» і «min», спростити роботу, усно виконуючи велику її частину. Для цього можна скористатися тією обставиною, що у правильного розмірного ланцюга середнє значення будь-якого розміру дорівнює алгебричній сумі середніх значень усіх інших розмірів. Переписуючи розміри ланцюга так, щоб номінальним значенням кожного з них було середнє значення ($H_{\text{сер}}$), спочатку знаходять середнє значення шуканого розміру, а потім визначають допуск на нього.

Наприклад, стосовно розглянутого вище операціям № 1, 2 і 3 розмірний ланцюг (див. рисунок 113 унизу ліворуч) можна записати, як показано на рисунку 114 ліворуч. Тоді

$$2H_{2\text{сер}}; 3_{\text{сер}} = 44,850 + 3 = 47,850 \text{ мм;} \quad H_{2\text{сер}} = H_{3\text{сер}} = 23,925 \text{ мм.}$$

Знаючи, що розмір $3 \pm 0,150$ виходить як замикаючий, розподіляють його допуск між усіма складовими розмірами. Якщо розподілити його порівну (з тих же розумінь, що було викладено вище, тобто прийняти

$$\Delta H_1 = \Delta H_2 = \Delta H_3 = 0,100 = \pm 0,050 \text{ мм), запишемо}$$

$$H_{1\text{сер}} \pm 0,5\Delta H_1 = 44,850 \pm 0,050 \text{ мм;} \quad H_{2\text{сер}} \pm 0,5\Delta H_2 = 23,925 \pm 0,050 \text{ мм.}$$

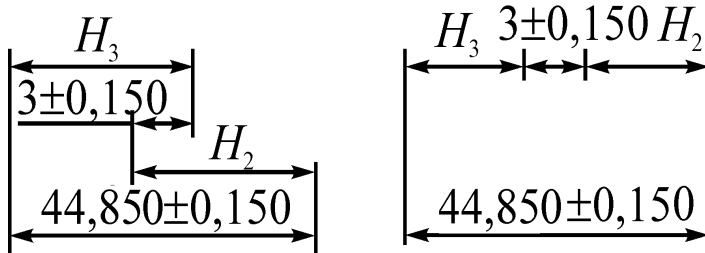


Рисунок 114 – Розрахунок ланцюгів за середніми значеннями розмірів

Знайдені таким способом розміри записують в операційних картах відповідно до загальних правил (допуск має бути спрямованим «у тіло» деталі): на операціях № 1 розмір $44,850 \pm 0,050 = 44,900 - 0,100$ мм; на операціях № 2 і 3 розміри $20,925 \pm 0,050 = 20,875 + 0,100$ мм.

Аналогічно розраховується ланцюг для операцій № 1', 2', 3' (див. рисунок 114 праворуч). Відразу видно: $H_2 \text{ сер}; z_{\text{сер}} = 44,850 - 3 = 41,850$ мм; $H_2 \text{ сер} = H_3 \text{ сер} = 20,925$ мм.

При $\Delta H_1 = \Delta H_2 = \Delta H_3 = 0,100 = \pm 0,050$ мм одержуємо розміри:

на операції № 1' розмір $44,850 \pm 0,050 = 44,900 - 0,100$ мм;

на операціях № 2' і 3' розміри $20,925 \pm 0,050 = 20,875 + 0,100$ мм.

Результати відрізняються від попередніх лише тому, що раніше висота головок була прийнята $45 - 0,100$ мм (середнє значення – 44,950), а тут вона – $44,900 - 0,100$ мм (середнє значення – 44,850).

Припустимо, що потрібно знайти граничні значення замикаючого розміру h за заданими складовими розмірами у ланцюзі, показаному на рисунку 115 угорі. Якщо цей ланцюг переписати, як показано на рисунку 115, то одержимо:

$$h_{\text{сер}} = 109,700 - 30 - 40,150 - 29,900 = 9,650 \text{ мм};$$

$$\Delta h = 0,600 + 0,200 + 0,300 + 0,200 = 1,300 = \pm 0,650 \text{ мм};$$

$$H - \Delta h = 10,300 - 1,300; \quad h^{+\Delta h} = 9^{+1,300} \text{ мм}.$$

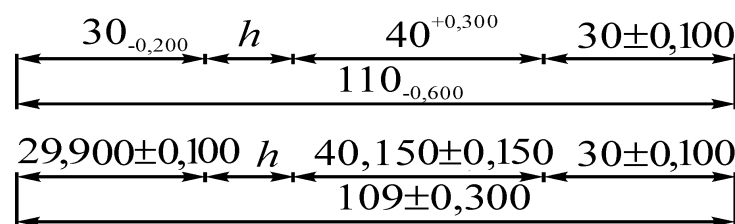


Рисунок 115 – Первинний (угорі) і новий (унизу) записи розмірів ланцюга

Оскільки технологічні ланцюги короткі, то при круглих розмірах їх можна розрахувати майже усно (з мінімумом записів).

2.6 Поняття про розподіл похибок

2.6.1 Розподіл похибок взаємного положення двох установочних баз

Однієї установочної бази не завжди досить для того, щоб забезпечити заданий координуючий розмір. У таких випадках на операції доводиться використовувати як установочні бази одночасно кілька поверхонь деталі.

Більше двох баз для надання деталі визначеного положення в якійсь потрібній площині звичайно не потрібно (рисунок 116). Тому навіть самий загальний випадок, коли деталь потрібно встановити у всіх напрямках простору (тобто в трьох взаємно пересічних площинах), характерний тими ж особливостями, що й установлення двох поверхонь в одній площині («просторова» задача зводиться до ряду «плоских» задач).

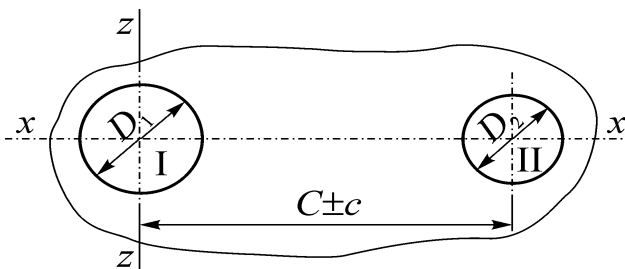


Рисунок 116 – Установочні бази – дві циліндричні поверхні

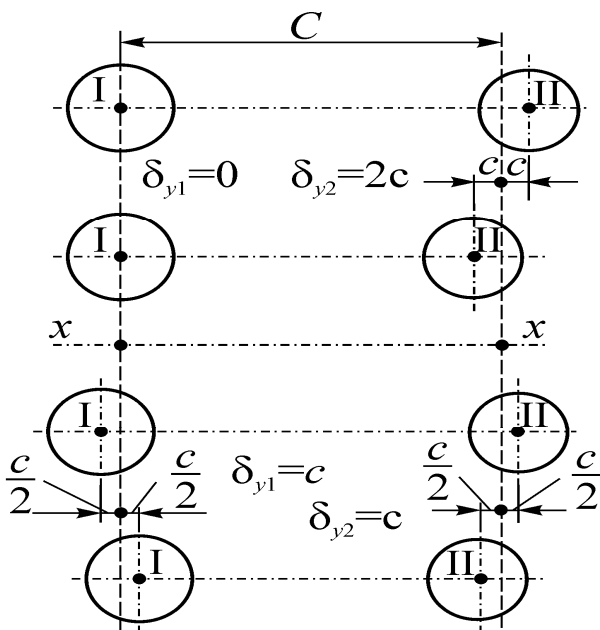


Рисунок 117 – Крайні положення двох циліндричних поверхонь баз при найкращому встановленні за першим варіантом (угорі) і другим варіантом (унизу)

Установлення в одній площині двох установочних баз потребує особливого підходу, обумовленого тим, що у взаємному розташуванні баз завжди є похибка. Допустимо, що установочними базами деталі є дві циліндричні поверхні D_1 і D_2 з паралельними осями, відстань між якими $C \pm c$. У цьому випадку похибка взаємного положення баз буде подана допуском $2c$, що витримувався раніше при обробленні самих баз. Присутність похибки взаємного положення баз робить очевидним той факт, що не тільки практично, але і теоретично абсолютно точне встановлення обох баз (тобто одержання $\delta y_1 = 0$ і $\delta y_2 = 0$) є неможливим. У зв'язку з цим виникає задача про те, яким чином розподілити вплив цієї похибки на точність установлення баз. При цьому можливі два принципово різних рішення і, відповідно, два варіанти теоретично найкращого встановлення баз.

Перший з цих варіантів (рисунок 117 угорі) характерний тим, що одна з двох баз (наприклад, перша) встановлена

абсолютно точно ($\delta y_1 = 0$) і, відповідно, похибка взаємного положення баз (2с) віднесена цілком у похибку встановлення другої бази.

Другий варіант відрізняється тим, що вплив похибок взаємного положення баз (2с) розподіляється між базами в якомусь певному відношенні. У практиці найбільш відомий окремий випадок розподілу – «розполовинювання», при якому вплив поділяється нарівно між обома базами, тобто $\delta y_1 = c$ і $\delta y_2 = c$ (рисунок 117 унизу).

Задача про розподіл (про доцільність застосування другого варіанта встановлення) виникає у всіх випадках, коли належать дотриманню координуючі розміри, напрям яких збігається з напрямом розміру, що зв'язує бази ($x - x$) і забезпечуються не однією базою, а обома.

Наприклад, показана на схемі (рисунок 118) операція не може бути виконана при встановленні деталі за *першим* варіантом (внаслідок браку за розміром A_1 або за розміром A_2 залежно від того, яка з двох баз буде прийнята «як перша»), але вона стає можливою, якщо здійснити *другий* варіант установаження і забезпечити розполовинювання похибки розміру C .

Показана операція стане можливою і без розполовинювання похибки розміру C , якщо в попередньому обробленні самих баз витримувати цей розмір з більш високою точністю (наприклад, замість $\pm 0,300$ мм прийняти $\pm 0,150$ мм). Однак компенсацією за це ускладнення попереднього оброблення буде лише сама можливість виконати операцію. Неприятливі наслідки *принципової невідповідності* способу встановлення деталі заданій координації оброблюваних поверхонь залишаться в недоторканності, а вплив похибки розміру C не буде пропорційним заданій точності координуючих розмірів A_1 і A_2 .

Описаний принцип вибору варіанта встановлення деталі зберігає силу й в умовах несуміщення координуючих баз з установочними базами.

Якщо координуючі бази зв'язані в напрямку розміру C (що з'єднує установочні бази) тільки з однією установочною базою (рисунок 119, а), тоді буде обов'язковим *перший* варіант.

Якщо ж розполовинювання похибки у взаємному розташуванні баз, частина яких зв'язана з однією установочною базою, а частина – з іншою (рисунок 119, б), то необхідно розглядати доцільність *другого* варіанта – розподілу похибок взаємного положення установочних баз.

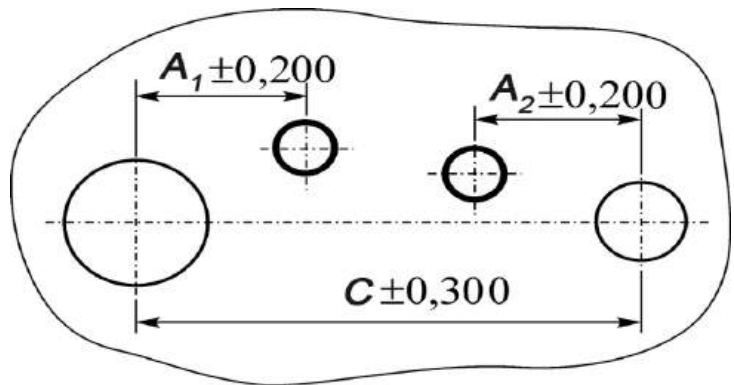


Рисунок 118 – Операція неможлива без розполовинювання похибок у взаємному розташуванні баз

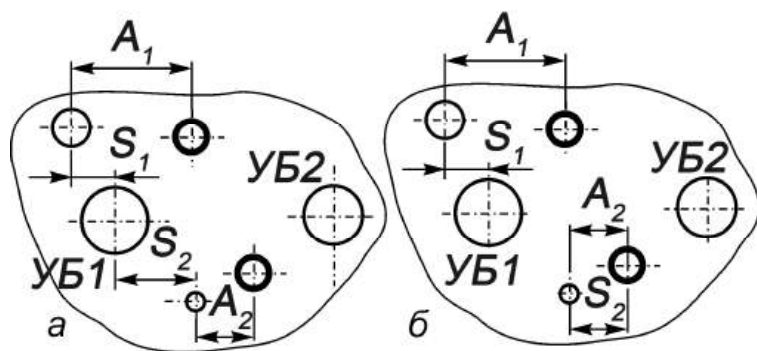


Рисунок 119 – Вибір варіанта встановлення для випадку несуміщення координуючих баз похибки P з базами установочними: **а** – координуючі бази зв'язані з однією з установочних баз; **б** – координуючі бази зв'язані з обома установочними базами



Рисунок 120 – Розполовинювання похибки P

За інших однакових умов у всіх випадках найкращим буде розподіл, пропорційний заданій точності координуючих розмірів, що забезпечуються першою і другою установочними базами. Якщо кожна з цих баз забезпечує кілька координуючих розмірів, то при розподілі орієнтуються на розміри, що мають найвищу точність.

2.6.2 Розполовинювання похибки P , зв'язаної з установленням деталі

Визначена розрахунком величина похибки P ($P = \lambda + \delta$) являє собою величину очікуваного поля розсіювання положень координуючої бази в напрямку координуючого розміру. Необхідність розполовинювання обумовлена тим, що це розсіювання є наслідком розсіювання розмірів деталей і неточностей роботи пристроїв верстата, отже, треба очікувати якогось «горбоподібного» розподілу похибок в її полі; ймовірніше всього розсіювання буде близьким до закону Гауса, якщо немає домінуючих факторів. Задача розполовинювання полягає в тому, щоб зв'язати середину поля похибок P (центр групування) із середнім значенням $A_{сер}$ заданого координуючого розміру (рисунок 120). Оскільки положення поля P (координуючої бази) у робочій зоні верстата залежить від розмірів деталі і пристрою, але останнє розробляється після проектування технологічного процесу, то розполовинювання досягається вибором величин відповідних розмірів елементів пристрою.

Два приклади показано на рисунку 121.

Угорі зображена схема свердління вала, а під нею – частина деталювання елементів пристрою. Встановлення бази $\varnothing 100^{-0,400}$ за допомогою призми призводить до похибки встановлення $\delta y = 0,7 \cdot a = 0,7 \cdot 0,400 = 0,280$ мм. Операція має забезпечити співвісність отвору і зовнішньої поверхні вала (суміщення баз; $A_{сер} = 0$), тому $P = \delta y = 0,280$ мм.

Величина координати отвору під направляючу втулку, що показана на схемі **б**, забезпечує розполовинювання похибки **P** (розмір на схемі **a** – помилковий).

Унизу рисунка, ліворуч, показана схема встановлення деталі на операції оброблення отвору в бобищі. Такий варіант устанавлення деталі забезпечує $P = \delta y = 0,5 \cdot a = 0,5 \cdot 0,700 = 0,350$ мм. При цьому похибка **P** буде розполовинена за умови величини координати встановочної площини $Ky = 0,5 \cdot D - 0,5 \cdot P = 24,820$ мм.

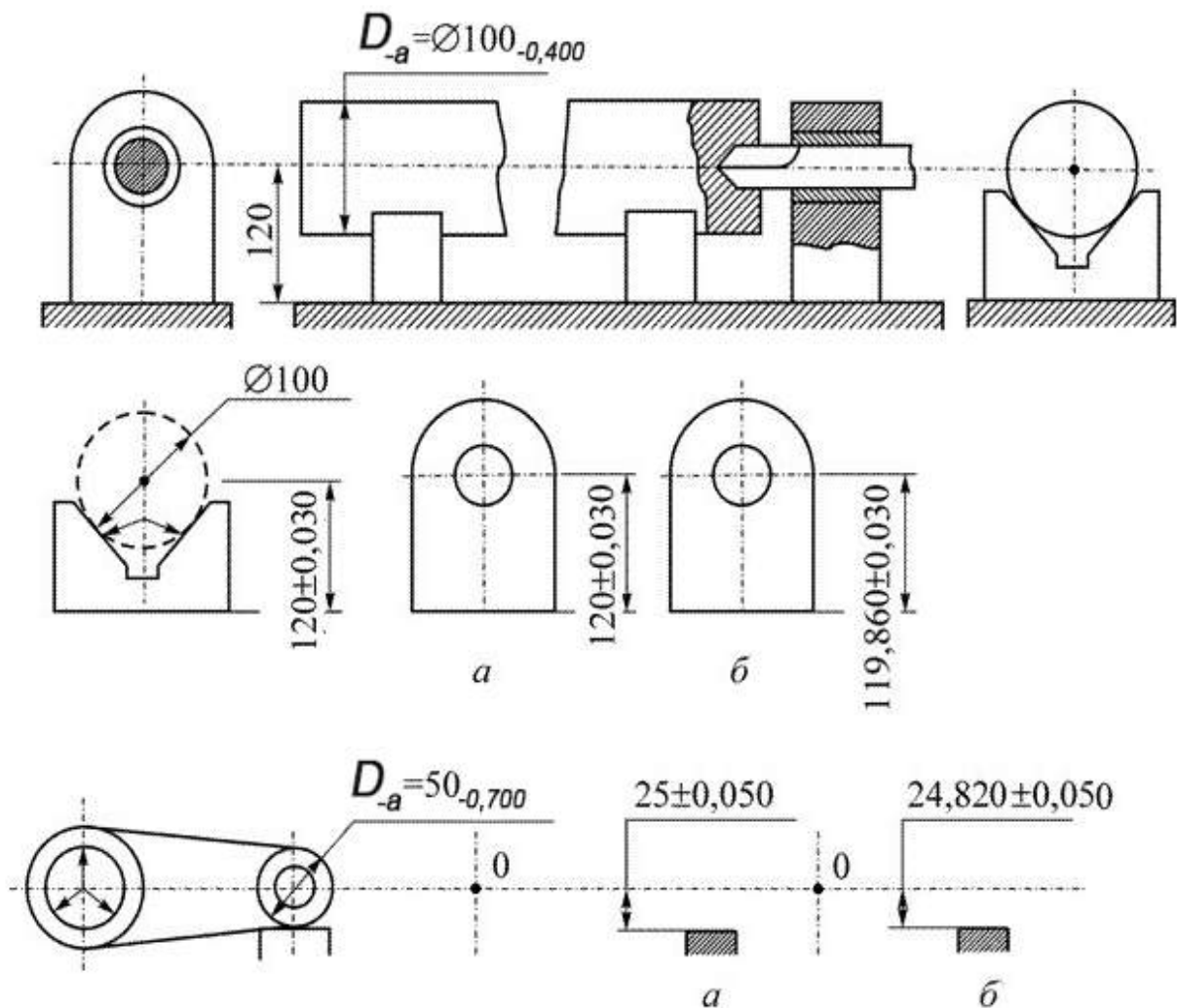


Рисунок 121 – Два приклади розполовинювання похибки **P**:
a – неправильна і **б** – правильна величина координати отвору під
 напрямну втулку (угорі) і установочною площиною (унизу)

Крім більш раціонального використання точнісних можливостей пристроїв верстата, за допомогою яких досягається просте встановлення деталей і автоматичне одержання заданих координуючих розмірів за умови попереднього налагодження верстата з відповідним оснащенням, розподіл (розполовинювання) похибок сприяє зменшенню нерівномірності припусків (наприклад, як це показано раніше на рисунку 92).

2.7 Розрахунково-технологічні вправи визначення і оптимізації параметрів точності базування деталей

Для набуття практичних навичок та компетенцій розрахунково-технологічного визначення параметрів точності базування деталей рекомендується виконання вправ за трьома темами.

2.7.1 Тема 1: Оптимізація технологічних розмірів-координат для мінімізації браку деталей за креслярськими розмірами в умовах несуміщення конструкторських і технологічних баз при дотриманні правила єдиної установочної бази

Мета роботи:

1. Набуття навичок розмірного аналізу формоутворюючих технологічних операцій з урахуванням топографії розмірів заданого креслення деталі авіадвигуна в умовах несуміщення конструкторських і технологічних баз при дотриманні правила єдиної установочної бази.

2. Набуття навичок комплексних розмірних розрахунків розмірів-координат в технологічних операціях, що виконуються при дотриманні правила єдиної установочної бази:

а) розрахунки очікуваних значень допоміжних технологічних розмірів X_0 і Y_0 ;

б) визначення браку для очікуваних значень креслярських розмірів A_0 і B_0 при розсіюванні технологічних розмірів за законами трикутника і рівної ймовірності;

в) оптимізація значень креслярських розмірів-координат A_{opt} і B_{opt} з метою мінімізації браку;

г) виявлення, розрахунки і перерахунки ланок конструкторсько-технологічних розмірних ланцюгів;

д) розрахунки оптимальних технологічних розмірів X_{opt} і Y_{opt} , що забезпечують мінімальний брак деталі за креслярськими розмірами-координатами A і B зі збереженням формату заданих значень граничних відхилень розмірів X і Y .

Початкові дані:

Ескіз деталі (рисунок 122) та ескізи установки і оброблення двох елементів деталі (операції №1 і №2 – рисунки 123 і 124).

Аналіз рисунків 122, 123 і 124 дає наступне. Розглядається один напрям координуючих розмірів – по вертикалі. У цьому напрямі виконуються із заданою точністю технологічні розміри-координати X і Y , визначальні положення площини (рисунок 123) і осі отвору (рисунок 124).

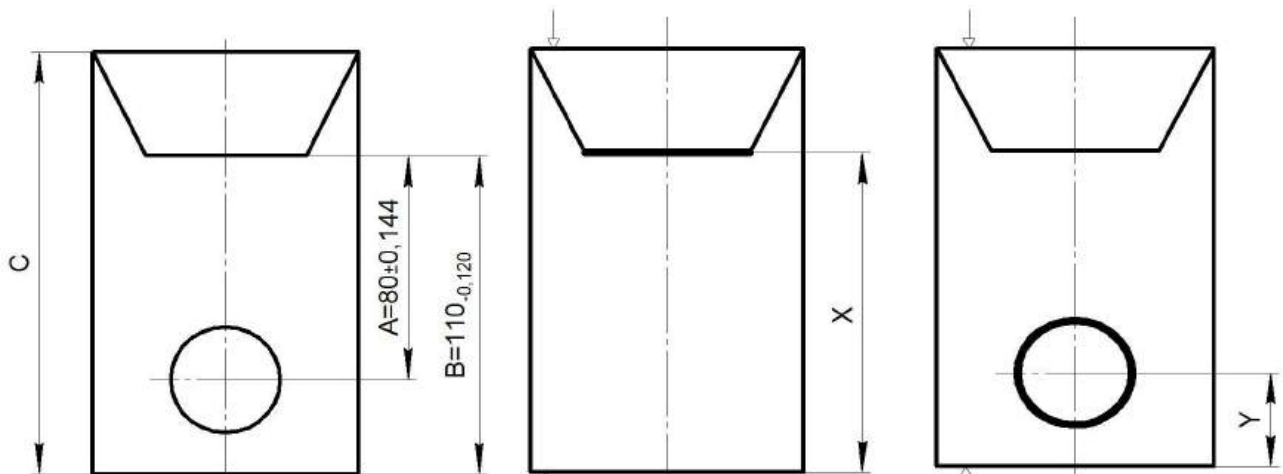


Рисунок 122 – Ескіз деталі

Рисунок 123 – Операція №1

Рисунок 124 – Операція №2

Методика і послідовність виконання роботи

Операції оброблення виконуються з єдиної установочної бази, в одній позиції, але з різних установів. Принцип суміщення баз дотримується тільки на операції оброблення площини, тобто очікуваний технологічний розмір X_0 топографічно співпадає з розміром B на кресленні деталі:

$$B_0 = X_0 = 110^{+0,130}_{-0,015}.$$

Очікуваний розмір A_0 виходить як замикаюча ланка в ланцюзі

$$A_0 = X_0 - Y_0 = 110^{+0,130}_{-0,015} - 30^{+0,105}_{-0,080} = 80^{+0,210}_{-0,120}.$$

Схема визначення вірогідності браку деталі за розмірами A і B для двох законів розсіювання (законів трикутника і рівної ймовірності) показано на рисунку 125, а і б.

Визначимо вірогідність браку для розміру A за законом трикутника

$$W_T = 0,5(GH^2 / FH^2) \cdot 100 \% = 0,5(0,066^2 / 0,165^2) \cdot 100 \% = 8 \%.$$

За законом рівної ймовірності вірогідність браку для розміру A

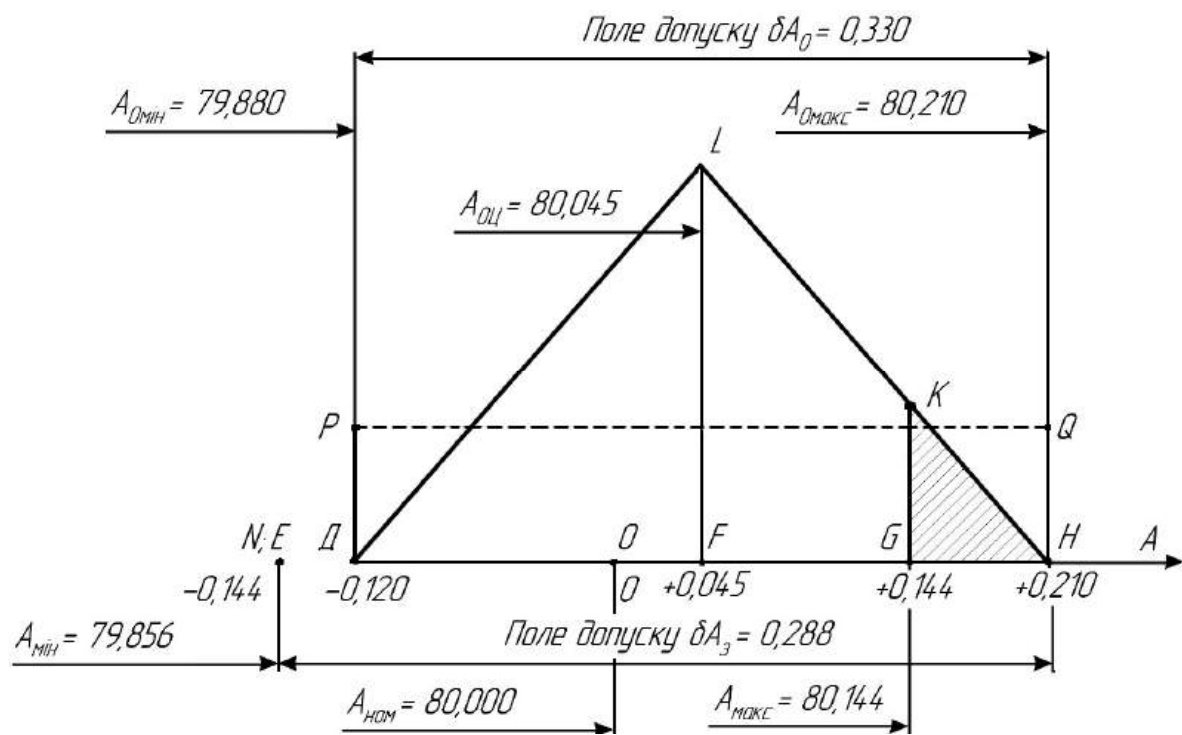
$$W_{PI} = (GH / DH) \cdot 100 \% = (0,066 / 0,330) \cdot 100 \% = 20 \%.$$

Визначимо вірогідність браку для розміру B за законом трикутника

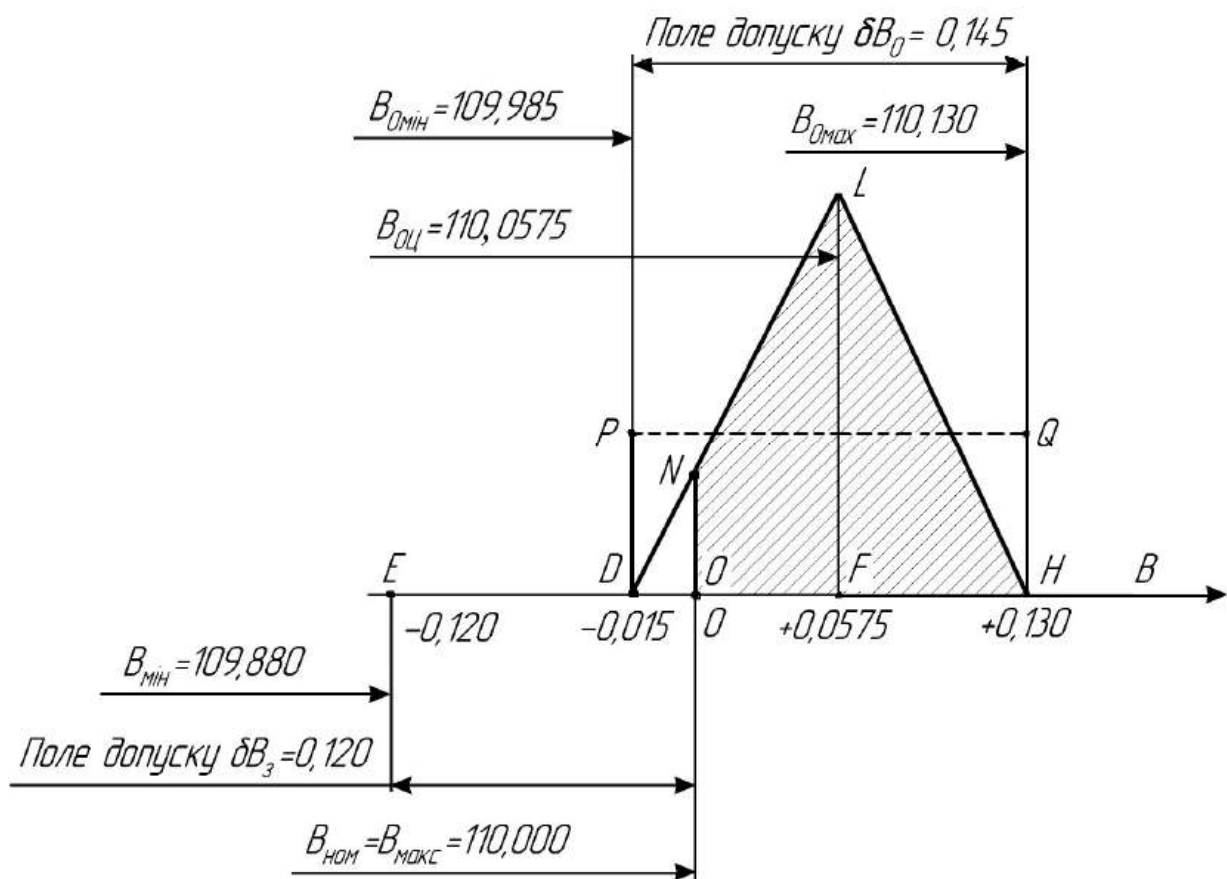
$$\begin{aligned} W_T &= 50 \% + 0,5(1 - DO^2 / DF^2) \cdot 100 \% = \\ &= 50 \% + 0,5(1 - 0,015^2 / 0,0725^2) \cdot 100 \% = 97,8 \%. \end{aligned}$$

За законом рівної ймовірності вірогідність браку для розміру B

$$W_{PI} = (OH / DH) \cdot 100 \% = (0,130 / 0,145) \cdot 100 \% = 90 \%.$$



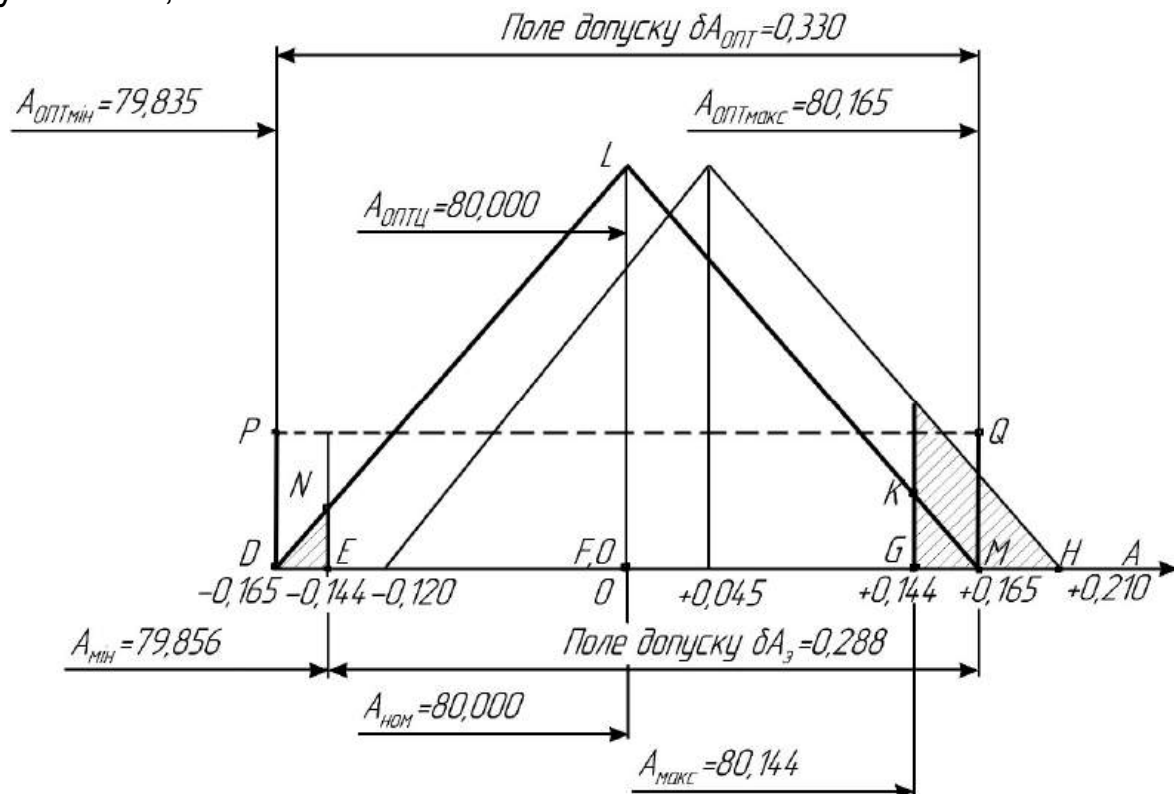
а



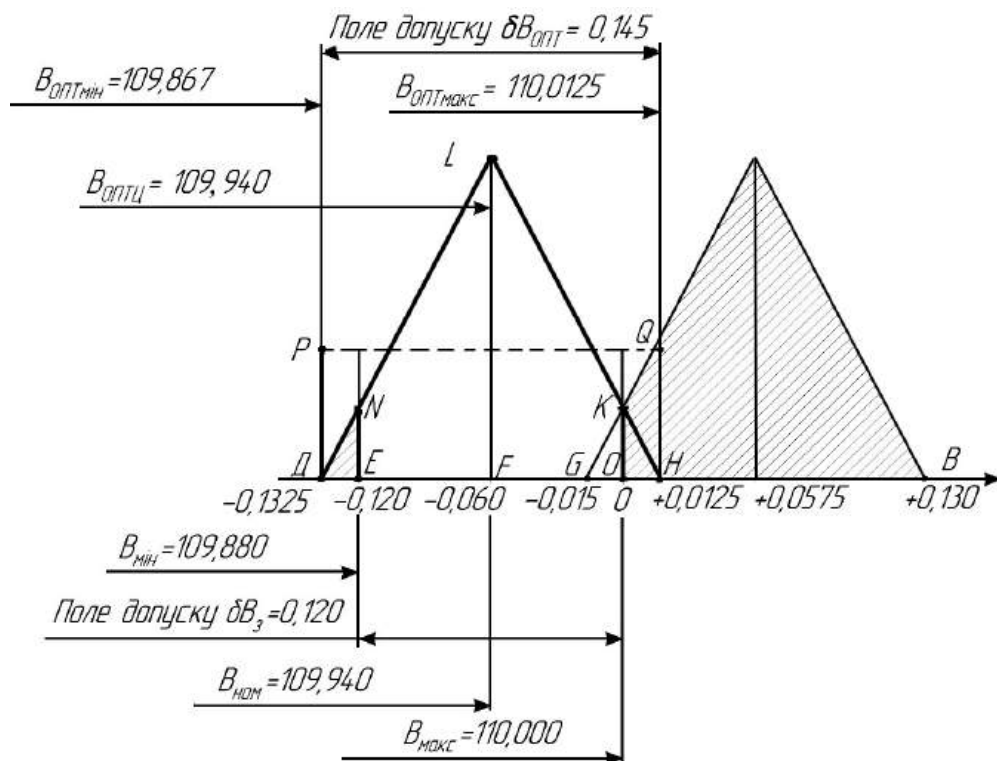
б

Рисунок 125 – Схема визначення вірогідності браку:
а – за розміром A ; б – за розміром B

Схема оптимізації креслярських розмірів **A** і **B** представлена на рисунках 126, а і б.



а



б

Рисунок 126 – Схема оптимізації розміру **A** (а) і розміру **B** (б)

Розрахунки операцій з досягнення оптимальних значень креслярських розмірів розпочинаються з аналізу розрахункової схеми визначення браку деталі розміром **B**, який формується в першій операції. Слід мати на увазі, що мінімізація можливого браку за креслярськими розмірами полягає в коригуванні меж граничних значень очікуваних розмірів так, щоб вони стали симетричними межах граничних значень заданих розмірів. В результаті перерахунків маємо оптимізовані розміри

$$A_{\text{опт}} = 80 \pm 0,165 \quad \text{і} \quad B_{\text{опт}} = 110^{+0,0125}_{-0,1325}$$

Розрахунок оптимальних значень технологічного розміру **X_{опт}** полягає у встановленні його номінального значення так, щоб граничні значення розмірів **B_{опт}** і **X_{опт}** збігалися, а верхнє і нижнє відхилення розміру **X_{опт}** залишалися такими, щоб дорівнювали відповідним відхиленням заданого технологічного розміру **X**. Остаточного отримаємо розмір

$$X_{\text{опт}} = 109,8825^{+0,130}_{-0,015}$$

Величини обох граничних значень оптимізованого технологічного розміру **Y_{опт}** знаходимо з рівняння

$$A_{\text{опт}} = X_{\text{опт}} - Y_{\text{опт}},$$

де значення **A_{опт}**, **X_{опт}** вже відомі. Тоді

$$A_{\text{опт.макс}} = X_{\text{опт.макс}} - Y_{\text{опт.мін}} \Rightarrow 80,165 = 110,0125 - Y_{\text{опт.мін}};$$

звідки
$$Y_{\text{опт.мін}} = 29,8475,$$

$$A_{\text{опт.мін}} = X_{\text{опт.мін}} - Y_{\text{опт.макс}} \Rightarrow 79,835 = 109,8675 - Y_{\text{опт.макс}},$$

звідки
$$Y_{\text{опт.макс}} = 30,0325.$$

Знаючи граничні значення і задані граничні відхилення **Y_{опт}**, встановлюється значення його номінального розміру **Y_{опт.ном}** = 29,9275.

Остаточного отримаємо
$$Y_{\text{опт}} = 29,9275^{+0,105}_{-0,080}.$$

Після оптимізації технологічних розмірів-координат встановимо відсоток браку за очікуваними значеннями креслярських розмірів **A** і **B**.

Визначимо вірогідність браку стосовно розміру **A** при розсіюванні за законом трикутника

$$\begin{aligned} W_T &= 0,5(DE^2 / DF^2 + GM^2 / FM^2) \cdot 100 \% = \\ &= 0,5(0,021^2 / 0,165^2 + 0,021^2 / 0,165^2) \cdot 100 \% = 1,6 \%. \end{aligned}$$

1.7 Розрахунково-технологічні вправи визначення параметрів точності формоутворення поверхонь і браку деталей [3]

Для набуття практичних навичок розрахунково-технологічного визначення параметрів точності формоутворення поверхонь деталей рекомендуються вправи за двома темами.

Тема 1. Визначення вірогідності браку у формоутворюючих операціях, що виконуються в умовах несуміщення баз

Мета роботи:

1. Набуття навичок розмірного аналізу формотвірних технологічних операцій з урахуванням заданого креслення деталі, ескізу встановлення і оброблення заготовки.
2. Набуття навичок аналізу схем базування корпусних деталей в умовах несуміщення баз.
3. Набуття навичок визначення вірогідності браку в умовах несуміщення баз при різних законах розсіювання розмірів: нормальному, трикутному і рівної ймовірності.

Початкові дані: ескіз деталі та ескіз оброблення (рисунки 68 і 69).

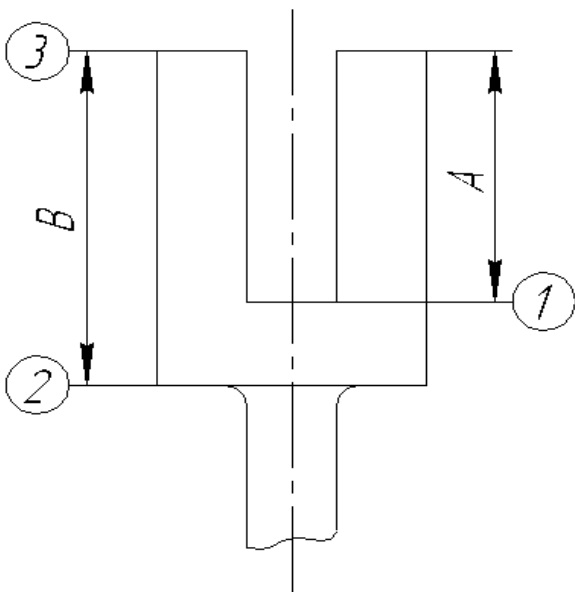


Рисунок 68 – Ескіз деталі

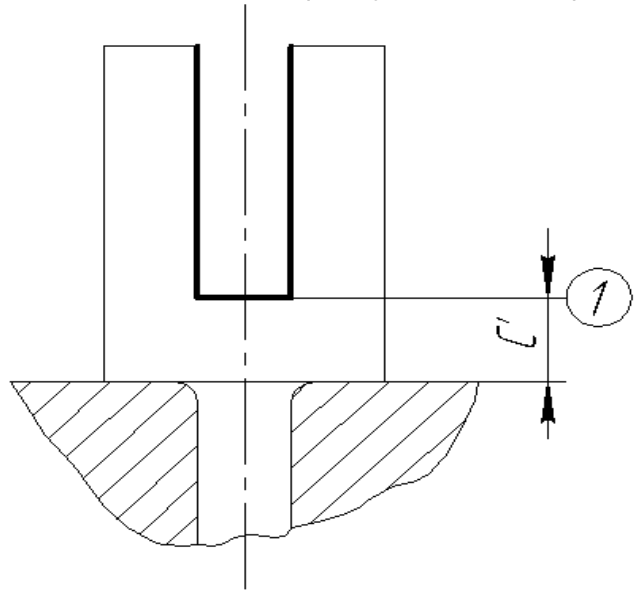


Рисунок 69 – Ескіз оброблення деталі

У процесі оброблення партії заготовок на налагоджених верстатах їх розміри безперервно коливаються в певних межах, відрізняючись один від одного і від настроювального розміру на величину випадкової похибки.

Випадкова похибка – це така похибка, яка для різних заготовок даної партії має різні значення, причому її поява не підлягає ніякій очевидній закономірності за відсутності домінуючого чинника.

За законом рівної ймовірності вірогідність браку за розміром **A**

$$W_{PI} = ((DE + GM) / DM) \cdot 100 \% = ((0,021 + 0,021) / 0,330) \cdot 100 \% = 12 \%$$

Визначимо вірогідність браку для розміру **B** за законом трикутника

$$\begin{aligned} W_T &= 0,5(DE^2 / DF^2 + HO^2 / DF^2) \cdot 100 \% = \\ &= 0,5(0,0125^2 / 0,0725^2 + 0,0125^2 / 0,0725^2) \cdot 100 \% = 1,5 \%. \end{aligned}$$

За законом рівної ймовірності вірогідність браку за розміром **B**

$$W_{PI} = ((DE + GM) / DM) \cdot 100 \% = ((0,0125 + 0,0125) / 0,145) \cdot 100 \% = 17 \%$$

Отримані результати систематизовано і наведено в таблиці 6.

З метою створення сприятливих умов для машинного оброблення основних результатів розмірного аналізу за цією темою доцільно подати конструкторські і технологічні розміри в різних зонах таблиці відповідно до процедур, що проводяться з ними, послідовно вводячи задані, очікувані, тобто розрахункові розміри, визначити вірогідність браку за креслярськими розмірами **A** і **B** при розподілах за законами трикутника і рівної ймовірності, а потім провести оптимізацію з метою мінімізації можливого браку деталі.

Починати потрібно обов'язково зі встановлення значень очікуваних операційних розмірів **X₀** і **Y₀**, для яких наведено верхні і нижні граничні відхилення. Формат заданої операційної похибки залишається незмінним на всіх етапах проектування і модифікації обох операцій за технічною умовою щодо заданих технологічних можливостей робочих місць.

Обов'язково виявити найбільш критичний з цих двох креслярських розмірів, порівнявши відповідні задані і очікувані їх значення, тобто порівняти величини полів розсіювання з полями допусків, співвідносячи з номінальними значеннями розмірів.

Вірогідність браку за очікуваними значеннями креслярських розмірів **A₀** і **B₀** досить визначати з точністю до 1%.

Примітка.

Суть оптимізації полягає в розрахунково-графічному розміщенні меж полів розсіювання розмірів симетрично межах полів допусків (див. рисунок 126) з вказівкою допусків на операційні розміри у виконавчому форматі, тобто "в тіло" деталі.

У результаті проведених розрахунків можна зробити висновок про те, що після оптимізації технологічних розмірів-координат вірогідність браку зменшується, тобто на етапі технологічної підготовки виробництва можна передбачити виготовлення деталей з економічною точністю в звичайних виробничих умовах з урахуванням можливостей наявного устаткування та персоналу.

2.7.2 Тема 2. Оптимізація технологічних розмірів-координат для мінімізації браку деталей за креслярськими розмірами в умовах несуміщення конструкторських і технологічних баз при порушенні умови найменшої похибки та правила єдиної установочної бази

Мета роботи:

1. Набуття навичок розмірного аналізу формоутворюючих технологічних операцій з урахуванням топографії розмірів заданого креслення деталі авіадвигуна, ескізів установлення і оброблення в умовах несуміщення конструкторських і технологічних баз при порушенні умови найменшої похибки і правила єдиної установочної бази.

2. Набуття навичок комплексних розмірних розрахунків розмірів-координат в технологічних операціях, що виконуються при порушенні умови найменшої похибки і правила єдиної установочної бази для заданих варіантів початкових даних:

а) розрахунки очікуваних значень технологічних розмірів X_0 і Y_0 ;

б) визначення браку за очікуваними значеннями креслярських розмірів A_0 і B_0 при розсіюванні технологічних розмірів за законами трикутника і рівної ймовірності;

в) оптимізація значень креслярських розмірів-координат $A_{опт}$ і $B_{опт}$ з метою мінімізації браку;

г) розрахунки оптимальних технологічних розмірів $X_{опт}$ і $Y_{опт}$, що забезпечують мінімальний брак деталі за креслярськими розмірами-координатами A і B зі збереженням формату заданих значень граничних відхилень розмірів X і Y .

Початкові дані:

Ескіз фрагмента деталі в параметричному вигляді (рисунок 127) та ескізи встановлення і оброблення деталі (рисунки 128 і 129).

Методика і послідовність виконання роботи

Розглядається один напрям початкових розмірів – по вертикалі. У цьому напрямі виконуються із заданою точністю технологічні розміри-координати X і Y , визначальні положення площини (див. рисунок 128) і осі отвору (див. рисунок 129). Операції оброблення виконуються з різних установочних баз, позицій і установів. Принцип суміщення баз дотримується тільки на операції оброблення площини, тобто очікуваний технологічний розмір X_0 топографічно збігається з розміром B на кресленні деталі: $B_0 = X_0 = 110^{+0.130}_{-0.015}$.

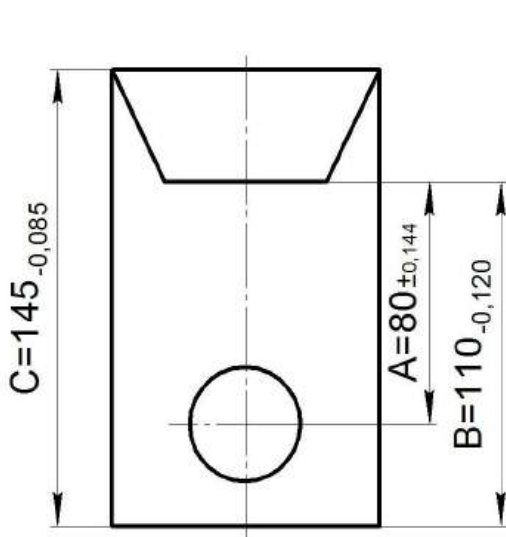


Рисунок 127 – Ескіз деталі

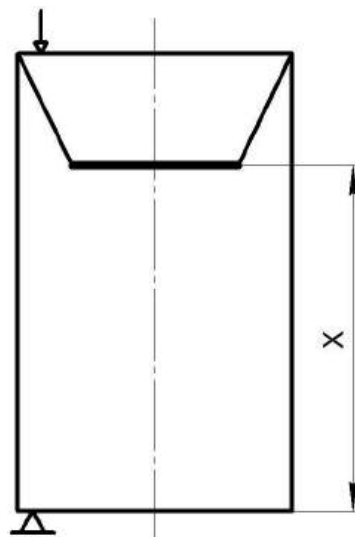


Рисунок 128 –
Операція 1

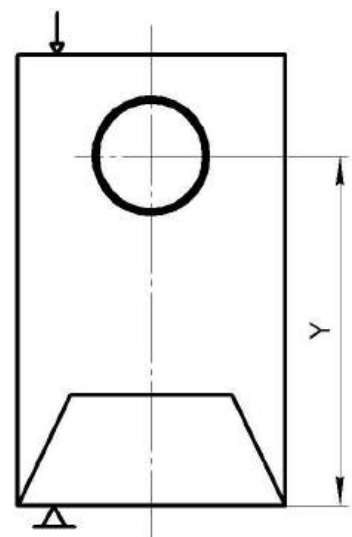


Рисунок 129 –
Операція 2

Очікуваний розмір A_0 виходить як замикаюча ланка в ланцюзі:

$$A_0 = X_0 + Y_0 - C = 110_{-0,015}^{+0,130} + 115_{-0,080}^{+0,105} - 145_{-0,085} = 80_{-0,095}^{+0,320}.$$

Схеми визначення вірогідності браку деталі для розмірів A і B за двома законами розсіювання (законів трикутника і рівної ймовірності) показано на рисунку 130. Визначимо вірогідність браку для розміру A .

За законом трикутника вірогідність браку для розміру A

$$W_T = 0,5(GH^2 / FH^2) \cdot 100 \% = 0,5(0,176^2 / 0,2075^2) \cdot 100 \% = 36 \ \%.$$

За законом рівної ймовірності вірогідність браку для розміру A

$$W_{PI} = (GH / DH) \cdot 100 \% = (0,176 / 0,415) \cdot 100 \% = 42 \ \%.$$

Визначимо вірогідність браку для розміру B за законом трикутника

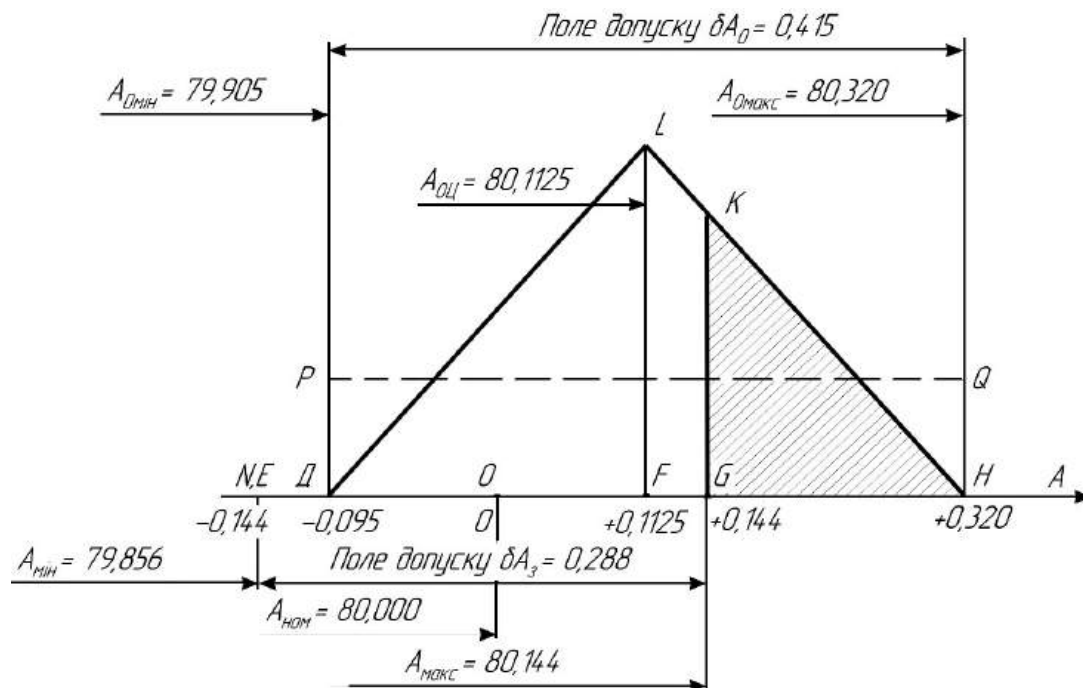
$$\begin{aligned} W_T &= 50 \% + 0,5 \cdot (1 - DO^2 / DF^2) \cdot 100 \% = \\ &= 50 \% + 0,5 \cdot (1 - 0,015^2 / 0,0725^2) \cdot 100 \% = 97,8 \ \%. \end{aligned}$$

За законом рівної ймовірності вірогідність браку для розміру B

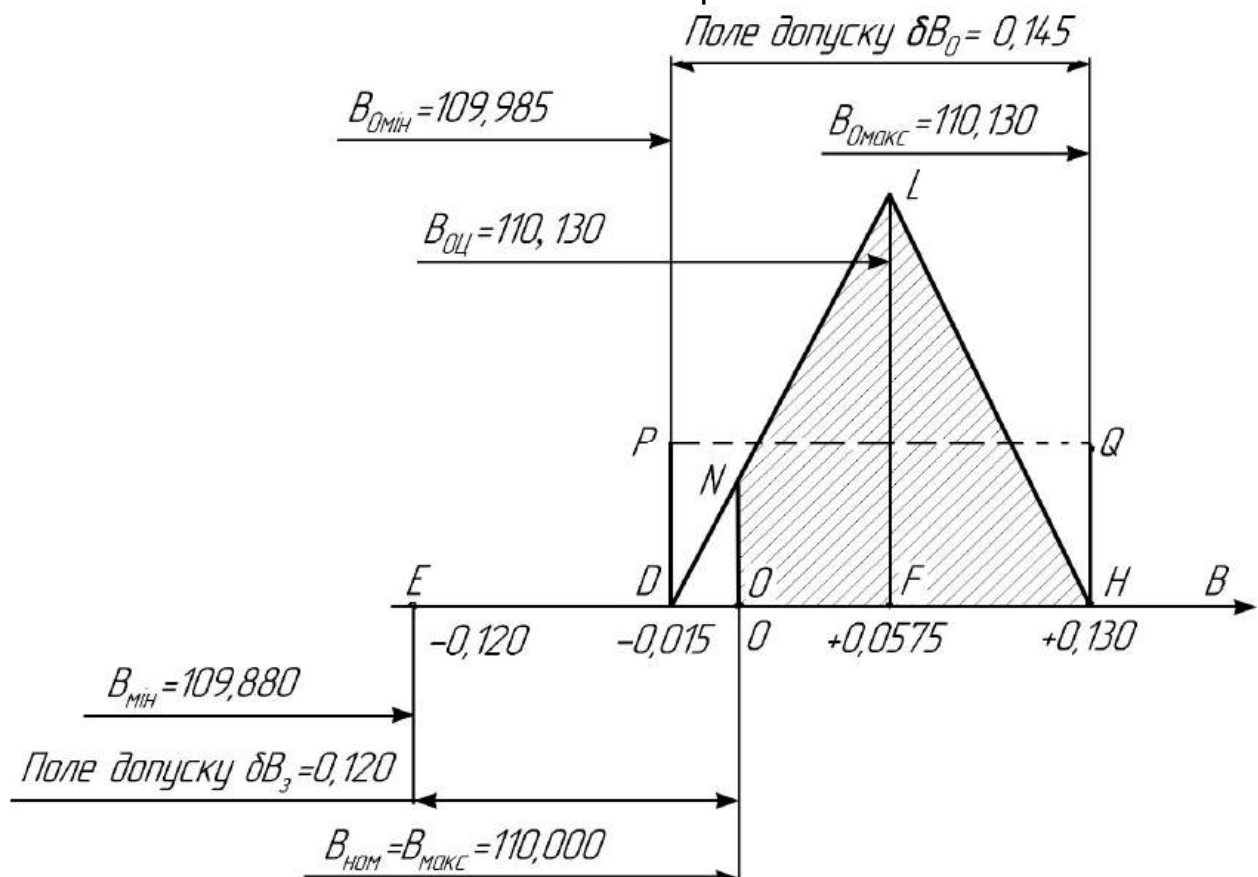
$$W_{PI} = (OH / DH) \cdot 100 \% = (0,130 / 0,145) \cdot 100 \% = 90 \ \%.$$

Схеми оптимізації креслярських розмірів A і B зображено на рисунку 131.

Розрахунки операцій з досягнення оптимальних значень креслярських розмірів (тобто з мінімальним браком за ними) розпочинається з аналізу розрахункової схеми визначення браку деталі за розміром B , який формується в першій операції.

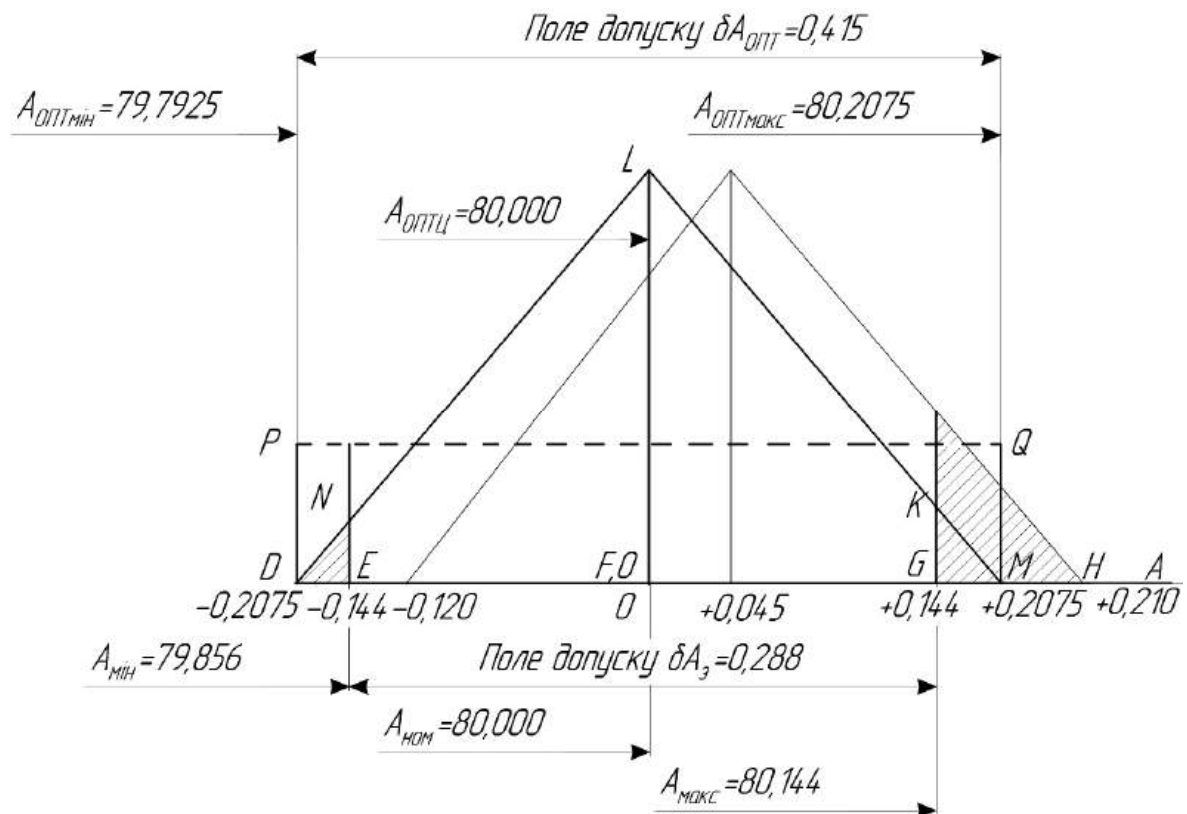


Розмір A

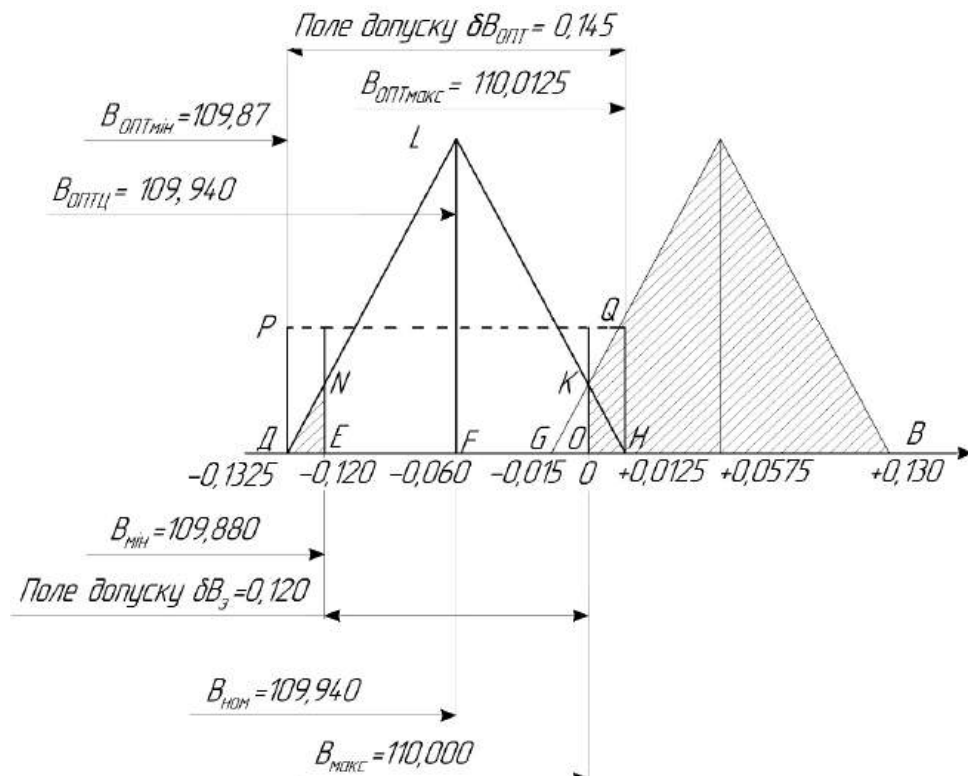


Розмір B

Рисунок 130 – Схема визначення імовірності браку за розмірами A і B



Оптимізація розміру **A**



Оптимізація розміру **B**

Рисунок 131 – Схеми оптимізації розмірів **A** і **B**

Слід мати на увазі, що мінімізація можливого браку за креслярськими розмірами полягає в розміщенні меж граничних значень очікуваних розмірів симетрично полям допусків.

Розрахунок оптимальних значень розміру $X_{опт}$ полягає у встановленні його номінального значення так, щоб граничні значення розмірів $B_{опт}$ і $X_{опт}$ збігалися, а верхнє і нижнє відхилення розміру $X_{опт}$ залишалися дорівнюючими відповідним відхиленням заданого розміру X . Остаточного отримаємо розмір $X_{опт} = 109,8825^{+0,130}_{-0,015}$.

Розрахунок граничних значень оптимізованого технологічного розміру $Y_{опт}$ знаходимо з рівняння $A_{опт} = X_{опт} + Y_{опт} - C$, де значення $A_{опт}$ і $X_{опт}$ вже відомі, а розмір C , отриманий раніше, і є заданим. Тоді

$$A_{опт.макс} = X_{опт.макс} + Y_{опт.макс} - C_{мін} \Rightarrow 80,2075 = 110,0125 + Y_{опт.макс} - 144,915,$$

$$\text{звідки } Y_{опт.макс} = 115,110;$$

$$A_{опт.мін} = X_{опт.мін} + Y_{опт.мін} - C_{макс} \Rightarrow 79,7925 = 109,8675 + Y_{опт.мін} - 145;$$

$$\text{звідки } Y_{опт.мін} = 114,925.$$

Знаючи граничні значення і задані граничні відхилення $Y_{опт}$, встановлюється значення його номінального розміру: $Y_{опт.ном} = 115,005$.

Остаточного отримаємо $Y_{опт} = 115,005^{+0,105}_{-0,080}$.

Визначимо вірогідність браку для розміру A .

Визначимо вірогідність браку для розміру A за законом трикутника

$$W_T = 0,5 \cdot (DE^2 / DF^2 + GM^2 / FM^2) \cdot 100 \% =$$

$$= 0,5 \cdot (0,0635^2 / 0,2075^2 + 0,0635^2 / 0,2075^2) \cdot 100 \% = 9 \ \%.$$

За законом рівної ймовірності вірогідність браку для розміру A

$$W_{PI} = ((DE + GM) / DM) \cdot 100\% = ((0,0635 + 0,0635) / 0,415) \cdot 100 \% = 30 \ \%.$$

Визначимо вірогідність браку для розміру B за законом трикутника

$$W_T = 0,5 \cdot (DE^2 / DF^2 + GH^2 / FH^2) \cdot 100 \% =$$

$$= 0,5 \cdot (0,0125^2 / 0,0725^2 + 0,0125^2 / 0,0725^2) \cdot 100\% = 1,5 \ \%.$$

За законом рівної ймовірності вірогідність браку для розміру B

$$W_{PI} = ((DE + OH) / DH) \cdot 100 \% = ((0,0125 + 0,0125) / 0,145) \cdot 100 \% = 17 \ \%.$$

Отримані результати систематизовано і наведено в таблиці 7.

173

B.в. X та ***B.в. Y*** – відповідно верхні відхилення розмірів ***X*** та ***Y***,
Н.в. X та ***Н.в. Y*** – відповідно нижні відхилення розмірів ***X*** та ***Y***.

$$A_{опт.мун} = X_{опт.мун} + Y_{опт.мун} - C_{макс} \Rightarrow 79,7925 = 109,8675 + 114,9250 - 145,0000 = 79,7925.$$

Прийняв: _____ (_____) _____ (_____) _____ (_____)

(Оцінка: нац. і ECTS, підпис, дата, прізвище та ініціали)

2.7.3 Тема 3. Розрахунки і оптимізація точності технологічних розмірів з урахуванням варіантів розподілу похибок взаємного положення двох установочних баз в умовах серійного виробництва деталей партіями на заздалегідь налагодженому устаткуванні

Мета роботи:

1. Набуття навичок розмірного аналізу формоутворюючих технологічних операцій з урахуванням топографії розмірів заданого креслення деталі авіадвигуна, ескізів установлення і оброблення в умовах суміщення і несуміщення конструкторських і технологічних баз.

2. Набуття навичок комплексних розмірних розрахунків і мінімізації браку операційних розмірів-координат в технологічних операціях, що виконуються в умовах різних варіантів базування і розподілу похибок взаємного положення двох взаємозв'язаних установочних баз:

а) розрахунки очікуваних значень основних **Bo, Vo, Go, Do** і допоміжних технологічних розмірів **Fo, Go, Ho, Lo** ...;

б) визначення вірогідності браку за креслярськими розмірами **Б, В, Г** і **Д** при розсіюванні похибок за законом симетричного трикутника;

в) мінімізація браку за креслярськими розмірами **Б, В, Г, Д** з подальшим зведенням браку до нуля при збереженні заданих форматів розмірів і операційної похибки Δ .

Початкові дані:

1. Ескіз корпусної деталі в параметричному вигляді.
2. Таблиці варіантів початкових даних.

Однієї установочної бази не завжди вистачає для того, щоб забезпечити заданий початковий конструкторський розмір. У таких випадках в операції доводиться використовувати як установочні бази одночасно декілька поверхонь деталі. Для надання деталі певного положення в будь-якій площині зазвичай потрібно не більше двох баз. Тому навіть найзагальніший випадок, коли деталь треба встановити за всіма напрямками у просторі (тобто в трьох взаємопересічних площинах), характерний тими ж особливостями, що і встановлення двох поверхонь в одній площині, тобто "просторове" завдання зводиться до ряду "плоских" завдань (рисунки 133 – 137). Завдання про розподіл виникає в усіх випадках, коли початкові розміри, що підлягають дотриманню, збігаються з напрямом координуючого розміру, що з'єднує бази, забезпечуються однією з двох взаємозв'язаних баз (рисунки 133 і 134), обома (рисунок 135) або іншими, що теж належать заготовці (рисунки 136 і 137). Проектні і оптимізаційні розрахунки технологічних операцій необхідно вести з урахуванням топографії розмірів заданого креслення деталі (рисунок 132), суміщення або несуміщення конструкторських і технологічних баз та інших умов базування заготовки.

Загальний порядок розрахунків

До початку виконання проектно-розрахункових робіт цієї теми потрібно освоїти ті розділи літературних джерел, які присвячені розподілу похибки взаємного положення двох установочних баз корпусної деталі [1; 3 та ін.]. Природно потрібно активізувати в пам'яті увесь атестований матеріал попередніх семестрів, особливо глибоко професійно-орієнтованих дисциплін, а в них – прикладну теорію базування при проектуванні технологічних процесів виробництва авіаційної техніки. Тоді оволодіння професійно-орієнтованими вміннями, навичками і компетенціями, передбаченими програмами дисциплін "Технології двигунобудування", "Технологія виробництва та ремонту АД" та інших, може бути якісним.

Рекомендується такий алгоритм виконання розрахункових робіт з проектування технологічних операцій свердління чотирьох отворів в корпусній деталі при точному встановленні заготовки в пристрої послідовно і окремо п'ятьма варіантами по осі X-X: УБ1; УБ2; УБ1+УБ2; УБ3; УБ4 [3]:

1. За заданим варіантом даних ***k*** виконати ескіз деталі (рисунок 132) і ескізи варіантів базування та оброблення заготовок (рисунки 133, 134, 135, 136, 137).

2. У рядок таблиці 4 "Розміри задані" вписати "значення початкових даних" індивідуального завдання ***k*** для УБ1. Для них треба побудувати і оброзмірити "Ескіз точної установки по УБ1, завдання ***k***" (аналогічні процедури для варіантів базування по УБ2; УБ1+УБ2; УБ3; УБ4 [3]).

3. Визначити очікувані значення основних креслярських ***Bo, Vo, Go, Do*** і допоміжних технологічних розмірів ***Fo, Go, Ho, Lo*** послідовно і окремо для п'яти варіантів точного базування заготовок (для УБ1, УБ2, УБ3, УБ4, УБ1 та УБ2).

4. У рядок "Розміри очікувані" вписати значення очікуваних (розрахункових) технологічних розмірів-координат ***Б', В', Г', Д'***, отриманих за рівняннями відповідних розмірних ланцюгів, в яких ***Б', В', Г', Д'*** були замикаючими ланками; ***A*** – розміром-координатою між базами УБ1 і УБ2.

5. Для отримання кондиційних деталей допускається призначати зменшений допуск на розмір ***A***, що витримується в попередніх операціях, щоб в подальших операціях і проектних процедурах забезпечити кондиційність конструкторських розмірів-координат ***Б, В, Г, Д***, заданих в кресленні деталі, зберігаючи заданий формат відхилень (для ***h, H*** або ***Js***).

6. ***Б, В, Г, Д*** – конструкторські розміри-координати, які потрібно забезпечити в проєктованих технологічних операціях з урахуванням рівнянь розмірних ланцюгів п'яти варіантів точного встановлення по УБ1; УБ2; УБ1+УБ2; УБ3; УБ4.

7. У підстрочних комірках ***Б', В', Г', Д'*** рекомендується записати рівняння відповідних розмірних ланцюгів, де вони є замикаючими

ланками, аналогічно виконати для решти варіантів точного встановлення по УБ2; УБ1+УБ2; УБ3; УБ4 [3].

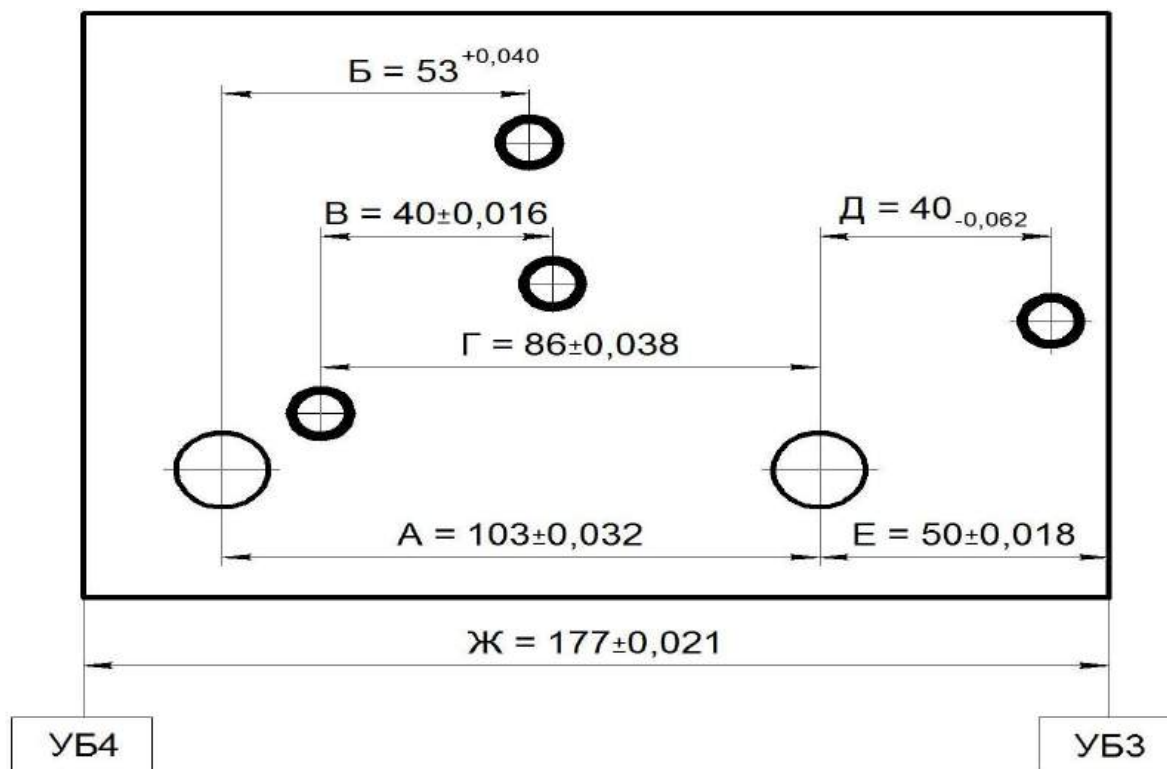


Рисунок 132 – Ескіз деталі

8. **F, G, K, L** і т. п. – допоміжні технологічні розміри-координати, за допомогою яких забезпечується отримання основних технологічних розмірів-координат **Б', В', Г', Д'** для забезпечення кондиційних конструкторських розмірів-координат **Б, В, Г, Д**.

9. Визначити очікувані значення вірогідності браку за креслярськими і операційними розмірами при розсіюванні похибок за законом симетричного трикутника. У рядок "Брак" вписати "0" або "+", порівнюючи відповідні очікувані технологічні і конструкторські розміри-координати за величиною і взаємним розташуванням відповідних полів допусків заданих креслярських розмірів **Б, В, Г, Д** і полів розсіювання технологічних розмірів **Б', В', Г', Д'**. Підрахувати значення параметра $\lambda_i = \delta_0 : \delta_3$, (як відношення допуску на очікуваний розмір до допуску заданого розміру), що відображає міру некондиційності (з точки зору критичності браку) деталі за відповідним навіть одним з конструкторських розмірів **Б, В, Г, Д**. Виявити найбільш критичну ланку за найгіршим співвідношенням поля розсіювання і поля допуску (λ_i) і подати аналогічно таблицям 8 – 12 (рисунки 133 – 137).

10. За значеннями λ_i в рядок "Критичність ланок" вписати відповідні символи ланок (наприклад, $\lambda_B \rightarrow \lambda_D \rightarrow \lambda_G$ ($\lambda_i > 1$); λ_B ($\lambda_i < 1$)). Ця послідовність критичності ланок визначає послідовність дій в етапах

"Мінімізація" і "Оптимізація" від найбільш критичної ланки відносно браку до менш критичної ланки [3].

11. Послідовно визначити оптимальні значення відповідних розмірів, що забезпечують мінімальний, а потім і нульовий брак креслярських розмірів **Б, В, Г, Д** (за необхідності вносяться зменшення допусків операційної похибки і розмірів **А', Е' і Ж'**, що витримуються в попередніх операціях). Проте компенсацією за це ускладнення попереднього оброблення буде лише сама можливість виконати таку операцію. Несприятливі наслідки принципової невідповідності способу встановлення та базування деталі заданій координаті оброблюваних поверхонь залишаться в недоторканості, а вплив похибки розміру **А** як і раніше не буде пропорційним заданій точності початкових конструкторських розмірів.

12. Сенс дій в етапах "Мінімізація" і "Оптимізація" полягає в тому, щоб шляхом зменшення допусків заданої операційної похибки $\Delta_{оп}$ і, в першу чергу, допоміжних технологічних розмірів-координат **Ф', Г', К', L'** і т. п., потім **А', Е', Ж'**, для яких треба передбачити зменшення допусків на попередніх операціях, спочатку мінімізувати зменшення допусків на технологічні розміри, забезпечивши величини їх полів допусків не більше полів допусків креслярських розмірів **Б, В, Г, Д**. Процедурою "оптимізація" забезпечується кондиційність деталі за всіма креслярськими розмірами, тобто брак має дорівнювати нулю, зберігаючи заданий формат відхилень.

13. Оформлені за сучасними стандартами завдання, з аналізом і висновками у звіті, з датою и підписом, подати до захисту.

Примітка. При виконанні теми "УБ1+УБ2" рекомендуються ввести додаткові раціональні процедурні послідовності, що підвищують наглядність і полегшують розроблення теми:

1) указати на ескізі встановлення і оброблення вісь симетрії жирною пунктирною вертикальною лінією через поле ескіза між базами УБ1 і УБ2;

2) указати на ескізі встановлення і оброблення два початкові розміри-координати **А / 2** від осі симетрії до баз УБ1 і УБ2: якщо **А = 106–0,080**, то **А / 2 = 53–0,040**; якщо **А = 106 ± 0,062**, то **А / 2 = 53 ± 0,031**;

3) допоміжними розмірами-координатами вказувати від осі симетрії початкові операційні розміри до відповідних центрів оброблюваних отворів: **Ф' = 40 ± 0,012**, **Г' = 82 ± 0,012** і т. п. [3];

4) за необхідності посилення точності заданого розміру **А** до **А'** вказати під розмірними лініями двох початкових розмірів-координат від осі симетрії до баз УБ1 і УБ2 їх модифіковані значення, при цьому зберігаючи заданий формат: **А' / 2 = 53–0,016** або **А' / 2 = 53 ± 0,010** і т. п.;

5) формат заданих значень **А, Б, В, Г, Д** слід обов'язково витримувати, досягаючи це за рахунок номінальних значень допоміжних технологічних розмірів (наприклад: **Ф' = 39,986 ± 0,012**, **Г' = 82,016 ± 0,012** і т. п. при заданому незмінному форматі операційної похибки $\Delta_{оп}$).

Таблиця 8 – Результати аналізу та оптимізації розмірів при точному базуванні по базі УБ1

Розміри	A	B	B	Г	Д	F	G	H	Δ
		B = B'	B' = G – F	Г' = A – F	Д' = H – A				
Задані	103±0,032	53 ^{+0,040}	40±0,016	86±0,038	40 _{-0,062}				±0,019
Очікувані		53±0,019	40±0,038	86±0,051	40±0,051	17 _{±0,019}	57 _{±0,019}	143 _{±0,019}	
δo : δз = λ		0,038:0,040 ≈ <1	0,076:0,032 = 2,3	0,102:0,076 = 1,3	0,102:0,062 = 1,6				
Брак		+	+	+	+				
Мінімізація	103±0,022	53,020±0,008	40±0,016	86±0,030	39,969±0,030	17 _{±0,008}	57 _{±0,008}	142,969 _{±0,008}	±0,008
Оптимізація		53,012 ^{+0,016}	–	–	39,999 _{-0,060}	–	–	–	–
Брак		0	0	0	0				

Критичність ланок: $\lambda_B \rightarrow \lambda_D \rightarrow \lambda_F \rightarrow \dots > 1$; $\lambda_B \rightarrow \dots < 1$.

Перевірка:

Мінімізація:	Оптимізація:
$B_{\max}' = G_{\max} - F_{\min} = 57,008 - 16,992 = 40,016;$	$B_{\max}'' = G_{\max} - F_{\min} = 57,008 - 16,992 = 40,016;$
$G_{\max}' = A_{\max} - F_{\min} = 103,028 - 16,992 = 86,036;$	$G_{\max}'' = A_{\max} - F_{\min} = 103,022 - 16,992 = 86,030$
$D_{\max}' = H_{\max} - A_{\min} = 142,977 - 102,978 = 39,999.$	$D_{\max}'' = H_{\max} - A_{\min} = 142,977 - 102,978 = 39,999.$

Виконав студ. гр. _____ (підпис, дата, прізвище та ініціали) Варіант № _____

Прийняв: _____ (_____) _____ (_____) _____ (_____)

(Оцінка: нац. і ECTS, підпис, дата, прізвище та ініціали)

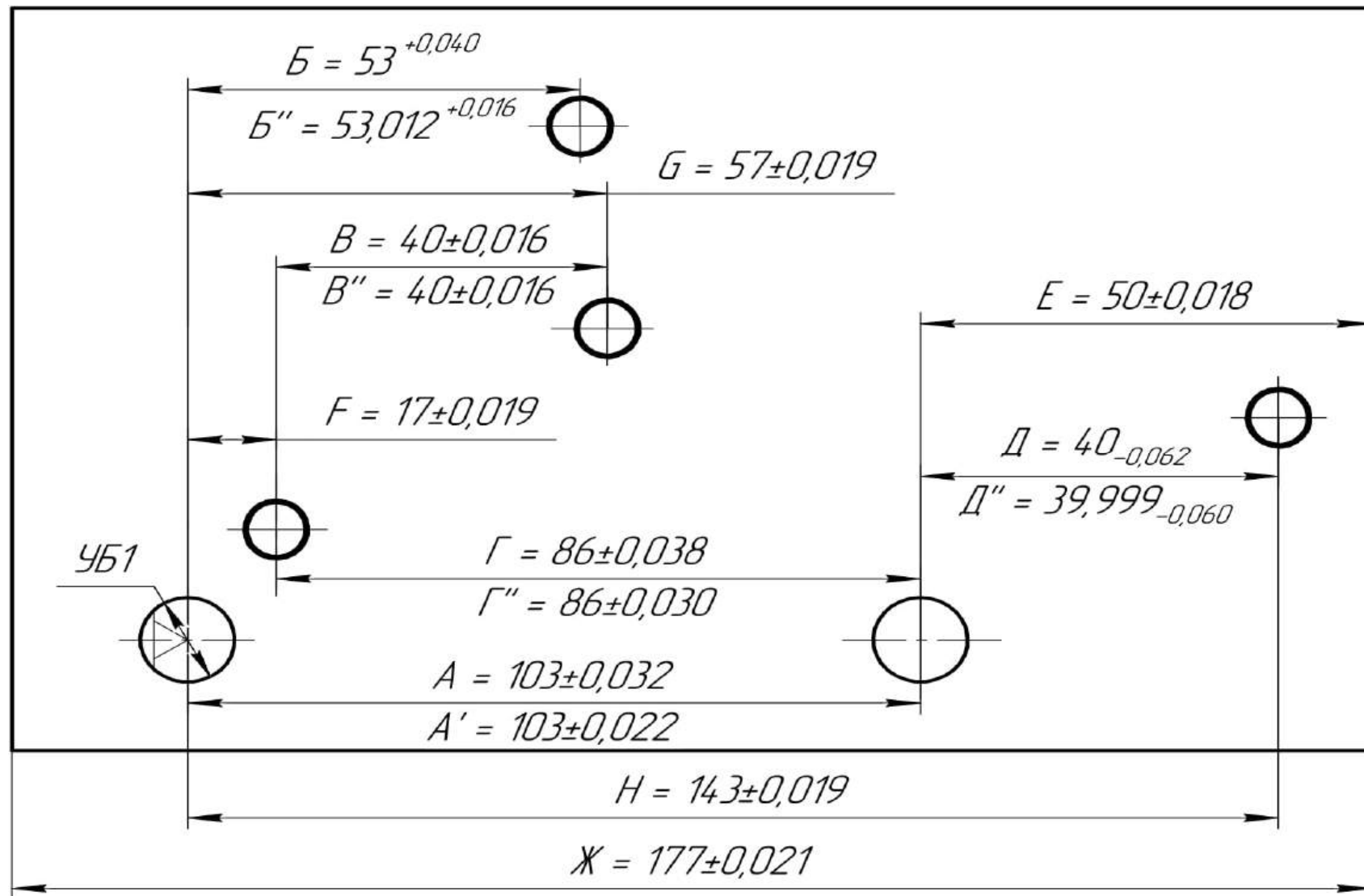


Рисунок 133 – Ескіз базування та оброблення по УБ1 Варіант № _____

Рисунок 134 – Ескіз базування та оброблення по УБ2 Варіант № _____

182

Критичність ланок: $\lambda_B \rightarrow \lambda_B \rightarrow \lambda_D \rightarrow > 1$; $\lambda_G \rightarrow < 1$.

Мінімізація:	Оптимізація:
$B_{\max}' = A/2_{\max} + L_{\max} = 51,511 + 1,528 = 53,039;$	$B_{\max}'' = A/2_{\max} + L_{\max} = 51,511 + 1,528 = 53,039;$
$B_{\max}' = F_{\max} + G_{\max} = 34,508 + 5,508 = 40,016;$	$B_{\max}'' = F_{\max} + G_{\max} = 34,508 + 5,508 = 40,016;$
$G_{\max}' = A/2_{\max} + F_{\max} = 51,511 + 34,508 = 86,019;$	$G_{\max}'' = A/2_{\max} + F_{\max} = 51,511 + 34,508 = 86,019;$
$D_{\max}' = H_{\max} - A/2_{\min} = 91,477 - 51,489 = 39,988.$	$D_{\max}'' = H_{\max} - A/2_{\min} = 91,477 - 51,489 = 39,988.$

Прийняв: _____ (_____) _____ (_____) _____ (_____)

(Оцінка: нац. і ECTS, підпис, дата, прізвище та ініціали)

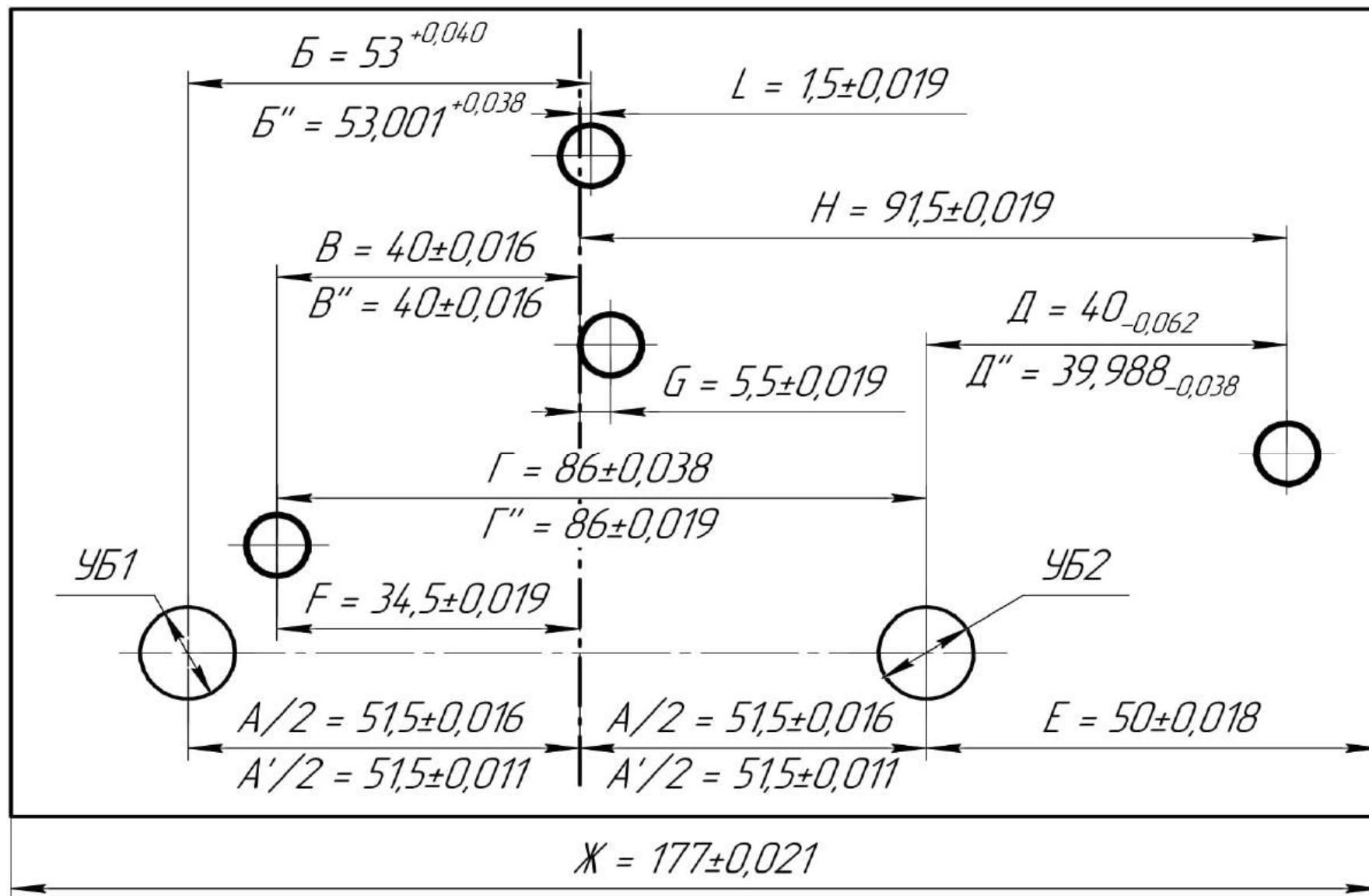


Рисунок 135 – Ескіз базування та оброблення по УБ1+УБ2 Варіант № _____

Таблиця 11 – Результати аналізу та оптимізації розмірів при точному базуванні по базі УБЗ

Розміри	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>Г</i>	<i>Д</i>	<i>E</i>	<i>F</i>	<i>G</i>	<i>H</i>	<i>L</i>	Δ
		$B' = A + E - L$	$B' = F - G$	$\Gamma' = F - E$	$D' = E - H$						
Задані	103±0,032	53 ^{+0,040}	40±0,016	86±0,038	40 _{-0,062}	50 ±0,018	–	–	–	–	±0,019
Очікувані		53±0,069	40±0,038	86±0,037	40±0,037	–	136 ±0,019	96 ±0,019	10 ±0,019	100 ±0,019	–
$\delta o : \delta z = \lambda$		0,138:0,040= = 3,45	0,076:0,032= = 2,4	0,074:0,076= = 0,97	0,074:0,062= = 1,2						
Брак		+	+	0	+						
Мінімізація	103±0,007	53,020±0,019	40±0,012	86±0,012	39,969 ±0,012	50 ±0,006	136 ±0,006	96 ±0,006	10,031 ±0,006	99,980 ±0,006	±0,006
Оптимізація	–	53,001 ^{+0,038}	–	–	39,981 _{-0,024}	–	–	–	–	–	–
Брак		0	0	0	0						

Критичність ланок: $\lambda_B \rightarrow \lambda_B \rightarrow \lambda_D \rightarrow > 1$; $\lambda_\Gamma \rightarrow < 1$.

Перевірка:

Мінімізація:	Оптимізація:
$B_{\max}' = A_{\max} + E_{\max} - L_{\min} = 103,007 + 50,006 - 9,974 = 53,039$;	$B_{\max}'' = A_{\max} + E_{\max} - L_{\min} = 103,007 + 50,006 - 9,974 = 53,039$;
$B_{\max}' = F_{\max} - G_{\min} = 136,006 - 95,994 = 40,012$;	$B_{\max}'' = F_{\max} - G_{\min} = 136,006 - 95,994 = 40,012$;
$\Gamma_{\max}' = F_{\max} - E_{\min} = 136,006 - 49,994 = 86,012$;	$\Gamma_{\max}'' = F_{\max} - E_{\min} = 136,006 - 49,994 = 86,012$;
$D_{\max}' = E_{\max} - H_{\min} = 50,006 - 10,025 = 39,981$.	$D_{\max}'' = E_{\max} - H_{\min} = 50,006 - 10,025 = 39,981$.

Виконав студ. гр. _____ (_____) Варіант № _____
(підпис, дата, прізвище та ініціали)

Прийняв: _____ (_____) _____ (_____) _____
(Оцінка: нац. і ECTS, підпис, дата, прізвище та ініціали)

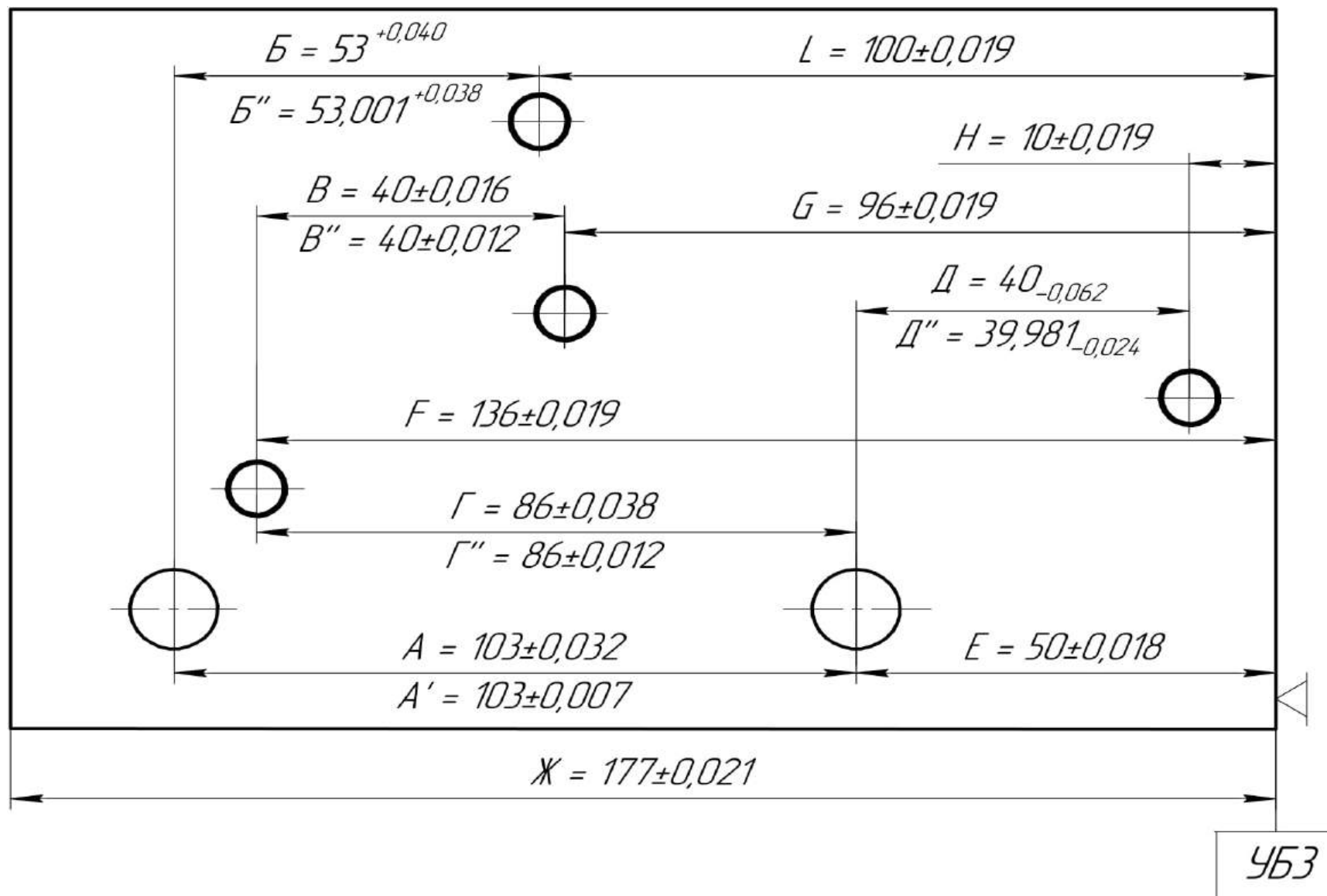


Рисунок 136 – Ескіз базування та оброблення по УБЗ Варіант № _____

Таблиця 12 – Результати аналізу та оптимізації розмірів при точному базуванні по базі УБ4

Розміри	A	B	B	Г	Д	E	Ж	F	G	H	L	Δ
		B' = A + L + E - Ж	B' = G - F	Г' = Ж - F - E	Д' = E + H - Ж							
Задані	103 ±0,032	53 ^{+0,040}	40±0,016	86±0,038	40 _{-0,062}	50 ±0,018	177 ±0,021					±0,019
Очікувані	–	53±0,090	40±0,038	86±0,058	40±0,058			41 ±0,019	81 ±0,019	167 ±0,019	77 ±0,019	
δo : δз = λ		0,180:0,040= 4,5	0,076:0,032= 2,4	0,116:0,076= 1,5	0,116:0,062= 1,9							
Брак		+	+	+	+							
Мінімізація	103 ±0,005	53,020±0,019	40±0,008	86±0,014	39,969 ±0,014	50 ±0,005	177 ±0,005	41 ±0,004	81 ±0,004	166,969 ±0,004	77,020 ±0,004	±0,004
Оптимізація	–	53,001 ^{+0,038}	–	–	39,983 _{-0,028}							
Брак		0	0	0	0							

Критичність ланок: $\lambda_B \rightarrow \lambda_V \rightarrow \lambda_D \rightarrow \lambda_G \rightarrow \dots > 1$.

Перевірка:

Мінімізація:	Оптимізація розмірів:
$B_{\text{макс}}' = L_{\text{макс}} + A_{\text{макс}} + E_{\text{макс}} - Ж_{\text{мін}} = 77,024 + 103,020 + 50,005 - 76,995 = 53,039;$	$B_{\text{макс}}'' = L_{\text{макс}} + A_{\text{макс}} + E_{\text{макс}} - Ж_{\text{мін}} = 77,024 + 103,020 + 50,005 - 76,995 = 53,039;$
$V_{\text{макс}}' = G_{\text{макс}} - F_{\text{мін}} = 81,004 - 40,996 = 40,008;$	$V_{\text{макс}}'' = G_{\text{макс}} - F_{\text{мін}} = 81,004 - 40,996 = 40,008$
$\Gamma_{\text{макс}}' = Ж_{\text{макс}} - E_{\text{мін}} - F_{\text{мин}} = 177,005 - 49,995 - 40,996 = 86,014;$	$\Gamma_{\text{макс}}'' = Ж_{\text{макс}} - E_{\text{мин}} - F_{\text{мін}} = 177,005 - 49,995 - 40,996 = 86,014;$
$D_{\text{макс}}' = H_{\text{макс}} + E_{\text{макс}} - Ж_{\text{мін}} = 166,973 + 50,005 - 174,995 = 39,983.$	$D_{\text{макс}}'' = H_{\text{макс}} + E_{\text{макс}} - Ж_{\text{мін}} = 166,973 + 50,005 - 174,995 = 39,983.$

Виконав студ. гр. _____ (_____) Варіант № _____
(підпис, дата, прізвище та ініціали)

Прийняв: _____
(Оцінка: нап. і ECTS, підпис, дата, прізвище та ініціали)

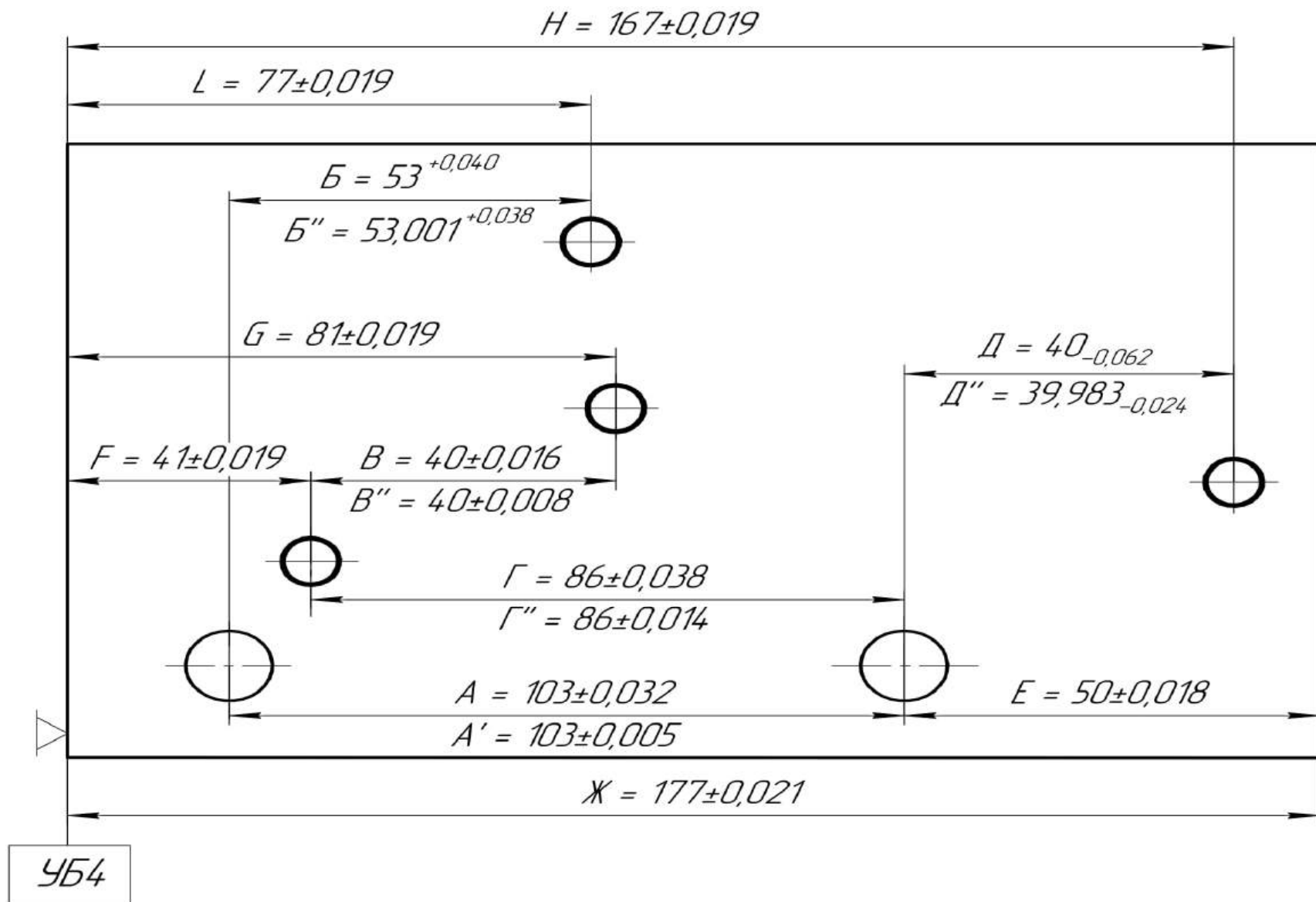
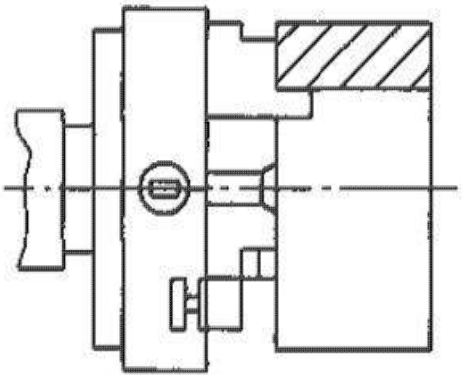
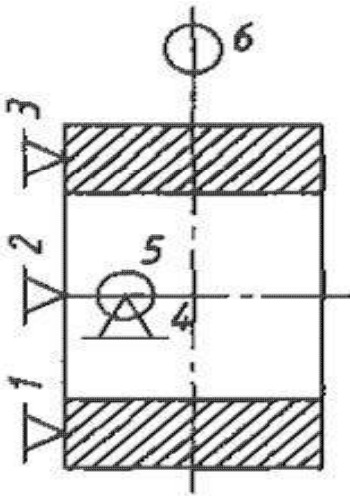
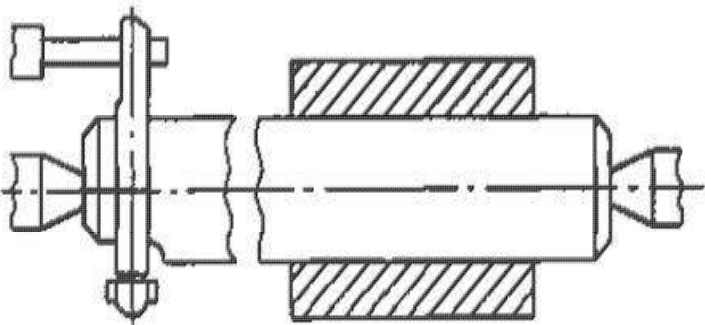
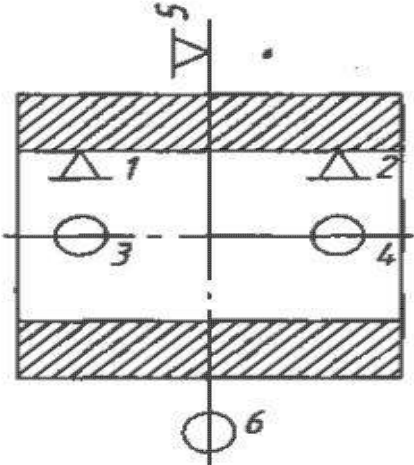
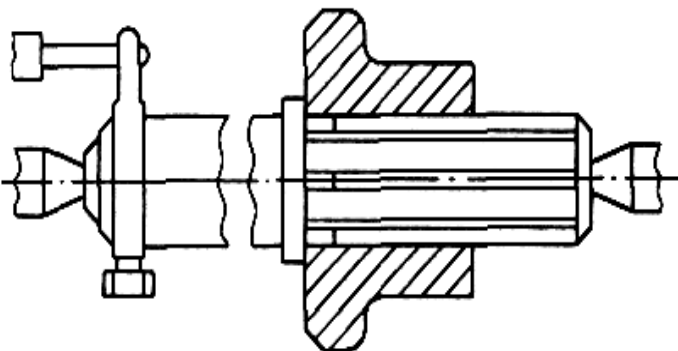
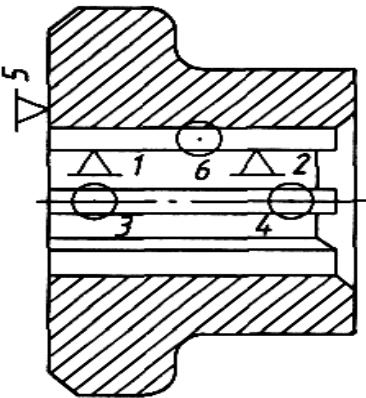
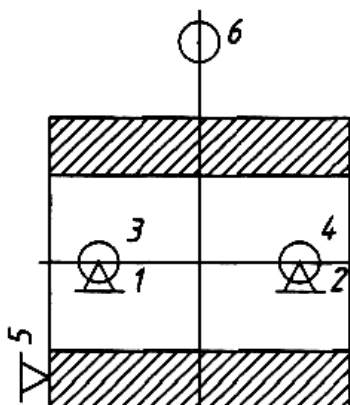
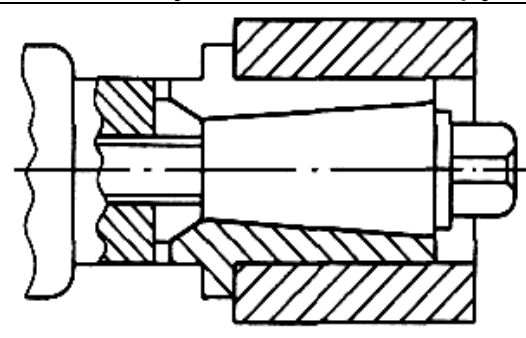
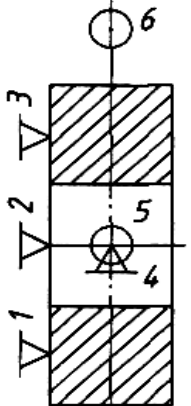
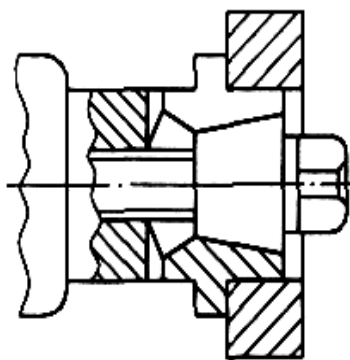
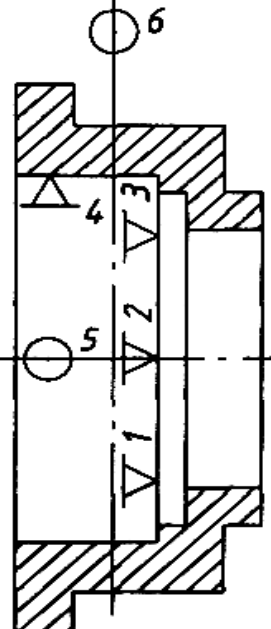
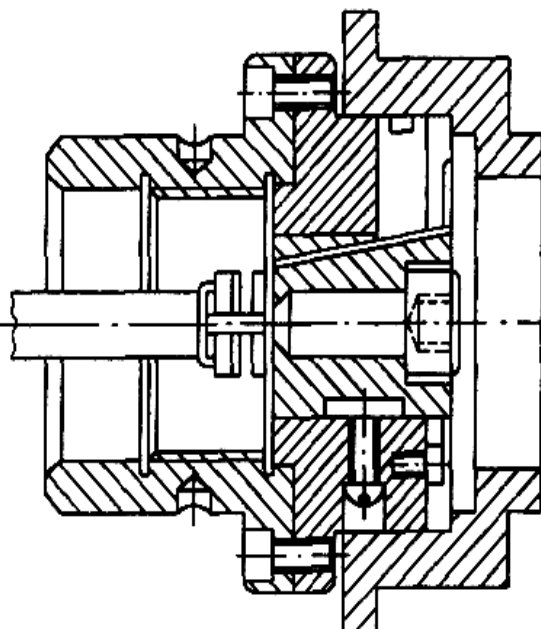


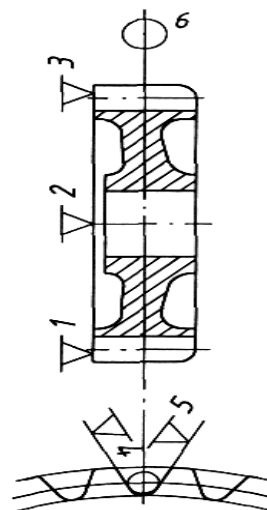
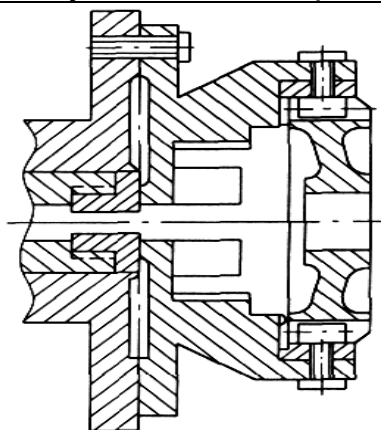
Рисунок 137 – Ескіз базування та оброблення по УБ4 Варіант № _____

2.8 Приклади і опис схем установлення та базування деталей

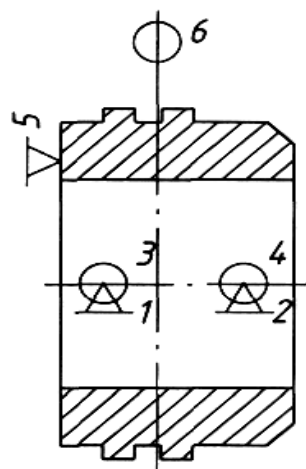
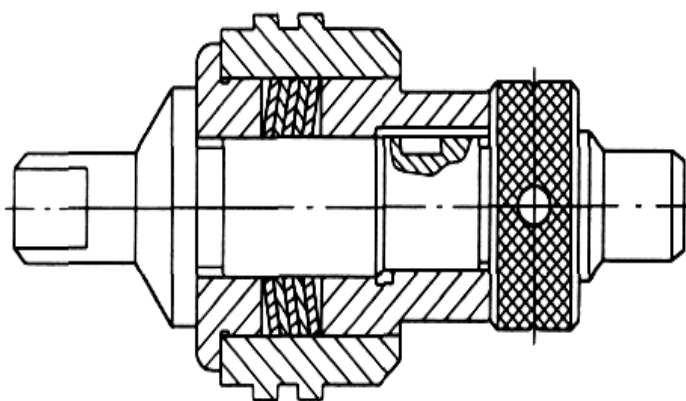
Опис і схема встановлення	Теоретична схема базування
1. У трикулачковому патроні в розтиск з базуванням по торцю 	
2. На жорсткій центровій конусній або циліндричній оправці з натягом в центрах з базуванням по отвору 	
3. На шліцьовій оправці в центрах з базуванням по отвору 	

Опис і схема встановлення	Теоретична схема базування
4. На розтискній консольній оправці з базуванням по отвору	
	
5. На розтискній консольній оправці з базуванням по торцю	
	
6. На оправці з кріпленням по отвору	
	
Опис і схема встановлення	Теоретична схема базування

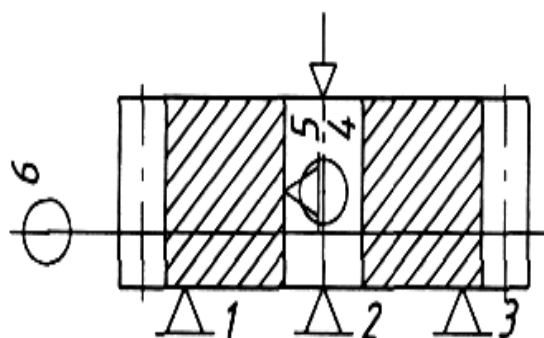
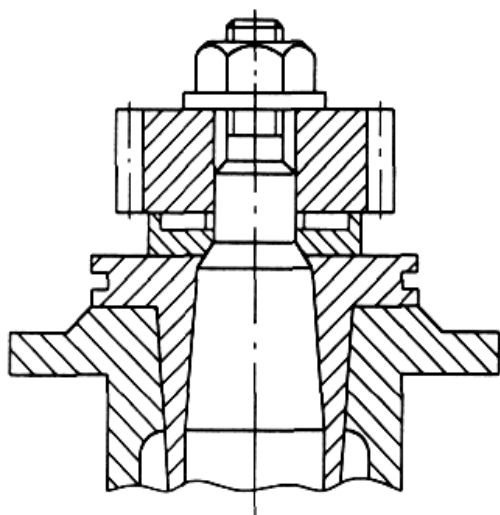
7. У пристосуванні з роликами
з базуванням по торцю

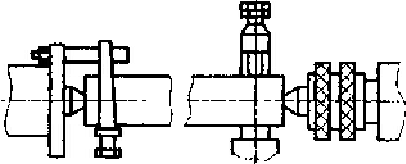
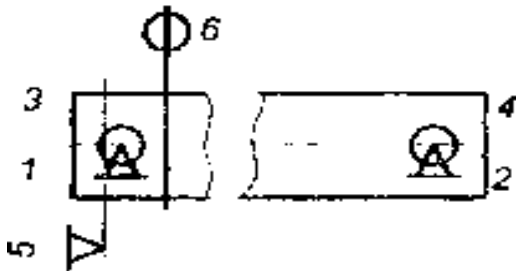
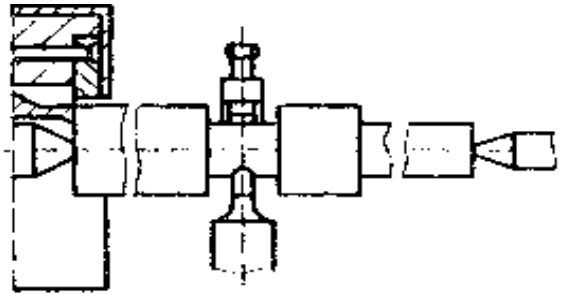
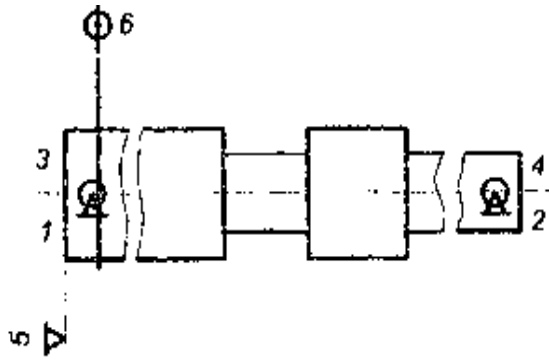
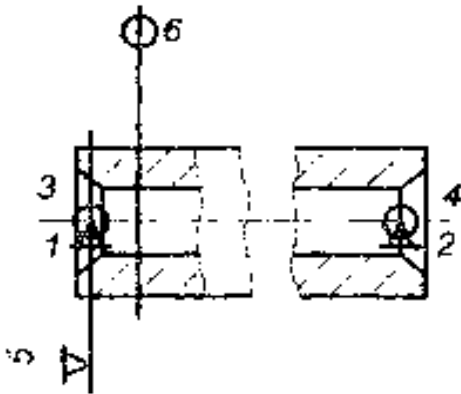


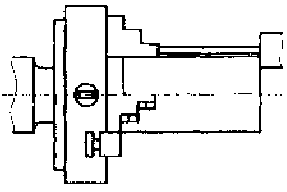
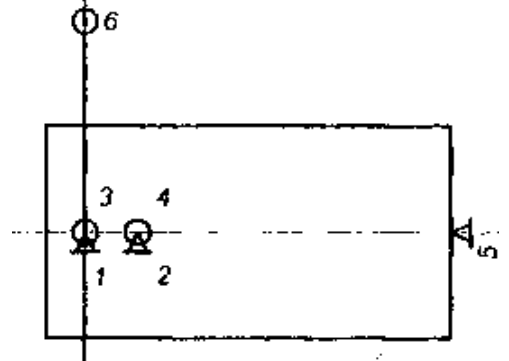
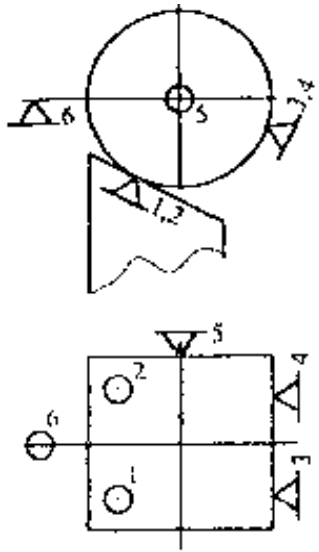
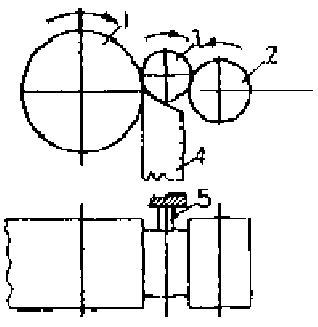
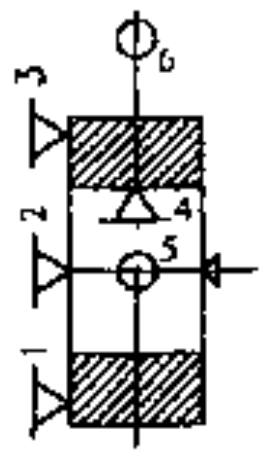
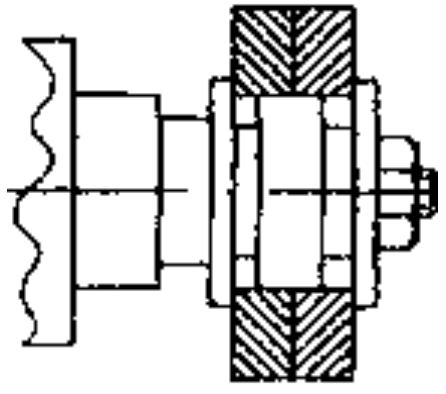
8. На оправці в розтиск з базуванням
по отвору

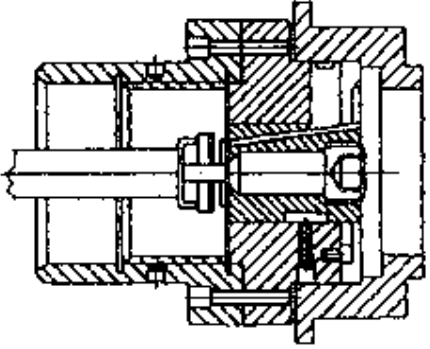
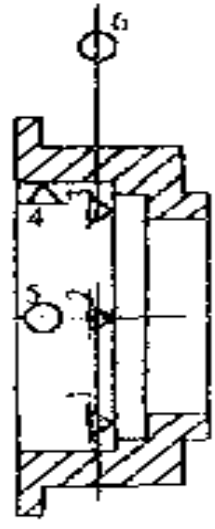
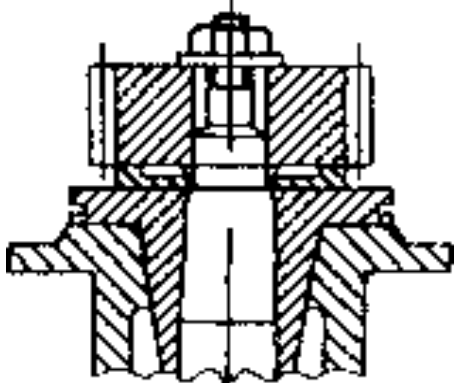
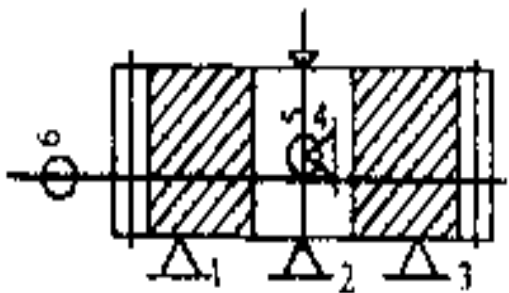
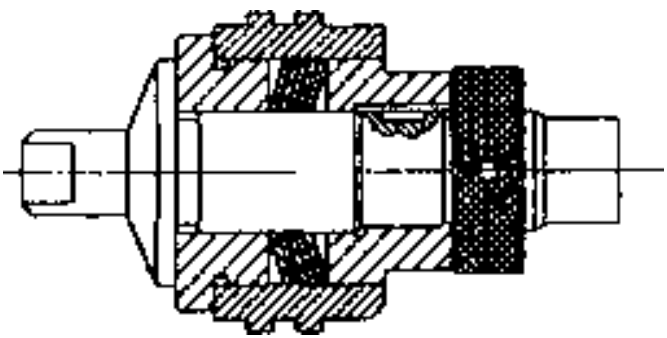
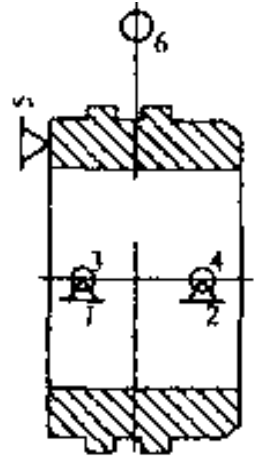


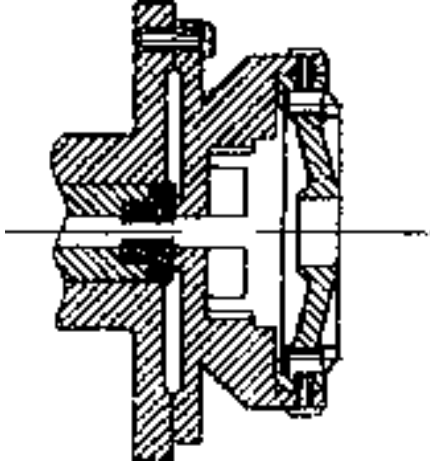
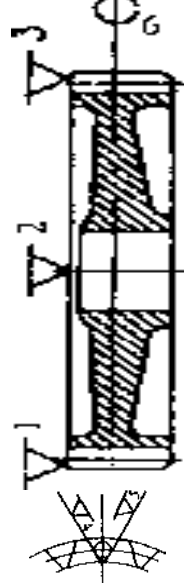
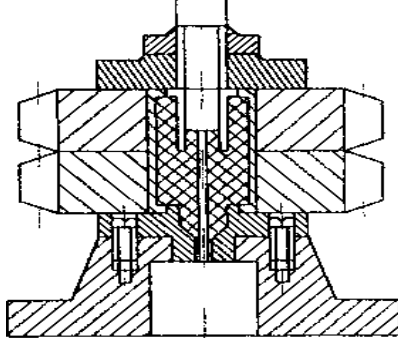
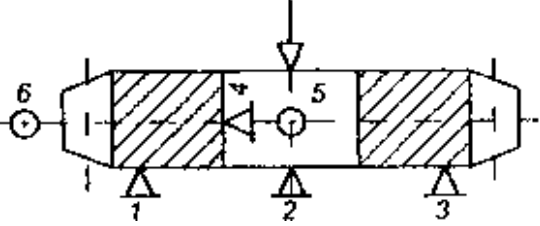
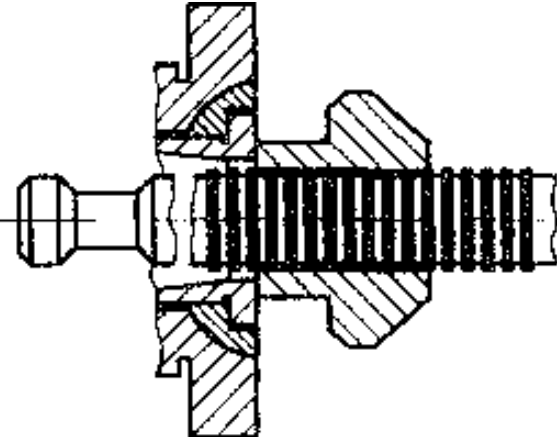
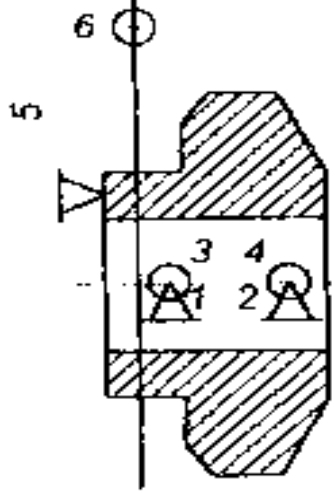
9. На жорсткій оправці з кріпленням
по торцю

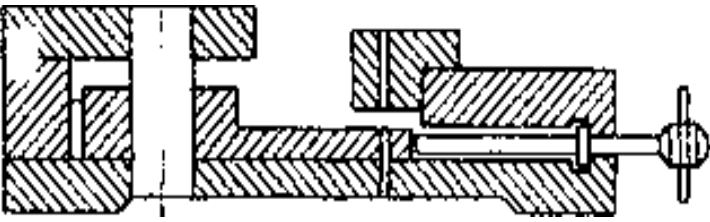
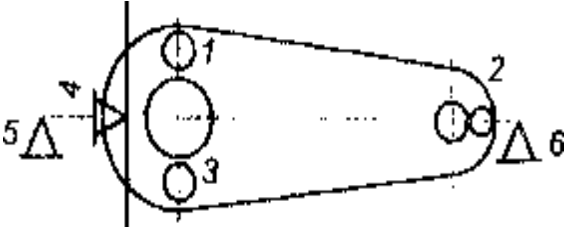
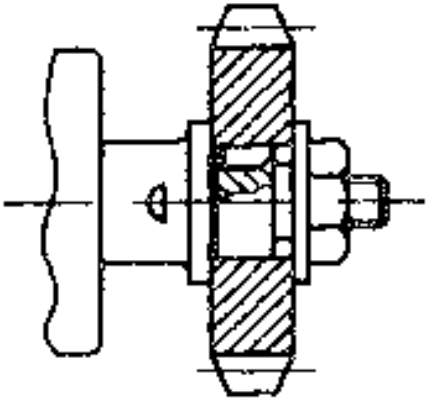
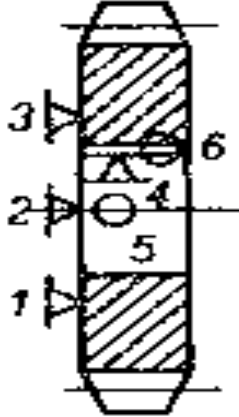
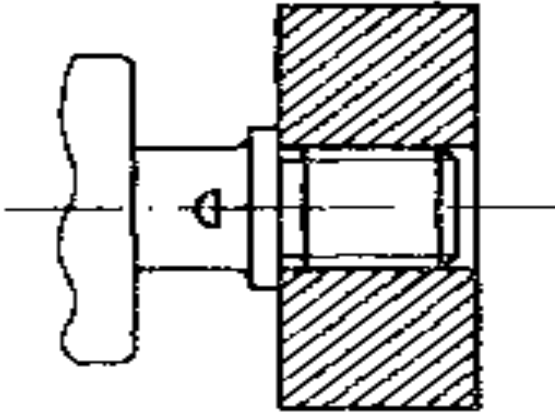
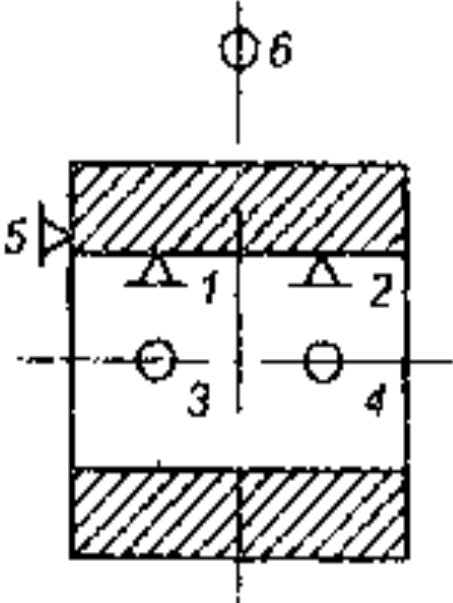


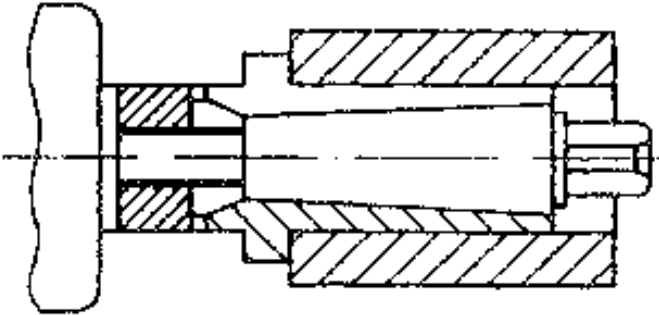
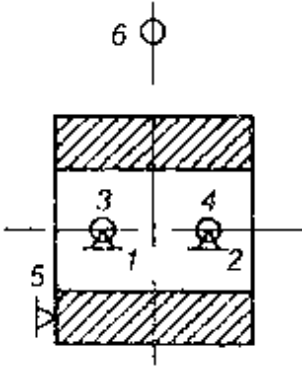
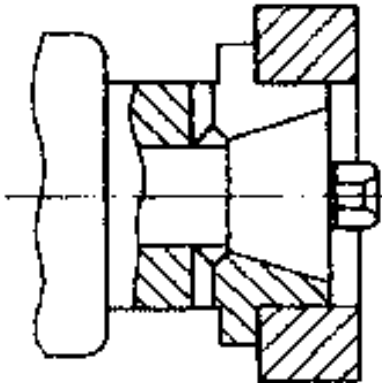
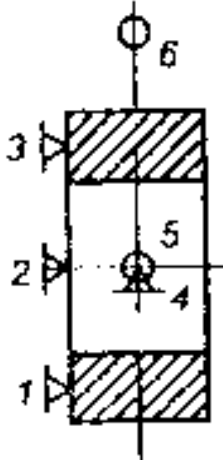
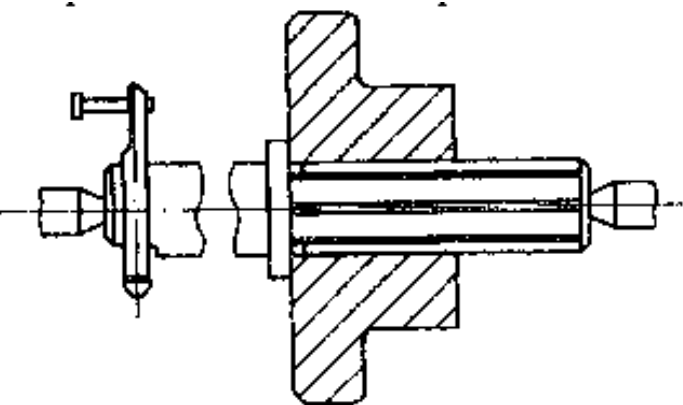
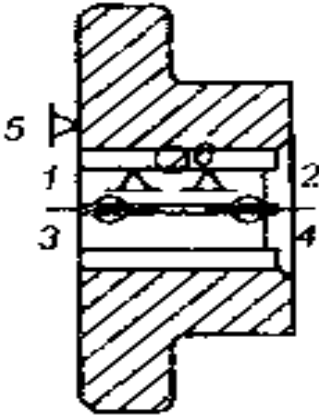
Опис і схема встановлення	Теоретична схема базування
10. У центрах з поводком і обертовим центром та рухомим люнетом 	
11. У центрах з плаваючим центром у поводковому патроні та нерухомим люнетом 	
12. У центрах с рифленням і обертовим центром 	

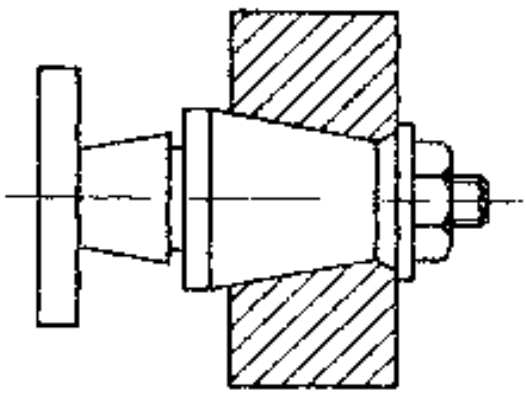
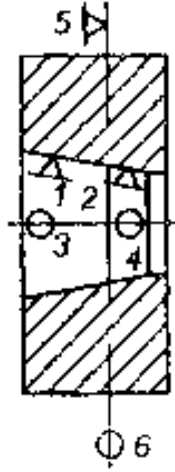
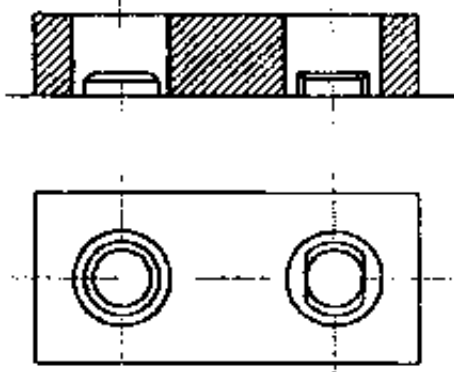
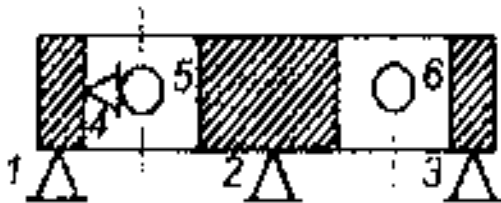
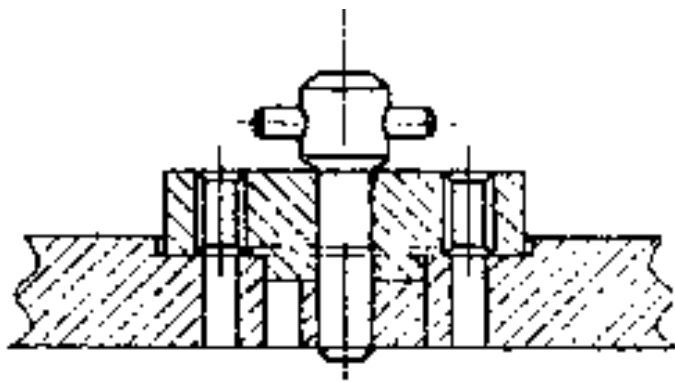
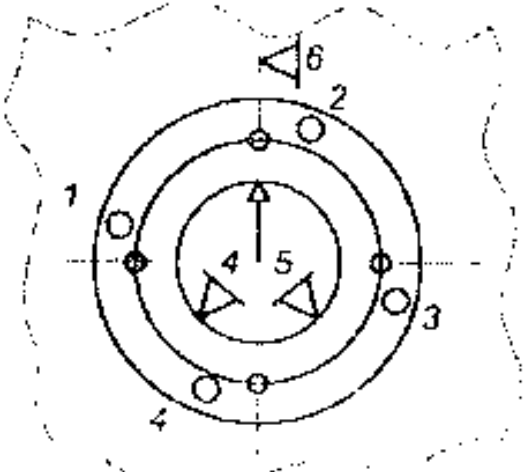
Опис і схема встановлення	Теоретична схема базування
13. У трьохкулачковому самоцентруючому патроні з базуванням по зовнішньому діаметру без упору в торець 	
14. На оброблюваній поверхні при безцентровому врізному шліфуванні: 1 – шліфувальний круг; 2 – ведучий круг; 3 – заготовка; 4 – опора; 5 – повздовжній упор	
	
15. На жорсткій консольній оправці з базуванням по торцю	
	

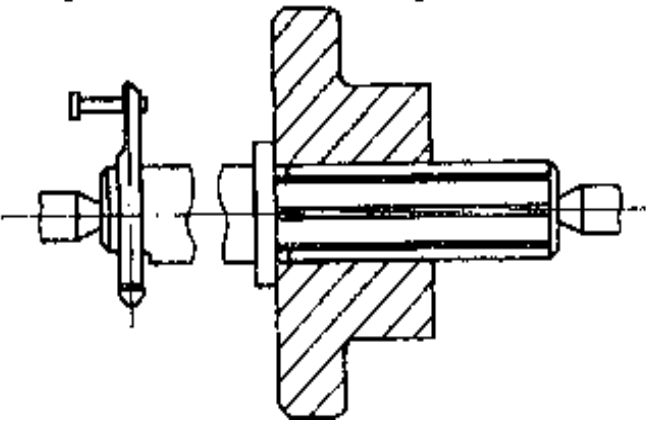
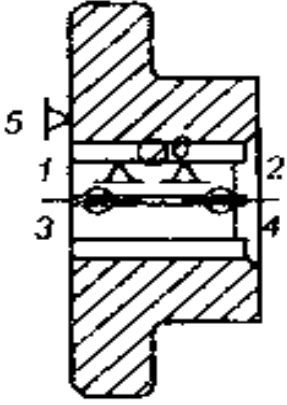
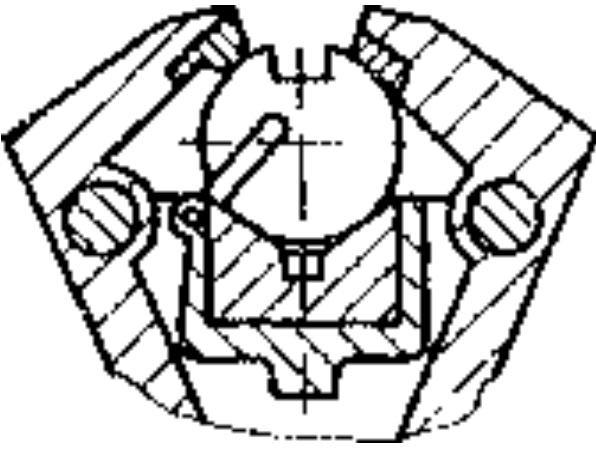
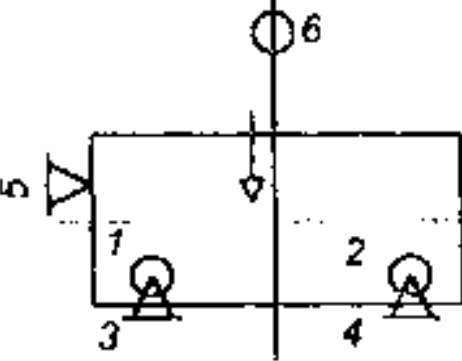
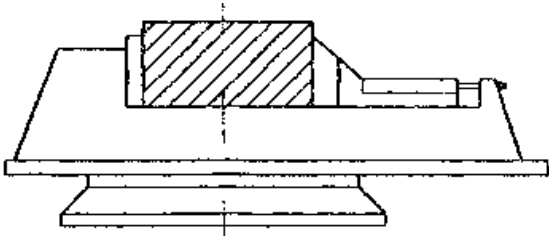
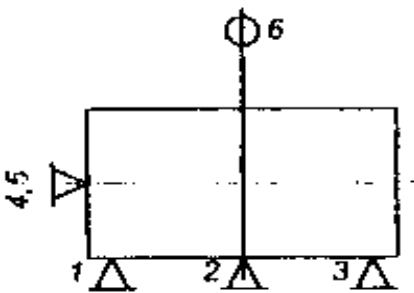
Опис і схема встановлення	Теоретична схема базування
16. На оправці з базуванням по торцю і кріпленням по отвору 	
17. На жорсткій оправці з кріпленням по торцю 	
18. На оправці в розтиск з базуванням по отвору 	

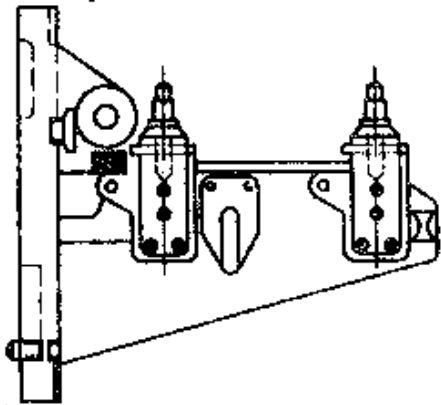
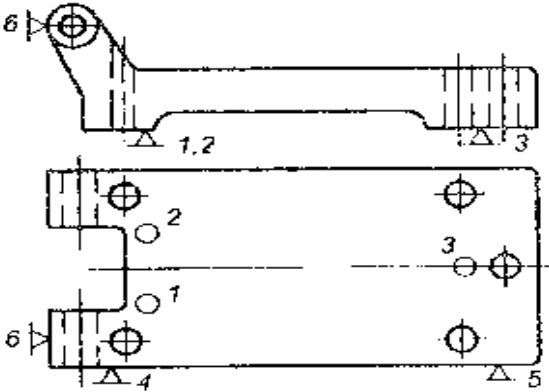
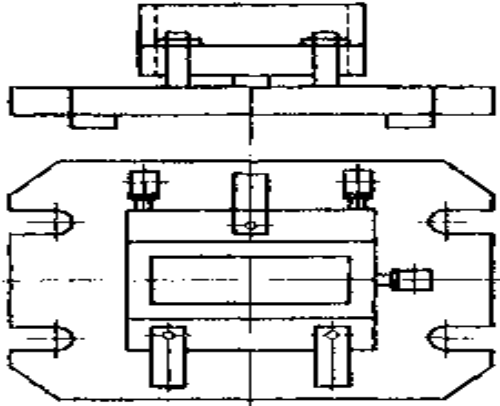
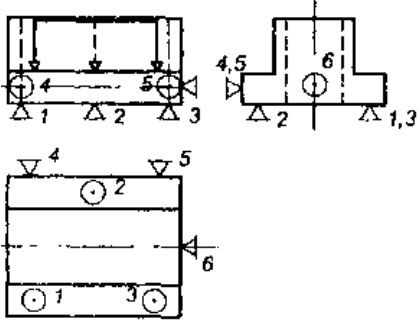
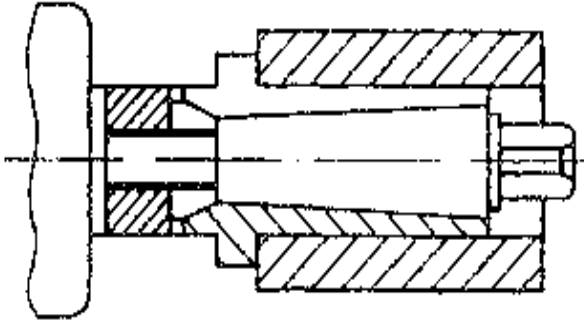
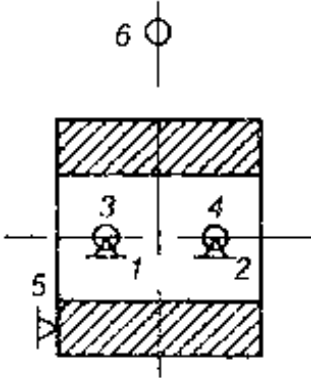
Опис і схема встановлення	Теоретична схема базування
19. У пристрої з роликами з базуванням по торцю 	
20. Кріплення на оправці з гідроластом 	
21. Базування по отвору на сферичній опорі при протягуванні 	

Опис і схема встановлення	Теоретична схема базування
22. Кріплення в призмах 	
23. На консольній оправці зі шпонкою з базуванням по торцю 	
24. На різьбовій консольній оправці з базуванням по різьбі 	

Опис і схема встановлення	Теоретична схема базування
25. На розжимній консольній оправці з базуванням по отвору 	
26. На розжимній консольній оправці з базуванням по торцю 	
27. На шлицевій оправці в центрах з базуванням по отвору 	

Опис і схема встановлення	Теоретична схема базування
28. На жорсткій конусній консольній оправці з базуванням по отвору 	
29. На площину, круглий і зрізаний пальці з вертикальними осями 	
30. У накладному кондукторі 	

Опис і схема встановлення	Теоретична схема базування
31. На шліцевій оправці в центрах з базуванням по отвору	
	
32. У призматичних тисках	
	
33. У машинних тисках	
	

Опис і схема встановлення	Теоретична схема базування
34. У кондукторі на поворотному столі 	
35. По площині основи і двом боковим сторонам 	
36. На розтискній консольній оправці з базуванням по отвору 	

Таблиця 13 – Значення нормованої функції Лапласа $\Phi_0(z)$

$$\Phi_0(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-\frac{z^2}{2}} dz$$

z	t(z)	$\Phi_0(z)$	z	t(z)	$\Phi_0(z)$	z	t(z)	$\Phi_0(z)$
0,00	0,39894	0,0000	0,36	0,3739	0,1406	0,72	0,3079	0,2642
0,01	0,39892	0,0040	0,37	0,3725	0,1443	0,73	0,3056	0,2673
0,02	0,39886	0,0080	0,38	0,3712	0,1480	0,74	0,3034	0,2703
0,03	0,39876	0,0120	0,39	0,3697	0,1517	0,75	0,3011	0,2734
0,04	0,39862	0,0160	0,40	0,3683	0,1554	0,76	0,2989	0,2764
0,05	0,39844	0,0199	0,41	0,3668	0,1591	0,77	0,2966	0,2794
0,06	0,39822	0,0239	0,42	0,3653	0,1628	0,78	0,2943	0,2823
0,07	0,39797	0,0279	0,43	0,3637	0,1664	0,79	0,2920	0,2852
0,08	0,39767	0,0319	0,44	0,3621	0,1700	0,80	0,2897	0,2881
0,09	0,39733	0,0359	0,45	0,3605	0,1736	0,81	0,2874	0,2910
0,10	0,3970	0,0398	0,46	0,3589	0,1772	0,82	0,2850	0,2939
0,11	0,3965	0,0438	0,47	0,3572	0,1808	0,83	0,2827	0,2967
0,12	0,3961	0,0478	0,48	0,3555	0,1844	0,84	0,2803	0,2995
0,13	0,3956	0,0517	0,49	0,3538	0,1879	0,85	0,2780	0,3023
0,14	0,3951	0,0557	0,50	0,3521	0,1915	0,86	0,2756	0,3051
0,15	0,3949	0,0596	0,51	0,3503	0,1950	0,87	0,2732	0,3078
0,16	0,3939	0,0636	0,52	0,3485	0,1985	0,88	0,2709	0,3106
0,17	0,3932	0,0675	0,53	0,3467	0,2019	0,89	0,2685	0,3133
0,18	0,3925	0,0714	0,54	0,3448	0,2054	0,90	0,2661	0,3159
0,19	0,3918	0,0753	0,55	0,3429	0,2088	0,91	0,2639	0,3186
0,20	0,3910	0,0793	0,56	0,3410	0,2123	0,92	0,2613	0,3212
0,21	0,3902	0,0832	0,57	0,3391	0,2157	0,93	0,2589	0,3238
0,22	0,3894	0,0871	0,58	0,3372	0,2190	0,94	0,2565	0,3264
0,23	0,3885	0,0910	0,59	0,3352	0,2224	0,95	0,2541	0,3289
0,24	0,3876	0,0948	0,60	0,3332	0,2257	0,96	0,2516	0,3315
0,25	0,3867	0,0987	0,61	0,3312	0,2291	0,97	0,2492	0,3340
0,26	0,3857	0,1026	0,62	0,3292	0,2324	0,98	0,2468	0,3365
0,27	0,3847	0,1064	0,63	0,3271	0,2257	0,99	0,2444	0,3389
0,28	0,3836	0,1103	0,64	0,3251	0,2389	1,00	0,2420	0,3413
0,29	0,3825	0,1141	0,65	0,3230	0,2422	1,01	0,2396	0,3438
0,30	0,3814	0,1179	0,66	0,3209	0,2454	1,02	0,2371	0,3461
0,31	0,3802	0,1217	0,67	0,3187	0,2486	1,03	0,2347	0,3485
0,32	0,3790	0,1255	0,68	0,3166	0,2517	1,04	0,2323	0,3508
0,33	0,3778	0,1293	0,69	0,3144	0,2549	1,05	0,2299	0,3531
0,34	0,3765	0,1331	0,70	0,3123	0,2580	1,06	0,2275	0,3554
0,35	0,3752	0,1368	0,71	0,3101	0,2611	1,07	0,2251	0,3577

z	t(z)	$\Phi_0(z)$	z	t(z)	$\Phi_0(z)$	z	t(z)	$\Phi_0(z)$
1,08	0,2227	0,3599	1,58	0,1145	0,4429	2,16	0,0387	0,4846
1,09	0,2203	0,3621	1,59	0,1127	0,4441	2,18	0,0371	0,4854
1,10	0,2179	0,3643	1,60	0,1109	0,4452	2,20	0,0355	0,4861
1,11	0,2155	0,3665	1,61	0,1092	0,4463	2,22	0,0339	0,4868
1,12	0,2131	0,3686	1,62	0,1074	0,4474	2,24	0,0325	0,4875
1,13	0,2108	0,3708	1,63	0,1057	0,4484	2,26	0,0310	0,4881
1,14	0,2083	0,3729	1,64	0,1040	0,4495	2,28	0,0297	0,4887
1,15	0,2059	0,3794	1,65	0,1023	0,4505	2,30	0,0283	0,4893
1,16	0,2036	0,3770	1,66	0,1006	0,4515	2,32	0,0270	0,4898
1,17	0,2012	0,3790	1,67	0,0989	0,4525	2,34	0,0258	0,4904
1,18	0,1989	0,3810	1,68	0,0973	0,4535	2,36	0,0246	0,4909
1,19	0,1965	0,3830	1,69	0,0957	0,4545	2,38	0,0235	0,4913
1,20	0,1942	0,3849	1,70	0,0940	0,4554	2,40	0,0224	0,4918
1,21	0,1919	0,3869	1,71	0,0925	0,4561	2,42	0,0213	0,4922
1,22	0,1895	0,3888	1,72	0,0909	0,4573	2,44	0,0203	0,4927
1,23	0,1872	0,3907	1,73	0,0893	0,4582	2,46	0,0194	0,4931
1,24	0,1849	0,3925	1,74	0,0878	0,4591	2,48	0,0184	0,4934
1,25	0,1826	0,3944	1,75	0,0863	0,4599	2,50	0,0175	0,4938
1,26	0,1804	0,3962	1,76	0,0848	0,4608	2,52	0,0167	0,4941
1,27	0,1781	0,3980	1,77	0,0833	0,4616	2,54	0,0158	0,4945
1,28	0,1758	0,3997	1,78	0,0818	0,4625	2,56	0,0151	0,4948
1,29	0,1736	0,4015	1,79	0,0804	0,4633	2,58	0,0143	0,4951
1,30	0,1714	0,4032	1,80	0,0790	0,4641	2,60	0,0136	0,4953
1,31	0,1691	0,4049	1,81	0,0775	0,4649	2,62	0,0129	0,4956
1,32	0,1669	0,4066	1,82	0,0761	0,4656	2,64	0,0122	0,4959
1,33	0,1647	0,4082	1,83	0,0748	0,4664	2,66	0,0116	0,4961
1,34	0,1626	0,4099	1,84	0,0734	0,4671	2,68	0,0110	0,4963
1,35	0,1604	0,4115	1,85	0,0721	0,4678	2,70	0,0104	0,4965
1,36	0,1582	0,4131	1,86	0,0707	0,4686	2,72	0,0099	0,4967
1,37	0,1561	0,4147	1,87	0,0694	0,4693	2,74	0,0093	0,4969
1,38	0,1539	0,4162	1,88	0,0691	0,4699	2,76	0,0088	0,4971
1,39	0,1518	0,4177	1,89	0,0669	0,4706	2,78	0,0084	0,4973
1,40	0,1497	0,4192	1,90	0,0656	0,4713	2,80	0,0079	0,4974
1,41	0,1476	0,4207	1,91	0,0644	0,4719	2,82	0,0075	0,4976
1,42	0,1456	0,4222	1,92	0,0632	0,4726	2,84	0,0071	0,4977
1,43	0,1435	0,4236	1,93	0,0620	0,4732	2,86	0,0067	0,4979
1,44	0,1415	0,4251	1,94	0,0608	0,4738	2,88	0,0063	0,4980
1,45	0,1394	0,4265	1,95	0,0596	0,4744	2,90	0,0060	0,4981
1,46	0,1374	0,4279	1,96	0,0584	0,4750	2,92	0,0056	0,4982
1,47	0,1354	0,4292	1,97	0,0573	0,4756	2,94	0,0053	0,4984
1,48	0,1334	0,4306	1,98	0,0562	0,4761	2,96	0,0050	0,4985
1,49	0,1315	0,4319	1,99	0,0551	0,4767	2,98	0,0047	0,4986
1,50	0,1295	0,4332	2,00	0,0540	0,4772	3,00	0,0044	0,49865
1,51	0,1276	0,4345	2,02	0,519	0,4783	3,20	0,0024	0,49931
1,52	0,1257	0,4357	2,04	0,0498	0,4793	3,40	0,0012	0,49966
1,53	0,1238	0,4370	2,06	0,0478	0,4803	3,60	0,0006	0,499841
1,54	0,1219	0,4382	2,08	0,0459	0,4812	3,80	0,0003	0,499928
1,55	0,1200	0,4394	2,10	0,0440	0,4821	4,00	0,00013	0,499968
1,56	0,1182	0,4406	2,12	0,0422	0,4830	4,50	0,000016	0,499997
1,57	0,1163	0,4418	2,14	0,0404	0,4838	5,00	0,0000015	0,499997

Заключення

Як було зазначено вище, технологія виробництва авіаційної та ракетно-космічної техніки – це галузь науки, що займається оволодінням закономірностей, що діють в процесі виготовлення наукоємних машин, з метою використання цих закономірностей для забезпечення необхідної якості при найменшій собівартості виробництва. Тому науково-технічні епохи вирізняються не тим, що виробляється, а чим і як: методами, способами, засобами, витратами і професійно-орієнтованими компетенціями.

Таке визначення, по суті, є формулюванням задачі оптимізації з вказівкою цільової функції – собівартості і технологічних обмежень. Вибір і обґрунтування оптимальних варіантів технологічних процесів для заданих умов виробництва потребує глибокого вивчення і оволодіння, чіткого дотримування наукових досягнень теорії і практики авіа- та ракетобудування, основних принципів раціональної організації виробничих процесів: спеціалізації, пропорційності, безперервності, паралельності, прямоточності, автоматичності і ритмічності. Необхідно враховувати закономірності і можливості раціональних методів, способів, засобів та необхідних спеціальних компетенцій персоналу, професійного володіння можливостями механічного і фізико-хімічного оброблення, керування арсеналами точності формоутворення поверхонь деталей, устаткування, інструмента, технологічного оснащення, теоретичного і практичного базування заготовок при виконанні інженерно-технологічних проектних робіт найвищого рівня.

У навчальному посібнику викладено науково-методичні основи аналізу, розрахунків та оптимізації точності формоутворення поверхонь та базування деталей в технологічних процесах виготовлення деталей авіаційних і ракетно-космічних об'єктів. При цьому зроблена спроба врахувати досвід викладання науково-технічних і професійно-орієнтованих дисциплін, орієнтуючись на досягнення вітчизняного промислового виробництва двигунів та літальних апаратів, ведучих авіаційних, машинобудівних та політехнічних вузів країни.

Рекомендовано оволодівати інформацією з бібліографічного списку, методиками і розрахунково-технологічними вправами виявлення та попередження браку в авіабудуванні, оптимізації припусків та операційних розмірів на формоутворення циліндричних і розмірів-координат торцевих поверхонь деталей.

Подано приклади комплексного розмірного аналізу та оптимізації схем базування деталей в робочій зоні металообробляючого обладнання для досягнення заданих вимог технічної документації.

Навчальний посібник рекомендується студентам авіаційної та ракетно-космічної галузі при вивченні професійно-орієнтованих дисциплін, курсовому та дипломному проектуванні, а також аспірантам і науковцям.

Бібліографічний список

1. Фираго, В. П. Основы проектирования технологических процессов и приспособлений. Методы обработки поверхностей / В. П. Фираго. – М.: Машиностроение, 1973. – 468 с.
2. Иващенко, И. А. Проектирование технологических процессов производства двигателей летательных аппаратов: учеб. пособие для авиац. вузов / И. А. Иващенко. – М.: Машиностроение, 1981. – 224 с.
3. Сотников, В. Д. Конструкторско-технологические размерные расчеты в авиадвигателестроении: учеб. пособие / В. Д. Сотников. – Харьков: ХАИ, 2007. – 57 с.
4. Гранин, В. Ю. Определение припусков на механическую обработку и технологические размерные расчеты: учеб. пособие / В. Ю. Гранин, А. И. Долматов, Э. А. Лимберг. – Харьков: ХАИ, 1993. – 119 с.
5. Методические указания к курсовому проекту по технологии производства авиационных двигателей / сост.: А. А. Лелета, В. И. Бастеев, В. Д. Сотников, А. И. Долматов. – Харьков: ХАИ, 1981. – 96 с.
6. Сотников, В. Д. Розрахунки розмірних ланцюгів з використанням графів / В. Д. Сотников. – Харків: ХАІ, 1994. – 24 с.
7. Разработка маршрутных технологических процессов изготовления деталей авиадвигателей / В. Д. Сотников, А. И. Долматов, А. Ф. Горбачев, С. В. Яценко. – Харьков: ХАИ, 1989. – 40 с.
8. Руденко, П. О. Проектування технологічних процесів у машинобудуванні: навч. посіб. / П. О. Руденко. – Київ: Вища шк., 1993. – 414 с.
9. Косилова, А. Г. Точность обработки, заготовки и припуски в машиностроении / А. Г. Косилова, Р. К. Мещеряков, М. А. Калинин. – М.: Машиностроение, 1976. – 224 с.
10. Справочник технолога-машиностроителя: справ. в 2 т. / под общ. ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1985. – Т. 1. – 656 с.
11. Изготовление основных деталей авиадвигателей / М. И. Евстигнеев, И. А. Морозов, А. В. Подзей и др.; под общ. ред. А. В. Подзея. – М.: Машиностроение, 1972. – 448 с.
12. Маталин, А. А. Технология машиностроения: учеб. для машиностр. вузов / А. А. Маталин. – Л.: Лань, 1985. – 512 с.
13. Технология производства авиационных двигателей / В. А. Богуслаев, А. Я. Качан, А. И. Долматов и др. – Запорожье: ОАО «Мотор-Сич», 2007. – Ч. 1. Основы технологии. – 518 с.
14. Технология производства авиационных двигателей: в 4 т. / В. А. Богуслаев, А. Я. Качан, А. И. Долматов и др. – Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2007. – Т. 2. – 557 с.

15. Комиссаров, В. И. Точность, производительность и надежность в системе проектирования технологических процессов / В. И. Комиссаров, В. И. Леонтьев. – М.: Машиностроение, 1985. – 219 с.
16. Гельфгат, Ю. И. Сборник задач и упражнений по технологии машиностроения: учеб. пособие / Ю. И. Гельфгат. – 2-е изд., перераб. – М.: Высш. шк., 1986. – 271 с.
17. Горбачевич, А. Ф. Курсовое проектирование по технологии машиностроения: учеб. пособие / А. Ф. Горбачевич, В. А. Шкред. – 4-е изд., перераб. и доп. – Мн.: Вышэйш. шк., 1983. – 256 с.
18. Производство зубчатых колес: справ. / С. Н. Калашников, А. С. Калашников и др.; под общ. ред. Б. А. Тайца. – М.: Машиностроение, 1990. – 464 с.
19. Зубчатые соединения : справ. / Е. Г. Глухарев, Н. И. Зубарев. – Л.: Машиностроение, 1983. – 270 с.
20. Гжиров, Р. И. Краткий справочник конструктора: справ. / Р. И. Гжиров. – Л.: Машиностроение, 1983. – 464 с.
21. Прейс, Г. А. Технология конструкционных материалов: учебник / Г. А. Прейс, Н. А. Сологуб, И. А. Рожнецкий и др. – 2-е изд. – Київ : Вища шк., 1991. – 391 с.
22. Режимы резания труднообрабатываемых материалов: справ. / Я. Л. Гуревич, М. Ф. Горохов, В. И. Захаров и др. – М.: Машиностроение, 1986. – 240 с.
23. Марочник сталей и сплавов: справ. / А. С. Зубченко, М. М. Колосков, Ю. В. Каширский и др.; под общ. ред. А. С. Зубченко. – 2-е изд., доп. и испр. – М.: Машиностроение, 2003. – 784 с.
24. Единая система допусков и посадок СЭВ в машиностроении и приборостроении: справ.: в 2 т. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – Т. 1. – 263 с.
25. Допуски и посадки: справ.: в 2 ч. / В. Д. Мягков, М. А. Палей, А. Б. Романов, В. А. Брагинский. – 6-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1982. – Ч. 1. – 543 с.
26. Якімов, О. В. Технологія машино- та двигунобудування : підручник / Якімов О. В. – Одеса: ОНПУ, 2005. – 720 с.
27. Базування та бази в машинобудуванні. Терміни та визначення. ДСТУ 2223-93. – Київ: Держстандарт України, 1993. – 35 с.
28. Соколовский, А. П. Научные основы технологии машиностроения / А. П. Соколовский. – Л.: Машгиз, 1955. – 515 с.
29. Корсаков, В. С. Основы технологии машиностроения / В. С. Корсаков. – М.: Высш. шк., 1974. – 335 с.
30. Балакшин, Б. С. Основы технологии машиностроения / Б. С. Балакшин. – М.: Высш. шк., 1969. – 359 с.
31. Кован, В. М. Технология машиностроения / В. М. Кован. – Л.: Машгиз, 1950. – 367 с.
32. Гжиров, Р. И. Краткий справочник конструктора: справ. / Р. И. Гжиров. –

- Л.: Машиностроение, 1983. – 464 с.
33. Колкер, Я. Д. Базирование и базы в машиностроении: учеб. пособие / Я. Д. Колкер, О.Н. Руднев. – Киев.: Вища шк., 1991. – 100 с.
34. Проектирование технологических процессов механической обработки. Расчёты припусков и операционных размеров: учеб. пособие / А. И. Долматов, Б. С. Белоконь, М. К. Князев и др.; под. общ. ред. Б. С. Белоконя. – Харьков: ХАИ, 2014. – 177 с.
35. Взаимозаменяемость и стандартизация : учеб. пособие / М. К. Князев, К. А. Данько, Ю. А. Невешкин, А. В. Онопченко. – Харьков: ХАИ, 2017. – 76 с.
36. ДСТУ ISO 286-1–2002. Допуски і посадки за системою ISO. Частина 1. Основи допусків, відхилів та посадок: – Введено вперше; чинний з 2003-10-1. – Київ : Держспоживстандарт України, 2003. – 42 с.
37. ДСТУ ISO 286-2:2002. Допуски і посадки за системою ISO. Частина 2. Таблиці квалітетів стандартних допусків і граничних відхилів отворів і валів: – Уведено вперше, чинний з 2003-10-1. – Київ : Держспоживстандарт України, 2003. – 47 с.
38. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / под. ред. А. М. Дальского, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова, А. Г. Сулова. – М.: Машиностроение-1, 2003. – Т. 1. – 912 с.
39. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / под. ред. А. М. Дальского, А. Г. Сулова, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. – М.: Машиностроение-1, 2003. – Т. 2. – 944 с.
40. Митрофанов, С. П. Групповая технология машиностроительного производства : в 2 т. / С. П. Митрофанов. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1983. – Т. 1. Организация группового производства. – 407 с.
41. Анурьев, В. И. Справочник конструктора-машиностроителя: в 3-х т. / В. И. Анурьев. – М.: Машиностроение-1, 2001. – Т. 1. – 920 с.
42. Березина, Л. Ю. Графы и их применение: пособие для учителей / Л. Ю. Березина. – М.: Просвещение, 1979. – 143 с.
43. Берж, К. Теория графов и её применения / К. Берж. – М.: ИЛ, 1962. – 164 с.
44. Грінченко, А. М. Фізико-хімічні основи технологічних процесів. / навч. посіб. / А. М. Грінченко, В. Г. Приєзжев, В. В. Третяк. – Харків : ХАІ, 2016. – Ч 1. Оброблення металів різанням. – 64 с.
45. Якимов, А. В. Оптимизация технологических процессов в машиностроении: учеб. пособие / А. В. Якимов, В. П. Ларшин, А. А. Якимов. – Киев: Лира, 1995. – 105 с.
46. Сотников, В. Д. Групові технологічні процеси в авіадвигунобудуванні / В. Д. Сотников. – навч. пос. – Харків : Нац. аерокосм. ун-т «Харк. авіац. ін-т», 2008. – 79 с.

Навчальне видання

**Сотников Володимир Данилович
Невешкін Юрій Олександрович
Худяков Сергій Валентинович
Третьак Володимир Васильович**

**ТОЧНІСТЬ ФОРМОУТВОРЕННЯ ПОВЕРХОНЬ
І БАЗУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ**

Редактор В. М. Коваль

Зв. план, 2018

Підписано до видання 30.11.2018

Ум. друк. арк. 11,4. Обл.-вид. арк. 12,88. Електронний ресурс

Видавець і виготовлювач
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»
61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17
<http://www.khai.edu>
Видавничий центр «ХАІ»
61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17
izdat@khai.edu

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів
видавничої продукції сер. ДК № 391 від 30.03.2001