

Центральноукраїнський національний технічний університет

Кафедра машинобудування, мехатроніки і робототехніки

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

до виконання самостійної роботи

з початкової дисципліни

«Теоретичні основи технології виробництва деталей та складання машин»

для здобувачів вищої освіти галузі знань

13 «Механічна інженерія»

Кропивницький 2024

Центральноукраїнський національний технічний університет

Кафедра машинобудування, мехатроніки і робототехніки

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

до виконання самостійної роботи

з початкової дисципліни

«Теоретичні основи технології виробництва деталей та складання машин»

для здобувачів вищої освіти галузі знань

13 «Механічна інженерія»

Затверджено на засіданні кафедри
«Машинобудування, мехатроніки і
робототехніки» Протокол № 7 від
17.12.2024 р.

Кропивницький 2024

Теоретичні основи технології виробництва деталей та складання машин: Методичні рекомендації до виконання самостійної роботи здобувачами вищої освіти галузі знань 13 «Механічна інженерія»/ [уклад. : А. М. Артюхов, О. І. Скібінський, М. А. Трембіцький] ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т, каф. машинобудування, мехатроніки і робототехніки, – Кропивницький: ЦНТУ, 2024. – 98 с.

Методичні рекомендації розроблено відповідно до начальних планів підготовки фахівців освітньо-кваліфікаційного рівня «бакалавр» за напрямком підготовки 131 - « Прикладна механіка.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1 Основні поняття та визначення.....	9
1.1 Побудова схем розмірних ланцюгів.....	12
1.2 Розрахунок розмірних ланцюгів.....	13
2 Метод повної взаємозамінності.....	14
2.1 Розрахунок поля розсіювання (допуску) замикаючої ланки (розрахунок на максимум і мінімум).....	14
2.2 Розрахунок допусків розмірів складових ланок по величині допуску розміру замикаючої (вихідної) ланки (пряма задача).....	17
3 Метод неповної взаємозамінності.....	20
3.1 Розрахунок поля розсіювання (допуску) замикаючої ланки ймовірнісним методом (обернена задача).....	21
3.2 Розрахунок допусків складових ланок.....	23
4 Розрахунок складальних розмірних ланцюгів.....	26
4.1 Методи групової взаємозамінності (селективне складання).....	28
4.2 Методи пригонки і регулювання	29
5 Операційні розмірні ланцюги.....	31
5.1 Послідовність розрахунку операційних розмірних ланцюгів технологічного процесу	35
5.2 Розрахунок операційних діаметральних розмірів.....	79
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	85
ДОДАТКИ.....	86

ВСТУП

Якість виготовлення машин, їх працездатність (надійність, довговічність, продуктивність) залежать від якості виготовлення складових деталей. На якість виготовлення деталей впливають хімічний склад та властивості матеріалів, їх фізико-механічні властивості, точність виготовлення і точність спряження цих деталей в машині чи вузлі.

Але довільно обговорити точність виготовлення деталі неможливо. В кожному випадку, виходячи з вимог, які пред'являються для даного спряження у вузлі, цю точність необхідно розрахувати. Окрім цього, при виготовленні деталі з заданою точністю вона проходить цілий ряд операцій послідовної зміни форми і розмірів, які також потребують відповідних розрахунків.

Сукупність методів і прийомів розрахунку, направлених на встановлення розмірних параметрів точності, називається розмірним аналізом.

Розпізнають декілька видів розмірного аналізу:

1. Розмірний аналіз механізму або машини, який полягає у виявленні і фіксації розмірних зв'язків механізму в цілому, які забезпечують точність його конструктивних параметрів;
2. Розмірний аналіз деталей, який визначає розмірний зв'язок точності між елементами деталі;
3. Розмірний аналіз технологічної операції, який полягає у виявленні і фіксації розмірних зв'язків системи ВПД на кожній операції, які забезпечують задану точність розміру, геометричної форми і взаємного положення поверхонь оброблюваної деталі;
4. Розмірний аналіз технологічного процесу, який полягає у виявленні розмірних зв'язків між поверхнями деталі на різних послідовних

технологічних операціях або переходах з метою встановлення операційних розмірів і їх точності.

В комплекс робіт по проектуванню технологічних процесів механічної обробки деталей в залежності від програми випуску, технічних вимог і можливостей конкретного виробництва входять наступні етапи:

1. Вибір виду заготовки;
2. Розробка плану обробки деталі;
3. Визначення методу базування;
4. Вибір обладнання;
5. Розрахунок припусків;
6. Визначення операційних розмірів;
7. Визначення форми і розмірів заготовки;
8. Розрахунок режимів різання;
9. Проектування пристроїв, різального і вимірювального інструментів.

Розміри деталі, що вказані на креслені, операційні розміри на кожному етапі обробки і розміри заготовки знаходяться у складній розмірній залежності. Точність виготовлення розмірів на кожному технологічному переході впливає на трудомісткість виготовлення всієї деталі. Необгрунтоване призначення допусків на операційні розміри призводить до збільшення вартості деталей: жорсткі допуски вимагають використання більш точного обладнання і оснастки, ретельного налаштування і зниження режимів різання, а грубі допуски – збільшення припусків і витрату метала.

Міжопераційні припуски на обробку і допуски на операційні розміри в кожному конкретному випадку обирають оптимальними, тобто, достатніми для отримання деталі із заданими розмірами при найменшій вартості обробки.

Розрахунок припусків на механічну обробку по кожній операції технологічного процесу виконується по методу професора В.М. Кована.

Цей метод зручно застосовувати для розрахунку припусків діаметральних розмірів, де зв'язок припуску з попередніми і остаточними розмірами доволі простий. Значну складність представляє розрахунок припусків і операційних розмірів, що входять до лінійного розмірного ланцюга (наприклад, розміри ступенів вала вздовж вісі). В подальшому такі розміри називають повздовжніми або лінійними. В даному випадку зв'язувати безпосередньо припуск з попередніми і виконуваними розмірами не завжди можливо, кількість розмірів, що входять до розмірної ланки, збільшується, і самі ланцюги виходять більш складними.

При виконанні розрахунків операційних повздовжніх розмірів виходять системи розмірних ланцюгів із взаємопов'язаними ланками. Щоб визначити розміри на попередній операції, необхідно знати величину припуску. Для визначення допусків на операційні розміри, крім того, необхідно враховувати досяжну точність обробки.

В машинобудуванні завжди особлива роль відводилася проектуванню та розробці технологічних операцій виготовлення деталей та складання вузлів і машин. Під час проектування технологічних процесів виникають завдання розрахунку операційних допусків і розмірів, а також припусків на обробку заготовок. У випадку неможливості поєднання технологічних, конструкторських і вимірювальних баз та необхідності зміни технолог змушений встановлювати «технологічні» операційні розміри та проводити перерахунок допусків, що зазвичай супроводжується зменшенням поля допуску. Всі ці задачі вирішуються на основі розрахунку відповідних технологічних розмірних ланцюгів.

Основна мета методичних вказівок полягає в підготовці фахівців до розробки та реалізації технологічних процесів виготовлення деталей вузлів і машин при вивченні спеціальних курсів за фахом, а також можуть бути використані під час самостійної роботи та дипломного проектування.

1. Основні поняття та визначення

Взаємне розміщення деталей складальних з'єднань, складальних елементів виробів, а також окремих поверхонь деталей визначається лінійними і кутовими розмірами, які встановлюють відставні між відповідними поверхнями, осями окремих деталей або складальних елементів та утворюють замкнуті ланцюги.

Розмірним ланцюгом називається сукупність розмірів, розташованих по замкнутому контурі, які визначають взаємне розміщення поверхонь чи осей поверхонь однієї деталі або ж декількох деталей складального з'єднання чи вузла (рисунок 1,а).

Конструкторський розмірний ланцюг визначає відстані або відносний поворот між поверхнями чи осями поверхонь деталей у виробі(рисунок 1,б, в, г). При розробці технологічних процесів складання конструкторські розмірні ланцюги також називають складальними.

Технологічний розмірний ланцюг визначає відстані між поверхнями виробу при виконанні операцій механічної обробки або складання, при настроюванні верстата або розрахунку між операційних розмірів і припусків.

Розміри, що входять у розмірний ланцюг, називаються ланками, Ланка розмірного ланцюга, яка є вихідною при постановці завдання або ж останньою у результаті його рішення, називається замикаючою або вихідною ланкою. Інші ланки ланцюга називається складовими.

Вихідна ланка розмірного ланцюга визначає точність розмірів складових ланок. Відносно вихідної ланки визначають допуски та граничні відхилення розмірів складових ланок. Так, при визначені розмірів паза A_2 і шпонки A_1 (рисунок 1, б) і діаметра вала A_1 та отвору A_2 (рисунок 1, в) виходять із необхідності забезпечення величини конструктивно необхідних зазорів A_0 , які є в даних випадках вихідними (замикаючими) ланками. Довжина вихідної заготовки вала B_1 (рисунок 1, д) визначається виходячи із задачі забезпечення необхідного розміру припуску $z = B_0$, який при цьому є

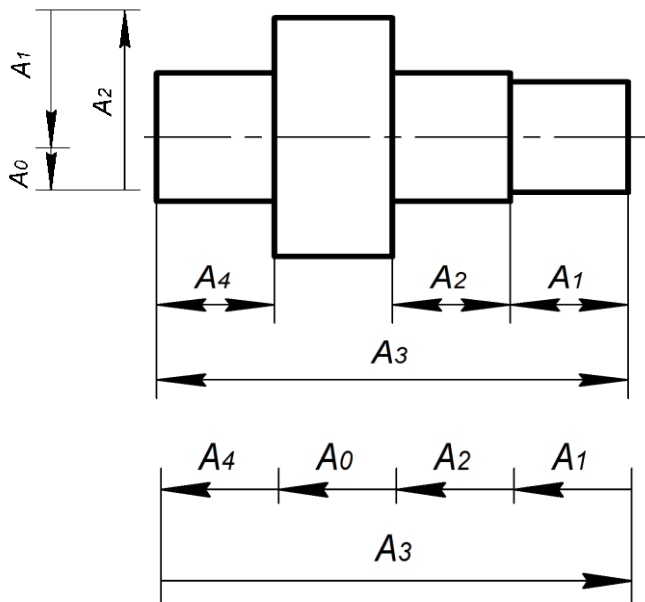
вихідною ланкою. У процесі обробки заготовки або ж в процесі складання з'єднання вихідна ланка стає замикаючою і остаточно формується в останню чергу.

На робочих кресленнях деталей розмір замикаючої (вихідною) ланки зазвичай не вказується. У складальних розмірних ланцюгах замикаючою ланкою можуть бути зазор, лінійний або кутовий розміри, точність яких обумовлюється в технічних умовах. У технологічних розмірних ланцюгах замикаючою ланкою часто є розмір припуску на обробку заготовки або той конструкторський розмір, що при обробці замінюється технологічними розмірами і отримується у результаті виконання останніх.

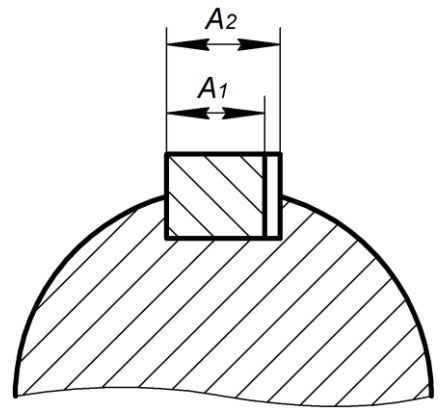
Складова ланка розмірного ланцюга, із збільшенням якої замикаюча ланка збільшується, називається збільшуваною і позначається $A_i \text{ зб.}$, а ланка, із збільшенням якого замикаюча ланка зменшується, називається зменшувальною і позначається $A_i \text{ зм.}$. На схемах лінійних і плоских розмірних ланцюгів збільшувальні ланки позначаються односторонніми стрілками, спрямованими праворуч, в зменшуючі ланки – стрілками спрямованими вліво.

В залежності від розташування розмірів розмірні ланцюги поділяються на:

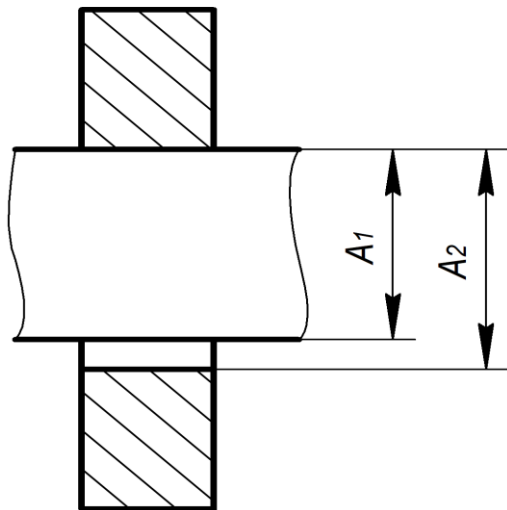
- лінійні розмірні ланцюги, що складаються із взаємно паралельних лінійних розмірів, які позначаються прописними буквами кирилиці;
- кутові розмірні ланцюги, ланками яких є кутові розміри, позначаються малими літерами грецького алфавіту (крім $\alpha, \delta, \zeta, \lambda$ і ω);
- плоскі розмірні ланцюги, ланки яких розташовані в одній або декількох паралельних площинах;
- просторові розмірні ланцюги, ланки яких перебувають у непаралельних площинах.



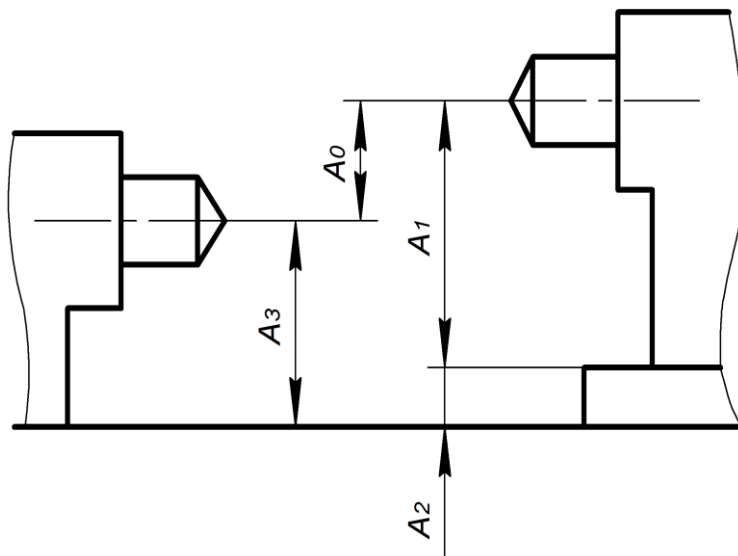
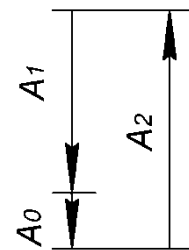
a)



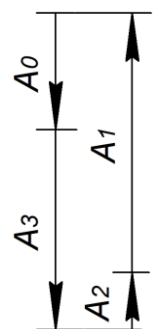
б)

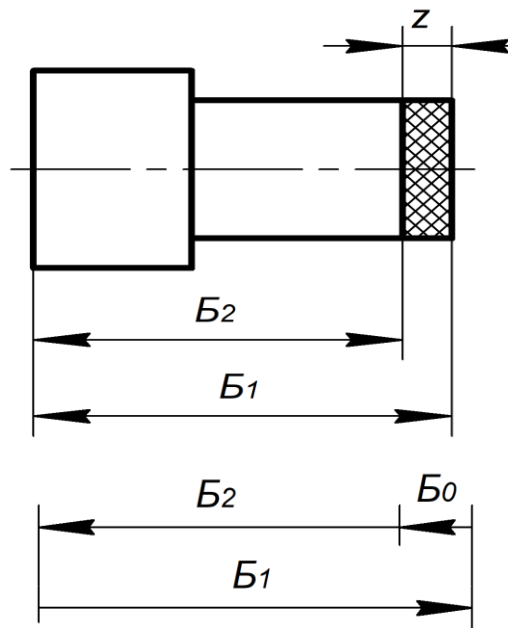


B)



Г)





д)

Рисунок 1 – Види розмірних ланцюгів

1.1 Побудова схем розмірних ланцюгів

Відповідно до ГОСТ 16320-80 залежно від розв'язуваної задачі зображуються схеми виробу технологічної схеми (оброблювана заготовка-верстат-пристрій-інструмент), технологічного процесу або вимірювання, на яких наноситься розмірний ланцюг або розмірні ланцюги. При цьому допускається для кожного розмірного ланцюга зображувати окрему схему.

Виходячи з поставленої задачі визначаються замикаюча ланка розмірного ланцюга. Зазвичай замикаючою ланкою є відстань між поверхнями (їхніми осями) або їхній відносний поворот, які потрібно забезпечити при конструюванні виробу, досягнути в процесі його виготовлення або визначити вимірюванням. У технологічних розмірних ланцюгах як замикаюча ланка часто приймається припуск на обробку заготовки.

Побудова схеми розмірного ланцюга починається від однієї з поверхонь (осей), що обмежують замикаючу ланку, при цьому встановлюються складові ланки розмірного ланцюга, які безпосередньо

беруть участь у рішенні поставленої задачі і доходять до іншої поверхні (осі), яка обмежує замикаючу ланку.

1.2 Розрахунок розмірних ланцюгів

Метою розрахунку розмірних ланцюгів у загальному випадку є рішення однієї із двох нижченаведених задач:

1.Пряма задача (проектна), яка полягає в тому, що по заданих параметрах замикаючої ланки визначаються параметри складових ланок. Практично при цьому по відомих граничних відхиленнях і допуску замикаючої ланки, який є вихідним, розраховуються допуски і граничні відхилення розмірів складових ланок.

2.Обернена задача (перевірочна). По відомих параметрах складових ланок визначаються параметри замикаючої ланки. Практично при цьому по відомих номінальних розмірах і їхніх граничних відхиленнях, допусках та характеристиках розсіювання розмірів складових ланок розраховується номінальний розмір замикаючої ланки, його допуск або поле розсіювання і граничні відхилення.

У процесі розв'язання оберненої задачі визначаються також величини, допуск і граничні відхилення розміру однієї із складових ланок по відомих характеристиках інших складових і замикаючої (вихідної) ланок, а також деякі інші технологічні завдання.

Залежно від поставленої задачі і виробничих умов технологічні розмірні ланцюги розраховуються способами:

- на максимум і мінімум;
- ймовірнісним методом;
- методом групової взаємозамінності (при селективному складанні);
- з урахуванням регулювання розмірів при складанні;
- з урахуванням пригонки розмірів окремих деталей під час складання.

Вибір конкретного способу розрахунку в першу чергу залежить від прийнятого в його основу методу досягнення необхідної точності виробу по принципах повної або неповної взаємозамінності.

2 Метод повної взаємозамінності

Метод повної взаємозамінності забезпечує досягнення необхідної точності замикаючої ланки розмірного ланцюга шляхом включення в неї складових ланок без вибору, підбору або зміни їх значень. При цьому будь-яка деталь, виготовлена за принципом повної взаємозамінності, може бути використана при складанні без припасування чи підбору при збереженні необхідних експлуатаційних властивостей виробу.

2.1 Розрахунок поля розсіювання (допуску) замикаючої ланки (розрахунок на максимум і мінімум)

При роботі по принципу повної взаємозамінності проводиться розрахунок розмірних ланцюгів на максимум і мінімум, що враховує тільки граничні відхилення ланок і несприятливі їх поєднання. Розрахунок на максимум і мінімум починається з побудови розмірного ланцюга, що визначає розмірні зв'язки складального з'єднання або торцевих поверхонь деталі. Основними перевагами методу розрахунку на максимум і мінімум, що забезпечує повну взаємозамінність деталей і складальних одиниць, є:

- а) простота, висока продуктивність і економічність складання виробів;
- б) простота нормування складальних операцій, їх синхронізації в часі і організації потокового складання;
- в) можливість спеціалізації і кооперування підприємств по випуску деталей і складальних одиниць;
- г) скорочення простоїв машин при їх ремонті і спрощення ремонту у зв'язку з можливістю швидкої заміни зношених деталей новими без пригону й регулювання.

Найбільшим недоліком методу розрахунку на максимум і мінімум є необхідність жорсткості допусків складових ланок пропорційно їх кількості. При великій кількості ланок допуски складових розмірів є надто високими і у багатьох випадках економічно не доцільними. У зв'язку із цим розрахунок на максимум і мінімум повинен застосовуватися лише для коротких розмірних ланцюгів, що мають дві-три складові ланки.

Приклад 1. Для даної деталі (рис.2) методом розрахунку на максимум і мінімум визначити: номінальний розмір замикаючої ланки A_0 , величину її допуску TA_0 , граничні відхилення ESA_0 і EIA_0 , а також координату середину поля допуску E_cA_0 .

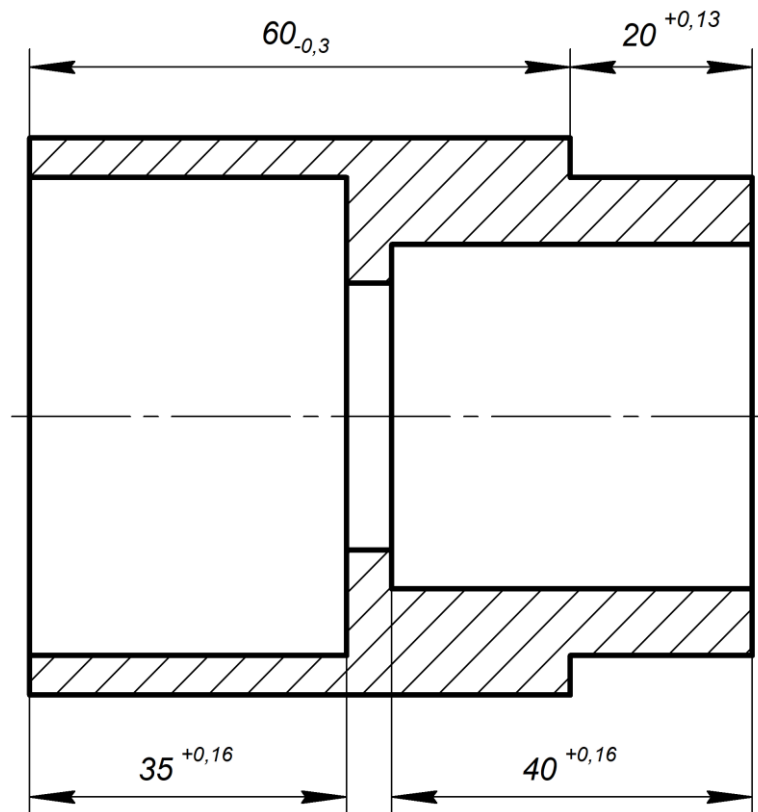


Рисунок 2 – Ескіз розрахункової деталі

Розв'язок: Відповідно до креслення деталі значення складових ланок наступні:

$$A_1 = 35^{+0,16} \text{ мм}; A_2 = 60_{-0,30} \text{ мм}; A_3 = 20^{+0,13} \text{ мм}; A_4 = 40^{+0,16} \text{ мм};$$

За відомими даними і на основі креслення деталі будемо розмірний аналіз (рис. 3).

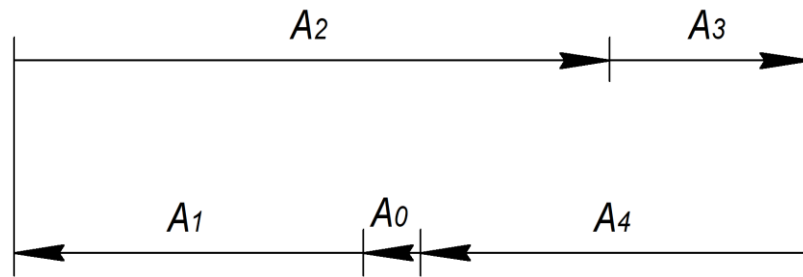


Рисунок 3 – Розмірний ланцюг деталі

Номінальний розмір замикаючої ланки визначаємо за формулою:

$$A_0 = \sum_{i=1}^n A_{i \text{ зб.}} - \sum_{n+1}^{m-1} A_{i \text{ зм.}} \quad (1)$$

де $A_{i \text{ зб.}}$ – збільшуваний розмір складової ланки;

$A_{i \text{ зм.}}$ – зменшувальний розмір складової ланки.

Відповідно, шляхом підстановки розрахунків значень, отримаємо:

$$A_0 = (60+20) - (35+40) = 5 \text{ мм.}$$

Допуск замикаючої ланки можна визначити за формулою:

$$TA_0 = TA_1 + TA_2 + \dots + TA_{m-1}, \text{ або } TA_0 = \sum_{i=1}^{m-1} TA_i, \quad (2)$$

де TA_1, TA_2, TA_{m-1} – значення допусків складових ланок розмірного ланцюга.

$$\text{Отже, } TA_0 = 0,16 + 0,30 + 0,13 + 0,16 = 0,75 \text{ мм.}$$

Згідно заданих умов граничні відхилення складових розмірів є наступними:

- верхнє відхилення

$$ES_{35} = +0,16 \text{ мм}; ES_{60} = 0 \text{ мм}; ES_{20} = 0,13 \text{ мм}; ES_{40} = +0,16 \text{ мм};$$

- нижнє відхилення

$$EI_{35} = 0 \text{ мм}; EI_{60} = -0,30 \text{ мм}; EI_{20} = 0 \text{ мм}; EI_{40} = 0 \text{ мм.}$$

Верхнє граничне відхилення замикаючої ланки ESA_0 дорівнює різниці суми верхніх відхилень збільшуючих ланок і суми нижніх відхилень зменшуючих ланок (3). А нижнє граничне відхилення замикаючої ланки EIA_0 дорівнює різниці суми нижніх відхилень збільшуючих ланок і суми верхніх відхилень зменшуючих ланок (4).

$$ESA_0 = \sum_{i=1}^n ESA_{i.зб.} - \sum_{n+1}^{m-1} EIA_{i.зм.}; \quad (3)$$

$$EIA_0 = \sum_{i=1}^n EIA_{i.зб.} - \sum_{n+1}^{m-1} ESA_{i.зм.}. \quad (4)$$

Відповідно верхнє відхилення дорівнює

$$ESA_0 = (ES60 + ES20) - (EI35 + EI40) = (0 + 0,13) - (0 + 0) = +0,13 \text{ мм};$$

- нижнє відхилення

$$EIA_0 = (EI60 + EI20) - (EIS35 + ES40) = (-0,30 + 0) - (0,16 + 0,16) = -0,62 \text{ мм};$$

Значення замикаючого розміру $A_0 = 5_{-0,62}^{+0,13}$ мм.

Координати середини поля допуску замикаючої ланки можна визначити із наступних залежностей

$$ESA_0 = E_c A_0 + \frac{TA_0}{2}; \quad (5)$$

$$EIA_0 = E_c A_0 - \frac{TA_0}{2}; \quad (6)$$

Відповідно з рівності (5) $E_c A_0$ дорівнює

$$E_c A_0 = ESA_0 - \frac{TA_0}{2} = 0,13 - \frac{0,75}{2} = -0,245 \text{ мм}.$$

2.2 Розрахунок допусків розмірів складових ланок по величині допуску розміру замикаючої (вихідної) ланки (пряма задача)

У розрахунок допусків розмірних ланцюгів ця задача вирішується при використанні способу пробних розрахунків. При цьому на всі складові ланки розмірного ланцюга призначаються допуски, економічно досяжні при передбачуваних видах обробки розглянутих поверхонь, що відповідають стандартним допускам певних квалітетів точності стандарту. Після цього

визначаються величина очікуваного поля розсіювання розміру замикаючої ланки ω_0 і координата середини його поля розсіювання $E_{c\omega_0}$. Отримані значення ω_0 і $E_{c\omega_0}$ порівнюються з необхідними у проектованому виробі допуском замикаючої ланки і координатою середини поля його допуску. Якщо характеристики очікуваного розсіювання перевищують допустимі значення коливань замикаючої ланки (вихідної) ланки, то зменшують допуски одного або декількох складових ланок, після чого проводиться перевірочний розрахунок розмірного ланцюга. Методом проб і послідовних наближень встановлюються шукані допуски.

Приклад 2. Встановити допуски і допустимі відхилення лінійних розмірів деталей частини роз'ємного корпусу зубчатої передачі (рис.4), за умови забезпечення зазору A_0 в межах від 1,0 до 1,75 мм. Лінійні розміри, згідно позначень на кресленні, наступні: $A_1 = 140$ мм; $A_2 = 5$ мм; $A_3 = 101$ мм; $A_4 = 50$ мм; $A_5 = 5$ мм.

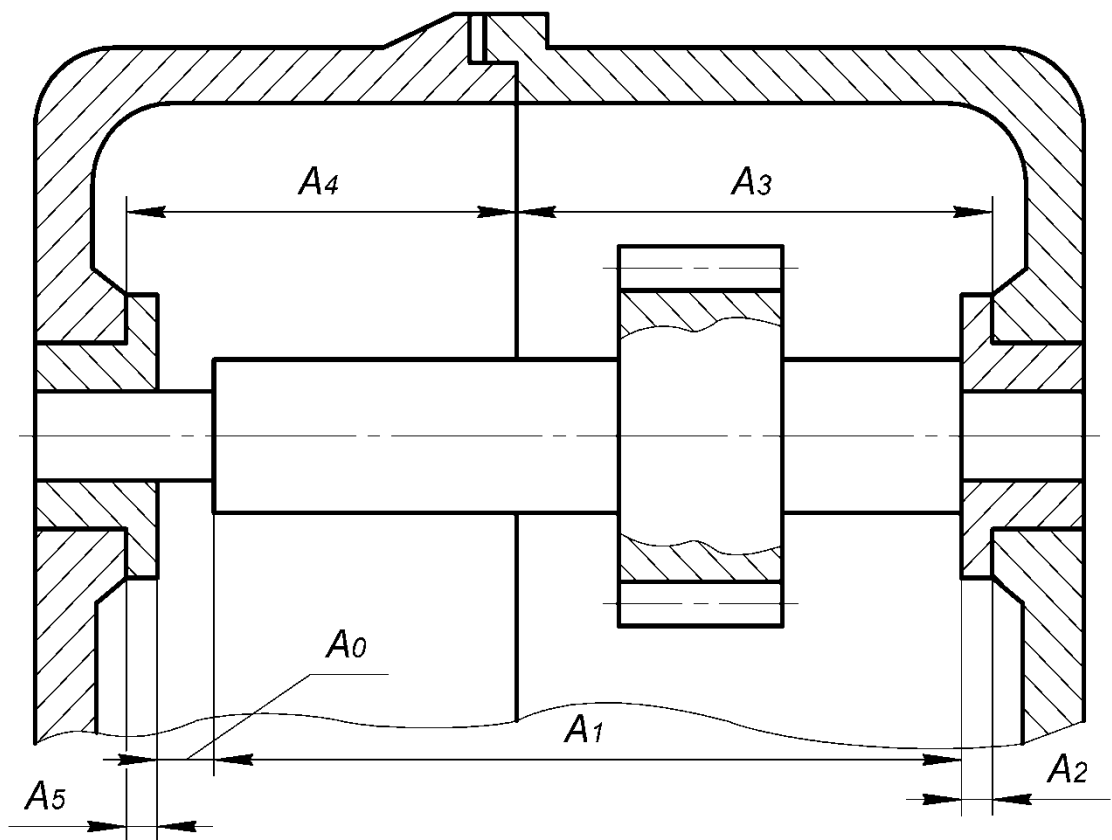


Рисунок 4 – Лінійні розміри роз'ємного корпусу

Розрахунок: Згідно даних креслення і умови задачі будуємо розмірний ланцюг (рис. 5). Замикаючою ланкою розмірного ланцюга є зазор із наступними розмірами:

$$A_0 = 1+0,75 \text{ мм}; TA_0 = 0,75 \text{ мм}; EIA_0 = 0; ESA_0 = +0,75 \text{ мм}; EсA_0 = +0,375\text{мм}.$$

Величина середнього допуску рівна:

$$T_{cp} = TA_0 / (m - 1) \quad (7)$$

де m – кількість ланок розмірного ланцюга.

$$\text{Відповідно } T_{cp} = 0,75 / (6-1) = 0,15 \text{ мм}.$$

Дана величина середнього допуску для деталей корпусу відповідає допускам 11-го квалітету точності, дотримання яких не викликає технологічних труднощів. У зв'язку з цим на всі розміри ланок розмірного ланцюга призначаємо допуски по h11 і H11, тобто: ω

$$A_1 = 140_{-0,22} \text{ мм}; A_2 = 5_{-0,075} \text{ мм}; A_3 = 101^{+0,22} \text{ мм}; A_4 = 50^{+0,16} \text{ мм}; A_5 = 5_{-0,075} \text{ мм}.$$

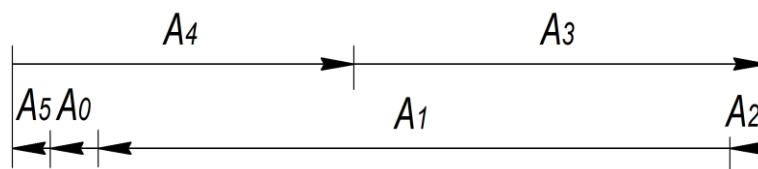


Рисунок 5 – Розмірний ланцюг роз'ємного корпусу

Як показує проведена за формулою (2) перевірка, що в даному випадку ω_0 вихідного розміру A_0 перевищують величину встановленого допуску $TA_0 = 0,75$ мм, оскільки

$$\omega_0 = 0,25 + 0,075 + 0,22 + 0,16 + 0,075 = 0,78 \text{ мм}.$$

Відповідно задана умова розрахунку не виконується. Отже, необхідно підібрати регулюючу ланку, розмір якої повинен бути оброблений точніше 11-го квалітету. В якості регулюючої ланки вибираємо розмір $A_1 = 140$ мм;

виконання і вимірювання якого не викликає труднощів, а абсолютна величина допуску якого більша, ніж у інших розмірів, а отже може бути зменшена без ускладнень.

Допуск регулюючої ланки A_l визначається за формулою:

$$TA_p = TA_0 - \sum_{i=1}^{m-2} TA_i. \quad (8)$$

Після підстановки даних отримаємо

$$TA_l = 0,75 - (0,075 + 0,75 + 0,22 + 0,16 + 0,075) = 0,22 \text{ мм.}$$

Координата середини поля допуску для збільшувальної ланки рівна

$$EсA_p = EсA_0 - \sum_{i=1}^{n-1} EсA_i + \sum_{n+1}^{m-1} EсA_i \quad (9)$$

а для зменшувальної

$$EсA_p = - \sum_{i=1}^n EсA_i + \sum_{n+1}^{m-2} EсA_i - EсA_0. \quad (10)$$

Ланка A_l є зменшувальною, тому

$$EсA_l = (0,11 \div 0,08) - (-0,0375 - 0,0375) = -0,11 \text{ мм.}$$

$$ES A_l = -0,11 + \frac{0,22}{2} = 0; \quad EI A_l = -0,11 - \frac{0,22}{2} = -0,22 \text{ мм.}$$

Розмір регулюючої ланки: $A_l = 140_{-0,22} \text{ мм.}$

Проводимо перевірку за формулою (1):

$$A_0^{max} = (A_3^{max} + A_4^{max}) - (A_1^{min} + A_2^{min} + A_5^{min}) = (101,22 + 50,16) - (139,78 + 4,925 + 4,925) = 1,75 \text{ мм.}$$

$$A_0^{min} = (A_3^{min} + A_4^{min}) - (A_1^{max} + A_2^{max} + A_5^{max}) = (101 + 50) - (140 + 5 + 5) = 1,0 \text{ мм.}$$

Отже, розрахунок проведений правильно.

3 Метод неповної взаємозамінності

При розрахунку розмірних ланцюгів із числом складових ланок більше трьох доцільно прийняти в основу досягнення точності метод неповної взаємозамінності з використанням ймовірного розрахунку. При використанні

методу неповної взаємозамінності необхідна точність забезпечується в заздалегідь обумовленої частини шляхом включення в розмірний ланцюг складових ланок без їхнього вибору, підбору або зміни їхніх значень.

Розрахунок ймовірнісним методом проводиться з урахуванням фактичного розподілу дійсних розмірів всередині полів їх допусків і ймовірності різних сполучень при складанні та механічній обробці виробу.

3.1 Розрахунок поля розсіювання (допуску) замикаючої ланки ймовірнісним методом (обернена задача)

Відповідно до положень теорії ймовірностей підсумовування випадкових величин проводиться квадратно, причому сума цих величин являє собою випадкову величину, що змінюється за певним законом розподілу. При цьому закон розподілу розмірів замикаючої ланки тим ближчий до закону нормального розподілу, чим більше силових ланок має розмірний ланцюг.

Найменша кількість складових ланок ($m - 1$), при якій відбувається розподіл розмірів замикаючої ланки з законом нормального розподілу, становить при розподілі складових розмірів ланцюга за законами:

- рівної ймовірності ($m - 1$) = 4;
- рівнобедреного трикутника (Закону Сімпсона) ($m - 1$) = 3;
- нормального розподілу ($m - 1$) = 2.

У практичних умовах (особливо при проектних розрахунках) закони розподілу складових ланок часто невідомі, тому застосування ймовірного методу розрахунку вважається правильним при числі складових ланок розмірного ланцюга ($m - 1$) \geq 4.

Приклад 3. Розв'язати задачу з умовами заданими у прикладі 1, але з використанням ймовірнісного методу коли закони розподілу невідомі.

Розрахунок: Оскільки закони розподілу невідомі, то приймаємо коефіцієнт асиметрії $\alpha_i = 0$, тобто розподіл відхилень симетричний, а коефіцієнт відносного розсіювання $k_i = 1,2$.

Номинальний розмір замикаючої ланки, згідно формули (1), залишається незмінним:

$$A_0 = (60 + 20) - (35 + 40) = 5 \text{ мм.}$$

Поле розсіювання замикаючої ланки, під час проектних розрахунків, коли закони розподілу невідомі, визначаються за формулою:

$$\omega_0 = 1,2 \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} T A_i^2}. \quad (11)$$

Підстановкою даних отримаємо

$$\omega_0 = 1,2 \sqrt{0,16^2 + 0,30^2 + 0,13^2 + 0,16^2} = 0,477 \text{ мм.}$$

Координати середини поля допуску замикаючої ланки $E_{c\omega_0}$ співпадає з координатою середини поля допуску E_{cA_0} аналогічно як у прикладі 1, тобто

$$E_{c\omega_0} = E_{cA_0} = E S A_0 - \frac{T A_0}{2} = 0,13 - \frac{0,75}{2} = -0,245 \text{ мм.}$$

Верхнє граничне відхилення визначається за формулою:

$$E_{cA_0} = E_{c\omega_0} + \omega_0 / 2, \quad (12)$$

а нижнє граничне відхилення

$$E_{IA_0} = E_{c\omega_0} - \omega_0 / 2. \quad (13)$$

Підставивши дані отримаємо:

$$E_{cA_0} = -0,245 + 0,477/2 = -0,007 \text{ мм;}$$

нижнє

$$E_{IA_0} = 0,245 - 0,477/2 = 0,484 \text{ мм.}$$

Замикаючий розмір $A_0 = 5_{-0,484}^{+0,007}$ мм.

Співставлення результатів розрахунків 1 і 3 показує, що поле розсіювання (допуск) замикаючої ланки, обчислене імовірнісним методом, в

1,57 рази (0,75/0,447) менше поля розсіювання отриманого розрахунком на максимум і мінімум.

Приклад 4. Розрахувати приклад 3, якщо $k_1 = 1,2$; $a_1 = +0,45$; $a_2 = +0,35$; $a_3 = +0,35$; $a_4 = -0,2$.

Розрахунок: Поле розсіювання замикаючої ланки розраховується за формулою (11) і рівне

$$EmA_0 = \sum_{i=1}^n (Ec\omega_i + a_i \frac{\omega_i}{2}) - \sum_{n+1}^{m-1} (Ec\omega_i + a_i \frac{\omega_i}{2}) \quad (14)$$

або

$$EmA_0 = \sum_{i=1}^n (EcA_i + a_i \frac{A_i}{2}) - \sum_{n+1}^{m-1} (EcA_i + a_i \frac{A_i}{2}) \quad (15)$$

Відповідно

$$EmA_0 = (-0,15 + 0,45 \frac{0,30}{2} + 0,065 + 0,35 \frac{0,13}{2}) - (0,08 + 0 \frac{0,16}{2}) - 0,2 \frac{0,16}{2} = -0,139 \text{ мм.}$$

3.2 Розрахунок допусків складових ланок

Допуски розмірів складових ланок при розрахунку розмірних ланцюгів ймовірнісним методом визначаються принципово так само, як і при їхньому розрахунку на максимумі мінімум. Розходження зводиться в основному до зміни арифметичного підсумовування геометричним.

При використанні способу пробних розрахунків після призначення допусків на всі розміри складових ланок лінійного розмірного ланцюга проводиться порівняння величини поля розсіювання замикаючого (вихідного) розміру з його заданим допуском. Координата середини поля розсіювання визначається так само як і при розрахунку на максимум і мінімум.

Якщо за результатами розрахунку середня точність розмірів складових ланок відповідає 11-му або 12-му квалітету, то метод неповної взаємозамінності підходить для розв'язання даного розмірного ланцюга і

визначений у результаті розрахунку квалітет приймається за основу для встановлення допусків складових ланок, крім регулюючої.

Якщо по розрахунках необхідна середня точність розмірів складових ланок характеризується 7...9-м квалітетами, то досягнення необхідної точності замикаючої ланки методом неповної взаємозамінності є неможливим, що робить необхідним використання методу регулювання або підгонки.

При встановленні розрахунком необхідності забезпечення точності розмірів складових ланок у межах 10-го квалітету питання про можливість її досягнення повинно вирішуватися шляхом додаткового аналізу технологічних особливостей виготовлення деталей, що входять у даний розмірний ланцюг.

В якості регулюючої ланки рекомендується вибирати ланку з найбільшим номінальним розміром, виконання і вимірювання якої не викликають технологічних труднощів.

Приклад 5. Для умов прикладу 2 встановити допуски і граничні відхилення лінійних розмірів використовуючи імовірнісний метод.

Розрахунок: Визначаємо середній допуск складових ланок за формулою:

$$T_{cp} = \frac{TA_0}{(1,2\sqrt{m-1})} \quad (16)$$

Відповідно

$$T_{cp} = \frac{0,75}{(1,2\sqrt{6-1})} = 0,28 \text{ мм.}$$

Дана величина допуску для середнього розміру деталей приблизно відповідає точності 12-го квалітету. Відповідно на всі розміри складових ланок встановлюються по h12 і H12.

$A_1 = 140_{-0,40}$ мм; $A_2 = 5_{-0,12}$ мм; $A_3 = 101^{+0,35}$ мм; $A_4 = 50^{+0,25}$ мм; $A_5 = 5_{-0,12}$ мм.

Поле розсіювання замикаючої (вихідної) ланки за формулою (11) дорівнює

$$\omega_0 = 1,2 \sqrt{0,4^2 + 0,12^2 + 0,35^2 + 0,25^2 + 0,12^2} = 0,734 \text{ мм.}$$

- тобто менше встановленого допуску вихідного розміру $TA_0 = 0,75$ мм.

Відповідно немає необхідності звужувати поле допуску регулюючої ланки, але необхідно розрахувати фактичні відхилення розміру замикаючої ланки при прийнятих допусках на складові ланки.

Координата середини поля розсіювання $E_{c\omega_0}$ замикаючої ланки за формулою (9) дорівнювати

$$E_{c\omega_0} = 0,175 + 0,125 - (-0,2 - 0,06 - 0,06) = 0,62 \text{ мм,}$$

а по заданих умовах вона повинна бути рівна

$$E_{cA_0} = \frac{TA_0}{2} = \frac{0,75}{2} = +0,375 \text{ мм.}$$

Відповідно завищеними будуть і фактичні значення ESA_0 і EIA_0 - тому вихідні умови задачі не виконуються.

При зменшенні величини координати середини поля розсіювання доцільно прийняти для розмірів A_2 і A_5 допуски по Н12, тобто $A_2 = A_5 = 5^{+0,12}$ мм.

Тоді координата середини фактичного поля розсіювання замикаючого (вихідного) розміру буде дорівнювати

$$E_{c\omega_0} = 0,175 + 0,125 - (-0,2 + 0,06 + 0,06) = 0,38 \text{ мм.}$$

Відповідно: $ESA_0 = 0,38 + 0,734/2 = 0,747$ мм;

$$EIA_0 = 0,38 - 0,734/2 = 0,13 \text{ мм.}$$

Оскільки фактичні розміри замикаючої ланки $A_0 = 1^{+0,747}_{+0,13}$ мм знаходяться в межах встановленого допуску $A_0 = 1^{+0,75}$ мм, отже поставлена задача розрахунку виконується.

4 Розрахунок складальних розмірних ланцюгів

При з'єднанні деталей машин в процесі складання необхідно забезпечити їх взаємне розташування в межах заданої точності. Одним із засобів визначення раціональних допусків, що забезпечують найбільш економічну обробку деталей і складання машин, є розрахунок і аналіз ланцюгів.

Як відомо, при розрахунку розмірних ланцюгів можуть бути використані різні методи, характеристика яких викладені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Методи досягнення точності замикаючої ланки при складанні

Метод	Суть методу	Область застосування
1	2	3
Повної взаємозамінності	Метод при якому необхідна точність замикаючої ланки розмірного ланцюга досягається у всіх об'єктах шляхом включення в неї складових ланок без вибору, підбору або зміни їхніх значень.	Використання є економічним в умовах досягнення високої точності при малому числі ланок розмірного ланцюга і при досить великій кількості виробів, що підлягає складанню.
Неповної взаємозамінності	Метод, при якому необхідна точність замикаючої ланки розмірного ланцюга досягається в заздалегідь обумовленої частини об'єктів шляхом включення в неї складових ланок без вибору, підбору або зміни їхніх значень.	Використання доцільно для досягнення точності в багатоланкових розмірних ланцюгах; допуск на складові ланки при цьому більші, ніж у попередньому методі, що підвищує економічність одержання складальних одиниць; у частині виробів похибка замикаючої ланки може бути за межами допуску на складання, тобто можливий певний ризик не збирання виробу.

Групової взаємозамінності	Метод, при якому необхідна точність замикаючої ланки розмірного ланцюга досягається шляхом включення в розмірний ланцюг складальних ланок, що належать до однієї із груп, на які вони попередньо розсортовані	Застосовується для досягнення найбільш високої точності замикаючих ланок розмірних ланцюгів з малою кількістю ланок; вимагає чіткої організації сортування деталей на розмірні групи, їхнього маркування, зберігання і транспортування в тарі.
Пригонки	Метод, при якому необхідна точність замикаючої ланки розмірного ланцюга досягається зміною розміру компенсуючої ланки, шляхом видалення з компенсатора певного шару матеріалу.	Використовується при складанні виробів з великим числом ланок; деталі можуть бути виготовлені з економічними допусками, але потрібні додаткові витрати на пригонку компенсатора ; економічність значною мірою залежить від вибору компенсуючої ланки, яка не повинна належати декільком зв'язаним розмірним ланцюгам.
Регулювання	Метод, при якому необхідна точність замикаючої ланки розмірного ланцюга досягається зміною розміру або положення компенсуючої ланки, без видалення матеріалу з компенсатора	Аналогічний методу пригонки, але має більшу перевагу оскільки при складанні не потрібно виконувати додаткові роботи зі зняттям шару металу; забезпечує високу точність і дає можливість періодично її відновлювати при експлуатації машини.

Складання з компенсуючими матеріалами	Метод, при якому необхідна точність замикаючої ланки розмірного ланцюга досягається застосуванням компенсуючого матеріалу, що входить у зазор між з'єднувальними поверхнями деталей після їхньої установки в необхідному положенні.	Використання найбільше доцільно для з'єднань і вузлів, що базуються по площинах (рами, корпуси, підшипники т.п.); у ремонтній практиці для відновлення працездатності складальних одиниць, для виготовлення оснащення.
---------------------------------------	---	--

4.1 Методи групової взаємозамінності (селективне складання)

При досягненні точності по методу групової взаємозамінності необхідна точність замикаючої ланки досягається шляхом включення в розмірний ланцюг складових ланок, що належать до загальної групи попередньо обміряних і розсортованих деталей. У цьому випадку деталі виробу оброблюються по розширених, а також економічно досяжних виробничих допусках і сортуються по їх дійсних розмірах на групи з таким розрахунком, щоб при з'єднанні деталей, що входять у певні групи, було забезпечене досягнення встановленого конструктором допуску замикаючої ланки і гарантована необхідна точність складального з'єднання. Метод групової взаємозамінності застосовується для розмірних ланцюгів, що складаються з невеликого числа ланок (трьох, інді чотирьох), для складальних з'єднань особливо високої точності, практично недосяжної методом повної взаємозамінності (кулькові підшипники, плунжерні пари, поршневий палець і отвір або верхньої головки шатуна і т.п.)

Складання по методу групової взаємозамінності називається селективним складанням (складання по методу підбора). Селективне складання застосовується не тільки для з'єднань циліндричних деталей, але й для конічних, призматичних, різьбових з'єднань А в деяких випадках і для

з'єднання декількох деталей у багатоланкових розмірних ланцюгах. В останньому випадку сортуванню на групи в межах розширених допусків можуть піддаватися на тільки дві які-небудь з'єднувальні деталі даного розмірного ланцюга, але послідовно декілька пар деталей.

Метод групової взаємозамінності дозволяє значно підвищити точність складання без істотного підвищення вимог до точності механічної обробки деталей або розширити допуски на механічну обробку без зниження точності складання. У ряді випадків групової взаємозамінності є практично єдино можливим.

4.2 Методи пригонки і регулювання

При розрахунку розмірних ланцюгів з урахуванням методу пригонки необхідна точність замикаючої ланки досягається зміною компенсуючої ланки шляхом видалення з компенсатора певного шару матеріалу (точінням, шліфуванням або припилюванням).

При розрахунку розмірних ланцюгів з урахуванням методу регулювання необхідна точність замикаючої ланки досягається зміною розміру або положення компенсуючої ланки, без видалення з компенсатора матеріалу.

При використанні методів пригонки або регулювання в конструкцію виробу вводиться спеціальна деталь – компенсатор, розміри якого можуть змінюватися при складанні в необхідних межах шляхом видалення певного шару матеріалу відповідно механічною пригонкою її положення з'єднаних поверхонь за рахунок їх конструкції (гвинтова пара, клин, набір прокладок, зазор у з'єднанні типу вал-отвір) або переміщення (пересувні втулки і т.п.).

При застосуванні методу пригонки проводять попереднє складання за яким визначають ступінь необхідної пригонки компенсуючої ланки, а потім проводять припасування компенсатора. Тільки після цього здійснюється остаточне складання. Це підвищує трудомісткість складання і утруднює

застосування потокового складання. Операція пригонки виконується робітниками дуже високої кваліфікації. Застосування методу регулювання не потребує повторного складання і трудомісткість складання знижується. При цьому створюються більш сприятливі умови для організації потокового складання, однак створення спеціальних деталей – компенсаторів ускладнює конструкцію виробу.

Великою перевагою методу регулювання є можливість підтримки точності замикаючої ланки в процесі експлуатації виробу шляхом компенсації зношування окремих складових ланок розмірного ланцюга.

Приклад 6. Виконати виконавчі розміри товщини B_6 компенсуючого кільця вузла редуктора (рис. 6) при його механічній обробці, щоб забезпечити можливість підгонки компенсуючого кільця під час складання вузла при забезпеченні зазору між компенсуючим і упорним кільцем в межах $0,05 \div 0,15$ мм. Вихідні дані: $B = 0,05$ мм; $B_1 = 2 \pm 0,05$ мм; ; $B_2 = 112 \pm 0,11$ мм; $B_3 = 23_{-0,13}$ мм; $B_4 = 60_{-0,19}$ мм; $B_5 = 23_{-0,13}$ мм.

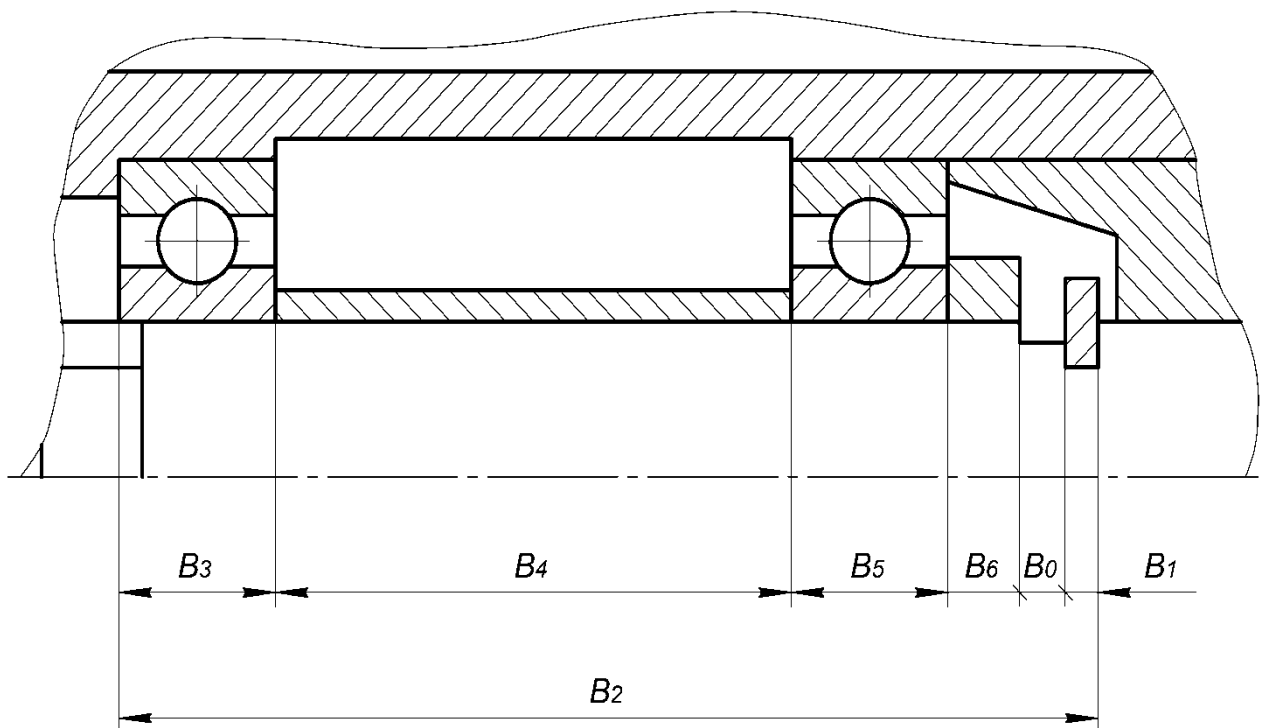


Рисунок 6 – Вузол редуктора

Розрахунок: У відповідності з умовами задачі приймаємо в якості номінального розміру замикаючої ланки:

$$B_0 = 0,05 \text{ мм}; T_0 = 0,05 \text{ мм}; ES = A_0 = +0,15 \text{ мм}.$$

Номінальний розмір товщини компенсуючого кільця після його пригонки згідно формули (1)

$$B_6 = B_2 - B_1 - B_3 - B_4 - B_5 - B = 112 - 2 - 23 - 60 - 23 - 0,05 = 3,95 \text{ мм}.$$

В якості економічно досяжного допуску розміру B_6 може бути допуск по 10-му квалітету (обробка плоским шліфуванням), тобто $TB_6 = 0,048 \text{ мм}$.

Поле розсіювання розмірів замикаючої ланки при використанні вказаних економічно досяжних виробничих допусків складових розмірів розраховуваного розмірного ланцюга згідно формули (11) дорівнює

$$\omega_0 = 1,2 \sqrt{0,1^2 + 0,22^2 + 0,13^2 + 0,19^2 + 0,13^2 + 0,048^2} = 0,4337 \text{ мм}.$$

Величину потрібної компенсації можна розрахувати за формулою:

$$\Delta k = \omega_0 - TA_0. \quad (17)$$

Відповідно

$$\Delta k = 0,4337 - 0,1 = 0,3337 \approx 0,33 \text{ мм}.$$

Номінальний розмір товщини компенсуючого кільця після механічної обробки (до пригонки) рівний

$$B_6^{\text{мех}} = B_6 + \Delta k = 3,95 + 0,33 = 4,28 \text{ мм}.$$

Виконавчий розмір товщини компенсуючого кільця після механічної обробки: $B_6 = 4,28_{-0,048} \text{ мм}$, тобто 4,3h11.

5 Операційні розмірні ланцюги

Операційні розмірний ланцюг – це сукупність розмірів, які утворюють замкнутий контур і відображають розмірний зв'язок між операціями по мірі

виконання технологічного процесу. Під сукупністю розмірів слід розуміти не тільки вказані розміри, а і усі інші величини, які мають векторне вираження (величини припусків, глибина шару, цементування, азотування і покриття, величини оговорені технічними умовами та інші).

Технологічний процес, який полягає в послідовній зміні стану заготовки (геометрична форма, розміри, якість поверхні) для отримання готової деталі відповідної якості в залежності від конфігурації виробу, програми і потрібної точності, складається із цілого ряду різних операцій. Розміри деталі вказані на креслені, операційні розміри на кожній стадії обробки і розміри заготовки знаходяться у складній розмірній залежності, і розрахунок операційних розмірних ланцюгів дозволяє визначити:

1. Операційні розміри, тобто розміри, по яким виконується обробка поверхонь на даній операції із залишком шару металу для наступної обробки, визначаються як складові ланки ланцюгів, у яких замикаючими ланками будуть розміри припуску або кінцеві креслярські розміри.

2. Операційні і загальні припуски, тобто розрахувати розміри заготовки. Значення припусків розраховують із ланцюгів, де замикаючими ланками є величини припусків.

3. Технологічні розміри, тобто розміри, які безпосередньо виконуються по технологічному процесу замість креслярських розмірів. Уведений технологічний розмір буде складовою ланкою розмірного ланцюга, а розмір на креслені, тобто розмір, який необхідно забезпечити в результаті виконання технологічного розміру, - замикаючою ланкою.

Таким чином, розрахунок операційних розмірних ланцюгів зводиться до визначення замикаючої ланки при відомих складових або однієї із складових ланок при відомих інших розмірах ланцюга.

Простий операційний ланцюг відображає зв'язок між розмірами двох послідовних операцій, які мають одну і ту ж технологічну базу, і припуски на обробку.

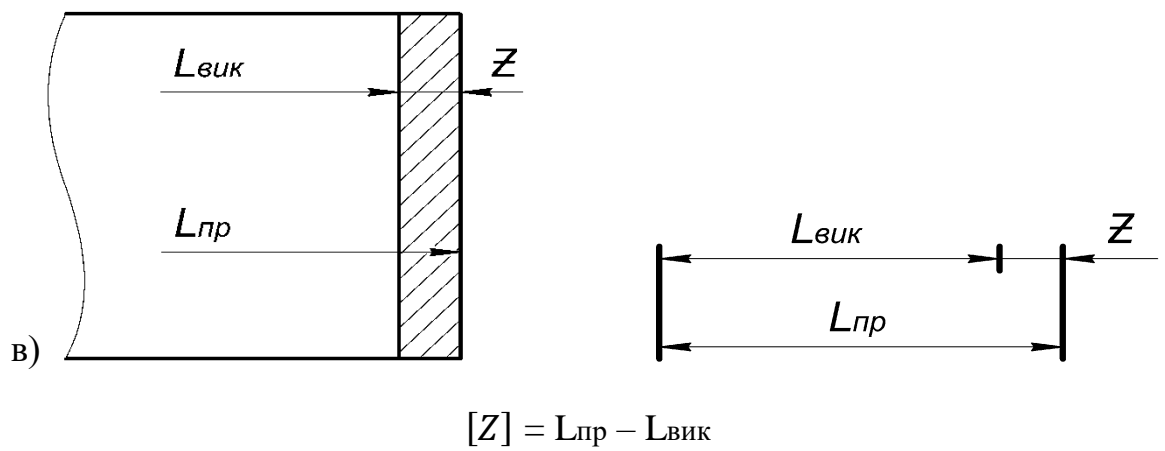
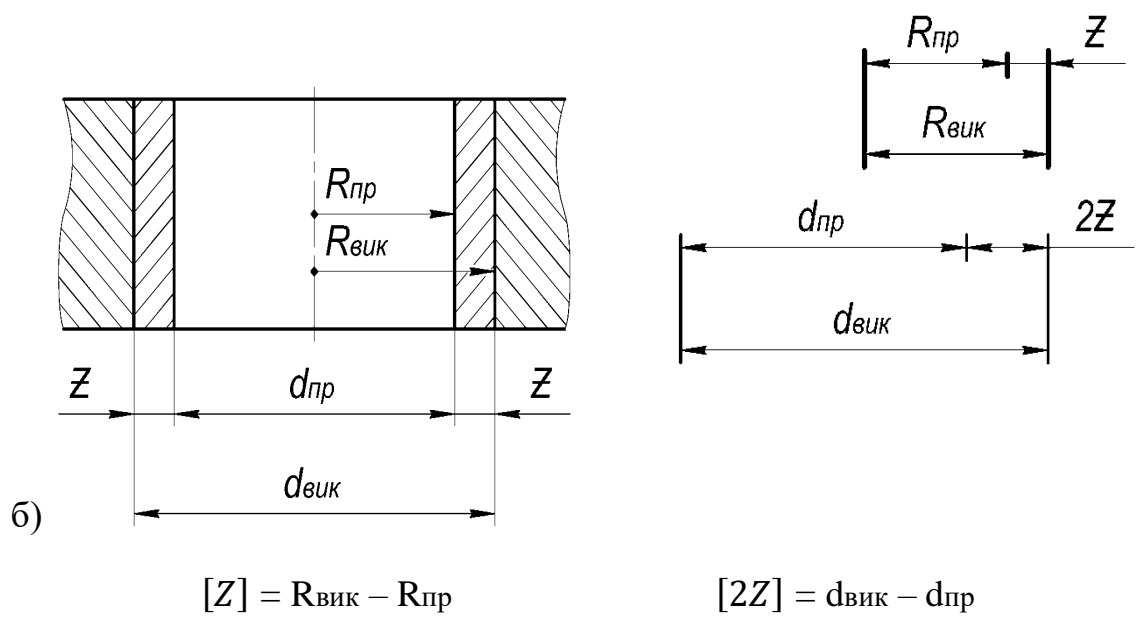
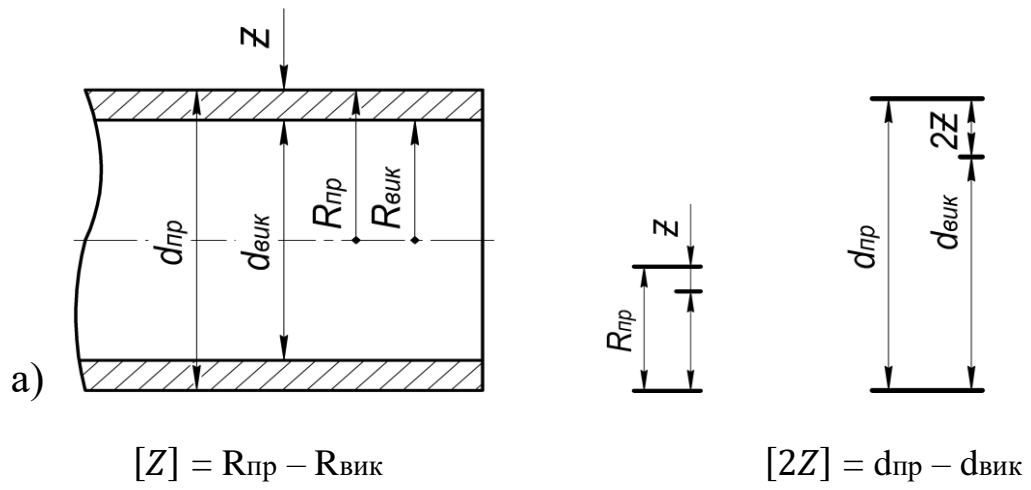


Рисунок 7 – Прості розмірні ланцюги

На рис. 7 представлені прості розмірні ланцюги з циліндричними поверхнями(рис.7а і б), а також з лінійними повздовжніми розмірами (рис.7в) У приведених ланках складовими ланками будуть розміри, R_{np} і L_{np} , безпосередньо виконані попередньо (або у заготовці) і розміри, $R_{вик}$ і $L_{вик}$, виконані на даній операції. Замикаючою ланкою у всіх приведених ланках буде розмір припуску z .

Рівняння розмірних ланцюгів в номіналах відносно замикаючої ланки запишуться так: а) $[z] = R_{np} - R_{вик}$ б) $[z] = R_{вик} - R_{np}$ в) $[z] = L_{np} - L_{вик}$.

У деяких випадках величина знімаемого шару (припуск) витримується і контролюються безпосередньо, тоді вона є складовою ланкою розмірного ланцюга. Слід зазначити, що у подетальних і операційних розмірних ланцюгах категорії ланок часто не співпадають. У перших (подетальних) розміри, проставлені на креслені, завжди є складовими ланками, а замикаючою ланкою – не проставлений розмір.

В операційних ланцюгах розмір може бути замикаючою або складовою ланкою в залежності від прийнятої постановки розмірів в операційному ескізі.

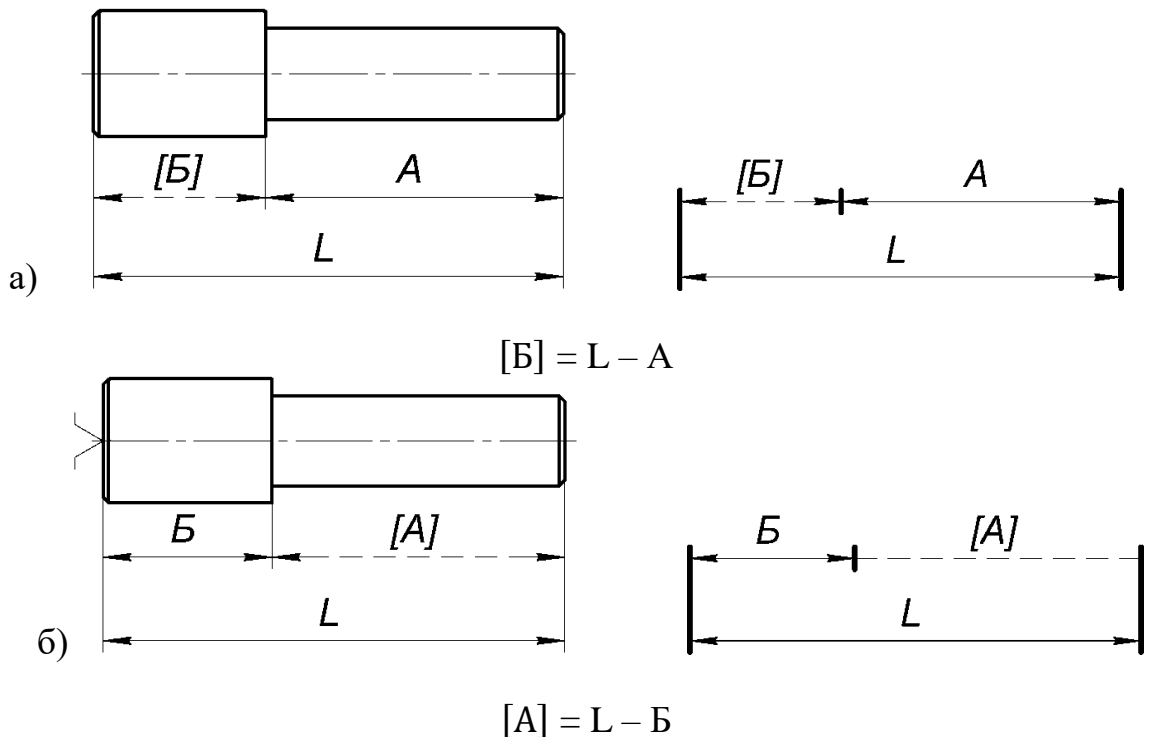


Рисунок 8 – Операційний ескіз валу

Отже згідно ескізу (рис.8а), рівняння розмірного ланцюга у формі замикаючої ланки має такий вигляд:

$$[B] = L - A.$$

(Замикаючою ланкою буде не проставлений на креслені розмір Б).

Якщо при виготовлені вала витримується замість із загальною довжиною L і розмір бурта B , як показано на операційному ескізі (рис.8б), то розмір A як безпосередньо не виконуваний буде замикаючою ланкою, і рівняння операційного розмірного ланцюга буде мати вигляд

$$[A] = L - B.$$

Такий варіант виконання деталі можливий у тому випадку, якщо коливання замикаючої ланки $[A]$ по кресленню, тобто $[\Delta A] \leq \delta_A$.

Розмірний аналіз технологічного процесу дозволяє не тільки розраховувати операційні розміри і розміри заготовки, але і з'ясувати можливість виконання вимог креслення по наміченому маршруту обробки, забезпечити найбільш раціональну його структуру.

5.1 Послідовність розрахунку операційних розмірних ланцюгів технологічного процесу

Розрахунок операційних розмірних ланцюгів виконується у такій послідовності:

1.Проектування технологічного процесу починається з ознайомлення і вивчення креслення деталі, при цьому, окрім матеріалу габаритів, точності і якості усіх поверхонь деталі, аналізують технічні вимоги (биття, соосність, непаралельність поверхонь осей і ін.), вимоги до якості поверхневих шарів, необхідність термообробки, товщини і виду покриття і т.п.).

2. Після ознайомлення із кресленням вибирають спосіб отримання заготовки з виконанням її ескізу, на якому попередньо наносять розмірні лінії без надання розмірів.

3. В залежності від вимог щодо якості, термічної обробки і інших факторів по кожній поверхні деталі призначають кількість обробок з вказівкою способів знімання припусків (фрезерування, точіння чорнове, точіння чистове, шліфування і т.п.). усі ці дані заносять в спеціальну таблицю. Послідовність і способи обробки повинні забезпечити, окрім необхідної шорсткості, і усі інші технічні вимоги до креслення.

4. Розробляють маршрут і план обробки деталі із кресленням ескізів по кожній операції. На ескізі вказують установчі і вимірювальні бази, проставляють розмірні лінії і технічні вимоги до даної операції по забезпеченню технічних умов креслення.

5. В залежності від програми і інших вимог вибирають обладнання(тип, марка), метод роботи на кожній операції (метод пробних проходів, на настроєних верстатах, з автоматичним підналагоджуванням) і в ескізах обробки проставляють економічно досяжну точність отримання розмірів (квалітет точності і величина коливання розміру)

6. Розмірну схему технологічного процесу складають в такій послідовності:

а) виконують креслення деталі з усіма розмірами, кожний розмір позначають будь-якою літерою, кожну оброблювану поверхню – цифрою;

б) від усіх оброблюваних поверхонь проводять лінії вниз(для лінійних розмірів) і праворуч (для діаметральних розмірів, по яким проставляють операційні розміри;

в) Усе поле нижче ескізу ділять горизонтальними лініями, а праворуч від ескізу – вертикальними на частини по кількості операцій, починаючи з останньої вверху під ескізом, завершуючи заготовкою;

г) на операції обробки будь-якої поверхні зі зніманням припуску проводять зміщення лінії цієї поверхні на величину знімаємого припуску, імітуючи тим самим на схемі положення цієї поверхні до знімання припуску і після обробки (рис.9).

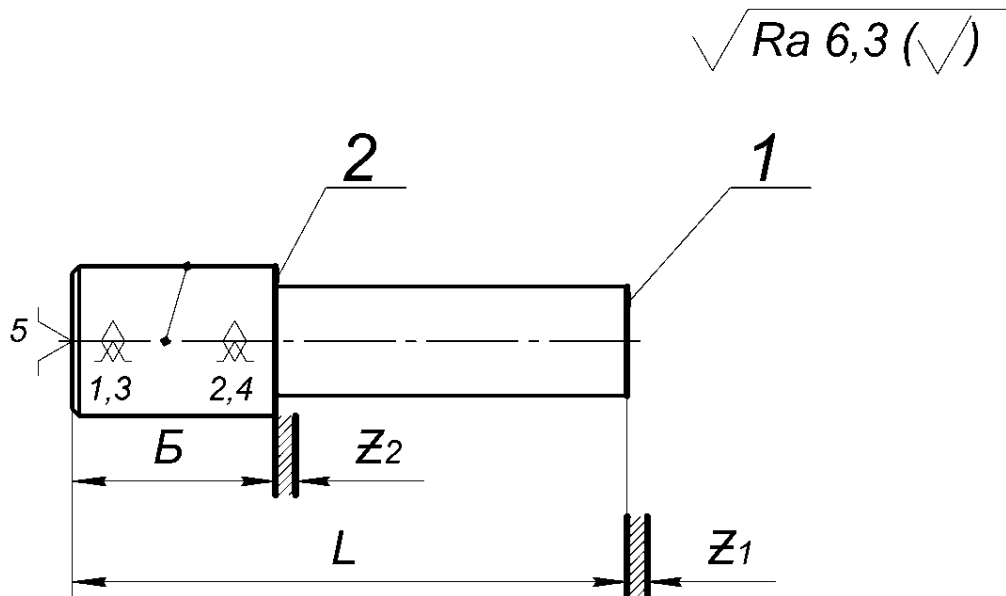


Рисунок 9 – Схема розміщення припусків

д) в зоні кожної операції у відповідності з планом обробки між лініями, проведеними від поверхні деталі, наносять виконувані розміри стрілками (точка означає вимірювальну базу, а стрілка – оброблену поверхню);

є) усі ланки – розміри позначають тією ж літерою, що і на ескізі, з вказівкою номера операції. Ланки-припуски позначають літерою z з двома індексами. Нижній індекс означає номер поверхні, з якої знімається припуск, а верхній – номер операції.

Замикаючи ланки і інші розміри, безпосередньо на цій операції не виконувані, позначають стрілками.

7. Для виявлення розмірних зв'язків виконують обхід контурів, починаючи із замикаючої ланки крайньої операції. Почавши обхід з однієї сторони замикаючої ланки, її ведуть по складовим ланкам (один раз по кожному) і вертикалям до повернення до другого боку цієї замикаючої ланки. З усіх ланок, які зустрілись при обході, формується операційний розмірний ланцюг.

Слід зазначити, що обхід допустимий тільки по складовим ланкам(в розмірному ланцюзі замикаюча ланка має бути тільки одна) і по тій операції,

де знаходиться вихідна замикаюча ланка, або її попередня по технологічному процесу (обхід контуру по наступним операціям неможливий). Загальне число контурів відповідне замикаючим ланкам в розмірній схемі технологічного процесу. Якщо будь-який контур не замикається, це говорить про неправильну постановку розмірів в операціях. Якщо деякі розміри не увійшли в жодний із контурів, їх видаляють із плану обробки.

8. По записаним ланкам, які зустрічались на шляху обходу контурів, креслимо кожний частковий контур на окремому аркуші і складаємо рівняння розмірного ланцюга у формі замикаючої ланки, які заносимо у графу 4 розмірного ланцюга.

9. Визначають значення мінімального припуску Z_{\min} по всім операціям технологічного процесу і вносять в графу 2 розмірної схеми.

10. У розмірних ланцюгах, де замикаючими ланками є розміри, що позначені на креслені, може статися, що допустимі розрахункові коливання ланки неможливо отримати по наміченій технології. В данному випадку неюхідне коригування технологічного процесу і додатковий розрахунок нових розмірних ланцюгів. Коригування технології проводять по декільком напрямленням, а саме:

а) за рахунок зменшення коливань складових ланок, змінюючи схему базування, використовуючи більш точне обладнання або які-небудь додаткові спеціальні пристрої;

б) уведенням додаткових операцій, що забезпечують точність виконуваного розміру;

в) уведенням операцій, які перетворюють замикаючу ланку складову.

11. Визначають максимальні значення припуску по кожній поверхні на операціях Z_{\max} , рівних сумі всіх коливань, які складають контур ланок, і величини мінімального припуску, визначеного раніше.

12. Починаючи з рівняння, в якому одне невідоме, послідовно розраховують усі рівняння часткових розмірних ланцюгів. Як вже було сказано, ДСТУ 16320 рекомендує ввести розрахунок по координатам середин полів допусків, знаючи половину допуску, визначають верхній та нижній відхил пошукового розміру.

Визначення операційних розмірів здійснюється методом розрахунку на максимум-мінімум для мало лакових ланцюгів, з числом складових ланок до трьох, і методом ймовірнісного розрахунку розмірних ланцюгів, які мають 4 і більше ланок.

При проведенні розмірного технологічного процесу у відповідні колонки (графі) його розмірної схеми вносять наступні записи:

- в графу 1 – номери операцій та їх назву;
- в графу 2 – величини припусків, розрахованих по формулах ;
- в графу 3 – графічне відображення розмірної схеми технологічного процесу;
- в графу 4 – рівняння операційних розмірних ланцюгів у формі замикаючої ланки;
- в графу 5 – результати розрахунку операційних розмірів;
- в графу 6 – прийняті операційні розміри.

Розглянемо декілька прикладів розрахунку операційних ланцюгів повздовжніх розмірів деталей які виготовляються у масовому виробництві методом автоматичного отримання розмірів на налаштованих верстатах.

Приклад 7. Розрахувати лінійні операційні розміри при обробці деталі, представленої на рис.10.

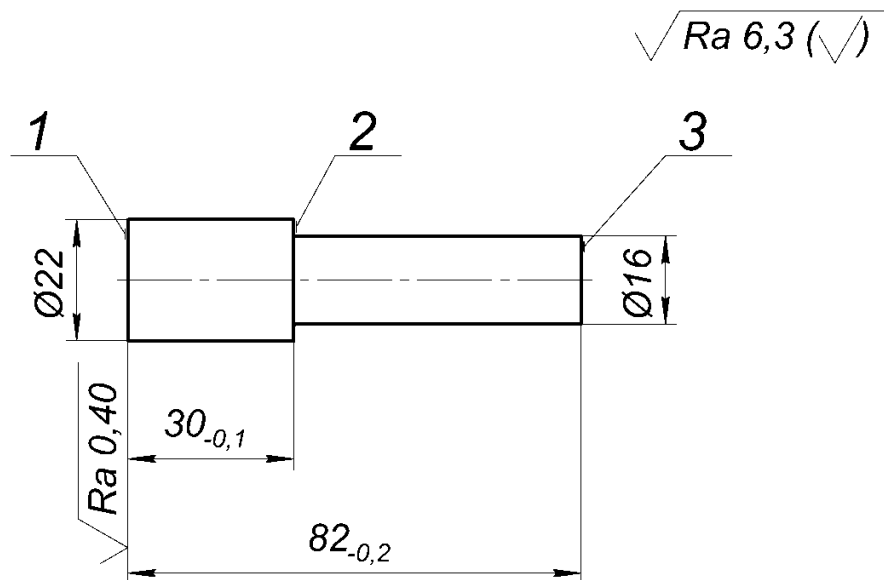


Рисунок 10 – Лінійні операційні розміри деталі

В даному випадку будемо дотримуватись порядку виконання робіт:

1. Ознайомлення з кресленням деталі показує, що деталь має один торець з шорсткістю Ra 0,4, інші поверхні – Ra 6,3. Додаткових технічних вимог до деталі не висувається.

2. Гадаємо, що деталь буде виготовлятися з прутка, оскільки величина перепаду діаметрів 22 і 16 невелика і виготовляти штамповану заготовку недоцільно.

3. Вимоги по шорсткості торцевих поверхонь дозволяє намітити наступну кількість знімальних шарів. (табл.1)

Таблиця 1. Технологічні показники обробки деталі

№ поверхні	Шорсткість поверхні	Додаткові вимоги	Кількість знімальних шарів	Вид обробки	Фактична кількість знімальних шарів
1	Ra 0,4	-	2	Точіння, шліфування	
2	Ra 6,3	-	1	Точіння	
3	Ra 6,3	-	1	Точіння	

4. Формуємо план обробки (рис.10), який складається з операцій 005 – токарної операції, 010 – шліфувальної.

5. Вибір типу обладнання і постановка економічної досяжної точності. Дані економічної точності взяті з табл. 6 і 7.

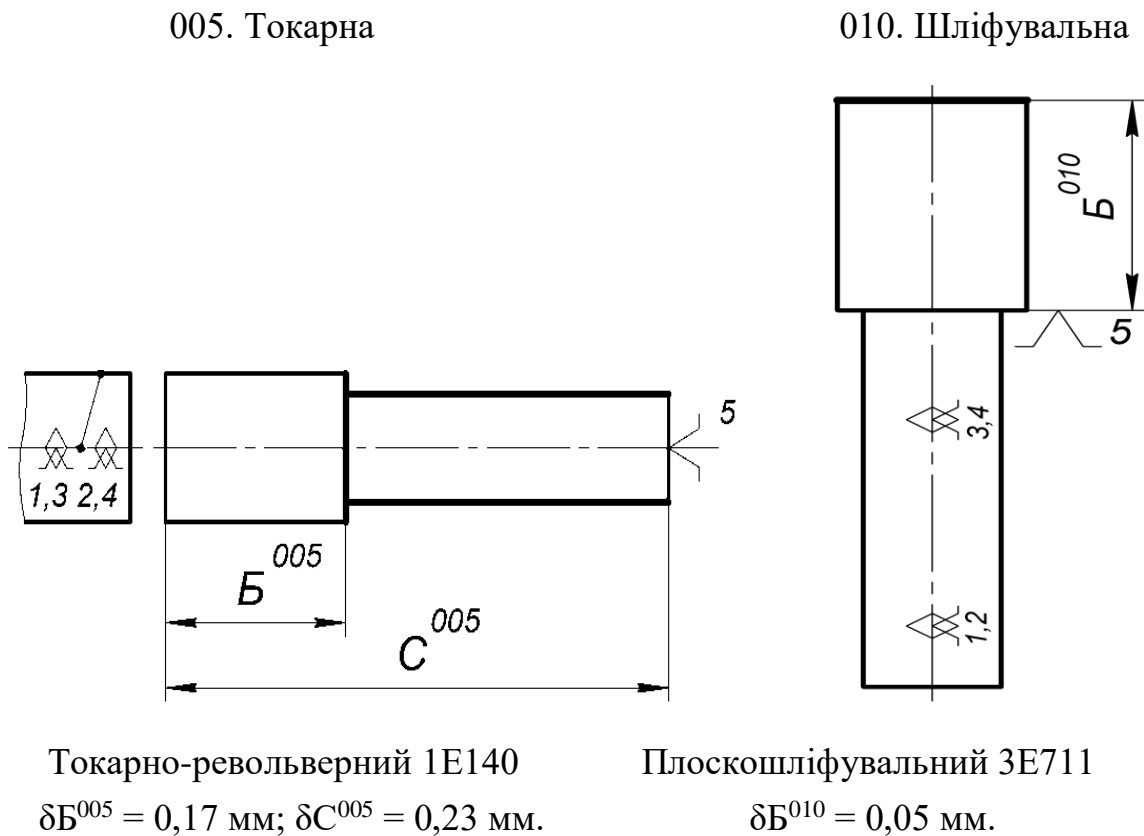


Рисунок 11 – технологічний маршрут обробки деталі

По таблиці допусків для відповідних квалітетів узяті допустимі коливання точності δB^{005} , δC^{005} , δB^{010} , які вказані на ескізах.

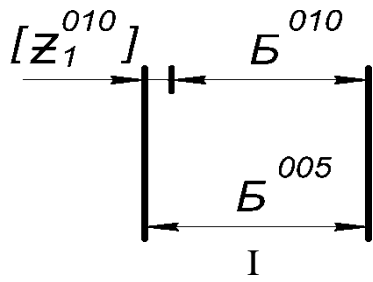
6. Обхід контурів починаємо із замикаючої ланки крайньої операції. При обході контури виявляються такими:

$$\text{I} \quad [Z_1^{010}], B^{005}, B^{010}.$$

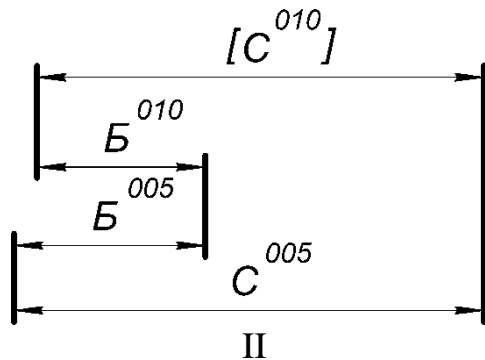
$$\text{II} \quad [C^{010}], C^{005}, B^{005}, B^{010}.$$

Переконаємося, що контури замкнуті – зайвих або відсутніх немає.

7. Викреслюємо контури частинних розмірних ланцюгів і формуємо рівняння у формі замикаючої ланки (рис.12).



$$I \quad [Z_1^{010}] = B^{005} - B^{010}$$



$$II \quad [C^{010}] = C^{005} - B^{005} + B^{010}$$

Рисунок 12 – Контури часткових розмірних ланцюгів

8. Визначаємо значення $z_{1\min}^{010}$ за формулою:

$$Z_{1\min}^{010} = Rz + T + \rho.$$

Підставляємо значення складових і отримуємо:

$$Z_{1\min}^{010} = 0,04 + 0,04 + 0 = 0,08\text{мм.}$$

9. Визначаємо $Z_{1\max}^{010}$:

$$Z_{1\max}^{010} = Z_{1\min}^{010} + \delta B^{010} + \delta B^{005} = 0,08 + 0,1 + 0,17 = 0,35\text{мм.}$$

10. Розв'язуємо рівняння (I) розмірного ланцюга:

$$Z_{1\min}^{010} = B_{\min}^{005} + B_{\max}^{010},$$

$$\text{звідси } B_{\min}^{005} = B_{\max}^{010} + Z_{1\min}^{010} = 30,0 + 0,08 = 30,08 \text{ мм.}$$

$$B_{\max}^{010} = B_{\min}^{005} + \delta B^{005} = 30,08 + 0,17 = 30,25 \text{ мм.}$$

Приймаємо розмір $B^{005} = 30,25_{-0,17}$.

11. Виконуємо розрахунок замикаючої ланки C^{010} при вибраному технологічному маршруті обробки. В той час в по детальному ланцюзі ця ланка є складовою і відповідно до креслення має розмір $82_{-0,2}$.

Перевіряємо коливання даної розмірної ланки

$$\Delta C^{010} = \delta C^{005} + \delta B^{005} + \delta B^{010};$$

$$\Delta C^{010} = 0,23 + 0,17 = 0,4 = 0,4 \text{ мм.}$$

По кресленню $\delta C^{005} = 0,2$; $\Delta C^{010} > \delta C^{010}$, тобто, вимоги креслення не виконуються.

Отже, запропонований варіант технологічного процесу не забезпечує придатність деталей по розміру $C = 82_{-0,2}$. Зазвичай при практичних розрахунках таку оцінку роблять зразу (до рішення ланцюга I), що передбачено порядком розрахунку.

З'ясуємо, чи можливе забезпечення розмірів деталі по кресленню шляхом витримування інших розмірів по операціях 005 і 010. При виготовленні деталі можуть бути різні варіанти заданих технологічних розмірів:

а) замість загальної довжини C^{005} задати на операції 005 розмір довжини хвостовика 16 мм;

б) замість розміру B^{005} довжини головки можна задати довжину хвостовика і залишити розмір загальної довжини деталі;

в) при шліфуванні за установчу базу прийняти торець 3 і витримати загальну довжину деталі, а не розмір $30_{-0,1}$.

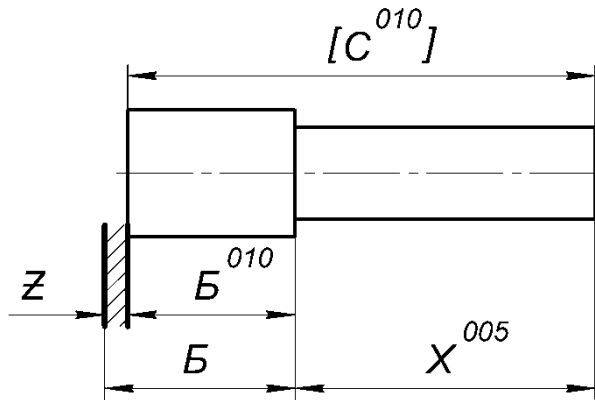
Проведемо розмірний аналіз точності виготовлення по кожному із названих варіантів постановки технологічних розмірів.

Розглянемо усі три варіанти.

1. При заданій довжині хвостовика X^{005} з коливаннями розміру 0,2 мм і довжину B^{010} з точністю креслення 0,1 мм, отримуємо:

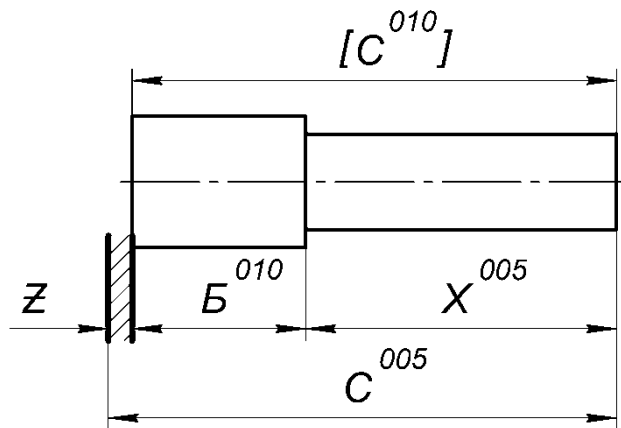
$$\Delta C^{010} = \delta X^{005} + \delta B^{010} = 0,2 + 0,1 = 0,3,$$

тобто коливання складових ланок більше допуску замикаючого розміру ($C^{010} = 0,2$), цей варіант технологічного процесу також не задовольняє вимоги креслення.



$$[\Delta C^{010}] = \delta B^{010} + \delta X^{005}$$

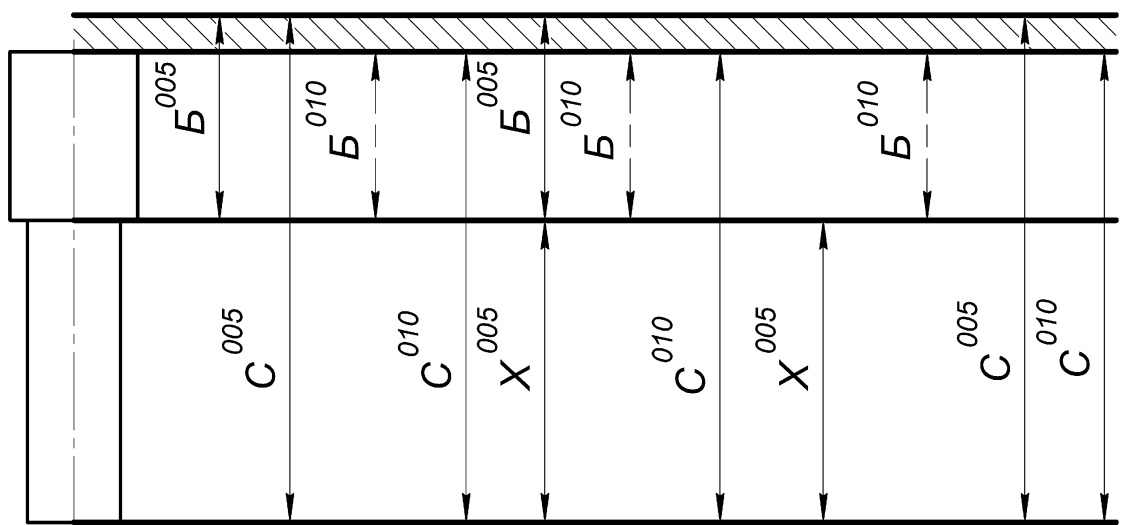
а)



$$[\Delta C^{010}] = \delta B^{010} + \delta X^{005}$$

б)

Рисунок 13 – Схема коливання розмірних ланцюгів



а) $\Delta B^{010} = \delta C^{005} + \delta C^{010} + \delta B^{005}$; б) $\Delta B^{010} = \delta C^{010} + \delta X^{005}$; в) $\Delta B^{010} = \delta C^{010} + \delta X^{005}$.

Рисунок 14 – Схема для розрахунку ланок розмірного ланцюга

2. Якщо на 005-й операції задати допуски повздовжніх розмірів хвостовика $\delta X^{005} = 0,2$ мм і загальної довжини $\delta C^{010} = 0,23$ мм, то в даному випадку, як і раніше, коливання розміру $\Delta C^{010} = 0,1 + 0,2 = 0,3$ мм будуть більші допусків на остаточний розмір. Значить, і при таких заданих розмірах ми не отримаємо розмірів згідно креслення, як і в попередньому варіанті.

3. При шліфуванні торцю 1 з виконанням загальної довжини розмір висоти головки $B^{010} = 30_{-0,1}$ буде замикаючою ланкою. Складовими ланками розмірного ланцюга, в залежності від постановки розмірів на 005-й операції, будуть при задані розмірів по попередньому прийнятому маршруту (рис.13а) C^{005} , C^{010} B^{005} , по варіантах а) і б) C^{010} і X^{005} (рис.13б і в).

В даних випадках коливання розміру ΔB^{010} більше, ніж це допускається по кресленню деталі.

Таким чином, розглянуті варіанти обробки непридатні і не забезпечують виготовлення деталей у відповідності з кресленням. Один із способів, який забезпечує виготовлення деталі по розмірам креслення, – введення додаткової, 015-ї операції – підрізання торцю 3 на необхідний розмір $C^{015} = 82_{-0,2}$.

Для підрізання торцю 3 на 015-й операції передбачаємо припуск Z_3^{015} , який буде замикаючою ланкою. Складові ланки C^{015} , C^{005} , B^{010} , B^{005} . Рівняння розмірного ланцюга буде таким

$$[Z_3^{015}] = C^{005} - C^{015} - B^{005} + B^{010}.$$

Розрахунок операційного розміру C^{005} по координатам середин полів допусків можна провести в такій послідовності:

а) визначаємо $Z_{3 \min}^{015}$:

$$Z_{3 \min}^{015} = Rz + T + \rho.$$

Торець 3, отриманий після підрізання на 005-й операції, має такі показники : $Rz = 0,045$ мм, $T = 0,045$ мм. Величиною ρ можна знехтувати. Отже, $Z_3^{015} = 0,09$ мм.

б) розраховуємо допуски всіх складових розмірів:

$$\delta C^{015} = 0,2 \text{ мм} - \text{по кресленню};$$

$$\delta B^{010} = 0,1 \text{ мм} - \text{по кресленню};$$

$$\delta B^{005} = 0,17 \text{ мм} - \text{прийнятий раніше і } \delta C^{005} = 0,23 \text{ мм}.$$

в) знаходимо Z_3^{015} :

$$Z_3^{015} = Z_3^{015} + \delta C^{015} + \delta C^{005} + \delta B^{010} + \delta B^{005};$$

$$Z_3^{015} = 0,09 + 0,2 + 0,1 + 0,17 = 0,79 \text{ мм}.$$

г) визначаємо координату середини поля допуску замикаючої ланки

$$\Delta_0 Z_3^{015} = \frac{Z_3^{015} + Z_3^{015}}{2} = \frac{0,09 + 0,79}{2} = 0,44 \text{ мм};$$

д) розраховуємо координати середини полів допусків відомих складових ланок:

$$\Delta_0 B^{010} = \frac{0 + (-0,1)}{2} = -0,05 \text{ мм};$$

$$\Delta_0 B^{005} = \frac{0,08 + 0,25}{2} = 0,165 \text{ мм};$$

$$\Delta_0 C^{015} = \frac{0 + (-0,2)}{2} = -0,1 \text{ мм}.$$

є) знаходимо координату середини поля допуску шуканої ланки C^{005} :

$$\Delta_0 C^{005} = \Delta_0 Z_3^{015} + \Delta_0 B^{005} - \Delta_0 B^{010} + \Delta_0 C^{015};$$

$$\Delta_0 C^{005} = 0,44 + 0,165 - (-0,05) + (-0,1) = 0,555 \text{ мм}.$$

ж) визначаємо номінальний розмір шуканої ланки:

$$\text{Прийняв } Z_3^{015} = 0_{+0,09}^{+0,79}; Z_3^{015} = C_{\text{НОМ}}^{005} - C_{\text{НОМ}}^{015} - B_{\text{НОМ}}^{005} + B_{\text{НОМ}}^{010},$$

отримаємо

$$C^{005} = Z_3^{015} + C_{\text{НОМ}}^{015} + B_{\text{НОМ}}^{005} + B_{\text{НОМ}}^{010} = 0 + 82 + 30 - 30 = 82,0 \text{ мм.}$$

з) розраховуємо граничні розміри C^{005} :

$$C^{005} = C_{\text{НОМ}}^{005} + \Delta_0 C^{005} \pm \frac{\delta C^{005}}{2} = 82 + 0,555 \pm \frac{0,23}{2} = 82,67_{-0,23}.$$

Отриманий розмір гарантує наявність припуску на обробку 015-ї операції, не дивлячись на те, що вимоги до якості поверхні торцю 3 вже виконані і додаткова обробка не потрібна. Якщо призначення припуску диктується тільки необхідністю забезпечення розміру, а не вимоги по шорсткості, то величину мінімального припуску можна прийняти рівним нулю і навіть мінусової величини.

В нашому прикладі, прийняв $Z_3^{015} = -0,2$ мм, отримаємо (див. вище):

$$\text{в) } Z_3^{015} = -0,2 + 0,2 + 0,23 + 0,1 + 0,17 = 0,5 \text{ мм;}$$

$$\text{г) } \Delta_0 Z_3^{015} = \frac{-0,2+0,5}{2} = 0,15 \text{ мм;}$$

$$\text{є) } \Delta_0 C^{005} = 0,15 + 0,165 + 0,05 - 0,1 = 0,265 \text{ мм;}$$

$$\text{з) } C^{005} = 82 + 0,265 \pm 0,115 = 82,38_{-0,23}.$$

В даному випадку при виконанні мінімального можливого розміру $C_{\text{min}}^{005} = 82,15$ мм, знявши максимальний припуск при шліфуванні торцю на 010-й операції, отримуємо $C_{\text{min}}^{015} = C_{\text{min}}^{005} - Z_1^{010} = 82,15_{-0,35}$; $C_{\text{min}}^{015} = 81,8$, тобто отримаємо розмір, заданий на кресленні без виконання 015-ої операції. Введена додаткова 015-а операція буде випадковою, яка використовується для частини деталей, у яких після 010-ї операції розмір становить більше максимально допустимого по кресленню. Розрахунок операційних ланцюгів по мінусовому припуску дозволяє не тільки скоротити кількість деталей, які піддаються додатковій обробці, але і значно зменшити припуски, а також і розхід металу.

Таким чином, усі ланки в розмірному ланцюзі визначені. Тепер може будь заповнена графа таблиці.

Таблиця 2. Технологічні показники обробки поверхонь вала

№ поверхні	Шорсткість поверхні	Додаткові вимоги	Кількість знімальних шарів	Вид обробки	Фактична кількість знімальних шарів
1	Ra 0,4	-	2	Точіння, шліфування	2
2	Ra 6,3	-	1	Точіння	1
3	Ra 6,3	-	1	Точіння	1

Аналізуючи графи 4 і 6 таблиці, видно, що в результаті розрахунку розмірного ланцюга появилася одна операція, пов'язана з повторною обробкою поверхні 3, що за попереднім варіантом технологічного процесу не передбачалось. Слід вказати, що на основі порівняльного аналізу граф 4 і 5 може будь дана оцінка того, чи достатньо вдало технологу вдалося спроектувати технологічний процес. Якщо кількість надлишкових операцій велике, то процес слід удосконалювати, а іноді і повністю видозмінювати, для отримання більш раціонального варіанту.

Приклад 8. Провести розмірний аналіз технологічного процесу обробки втулки і розрахувати лінійні операційні розміри. Ескіз креслення втулки представлено на рис. 15.

1. Ознайомившись з кресленням, можна відмітити, що тільки розмір $\varnothing 40$ і торець вимагають обробки з шорсткістю $Ra 0,8$. Інші поверхні можуть бути оброблені з шорсткістю $Ra 6,3$.

2. Приймаємо для виготовлення втулки в якості заготовки прутки $\varnothing 50$ мм з наступною її рубкою на пресі.

3. Вимоги щодо шорсткості повздовжніх поверхонь дозволяє намітити наступну кількість обробки (див. таблицю).

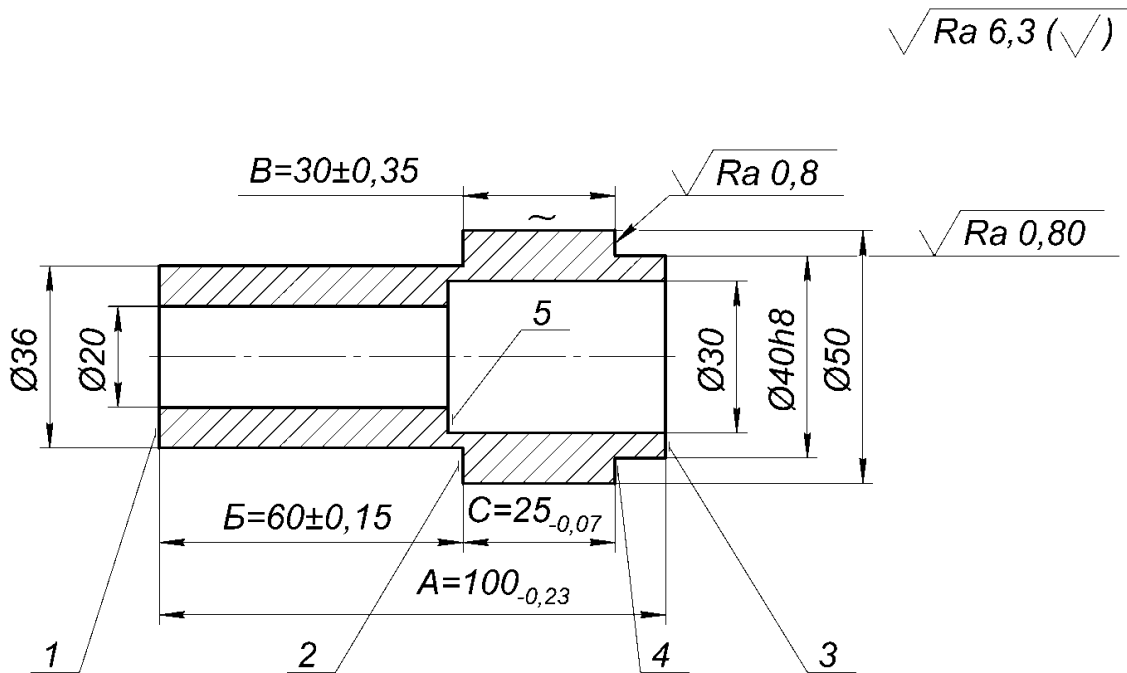


Рисунок 15 – Ескіз втулки

Таблиця 3. Технологічні показники обробки поверхонь втулки

№ поверхні	Шорсткість поверхні	Додаткові вимоги	Кількість знімальних шарів	Вид обробки	Фактична кількість знімальних шарів
1	Ra 6,3	-	1	Точіння	1
2	Ra 6,3	-	1	Точіння	1
3	Ra 6,3	-	1	Точіння	1
4	Ra 0,4	-	2	Точіння, шліфування	2
5	Ra 6,3	-	1	Точіння	1

4. Намічаємо наступний план обробки:

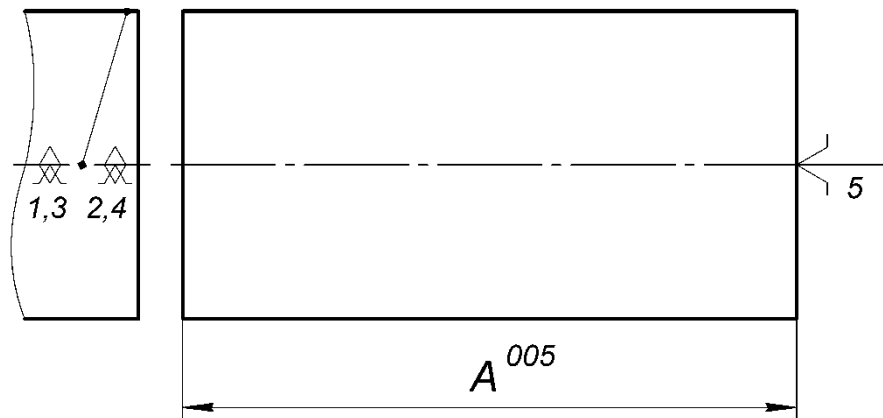
005. Заготівельна. Рубка штучних заготовок з прутка на пресі.

010. Токарна. Підрізання торцю 1 і проточування діаметру 36 на розмір B^{010} від підрізного торцю.

015. Токарна. Підрізання торцю 3 в розмір A^{015} , свердління отвору Ø20 наскрізь, точіння фланцю Ø40 з утворенням фланцю розміром K^{015} від торцю 3, розточування отвору Ø30 на глибину M^{015} від торця 3.

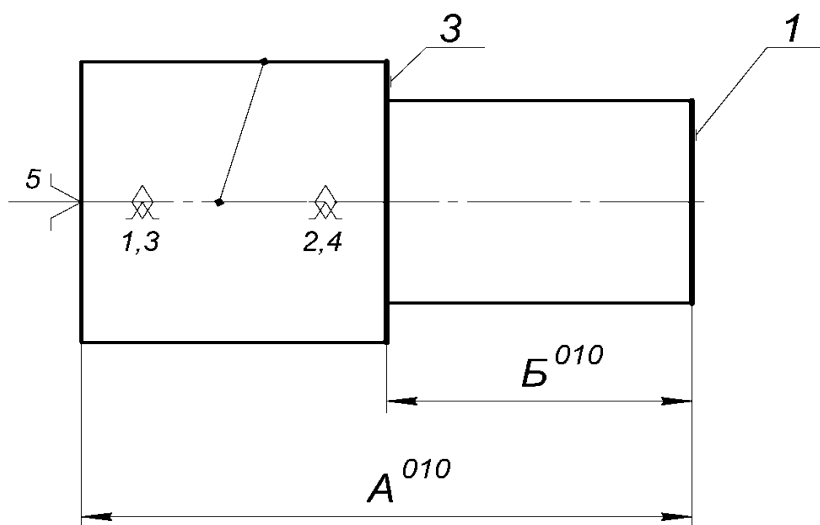
020. Шліфувальна. Шліфування поверхні Ø40 і торця 4 в розмір $C = 25_{-0,17}$.

005. Заготівельна



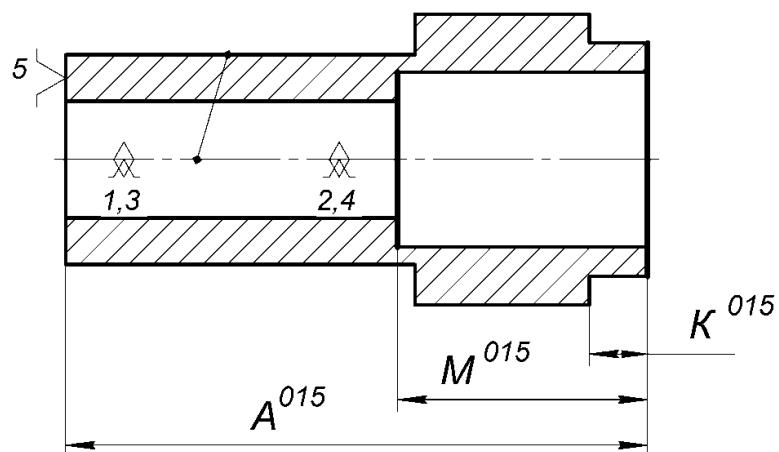
$$\delta A^{005} = 1,4 \text{ мм}$$

010. Токарна



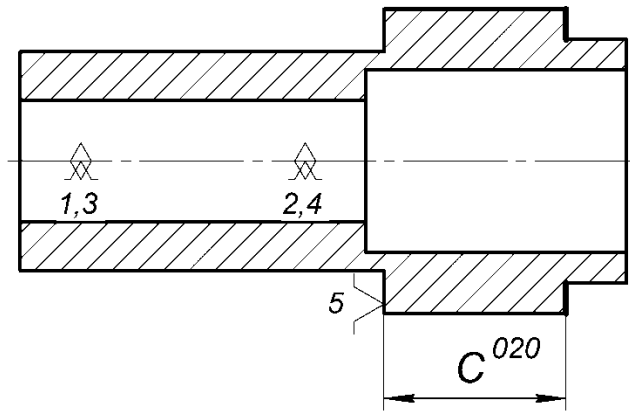
$$\delta A^{010} = 0,87 \text{ мм}$$

015. Токарна



$$\delta A^{015} = 0,87 \text{ мм}; \delta K^{015} = 0,24 \text{ мм}; \delta K^{015} = 0,1 \text{ мм}.$$

020. Шліфувальна



$$\delta A^{015} = 0,87 \text{ мм.}$$

Рисунок 16 – Ескізи плану обробки втулки

5. На рис. 15 представлено ескізи плану обробки. Розмірні лінії з літерними позначеннями вказують на виконуваний розмір.

6. Для виявлення і складання рівнянь розмірних ланцюгів виконуємо обхід контурів, починаючи із замикаючої ланки:

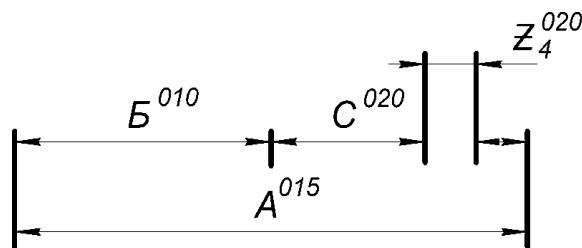
$$\text{I} \quad [Z_4^{020}], C^{020}, B^{010}, A^{015}, K^{015}.$$

$$\text{II} \quad [B], M^{015}, A^{015}, B^{010}, C^{020}.$$

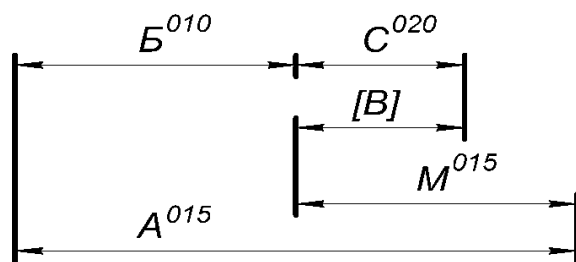
$$\text{III} \quad [Z_3^{015}], A^{015}, A^{010}.$$

$$\text{IV} \quad [Z_1^{010}], A^{005}, A^{010}.$$

7. Викреслюємо контури частинних розмірних ланцюгів і складаємо рівняння у формі замикаючої ланки (рис. 16).



$$[Z_4^{020}] = A^{015} - B^{010} - C^{020} - K^{015}$$



$$[B] = M^{015} - A^{015} + B^{010} + C^{020}$$

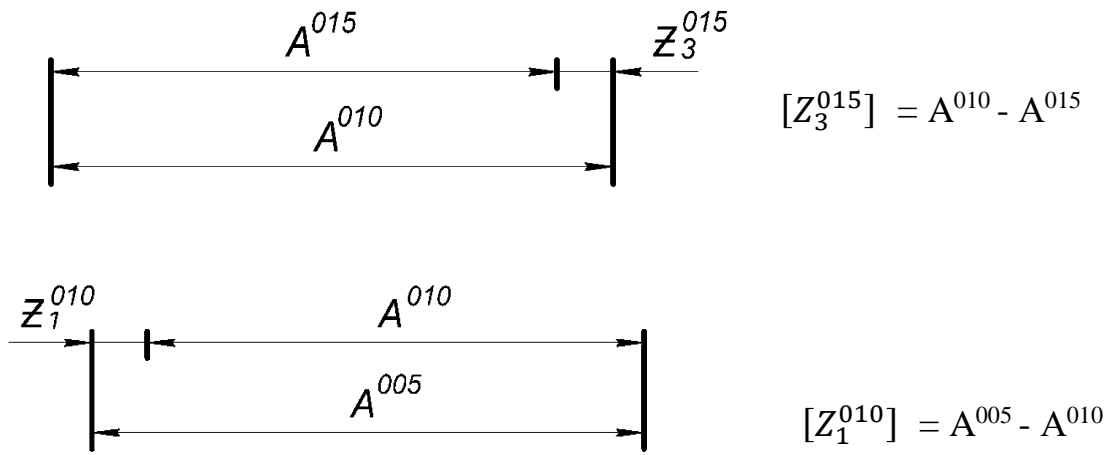


Рисунок 16 – Контури частинних розмірних ланцюгів.

8. Визначаємо значення мінімального припусків:

а) $Z_{4 \min}^{020} = Rz + T + \rho = 0,05 + 0,04 = 0,09$ мм.

В даному випадку просторові відхилення для торця 4 при малому перепаді діаметрів $\rho = 0$.

б) $Z_{3 \min}^{015} = Rz + T + \rho = 0,3 + 0,3 + 0,7 = 1,3$ мм.

в) $Z_{1 \min}^{010} = Z_{3 \min}^{015} = 1,3$ мм.

9. Перевіряємо можливість отримання розміру B , який в по детальному розмірному ланцюзі є складовою ланкою, а в операційному – замикаючим.

По креслення $\delta_B = \pm 0,35 = 0,7$ мм, а по технологічному процесу

$$[\Delta_B] = \delta M^{015} + \delta A^{015} + \delta B^{010} + \delta C^{020}.$$

Прийнявши відповідні значення, які вказані на ескізах обробки $\delta M^{015} = 0,17$ мм; $\delta A^{015} = 0,23$ мм; $\delta B^{010} = 0,3$ мм і $\delta C^{020} = 0,07$ мм, отримаємо

$[\Delta_B] = 0,17 + 0,23 + 0,3 + 0,007 = 0,77$ мм, тобто коливання розміру більше, ніж допустимо кресленням.

Для забезпечення вимог креслення в даному прикладі достатньо посилити допуск на розмір M^{015} , прийнявши його замість $\delta M^{015} = 0,17$ мм $\delta M^{015} = 0,1$ мм.

Для цього необхідно додатково поставити упор для розточувальної оправки, точно налаштований по відношенню до підрізного для торця 3 різцю .

10.Визначаємо максимальні значення припусків і їх номінальні і середні значення:

$$а) Z_4^{020}{}_{max} = Z_4^{020}{}_{min} + \delta A^{015} + \delta B^{010} + \delta K^{015} + \delta C^{020} ;$$

$$Z_4^{020}{}_{max} = 0,09 + 0,23 + 0,3 + 0,24 + 0,007 = 0,93 \text{ мм} .$$

$$\text{Приймаємо } Z_4^{020} = 0_{+0,09}^{+0,93} ; \Delta_0 Z_4^{020} = \frac{0,09+0,93}{2} = 0,51 \text{ мм}.$$

$$б) Z_3^{015}{}_{max} = Z_3^{015}{}_{min} + \delta A^{010} + \delta A^{015} = 1,3 + 0,87 + 0,23 = 2,4 \text{ мм}.$$

$$\text{Приймаємо } Z_3^{015} = 0_{+1,3}^{+2,4} ; \Delta_0 Z_3^{015} = \frac{2,4+1,3}{2} = 1,85 \text{ мм}.$$

$$в) Z_1^{010}{}_{max} = Z_1^{010}{}_{min} + \delta A^{005} + \delta A^{010} = 1,3 + 1,4 + 0,87 = 3,57 \text{ мм}.$$

$$\text{Приймаємо } Z_1^{010} = 0_{+1,3}^{+3,57} ; \Delta_0 Z_1^{010} = \frac{3,57+1,3}{2} = 2,43 \text{ мм}.$$

9.Визначаємо операційні розміри.

а) із ланцюга $[Z_4^{020}] = + A^{015} - B^{010} - K^{015} - C^{020}$ визначаємо розмір K^{015} ; номінальний розмір K^{015} з рівняння:

$$K_{\text{НОМ}}^{015} = A_{\text{НОМ}}^{015} - B_{\text{НОМ}}^{010} - C_{\text{НОМ}}^{010} - Z_{4 \text{НОМ}}^{020} ,$$

де A^{015} , B^{010} , C^{020} – розміри креслення, які виконані на відповідних операціях ($Z_4^{020}{}_{max}$ – визначений вище);

$$K_{\text{НОМ}}^{015} = 100 - 60 - 23 - 0 = 15 \text{ мм}.$$

Координата середини поля допуску розміру K^{015}

$$\Delta_0 K^{015} = \Delta_0 A^{015} - \Delta_0 B^{010} - \Delta_0 C^{020} - \Delta_0 Z_4^{020} ,$$

де координати середин полів допусків кожного розміру будуть визначені із розрахунків

$$\Delta_0 A^{015} = \frac{\Delta_H A^{015} + \Delta_B A^{015}}{2} + \frac{-0,23+0}{2} = -0,115 \text{ мм};$$

$$\Delta_0 B^{010} = \frac{\Delta_H B^{010} + \Delta_B B^{010}}{2} + \frac{-0,15+0,15}{2} = 0 \text{ мм};$$

$$\Delta_0 C^{020} = \frac{\Delta_H C^{020} + \Delta_B C^{020}}{2} + \frac{-0,07+0}{2} = -0,035 \text{ мм};$$

$$\Delta_0 Z_{4 \text{ min}}^{020} = 0,51 \text{ мм}.$$

$$\Delta_0 K^{015} = -0,115 - 0 - (-0,035) - 0,51 = 0,59 \text{ мм}.$$

Допуск обробленої поверхні на 015 -й операції $\delta K^{015} = 0,24 \text{ мм}$.

Визначаємо розмір отриманий на даній операції

$$K^{015} = K_{\text{НОМ}}^{015} + \Delta_0 K^{015} \pm \frac{\delta K^{015}}{2} = 15 + (-0,59) \pm \frac{0,24}{2} = 14,41 \pm 0,12 \text{ мм}.$$

В технологічному ескізі операційної карти цей розмір можна проставити з деяким округленням і прийняти $K^{015} = 14,4 \pm 0,12$, що призведе до змінення мінімального припуску під шліфування Z_4^{020} на величину округлення, тобто припуск буде зменшений на 0,01 мм.

б) в операційній карті 015-ої операції має бути проставлений розмір M^{015} , який обмежує довжину отвору від торцю 3. Цей розмір може буде визначений із розмірного ланцюга

$$[B] = M^{015} - M^{015} + B^{010} + C^{020};$$

$$M_{\text{НОМ}}^{015} = B_{\text{НОМ}} + A_{\text{НОМ}}^{015} - B_{\text{НОМ}}^{010} - C_{\text{НОМ}}^{020} = 30 + 100 - 80 - 25 = 45 \text{ мм}.$$

Координату середини поля допуску розміру M^{015} знайдемо із рівняння

$$\Delta_0 M^{015} = \Delta_0 B + \Delta_0 A^{015} - \Delta_0 B^{010} - \Delta_0 C^{020},$$

де $\Delta_0 B = \frac{-0,35+0,35}{2} = 0$, а інші координати середини визначені раніше

і тому

$$\Delta_0 M^{015} = 0 - (-0,113) - 0 - (-0,035) = -0,08.$$

Допуск розміру M^{015} визначений при перевірці можливості отримання розміру B на кресленні.

Той же допуск отримаємо і із другого рівняння.

$$\delta M^{015} = \delta B - (\delta A^{010} + \delta C^{020}) = 0,7 - (0,23 + 0,3 + 0,07) = 0,1 \text{ мм.}$$

Операційний розмір

$$M^{015} = M_{\text{НОМ}}^{015} + \Delta_0 M^{015} \pm \frac{\delta M^{015}}{2} = 45 + (- \pm 0,08) \pm \frac{0,1}{2} = 44,92 \pm 0,05.$$

Округлення операційного розміру в даному випадку призведе до змінення розміру B і тому цього робити не можна:

в) для розрахунку операційного розміру A^{010} буде використаний розмірний ланцюг $[Z_3^{015}] = A^{010} - A^{015}$, з якого

$$A_{\text{НОМ}}^{010} = A_{\text{НОМ}}^{015} + Z_{3 \text{ НОМ}}^{015} = 100 + 0 = 100 \text{ мм;}$$

$$\Delta_0 A^{010} = \Delta_0 A^{015} + \Delta_0 Z_3^{015} = - 0,115 + 1,85 = 1,735;$$

$$A^{010} = A_{\text{НОМ}}^{010} + \Delta_0 A^{010} \pm \frac{\delta A^{010}}{2} = 100 + 1,735 \pm \frac{0,87}{2} = 102,17_{-0,87};$$

г) визначаємо розмір заготовки, отриманий рубкою прутка на пресі.

Для цього може будь використаний ланцюг $[Z_1^{010}] = A^{005} - A^{010}$, з якого

$$A_{\text{НОМ}}^{010} = A_{\text{НОМ}}^{015} + Z_{3 \text{ НОМ}}^{015} = 100 + 0 = 100 \text{ мм;}$$

$$\Delta_0 A^{005} = \Delta_0 A^{010} + \Delta_0 Z_1^{010} = - 1,735 + 2,43 = 4,165.$$

$$A^{005} = A_{\text{НОМ}}^{005} + \Delta_0 A^{005} \pm \frac{\delta A^{005}}{2} = 100 + 4,165 \pm \frac{1,4}{2} = 104,865_{-1,4}.$$

Приймаємо $A^{005} = 105_{-1,4}$.

У наведеному прикладі операційні розміри і припуски визначені методом розрахунку на максимум-мінімум. Результати розрахунку не можна вважати задовільними, оскільки максимальний припуск на шліфування отриманий більше середнього рекомендованого ($Z_{4 \text{ max}}^{020} = 0,93$), а розмір M^{005} досить важко виконати на токарно-револьверному верстаті з допуском 0,1 мм.

Оскільки ланцюг, з якого знаходимо вищевказані розміри, має багато ε ланок (в кожному по 5 ланок), то для розрахунку розмірів використовують ймовірнісний метод, попередньо визначивши можливий відсоток ризику виходу частини розмірів замикаючої ланки з межі допуску і встановивши закони розсіювання складових ланок.

В нашому прикладі приймаючи відсоток ризику $P = 0,27\%$ з рівно ймовірнісним виходом за обидва кордони поля допуску ($t = 3$) і той же закон розподілення всіх ланок, отримаємо:

а) при розсіюванні по закону нормального розподілу $\lambda'_i = 1/9$.
(Розподіл по закону Гауса більш ймовірно для крупносерійного і масового виробництва).

$$\Delta_0 Z_{4(\ddot{y})}^{020} = \frac{Z_{4\min}^{020} + Z_{4\max(\ddot{y})}^{020}}{2} \text{ при } |\varepsilon| = 1;$$

$$Z_{4\max(\ddot{y})}^{020} = Z_{4\min}^{020} + t \sqrt{\sum_{i=1}^{m=1} \lambda'_i \delta A_i^2};$$

$$Z_{4\max(\ddot{y})}^{020} = 0,09 + 3 \sqrt{\frac{1}{9}(0,23^2 + 0,3^2 + 24 + 0,07^2)} = 0,34 \text{ мм.}$$

$$\Delta_0 Z_{4(\ddot{y})}^{020} = \frac{0,09 + 0,34}{2} = 0,325 = 0,33 \text{ мм.}$$

Індекс (й) означає, що розмір отриманий ймовірнісним методом розрахунку.

Координата середини поля допуску розміру K^{015}

$$\Delta_0 K^{015}_{(\ddot{y})} = -0,115 - 0(-0,035) - 0,33 = -0,41;$$

$$K^{015}_{(\ddot{y})} = K_{\text{ном}}^{015} + \Delta_0 K^{015}_{(\ddot{y})} \pm \frac{\delta K^{015}}{2} = 15 - 0,41 \pm \frac{0,24}{2} = 14,6 \pm 0,12;$$

б) при розподілу розмірів по закону рівнобедреного трикутника (для серійного виробництва) $\lambda'_i = 1/6$.

$$Z_{4\max(\ddot{y})}^{020} = 0,09 + 3 \sqrt{\frac{1}{6}(0,23^2 + 0,3^2 + 24 + 0,07^2)} = 0,64 \text{ мм.}$$

$$\Delta_0 Z_{4(\ddot{u})}^{020} = \frac{0,09+0,64}{2} = 0,37; K^{015}_{(\ddot{u})} = 14,55 \pm 0,12;$$

в) при розподілу по закону рівної ймовірності (для дрібносерійного і одиничного виробництва або коли нічого невідомо про характер кривої розсіювання)) $\lambda'_i = 1/3$.

$$Z_{4max(\ddot{u})}^{020} = 0,09 + 3 \sqrt{\frac{1}{3}(0,23^2 + 0,3^2 + 24 + 0,07^2} = 0,87 \text{ мм.}$$

$$\Delta_0 Z_{4(\ddot{u})}^{020} = \frac{0,09+0,87}{2} = 0,48; K^{015}_{(\ddot{u})} = 14,44 \pm 0,12;$$

Можна розрахувати ймовірнісним методом операційний розмір M^{015} із ланки [B] = $M^{015} - A^{015} + B^{010} + C^{020}$:

$$\delta B_{(\ddot{u})} = t \sqrt{\lambda'_M (\delta M^{015})^2 + \lambda'_A (\delta A^{015})^2 + \lambda'_B (\delta B^{010})^2 + \lambda'_C (\delta C^{020})^2}$$

Звідси,

$$\delta M^{015}_{(\ddot{u})} = \sqrt{\frac{(\frac{\delta B}{t})^2 - \lambda'_A (\delta A^{015})^2 - \lambda'_B (\delta B^{010})^2 - \lambda'_C (\delta C^{020})^2}{\lambda'_M}}$$

а) при розподілу по закону Гауса

$$\lambda'_M = \lambda'_A = \lambda'_B = \lambda'_C = \frac{1}{9};$$

$$\delta M^{015}_{(\ddot{u})} = \sqrt{\frac{\frac{1}{9}(\delta B)^2 - \frac{1}{9}(\delta A^{015})^2 - \frac{1}{9}(\delta B^{010})^2 - \frac{1}{9}(\delta C^{020})^2}{\frac{1}{9}}}$$

$$\begin{aligned} \delta M^{015}_{(\ddot{u})} &= \sqrt{\delta B^2 - [(\delta A^{015})^2 + (\delta B^{010})^2 + (\delta C^{020})^2]} = \\ &= \sqrt{0,7^2 - (0,23^2 + 0,3^2 + 0,07^2)}; \end{aligned}$$

$$\delta M^{015}_{(\ddot{u})} = 0,58; M^{015} = M_{\text{НОМ}}^{015} + \Delta_0 M^{015} \pm \frac{\delta M^{015}}{2} = 44,92 \pm 0,29;$$

б) при розподілу за законом трикутника

$$\lambda'_M = \lambda'_A = \lambda'_B = \lambda'_C = \frac{1}{6};$$

$$\delta M^{015}_{(ii)} = \sqrt{\frac{\frac{1}{9}(\delta B)^2 - \frac{1}{6}[(\delta A^{015})^2 - \frac{1}{6}(\delta B^{010})^2 - \frac{1}{6}(\delta C^{020})^2]}{\frac{1}{6}}};$$

$$\delta M^{015}_{(ii)} = \sqrt{\frac{2}{3} \times 0,7^2 - (0,23^2 + 0,3^2 + 24 + 0,07^2)} = 0,42;$$

$$M^{015} = 44,92 \pm 0,21;$$

в) при розподілу по закону рівної ймовірності $\lambda'_i = \frac{1}{3}$;

$$\delta M^{015}_{(ii)} = \sqrt{\frac{\frac{1}{9}(\delta B)^2 - \frac{1}{3}[(\delta A^{015})^2 - \frac{1}{3}(\delta B^{010})^2 - \frac{1}{3}(\delta C^{020})^2]}{\frac{1}{3}}};$$

$$\delta M^{015}_{(ii)} = \sqrt{\frac{1}{3} \times 0,7^2 - (0,23^2 + 0,3^2 + 24 + 0,07^2)} = 0,12;$$

$$M^{015} = 44,92 \pm 0,06 .$$

Порівняння результатів розрахунку розмірів і їх допусків, проведених різними методами, показує, що використання ймовірнісного методу веде до значного скорочення припусків на обробку, а в ланцюгах, де замикаючою ланкою є остаточний розмір деталі, дозволяє розширити допуски на операційні розміри.

Ефективність ймовірнісного методу розрахунку зростає при збільшенні числа ланок в розмірному ланцюзі по мірі наближення кривих розсіювання складових ланок до нормального закону розподілу.

Приклад 8. Розрахувати операційні розміри і розміри заготовки на вал-шестерню.

Таблиця 4. Технологічні показники обробки поверхонь вал-шестерні

№ поверхні	Шорсткість поверхні	Додаткові вимоги	Кількість знімальних шарів	Вид обробки	Фактична кількість знімальних шарів
8	Ra 0,4	-	2	Точіння, шліфування	3
7	Ra 0,8	-	3	Точіння, шліфування, шліфування	3
6	Ra 6,3	-	1	Точіння	1
5	Ra 6,3	-	1	Точіння	1
D ₁	Ra 0,8	-	3	Точіння, шліфування, шліфування	3
D ₂	Ra 6,3	-	1	Точіння	1
D ₃	Ra 6,3	-	1	Точіння	1
D ₄	Ra 6,3	-	1	Точіння	1

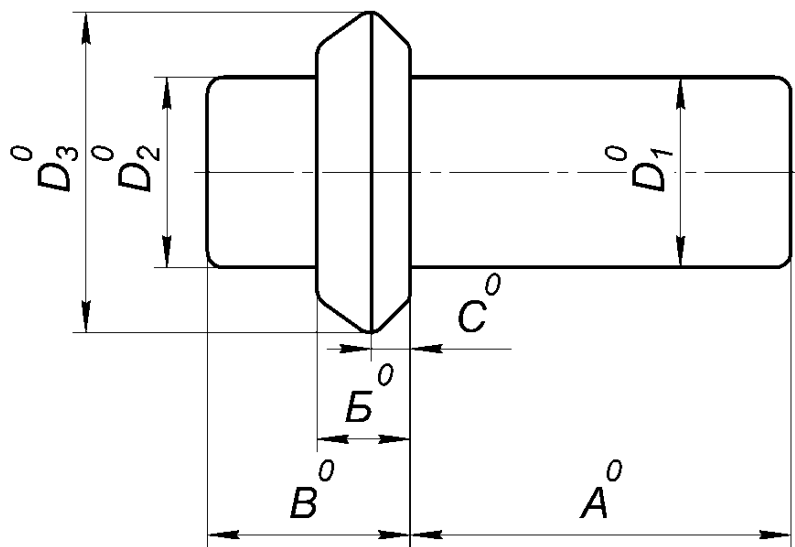


Рисунок 18 – Ескіз заготовки вал-шестерні

4.Попередньо намітимо маршрут обробки деталі

005. Фрезерно-центрувальна

Фрезерування торців, свердління центрових отворів.(Установа в призми з упором в торець 7).

010. Токарна.

Обточування заготовки з боку зубчастого вінця, підрізання торцю 7, проточування канавки. (Установа в центрах з упором в торець 5).

015. Токарна.

Обточування хвостовика $\varnothing 20$ і конусів, підрізання торцю 6.(Установа в цанзі по $\varnothing 30$ з упором в торець 7.

020. Шліфувальна.

Шліфування поверхні $\varnothing 30$ і торця 7. (Установа в центрах).

025. Зубодовбежна.

Обробка зубів зубчастого вінця. (Установа по шийці $\varnothing 30$ з упором в торець 6) .

030. Зубофрезерна.

Фрезерування зубів зубчастого вінця. (Установа по шийці $\varnothing 30$ з упором в торець 7) .

035.Зубостругальна.

Обробка зубів зубчастого вінця струганням. (Установа по шийці $\varnothing 30$ з упором в торець 7) .

040. Слюсарна

Ультразвукове зачищення задирок поверхонь зубців.

045. Контрольна.

Контроль поверхонь перед термічною обробкою.

050. Термічна.

Цементация на глибину 0,6 0,8 мм. Гартування і відпуск.

055 Слюсарна. Шабренья центрових отворів і правка деталі.

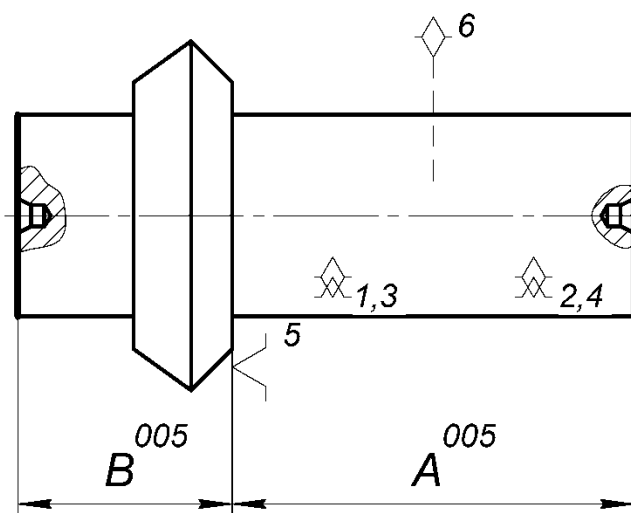
060. Шліфувальна.

Шліфування шийки $\varnothing 30$ і торців 7 і 8. (Установка в центрах).

065. Контрольна.

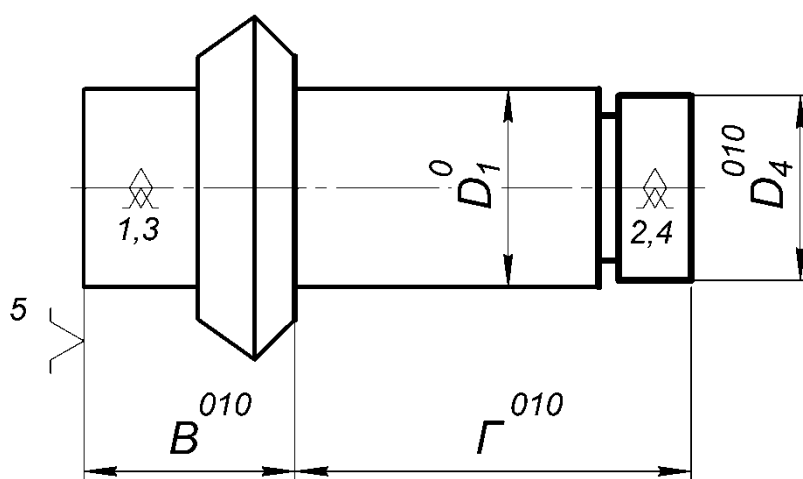
5. На рис. 19 представлено план обробки по основних операціях з вказівкою витримування операційних розмірів і досяжної середньо економічної точності.

005. Фрезерно-центрувальна



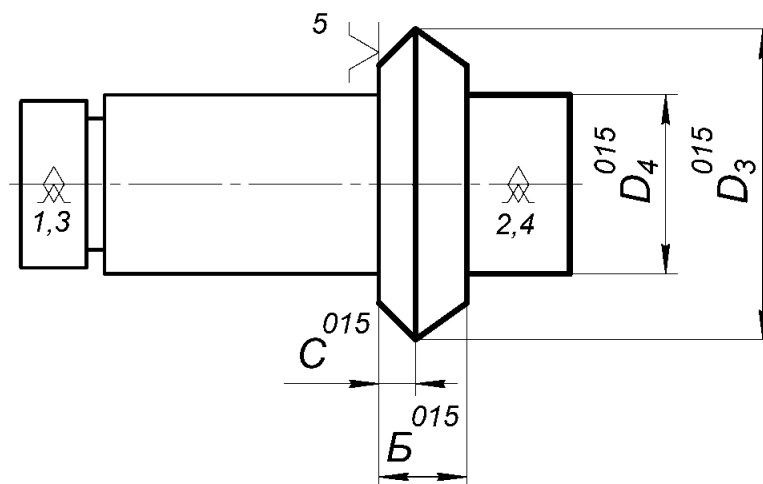
$$\delta B^{005} = 0,62 \text{ мм}; \delta A^{005} = 0,74 \text{ мм};$$

010. Токарна



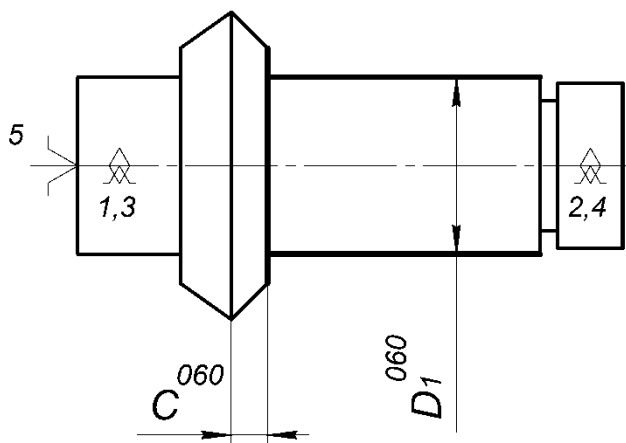
$$\delta B^{010} = 0,34 \text{ мм}; \delta \Gamma^{010} = 0,34 \text{ мм}; \delta D_1^{010} = 0,28 \text{ мм}; \delta D_4^{010} = 0,28 \text{ мм}$$

015. Токарна



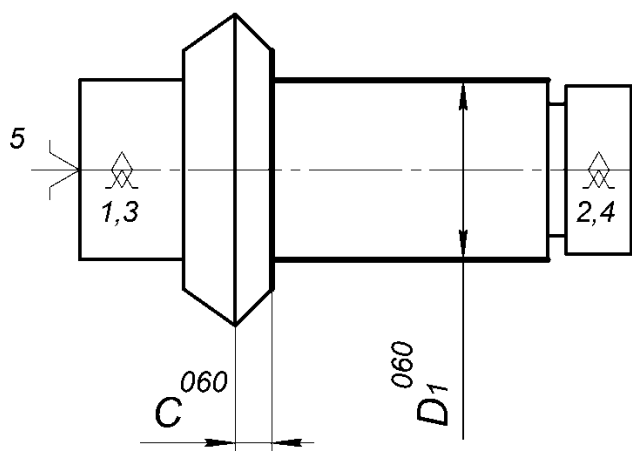
$$\delta C^{015} = 0,2 \text{ мм}; \delta B^{015} = 0,24 \text{ мм}; \delta D_3^{015} = 0,12 \text{ мм}; \delta D_4^{015} = 0,14 \text{ мм}$$

020. Шліфувальна



$$\delta C^{020} = 0,1 \text{ мм}; \delta D_1^{020} = 0,05 \text{ мм}$$

060. Шліфувальна



$$\delta C^{060} = 0,1 \text{ мм}; \delta D_1^{060} = 0,05 \text{ мм}$$

Рисунок 19 – Маршрут обробки вал-шестерні

6. Складаємо розрахункову схему запропонованого технологічного процесу у відповідності з раніше викладеним маршруту його побудови.

7. Виконуємо обхід контурів, починаючи із замикаючої ланки з метою побудови окремих операційних ланок:

$$I \quad [Z_7^{060}] , C^{020} , C^{060} .$$

$$II \quad [Z_8^{060}] , A^{005} , A^{060} , B^{005} , B^{010} , C^{015} , C^{060} .$$

$$III \quad [Z_7^{020}] , C^{015} , C^{020} .$$

$$IV \quad [B] , B^{015} , C^{015} , C^{060} .$$

$$V \quad [Z_6^{015}] , B^0 , B^{015} , B^{005} , B^{010} .$$

$$VI \quad [B] , B^{010} , C^{015} , C^{060} .$$

$$VII \quad [Z_7^{010}] , B^{005} , B^{010} .$$

$$VIII \quad [\Gamma] , \Gamma^{010} , C^{015} , C^{060} .$$

$$IX \quad [Z_5^{005}] , B^0 , B^{005} .$$

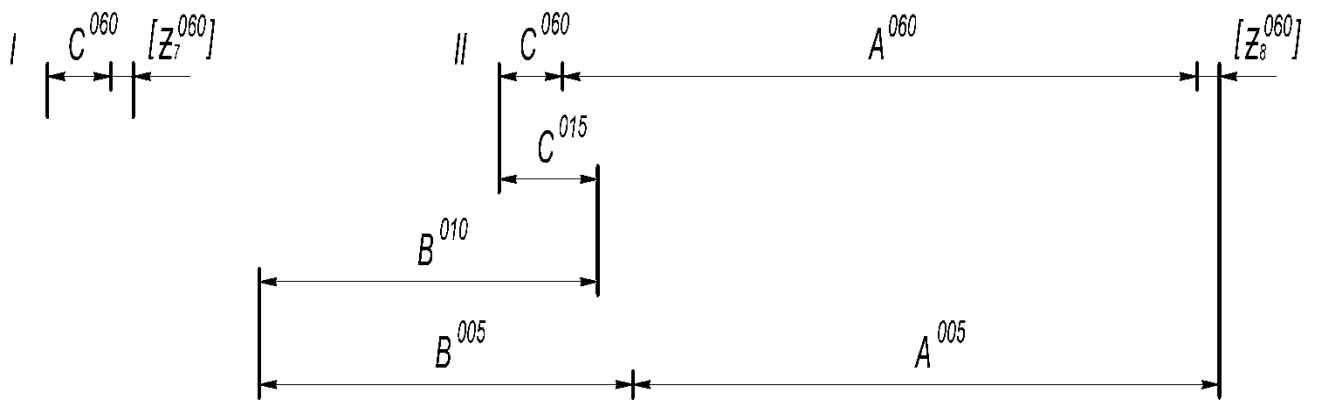
$$X \quad [Z_8^{005}] , A^0 , A^{005} .$$

Окрім вказаних, необхідно відзначити ще 2 контури по лінійним розмірам, що визначають виконання технічних вимог креслення по забезпеченню цементацийного шару. По кресленню деталь має бути піддана цементації на глибину $S^{050} = 0,6-0,8$ мм, щоб після зняття відповідних припусків на шліфувальних поверхнях (торці 7 і 8) зберегти величину цементованого шару не менше 0,3 мм ($S_7^{060} = S_8^{060} \geq 0,3$ мм. В контури, що визначають цементувальні шари, увійдуть наступні ланки:

$$[S_7^{060}] , S_7^{050} , C^{020} , C^{060} .$$

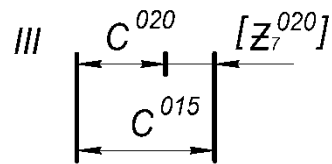
$$[S_8^{060}] , S_8^{050} , A^{005} , B^{005} , B^{010} , C^{015} , C^{060} .$$

8. По кожному контуру визначаємо замикаючі і складові ланки, викреслюємо контури усіх окремих розмірних ланцюгів і складемо їх рівняння у формі замикаючої ланки.

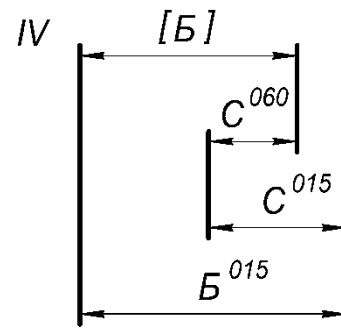


$$[Z_7^{060}] = C^{020} - C^{060}$$

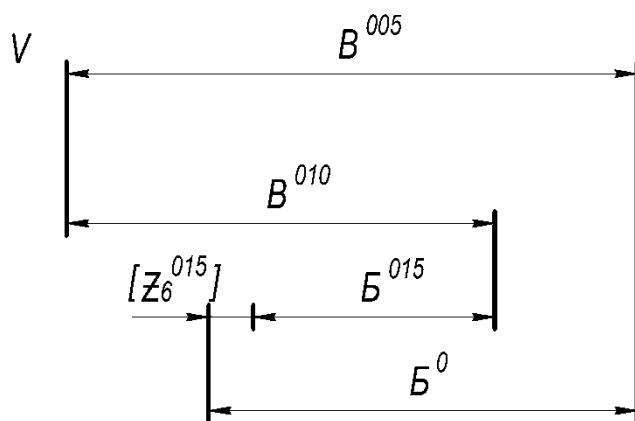
$$[Z_8^{060}] = A^{005} + B^{005} - B^{010} + C^{015} - C^{060} - A^{060}$$



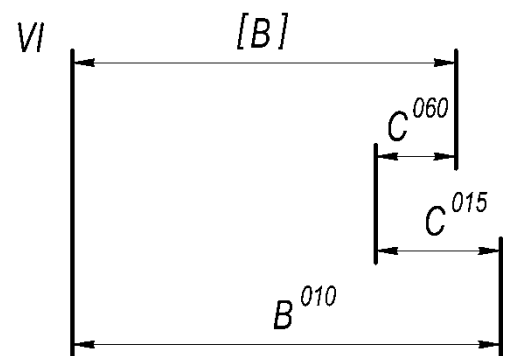
$$[Z_7^{020}] = C^{015} - C^{020}$$



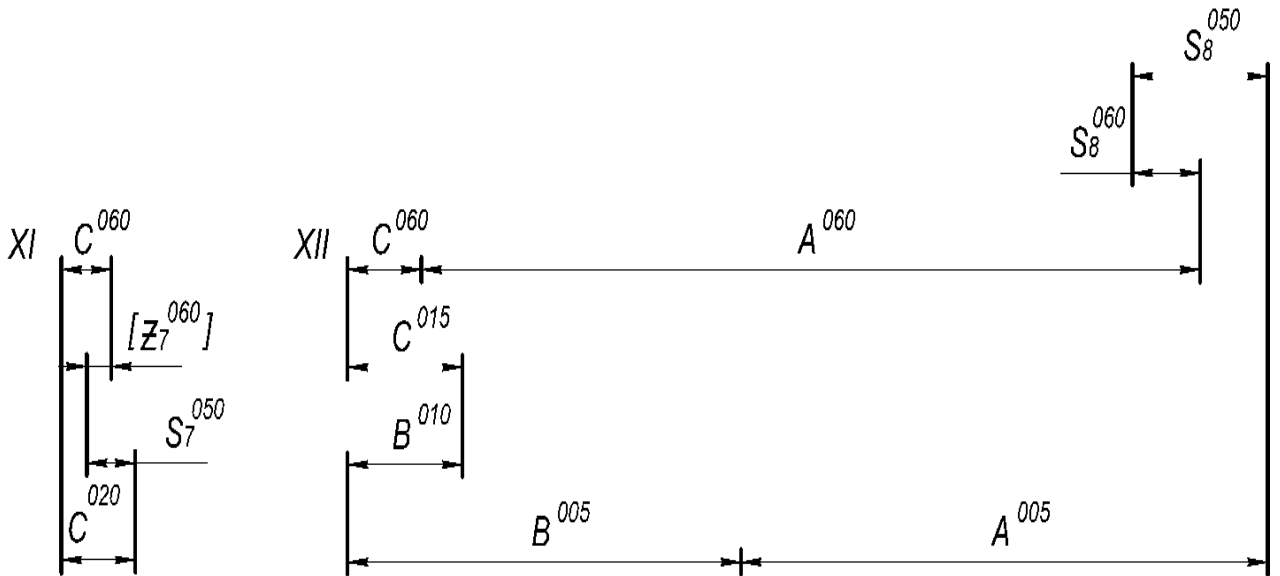
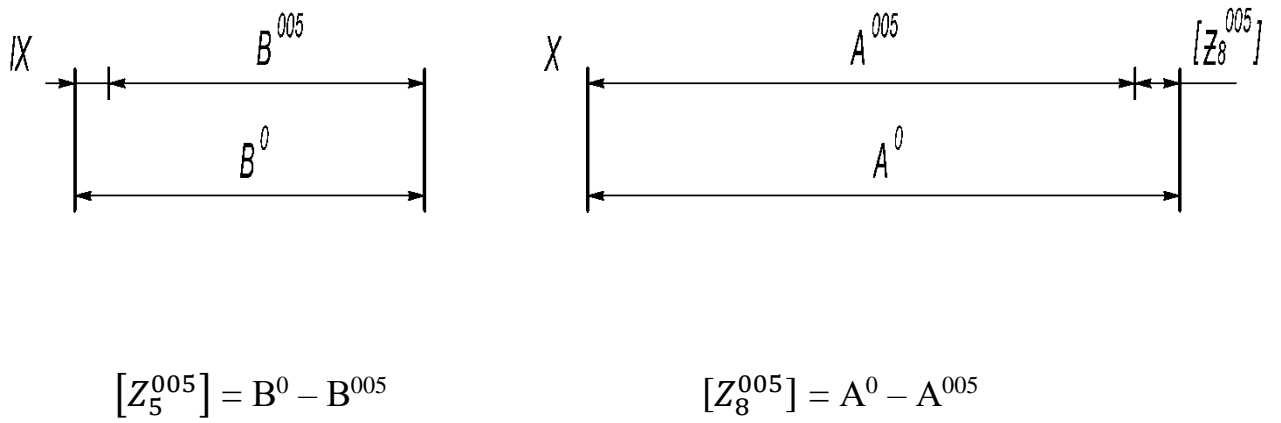
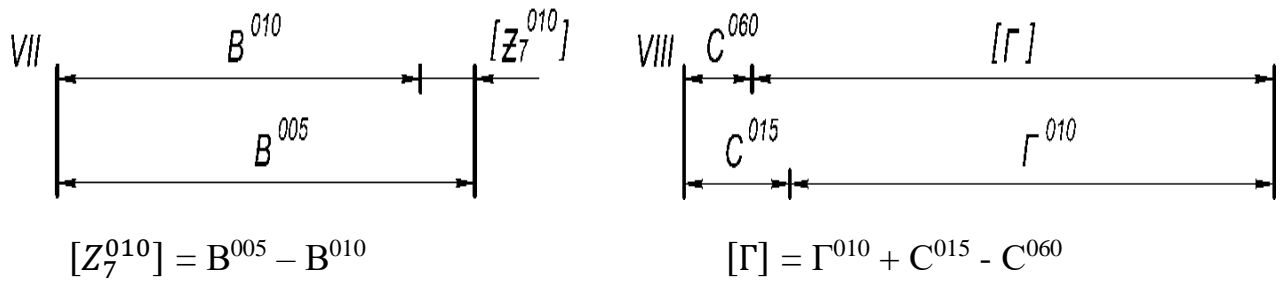
$$[B] = B^{015} - C^{015} + C^{060}$$



$$[Z_6^{015}] = B^0 - B^{005} + B^{010} - B^{015}$$



$$[B] = B^{010} - C^{015} + C^{060}$$



$[S_7^{060}] = [S_7^{050}] - C^{020} + C^{060}$

$[S_8^{060}] = [S_8^{050}] - A^{005} - B^{005} + B^{010} - C^{015} + C^{060} + A^{060}$

Рисунок 20 – Контури часткових розмірних ланцюгів

9. Визначимо величину мінімальних припусків:

$$а) Z_{7\min}^{060} = R_z + T + \rho = 0,03 + 0,035 + 0 = 0,065 \text{ мм.}$$

Похибку на короблення торцю при малому перепаду діаметрів можна прийняти рівною $\rho = 0$; При шліфуванні $R_z = 0,03$; $T = 0,035$;

$$б) Z_{8\min}^{060} = R_z + T + \rho = 0,04 + 0,05 + 0 = 0,09 \text{ мм.}$$

Перекосом торця 8 відносно лінії центрів можна знехтувати, оскільки центрування деталі і фрезерування торців виконується на верстаті з одної установки. При фрезеруванні $R_z = 0,04$; $T = 0,055$;

$$в) Z_{7\min}^{020} = R_z + T + \rho = 0,4 + 0,45 + 0 = 0,85 \text{ мм.}$$

Приймаємо при точінні $R_z = 0,4$; $T = 0,45$; $\rho = 0$.

$$г) Z_{6\min}^{015} = R_z + T + \rho = 0,15 + 0,25 + 0 = 0,9 \text{ мм;}$$

Для поверхні, отриманої на ГКМ $R_z = 0,15$; $T = 0,25$. Відхилення від перпендикулярності торцю 7 прийнято із-за малого перепаду діаметрів $\rho = 0,5$ мм.

$$д) Z_{7\min}^{010} = R_z + T + \rho = 0,15 + 0,25 + 0,3 = 0,7 \text{ мм.}$$

Приймаємо $R_z = 0,15$; $T = 0,25$. Відхилення від перпендикулярності торцю 7 прийнято із-за малого перепаду діаметрів $\rho = 0,3$ мм;

е) приймаємо

$$Z_{7\min}^{010} = Z_{7\min}^{010} = Z_{7\min}^{010} = 0,9 \text{ мм.}$$

10.Перевіримо можливість отримання остаточних креслярських розмірів деталі в операційних ланках, в яких вони є замикаючими ланками.

Так, розмір B безпосередньо не виготовляється, а має бути отриманий в результаті виконання складових цього розмірного ланцюга операційних розмірів B^{015} , C^{015} і C^{060} . Прийняв допуски цих розмірів по ескізам плану обробки, отримаємо

$$\Delta B = \delta B^{015} + \delta C^{015} + \delta C^{060} = 0,24 + 0,2 + 0,1 = 0,54 \text{ мм.}$$

По кресленню деталі розмір B може бути виконаний з допуском $\delta B = 0,5$ мм.

Отже, виконання операційних розмірів з допусками, прийнятими у відповідності з економічною точністю обробки і проставленими на ескізах плану, не гарантує отримання креслярського розміру $B = 14,7_{-0,5}$.

Самим простим і даному випадку цілком можливим методом приведення у відповідність отриманих коливань розміру в результаті з креслярським допуском може бути посилення допусків на виконувани операційні розміри.

У нашому прикладі достатньо прийняти $\delta B^{015} = 0,2$ мм, а не $0,24$ мм, як поставлено на ескізі, і вимоги креслення будуть виконані, Зменшення коливань операційного розміру B^{015} на $0,04$ мм можна отримати більш якісним налаштуванням верстата.

В ланцюзі $[B] = B^{010} - C^{015} + C^{060}$ при виконанні операційних розмірів з прийнятими по економічній точності допусками коливаннями замикаючої ланки будуть

$$\Delta B = \delta B^{015} + \delta C^{015} + \delta C^{060} = 0,34 + 0,2 + 0,1 = 0,64 \text{ мм,}$$

а по кресленню $\delta B = 0,62$ мм. В даному ланцюзі, як і в попередньому, фактично отриманні коливання розміру B більше допустимого по кресленню на $0,02$ мм і, отже, допуск на операційний розмір B^{010} також має бути зменшений. Приймаємо $\delta B^{015} = 0,32$ мм.

У ланцюзі $[\Gamma] = \Gamma^{010} - C^{015} + C^{060}$ при виконанні операційних розмірів по прийнятим в плані обробки допускам отримаємо коливання, безпосередньо на не виконуваному розмірі

$$\Delta \Gamma = \delta \Gamma^{010} + \delta C^{015} + \delta C^{060} = 0,34 + 0,2 + 0,1 = 0,64 \text{ мм.}$$

По кресленню цей розмір ($\Gamma = 40 \pm 0,35$ мм.) має допуск $0,7$ мм.

Отже, отримання креслярського розміру гарантовано навіть при розширенні допуску на операційний розмір Γ^{010} до $0,4$ мм замість прийнятого

$\delta\Gamma^{010} = 0,34$ мм. Окрім розглянутих операційних розмірних ланцюгів, є ще 2 ланцюги, які змінюють величини цементаційного шару з операційними розмірами обробки деталі (глибина цементаційного шару також є ланкою ланцюга, як і любий розмір). У цих ланцюгах, як і раніше розглянутих, замикаючими ланками слугують безпосередньо не виконані, але кресленням мінімально допустимі оговорені величини цементованих шарів, які залишаються після остаточної обробки поверхонь. Перевіримо можливість їх виконання по наміченому технологічному процесу.

У ланцюзі $[S_7^{060}] = S_7^{050} - C^{020} - C^{060}$ фактичне коливання цементованого шару в результаті виготовлення деталі по операційним розмірам буде дорівнювати сумі допусків складових ланок:

$$\Delta S_7^{060} = \delta S_7^{050} + \delta C^{020} + \delta C^{060} = 0,2 + 0,1 + 0,1 = 0,4 \text{ мм.}$$

А по технічним вимогам креслення ці коливання визначаються різницею граничних значень величини залишкового цементаційного шару:

$$\Delta S_{7кр}^{060} = S_{7max}^{060} - S_{7min}^{060},$$

де S_{7max}^{060} - максимально можлива глибина цементованого шару, що отримана після зняття з поверхні торцю 7 мінімального припуску;

S_{7min}^{060} - по технічним вимогам не менше 0,3мм.

Оскільки по кресленню глибина цементованого шару має бути в межах (0,6-0,8) мм і в любых випадках для отримання шорсткості поверхні необхідно видалити S_{7min}^{060} , то максимально можлива глибина залишкового цементованого шару буде

$$S_{7max}^{060} = S_{7max}^{050} - Z_{7min}^{060} = 0,8 - 0,065 = 0,735 \text{ мм,}$$

Тому $\Delta S_{7кр}^{060} = 0,735 - 0,3 = 0,435$.

Отже, обробка торцю 7 по наміченій технології гарантує отримання деталі з глибиною цементаційного шару не менше 0,3 мм.

Перевіримо виконання технічних вимог по торцю 8.

У ланцюзі $[S_8^{060}] = S_8^{050} - A^{005} + A^{060} - B^{005} - B^{010} - C^{015} + C^{060}$ виконання операційних розмірів з допусками, що встановлені по економічній точності обробки, призведе до фактичного коливання цементацийного шару на торці 8, який дорівнює сумі допусків складових ланок:

$$\Delta S_{8 \text{ факт}}^{060} = \delta S_8^{050} + \delta A^{005} + \delta A^{060} + \delta B^{005} + \delta B^{010} + \delta C^{015} + \delta C^{060} ;$$

$$\Delta S_{8 \text{ факт}}^{060} = 0,2 + 0,74 + 0,4 + 0,62 + 0,32 + 0,2 + 0,1 = 2,58 \text{ мм.}$$

Колівання цементованого шару, що допускаються по технічним вимогам креслення,

$$\Delta S_{8 \text{ кр}}^{060} = S_{8 \text{ max}}^{050} - Z_{8 \text{ min}}^{060} - S_{8 \text{ min}}^{060} ;$$

$$\Delta S_{8 \text{ кр}}^{060} = 0,8 - 0,09 - 0,3 = 0,41 \text{ мм.}$$

Отже, виготовлення деталі по наміченій технології не гарантує виконання її по встановленим на кресленні технічним умовам.

Для забезпечення вимог креслення по збереженню цементованого шару на торці 8 не менше 0,3 мм необхідно зменшити фактичні коливання, що може будь досягнуто різними методами:

1. Використання ймовірнісного розрахунку. (ланцюг складається з 8 складових ланок).

$$\Delta S_{8 \text{ (й)}}^{060} =$$

$$= t \sqrt{\lambda' [(\delta S_8^{050})^2 + (\delta A^{005})^2 + (\delta A^{060})^2 + (\delta B^{005})^2 + (\delta B^{010})^2 + (\delta C^{015})^2 + (\delta C^{060})^2]}$$

Прийняв $t = 3$, $\lambda' = 1/9$ для всіх складових ланок, отримаємо

$$\Delta S_{8 \text{ (й)}}^{060} = t \sqrt{\frac{1}{9} [0,2^2 + 0,74^2 + 0,4^2 + 0,62^2 + 0,32^2 + 0,2^2 + 0,1^2]} = 1,14 \text{ мм.}$$

Ймовірнісний розрахунок дозволяє значно зменшити коливання замикаючої ланки (більше ніж у 2 рази), але для даного прикладу такого зменшення недостатньо.

2.Скорочення кількості складових у розмірному ланцюзі. Якщо в маршруті виготовлення деталі передбачити додаткову обробку торцю 8 перед термообробкою (шліфування торцю 8 на операції 015 з витримуванням розміру A^{015}), то в розмірний ланцюг, що визначає зміни цементованого шару торцю 8, будуть входити тільки 6 розмірів, а не 8, як було в попередньому варіанті технологічного процесу.

Розмірний ланцюг буде мати вигляд

$$[SB^{060}] = SB^{050} - A^{015} - A^{060} + C^{015} - C^{060},$$

і коливання цементованого шару будуть дорівнювати:

а) при розрахунку на *max - min*

$$\Delta S_8^{060} = \delta S_8^{060} + \delta A^{015} + \delta A^{060} + \delta C^{015} + \delta C^{060} = 0,2 + 0,17 + 0,4 + 0,2 + 0,1 = 1,07 \text{ мм.}$$

(Приймаємо $\delta A^{015} = 0,17$ мм, що відповідає заданому квалітету точності:

б) при ймовірнісному розрахунку

$$\Delta S_8^{060}(\text{й}) = t \sqrt{(\delta S_8^{050})^2 \lambda'_1 + (\delta A^{015})^2 \lambda'_2 + (\delta A^{060})^2 \lambda'_3 + (\delta C^{015})^2 \lambda'_4 + (\delta C^{060})^2 \lambda'_5}.$$

Прийняв

$$t = 3, \lambda'_1 = \lambda'_2 = \lambda'_3 = \lambda'_4 = \lambda'_5 = \frac{1}{9};$$

$$\Delta S_8^{060}(\text{й}) = t \sqrt{0,2^2 + 0,17^2 + 0,4^2 + 0,2^2 + 0,1^2} = 0,53 \text{ мм.}$$

Як видно з розрахунків, введення додаткової операції, що забезпечує більш точне виконання розміру ($\delta A^{005} = 0,74$ мм, а $\delta A^{015} = 0,17$ мм.) і скорочення кількості ланок в ланцюзі, призвело до зменшення коливання залишкового цементацийного шару торцю 8 більше ніж в 2,5 рази (при розрахунку ймовірнісним методом в 2 рази), але і це виявилось недостатнім. По кресленню коливання величини цементацийного шару торцю 8 допустимі не більше 0,41 мм.

Самим радикальним методом скорочення кількості ланок в розмірному ланцюзі і забезпечення мінімального коливання цементацийного шару на

торці 8 буде зміни технологічного процесу обробки торцю на крайній операції таким чином, щоб знімає мий припуск Z_8^{060} став складовою ланкою, тобто безпосередньо виконаним і вимірювальним розміром. Це можна забезпечити декількома способами:

1) шліфуванням торцю з попереднім вимірюванням розміру кожної деталі і вказівкою цього розміру на неробочій поверхні;

2) шліфуванням з використанням в якості вимірювальної бази оброблюваної поверхні 8;

3) використання суперфінішу або будь-якого іншого методу, при якому в залежності від тривалості часу обробки знімаємо строго визначеного шару металу (0,01-0,04) з дуже малими коливаннями (10-15 мкм).

При такій побудові технологічного процесу рівняння розмірного ланцюга, який виражає зміну величини цементаційного шару торцю 8, записано у формі замикаючої ланки, має вид $S_8^{060} = S_8^{050} - Z_8^{060}$, а коливання цементаційного шару визначаємо з рівняння:

$$\Delta S_8^{060} = \delta S_8^{050} + \delta Z_8^{060}.$$

Введемо у попередньо намічений маршрут обробки додаткову операцію 060 – суперфініш торцю і тоді, задаючи величину знімального шару ($Z_{8min}^{065} \leq R_z^{020}$) і його коливання, щоб з дуже більшою точністю регламентується час обробки, отримаємо розмірний ланцюг, в якому припуск буде складовою ланкою.

Оскільки проводити суперфінішування поверхні після її фрезерування на 5-й операції із-за великої шорсткості нераціонально, то вводимо у 020-у операцію попереднє шліфування торцю 8.

У зв'язку зі зміненням технологічного процесу дещо змінюються розмірні ланцюги з вищевказаними змінами і їх рівняння. В такому випадку рівняння другого ланцюга буде мати такий вигляд

$$[A^{065}] = A^{020} + C^{020} - C^{060} - Z_8^{065};$$

рівняння дванадцятого ланцюга –

$$[S_8^{065}] = S_8^{050} - Z_8^{065} .$$

Окрім того, введення додаткової обробки торця 8 на 020-й операції призведе до утворення нового операційного розмірного ланцюга

$$[Z_8^{020}] = A^{005} - A^{020} + B^{005} - B^{010} + C^{015} - C^{020} .$$

Перевіримо можливість виконання розмірів і технічних вимог в розмірних ланцюгах, де вони є замикаючими ланками. Прийняв $Z_{8min}^{065} \leq R_z^{020} = 0,035$ мм і коливання при суперфініші $\delta Z_8^{065} = 0,01$ мм, отримаємо, що фактичні коливання розміру A^{065} безпосередньо не виконуючої замикаючої ланки ланцюга будуть рівними сумі допусків складових ланок

$$\delta A^{065} = 0,17 + 0,1 + 0,1 + 0,01 = 0,38 \text{ мм}.$$

По кресленню коливання цього розміру можуть бути до 0,4 мм. Отже, виконання розміру $A = 60 \pm 0,2$ гарантовано.

З розмірного ланцюга $[S_8^{065}] = S_8^{050} - Z_8^{065}$ коливання цементацийного шару можуть бути

$\Delta S_8^{065} = \delta S_8^{050} + \delta Z_8^{065} = 0,20 + 0,01 = 0,21$ мм, по кресленню ж допускається до 0,465 мм:

$$\Delta S_{8 \text{ кр}}^{065} = S_{8 \text{ max}}^{050} - Z_{8 \text{ min}}^{065} - S_{8 \text{ min}}^{065} = 0,8 - 0,065 - 0,3 = 0,465 \text{ мм},$$

тобто, технічні вимоги по збереженню цементацийного шару будуть також виконані.

Перш ніж приступити до подальших розрахунків, встановимо величину мінімальних припусків по зміненому технологічному процесу. Оскільки зміни технологічного процесу стосуються тільки в обробки торцю 8 на 065-й та 020-й операціях, то слід визначити припуски для цих проходів.

$$Z_{8 \text{ min}}^{065} = 0,035 \text{ мм} - \text{визначений вище},$$

$$Z_{8 \text{ min}}^{020} = R_z + T + \rho = 0,04 + 0,05 = 0,09 \text{ мм}.$$

(Для розміру поверхні, отриманої фрезеруванням , $R_z = 0,04$ мм; $T = 0,05$ мм; $\rho = 0$) .

Припуски по іншим поверхням залишаються без змін.

11. Визначимо максимальні значення припусків і координати середин їх полів допусків.

$$Z_{8 \max}^{065} = Z_{8 \min}^{065} - \delta Z_8^{065} = 0,035 + 0,01 = 0,045 \text{ мм.}$$

Приймаємо $Z_8^{065} = 0_{+0,035}^{+0,045}$,

тоді $\Delta_o Z_8^{065} = \frac{Z_{8 \min}^{065} + Z_{8 \max}^{065}}{2} = \frac{0,035 + 0,045}{2} = 0,04$ мм.

$$Z_{7 \max}^{060} = Z_{7 \min}^{060} + \delta C^{020} + \delta C^{060} = 0,065 + 0,1 + 0,1 = 0,265 \text{ мм.}$$

Приймаємо $Z_7^{060} = 0_{+0,065}^{+0,265}$,

$$\Delta_o Z_8^{060} = \frac{Z_{7 \min}^{060} + Z_{7 \max}^{060}}{2} = \frac{0,065 + 0,265}{2} = 0,165 \text{ мм.}$$

$$Z_{8 \max}^{020} = Z_{8 \min}^{020} + \delta A^{005} - \delta B^{005} + \delta B^{010} + \delta A^{020} + \delta C^{015} + \delta C^{020} ;$$

$$Z_{8 \max}^{020} = 0,09 + 0,74 + 0,17 + 0,62 + 0,22 + 0,1 + 0,32 = 2,24 \text{ мм.}$$

Приймаємо $Z_8^{020} = 0_{+0,09}^{+2,24}$;

$$\Delta_o Z_8^{020} = \frac{0,09 + 2,24}{2} = 1,165 \text{ мм.}$$

$$Z_{7 \max}^{020} = Z_{7 \min}^{020} + \delta C^{015} + \delta C^{020} = 0,085 + 0,2 + 0,1 = 0,385 \text{ мм.}$$

Приймаємо $Z_7^{020} = 0_{+0,085}^{+0,385}$;

$$\Delta_o Z_7^{020} = \frac{0,085 + 0,385}{2} = 0,23 \text{ мм.}$$

$$Z_{8 \max}^{015} = Z_{8 \min}^{015} + \delta D^0 + \delta D^{015} = 0,9 + 0,24 + 1,5 = 2,64 \text{ мм.}$$

Приймаємо $Z_6^{015} = 0_{+0,9}^{+2,64}$;

$$\Delta_0 Z_6^{020} = \frac{2,64+0,9}{2} = 1,77 \text{ мм.}$$

$$Z_7^{010} \max = Z_7^{015} \min + \delta B^{005} + \delta B^{010} = 0,7 + 0,62 + 0,32 = 1,64 \text{ мм.}$$

Приймаємо $Z_7^{010} = 0_{+0,7}^{+1,64}$;

$$\Delta_0 Z_7^{010} = \frac{1,64+0,7}{2} = 1,69 \text{ мм.}$$

$$Z_8^{005} \max = Z_8^{005} \min + \delta A^{00} + \delta A^{005} = 0,9 + 1,5 + 0,74 = 3,14 \text{ мм.}$$

Приймаємо $Z_8^{005} = 0_{+0,9}^{+3,14}$;

$$\Delta_0 Z_8^{005} = \frac{0,9+3,14}{2} = 2,02 \text{ мм.}$$

$$Z_5^{005} \max = Z_5^{005} \min + \delta B^{00} + \delta B^{005} = 0,9 + 1,5 + 0,62 = 3,02 \text{ мм.}$$

Приймаємо $Z_5^{005} = 0_{+0,9}^{+3,02}$;

$$\Delta_0 Z_5^{005} = \frac{0,9+3,02}{2} = 1,96 \text{ мм.}$$

12. Найдемо операційні розміри. Любий операційний розмір через координату середини поля допуску може бути виражений у вигляді

$$A = A_{\text{ном}} + \Delta_0 \pm \frac{\delta A}{2},$$

де $A_{\text{ном}}$ – номінальний розмір, який можна визначити із рівняння розмірного ланцюга два (рівняння номіналів);

Δ_0 – координата середини поля допуску шуканого розміру, що визначається з того ж розмірного ланцюга, але виражає залежність координат середини полів допусків;

$\frac{\delta A}{2}$ – половина допуску розміру, що визначається по середньо економічній точності (вказані у плані обробки) .

А) операційний розмір C^{020} з розмірного ланцюга $[Z_7^{060}] = C^{020} - C^{060}$

$$C_{\text{НОМ}}^{020} = C_{\text{НОМ}}^{060} + Z_{\text{НОМ}}^{060} \quad (C^{060} = 6,12^{+0,1} \text{ по кресленю деталі})$$

$$C_{\text{НОМ}}^{020} = 6,12 + 0 = 6,12 \text{ мм};$$

$$\Delta_o C^{020} = \Delta_o C^{060} + \Delta_o Z_7^{060} = 0,5 + 0,155 = 0,215 \text{ мм};$$

$$(\Delta_o C^{060} = \frac{\Delta_{\text{HC}}^{060} + \Delta_{\text{BC}}^{060}}{2} = \frac{0+0,1}{2}) = 0,05 \text{ мм);}$$

$$C^{020} = C_{\text{НОМ}}^{020} + \Delta_o C^{020} \pm \frac{\delta C^{020}}{2} = 6,12 + 0,215 \pm \frac{0,1}{2} = 6,28^{+0,1}.$$

б) операційний розмір C^{015} з розмірного ланцюга $[Z_7^{020}] = C^{015} - C^{020}$

$$C_{\text{НОМ}}^{015} = \Delta_o C^{020} + Z_{\text{НОМ}}^{020} = 6,28 \text{ мм};$$

$$\Delta_o C^{015} = \Delta_o C^{020} + \Delta_o Z_7^{020} = 0,05 + 0,23 = 0,28 \text{ мм};$$

$$C^{015} = C_{\text{НОМ}}^{015} + \Delta_o C^{015} \pm \frac{\delta C^{015}}{2} = 6,28 + 0,28 \pm \frac{0,2}{2} = 6,56 \pm 0,1.$$

в) операційний розмір A^{020} з ланцюга $[A^{065}] = A^{020} + C^{020} - C^{060} - Z_{\text{НОМ}}^{065}$

$$A_{\text{НОМ}}^{020} = A_{\text{НОМ}}^{065} - C_{\text{НОМ}}^{020} + C_{\text{НОМ}}^{060} + Z_{\text{НОМ}}^{020};$$

$$A_{\text{НОМ}}^{020} = 60 - 6,28 + 6,12 + 0 = 59,84 \text{ мм};$$

$$\Delta_o A^{020} = \Delta_o A^{065} - \Delta_o C^{020} + \Delta_o C^{060} + \Delta_o Z_8^{065};$$

$$\Delta_o A^{020} = 0 - 0,25 + 0,05 + 0,045 = 0,04 \text{ мм};$$

$$A^{020} = A_{\text{НОМ}}^{020} + \Delta_o A^{020} \pm \frac{\delta A^{020}}{2};$$

$$A^{020} = 59,84 + 0,04 \pm \frac{0,17}{2} = 59,8 \pm 0,085.$$

г) операційний розмір B^{015} з розмірного ланцюга $[B] = B^{015} - C^{015} + C^{060}$

$$B_{\text{НОМ}}^{015} = B_{\text{НОМ}} + C_{\text{НОМ}}^{015} - C_{\text{НОМ}}^{060};$$

$$B_{\text{НОМ}}^{015} = 14,7 + 6,56 - 6,12 = 15,14 \text{ мм};$$

$$\Delta_o B^{015} = \Delta_o B + \Delta_o C^{015} - \Delta_o C^{060};$$

$$\Delta_o B^{015} = -0,3 + 0 - 0,05 = -0,35 \text{ мм};$$

$$(\Delta_o B = \frac{\Delta_{HB} + \Delta_{VB}}{2} = \frac{0 + (-0,5)}{2}) = -0,25 \text{ мм);}$$

$$B^{015} = B_{\text{НОМ}}^{015} + \Delta_o B^{015} \pm \frac{\delta B^{015}}{2};$$

$$B^{015} = 15,14 - 0,25 \pm \frac{0,2}{2} = 15_{-0,2} .$$

д) операційний розмір B^{010} з розмірного ланцюга $[B] = B^{010} - C^{015} + C^{060}$

$$B_{\text{НОМ}}^{010} = B_{\text{НОМ}} + C_{\text{НОМ}}^{015} - C_{\text{НОМ}}^{060};$$

$$B_{\text{НОМ}}^{010} = 32 + 6,56 - 6,12 = 32,44 \text{ мм};$$

$$\Delta_o B^{010} = \Delta_o B + \Delta_o C^{015} - \Delta_o C^{060};$$

$$\Delta_o B^{010} = -0,31 + 0 - 0,05 = -0,36 \text{ мм};$$

$$(\Delta_o B = \frac{\Delta_{HB} + \Delta_{VB}}{2} = \frac{0 + (-0,62)}{2}) = -0,31 \text{ мм);}$$

$$B^{010} = B_{\text{НОМ}}^{010} + \Delta_o B^{010} \pm \frac{\delta B^{010}}{2};$$

$$B^{010} = 32,44 - 0,36 \pm \frac{0,32}{2} = 32,24_{-0,32} .$$

є) операційний розмір Γ^{010} з розмірного ланцюга $[\Gamma] = \Gamma^{010} + C^{015} - C^{060}$

$$\Gamma_{\text{НОМ}}^{010} = \Gamma_{\text{НОМ}} - C_{\text{НОМ}}^{015} + C_{\text{НОМ}}^{060};$$

$$C_{\text{НОМ}}^{010} = 40 + 6,56 + 6,12 = 45,56 \text{ мм};$$

$$\Delta_o \Gamma^{010} = \Delta_o C - \Delta_o C^{015} + \Delta_o C^{060};$$

$$\Delta_o \Gamma^{010} = 0 - 0 + 0,05 = 0,5 \text{ мм};$$

$$\Gamma^{010} = \Gamma_{\text{НОМ}}^{010} + \Delta_o \Gamma^{010} \pm \frac{\delta \Gamma^{010}}{2};$$

$$\Gamma^{010} = 45,56 + 0,06 \pm \frac{0,4}{2} = 45,6 \pm 0,2 .$$

ж) операційний розмір B^{005} з розмірного ланцюга $[Z_7^{010}] = B^{005} - B^{010}$

$$B_{\text{НОМ}}^{005} = B_{\text{НОМ}}^{010} + Z_{7 \text{ НОМ}}^{010} ;$$

$$B_{\text{НОМ}}^{005} = 32,44 + 0 = 32,44 \text{ мм};$$

$$\Delta_o B^{005} = \Delta_o B^{010} + Z_{7 \text{ НОМ}}^{010} ;$$

$$\Delta_o B^{005} = -0,16 + 1,69 = 1,53 \text{ мм};$$

$$B^{005} = B_{\text{НОМ}}^{005} + \Delta_o B^{005} \pm \frac{\delta B^{005}}{2};$$

$$B^{005} = 32,44 + 1,53 \pm \frac{0,62}{2} = 34,3_{-0,62} .$$

з) операційний розмір A^{005} з розмірного ланцюга

$$[Z_8^{020}] = A^{005} + B^{005} - B^{010} + C^{015} - C^{020} - A^{020}$$

$$A_{\text{НОМ}}^{005} = Z_{8 \text{ НОМ}}^{020} - B_{\text{НОМ}}^{005} + B_{\text{НОМ}}^{010} - C_{\text{НОМ}}^{015} + C_{\text{НОМ}}^{020} + A_{\text{НОМ}}^{020} ;$$

$$A_{\text{НОМ}}^{005} = 0 - 34,3 + 0,31 - 0,16 - 0 + 0,05 = 1,365 \text{ мм};$$

$$\Delta_o A^{005} = \Delta_o Z_8^{020} - \Delta_o B^{005} + \Delta_o B^{010} - \Delta_o C^{015} + \Delta_o C^{020} + \Delta_o A^{020};$$

$$\Delta_o A^{005} = 1,165 + 0,31 - 0,16 + 0,05 + 0 = 1,365 \text{ мм};$$

$$A^{005} = A_{\text{НОМ}}^{005} + \Delta_o A^{005} \pm \frac{\delta A^{005}}{2};$$

$$A^{005} = 57,5 + 1,365 \pm \frac{0,74}{2} = 58,85 \pm 0,37.$$

і) визначаємо розміри заготовки.

Розмір A^0 з ланцюга $[Z_8^{005}] = A^0 - A^{005}$

$$A_{\text{НОМ}}^{005} = A_{\text{НОМ}}^{010} + Z_{8 \text{ НОМ}}^{005} = 58,85 + 0 = 58,85 \text{ мм};$$

$$\Delta_o A^0 = \Delta_o A^{005} + Z_8^{005} = 0 + 2,02 = 2,02 \text{ мм};$$

$$A^0 = A_{\text{НОМ}}^{005} + \Delta_o A^0 \pm \frac{\delta A^0}{2};$$

$$A^0 = 58,85 + 2,02 \pm \frac{+1,5}{2} = 60,6_{-0,5}^{+1} .$$

Розмір B^0 з ланцюга $[Z_5^{005}] = B^0 - B^{005}$

$$B_{\text{НОМ}}^{005} = B_{\text{НОМ}}^{005} + Z_{5 \text{ НОМ}}^{005} = 34,3 + 0 = 34,3 \text{ мм};$$

$$\Delta_o B^0 = \Delta_o B^{005} + Z_5^{005} = -0,31 + 1,96 = 1,65 \text{ мм};$$

$$B^0 = B_{\text{НОМ}}^0 + \Delta_o B^0 \pm \frac{\delta B^0}{2};$$

$$B^0 = 34,3 + 1,65 \pm \frac{+1,5}{2} = 35,7_{-0,5}^{+1}.$$

Розмір B^0 з ланцюга $[Z_6^{015}] = B^0 - B^{015}$

$$B_{\text{НОМ}}^{005} = B_{\text{НОМ}}^{015} + Z_{6 \text{ НОМ}}^{015} = 14,9 + 0 = 14,9 \text{ мм};$$

$$\Delta_o B^0 = \Delta_o B^{015} + Z_5^{005} = -0,1 + 1,77 = 1,67 \text{ мм};$$

$$B^0 = B_{\text{НОМ}}^0 + \Delta_o B^0 \pm \frac{\delta B^0}{2};$$

$$B^0 = 14,9 + 1,67 \pm \frac{+1,5}{2} = 16,3_{-0,5}^{+1}.$$

5.2 Розрахунок операційних діаметральних розмірів

Розрахунок операційних діаметральних розмірів проводимо аналогічно попереднім, починаючи з крайньої (останньої) операції. Поєднуючи пункти 7 і 8 порядку розрахунку, проводимо обхід контурів і складаємо рівняння розмірних ланцюгів.

$$[Z_1^{060}] = R_1^{020} - R_1^{060}.$$

$$[S_1^{060}] = S_1^{050} - R_1^{020} + R_1^{060}.$$

$$[Z_1^{020}] = R_1^{010} - R_1^{020}.$$

$$[Z_1^{010}] = R_1^0 - R_1^{010}.$$

$$[Z_3^{015}] = R_3^0 - R_3^{015}.$$

$$[Z_2^{015}] = R_2^0 - R_2^{015}.$$

$$[Z_4^{010}] = R_4^0 - R_4^{010} .$$

Визначаємо мінімальні необхідні припуски на обробку:

$$а) Z_{1min}^{060} = R_Z + T + \rho = 0,2 + 0,03 + 0,215 = 0,265 \text{ мм.}$$

Для поверхні, яка отримана попереднім шліфуванням $R_Z = 0,02$; $T = 0,03$. Просторові відхилення складаються з вигнутості і короблення шийки вала в результаті термообробки на 050-й операції. Вигнутість деталі може бути визначена добутком питомої вигнутості на половину довжини валу.

У наведеному прикладі питома вигнутість загартованої деталі після правки Δ мкм/мм = 0,8. Довжина вала – 92 мм. Величина вигнутості

$$i = \Delta_i \frac{L}{2} = 0,8 \frac{92}{2} = 0,04 \text{ мм.}$$

Зміщення центрових отворів при пришабруванні можна визначити, якщо відоме биття зубчастого вінця після термообробки і вимоги по битті готової деталі. Якщо прийняти коефіцієнт збільшення похибок зубчастого колеса після цементації і гартування $k = 2,5$, а биття при виготовленні $j = 0,1$ мм, то биття зубчастого вінця після термообробки $j_t = k \times j = 0,25$ мм. За технічними умовами допустиме биття конічного колеса $j_g = 0,1$ мм і , максимальна величина зміщення центрових отворів при пришабруванні

$$J = \frac{J_t + J_g}{2} = \frac{0,25 + 0,1}{2} = 0,175 \text{ мм.}$$

$$\text{Сумарна похибка } \rho = i + J = 0,04 + 0,175 \text{ мм.}$$

Величину зміщення центрових отворів при виправленні центрів можна зменшити, вказав в технічних умовах необхідність забезпечення направлення биття вінця шийки вала в одну сторону. Ці додаткові вимоги ускладнюють процес виправлення центрів і, якщо немає особливої необхідності, цю гварку робити не треба:

$$б) Z_{1min}^{020} = R_Z + T + \rho = 0,04 + 0,05 + 0 = 0,09 \text{ мм.}$$

Для напівчистої токарної обробки поверхні $R_z = 0,04$; $T = 0,05$; (оскільки шліфування шийки і точіння виконується в центрах, то $\rho = 0$).

$$в) Z_{1min}^{010} = R_z + T + \rho = 0,12 + 0,18 + 0,3 = 0,6 \text{ мм.}$$

Для поверхні, яка отримана штамповкою $R_z = 0,120$; $T = 0,180$, а просторові відхилення, що відображають зміщення центрових отворів при їх виготовленні на 005-й операції з базуванням по необроблюваним шийкам вала $\rho = 0,25\delta D_1^0$, де δD_1^0 – допуск на діаметр заготовки. $\delta D_1^0 = 1,2$ мм; $\rho = 0,25 \times 1,2 = 0,3$ мм.

$$г) Z_{1min}^{015} = R_z + T + \rho = 0,12 + 0,18 + 0,8 = 1,1 \text{ мм.}$$

Для штампованої поверхні $R_z = 0,12$; $T = 0,180$. Просторові відхилення будуть складатися із зміщення осі центрових отворів і можливого зміщення Места для формулы.осі конуса відносно загальної осі деталі. Зміщення осі центрових отворів приймаємо 0,3мм. Зміщення конусу при штамповці високої точності – 0,5 мм, отримуємо сумарні просторові відхилення $\rho = 0,3 + 0,5 = 0,8$ мм .

д) $Z_{2min}^{015} = R_z + T + \rho = 0,12 + 0,18 + 0,8 = 1,1$ мм. за попереднім розрахунком.

Розраховувати величину припуску Z_4^{010} немає сенсу , оскільки розмір D_4 буде виконуватися із заготовки, яка має загальний діаметр шийки без ступінів.

10.Перевіримо чи виконуються технічні вимоги креслення по забезпеченню мінімального цементаційного шару після шліфування шийки $\varnothing 30$, величина якого має бути не менш 0,3 мм.

З ланцюга $[S_1^{060}] = S_1^{050} - R_1^{020} - R_1^{060}$ коливання цементаційного шару як замикаючої ланки визначимо так:

$$\Delta S_1^{060} = \delta S_1^{050} + \delta R_1^{020} + \delta R_1^{060} = 0,2 + 0,025 + 0,013 = 0,238 \text{ мм.}$$

Для попереднього шліфування $\delta R_1^{020} = 0,025$ мм; $\delta R_1^{060} = 0,013$ мм по кресленню. Коливання цементаційного шару, допустимі по кресленню.

$$\Delta S_{1 \text{ кр}}^{060} = S_{1 \text{ max}}^{060} - S_{1 \text{ min}}^{060} = S_{1 \text{ max}}^{050} - Z_{1 \text{ min}}^{060} - S_{1 \text{ min}}^{060} ;$$

$$\Delta S_{1 \text{ кр}}^{060} = 0,8 - 0,265 - 0,3 = 0,235.$$

Отже, обробка шийки вала по прийнятій технології забезпечує отримання мінімального цементаційного шару. Тільки у деякої частини деталей необхідний шар може бути зменшений до 0,03 мм. Якщо в технічних умовах операції пришабрування центрувальних отворів вказує, що биття конічного зубчастого вінця повинно співпадати по напрямленню з биттям шийки, то величина можливого зміщення центрових отворів буде меншою

$$(J' = \frac{J_t - J_g}{2} = \frac{0,25 - 0,1}{2} = 0,075).$$

Відповідно зменшиться мінімальний припуск

$$(Z_1^{060})' = R_Z + T + \rho' = 0,02 + 0,03 + 0,115 = 0,165 \text{ мм.}$$

$$\text{При цьому } (\rho' = 0,04 + 0,0175 = 0,115)$$

В даному випадку фактичні коливання залишкового після шліфування шийки цементаційного шару будуть дорівнювати

$$(\Delta S_{1 \text{ кр}}^{060})' = 0,8 - 0,165 - 0,3 = 0,335 \text{ мм,}$$

що означає в даному випадку наявність резерву, який гарантує необхідну величину цементаційного шару.

$$(S_{1 \text{ min}}^{050})_{\text{факт}} = 0,3 + 0,335 - 0,238 = 0,397 \approx 0,4 \text{ мм.}$$

11. Визначаємо максимальні і середні значення припусків:

$$\text{а) } Z_{1 \text{ max}}^{060} = Z_{1 \text{ min}}^{060} + \delta R_1^{020} + \delta R_1^{060} = 0,265 + 0,025 + 0,013 = 0,303 \text{ мм.}$$

$$\text{Приймаємо } Z_1^{060} = 0_{+0,265}^{+0,303} ; \Delta_0 Z_1^{060} = \frac{0,265 + 0,303}{2} = 0,284 \text{ мм;}$$

$$\text{б) } Z_{1 \text{ max}}^{020} = Z_{1 \text{ min}}^{060} + \delta R_1^{010} + \delta R_1^{020} = 0,09 + 0,025 + 0,14 = 0,255 \text{ мм.}$$

$$\text{Приймаємо } Z_1^{020} = 0_{+0,09}^{+0,255} ; \Delta_0 Z_1^{020} = \frac{0,255 + 0,09}{2} = 0,17 \text{ мм;}$$

$$\text{в) } Z_{1 \text{ max}}^{010} = Z_{1 \text{ min}}^{010} + \delta R_1^0 + \delta R_1^{010} = 0,6 + 0,14 + 0,5 = 1,24 \text{ мм.}$$

(Для штамповки на ГKM $\delta D_I = 1 \text{ мм}$).

$$\text{Приймаємо } Z_1^{010} = 0_{+0,6}^{+1,24} ; \Delta_0 Z_1^{010} = \frac{1,24+0,6}{2} = 0,92 \text{ мм};$$

$$\text{г) } Z_3^{015} = Z_3^{015} + \delta R_3^0 + \delta R_3^{015} = 1,61 + 0,06 + 0,6 = 1,76 \text{ мм.}$$

(Для штамповки на ГКМ $\delta D_3 = 1,2$ мм).

$$\text{Приймаємо } Z_3^{015} = 0_{+1,1}^{+1,76} ; \Delta_0 Z_3^{015} = \frac{1,76+1,1}{2} = 1,43 \text{ мм};$$

$$\text{д) } Z_2^{015} = 1,1 + 0,07 + 0,5 = 1,67 \text{ мм. } \Delta_0 Z_2^{015} = \frac{1,67+1,1}{2} = 1,38 \text{ мм};$$

12. Визначаємо операційні розміри:

$$\text{а) } R_{1 \text{ ном}}^{020} = R_{1 \text{ ном}}^{060} + Z_{1 \text{ ном}}^{060} = 15 + 0 = 15 \text{ мм};$$

$$\Delta_0 R_1^{020} = \Delta_0 R_1^{060} + \Delta_0 Z_1^{060} = 0,05 + 0,284 = 0,231 \approx 0,23 \text{ мм};$$

$$(\Delta_0 R_1^{060} = \frac{\Delta_0 R_1^{060} + \Delta_0 R_1^{060}}{2} = \frac{-0,04 + (-0,07)}{2} = -0,055 \text{ мм});$$

$$R_1^{020} = R_{1 \text{ ном}}^{020} + \Delta_0 R_1^{020} \pm \frac{\delta R_1^{020}}{2} = 15 + 0,23 \pm \frac{0,025}{2} = 15,25_{-0,025}$$

$$\text{або } D_1^{020} = 2R_1^{020} = 30,5_{-0,05};$$

$$\text{б) } R_{1 \text{ ном}}^{010} = R_{1 \text{ ном}}^{020} + Z_{1 \text{ ном}}^{020} = 15,25 + 0 = 15,25 \text{ мм};$$

$$\Delta_0 R_1^{010} = \Delta_0 R_1^{020} + \Delta_0 Z_1^{020} = -0,0125 + 0,17 = 0,157 \text{ мм};$$

$$(\Delta_0 R_1^{020} = \frac{\Delta_0 R_1^{020} + \Delta_0 R_1^{020}}{2} = \frac{-0,025 + 0}{2} = -0,0125 \text{ мм});$$

$$R_1^{010} = R_{1 \text{ ном}}^{010} + \Delta_0 R_1^{010} \pm \frac{\delta R_1^{010}}{2} = 15,25 + 0,157 \pm \frac{0,14}{2} = 15,48_{-0,14},$$

$$\text{або } D_1^{010} = 2R_1^{010} = 31_{-0,28};$$

$$\text{в) } R_{1 \text{ ном}}^0 = R_{1 \text{ ном}}^{010} + Z_{1 \text{ ном}}^{010} = 15,48 + 0 = 15,48 \approx 15,5 \text{ мм};$$

$$\Delta_0 R_1^0 = \Delta_0 R_1^{010} + \Delta_0 Z_1^{010} = -0,07 + 0,92 = 0,85 \text{ мм};$$

$$R_1^0 = R_{1 \text{ ном}}^0 + \Delta_0 R_1^0 \pm \frac{\delta R_1^0}{2} = 15,5 + 0,85 \pm \frac{0,5}{2} = 16,6_{-0,5};$$

$$D_1^0 = 2R_1^0 = 33,2_{-1} = 32,5_{-0,3};$$

$$\Gamma) R_{3 \text{ НОМ}}^0 = R_{3 \text{ НОМ}}^{015} + Z_{3 \text{ НОМ}}^{015} = 26 + 0 = 26 \text{ мм};$$

$$\Delta_0 R_3^0 = \Delta_0 R_3^{015} + \Delta_0 Z_3^{015} = -0,03 + 1,43 = 1,4 \text{ мм};$$

$$(\Delta_0 R_3^{015} = \frac{\Delta_{\text{Н}} R_3^{015} + \Delta_{\text{В}} Z_3^{015}}{2} = \frac{-0,06 + 0}{2} = -0,03 \text{ мм});$$

$$R_3^0 = R_{3 \text{ НОМ}}^0 + \Delta_0 R_3^0 \pm \frac{\delta R_3^0}{2} = 26 + 1,4 \pm \frac{0,6}{2} = 27,7_{-0,6};$$

$$D_3^0 = 2R_3^0 = 55,5_{-1,2} = 54,7_{-0,4}^{+0,8};$$

$$\Delta) R_{2 \text{ НОМ}}^0 = R_{2 \text{ НОМ}}^{015} + Z_{2 \text{ НОМ}}^{015} = 10 + 0 = 10 \text{ мм};$$

$$\Delta_0 R_2^0 = \Delta_0 R_2^{015} + \Delta_0 Z_2^{015} = -0,035 + 1,38 = 1,35 \text{ мм};$$

$$(\Delta_0 R_2^{015} = \frac{\Delta_{\text{Н}} R_2^{015} + \Delta_{\text{В}} Z_2^{015}}{2} = \frac{-0,07 + 0}{2} = -0,035 \text{ мм});$$

$$R_2^0 = R_{2 \text{ НОМ}}^0 + \Delta_0 R_2^0 \pm \frac{\delta R_2^0}{2} = 10 + 1,35 \pm \frac{0,5}{2} = 11,6_{-0,5};$$

$$D_2^0 = 2R_2^0 = 23,2_{-1} = 22,5_{-0,34}^{+0,7}.$$

Усі операційні розміри (лінійні і діаметральні) вносять у відповідні карти технологічних процесів. По отриманим розрахунковим розмірам заготовки виконують її креслення з усіма технічними вимогами (нахили, зміщення перекося і т.і.)

Порівнюючи попередньо намічений маршрут обробки з кінцевим варіантом технологічного процесу, неважко помітити, що не тільки збільшилась кількість обробок торцю 8 (намічалось 2 обробки), в результаті розрахунків отримали 3 обробки), але змінив і сам характер обробки (введено суперфініш). Ці зміни введені в результаті розмірного аналізу, без як обуло б неможливо отримати деталі у відповідності з вимогами креслення.

Висновок: У методичних вказівках викладена методика проведення розмірного аналізу технологічних процесів механічної обробки, без якого неможливо спроектувати технологічний процес, що забезпечує виготовлення деталі у відповідності з її розмірними параметрами на кресленні.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Медвідь М.В., Шабайкович В.А. Теоретичні основи технології машинобудування. Для студентів машинобудівних спеціальностей технічних вузів. – Львів: Вища школа, 1976. – 250 с.

2. Руденко П.О. Проектування технологічних процесів у машинобудуванні. – К.: «Вища школа», 1993. – 369 с.

3. РОЗМІРНЕ МОДУЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ. [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка» /В.П. Приходько; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: : pdf – 15,2 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 249 с.

4. Складальні процеси в машинобудуванні : навчальний посібник / укладач: В.В. Савуляк – Вінниця : ВНТУ, 2014. – 99 с.

5. Тексти (конспект) лекцій з дисципліни «Розмірні розрахунки при проектуванні технологічних процесів» для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка» освітньої програми «Технології машинобудування» усіх форм навчання / Укл. В.О. Логомінов. – Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка» , 2020. – 40 с.

6. Технологія машинобудування: Посібник – довідник кваліфікаційних робіт: Навч. посібник / І.І. Юрчишин, Я.М. Литвиняк, І.Є. Грицай, М.Л. Кукляк, Я.М. Кусий, В.В. Ступницький, В.А. Яцюк, М.А. Кук, Є.М. Махоркін, В.П. Свізінський / За ред.. І.І. Юрчишина. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка». 2009. – 528 с.
ISBN 978-966-846-2.

7. Технологічні основи машинобудування. [Електронний ресурс] : навчальний посібник для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка»; 133 «Галузеве машинобудування» / Ю.М. Малафєєв ; КПІ ім.. Ігоря Сікорського. – Електронні тестові дані (1 файл : 10Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 201 с.

ДОДАТКИ

Таблиця 1. Похибки закріплення деталей, мкм

Методи отримання базових поверхонь	Установка в цангу до упору							
	в радіальному напрямку				в осьовому напрямку			
	Інтервали діаметрів, мм							
	10-18	18-30	30-50	50-80	10-80	18-30	30-50	50-80
Холоднотягнута калібрована поверхня	50	60	70	80	50	60	70	80
Попередньо оброблена поверхня	50	60	70	80	50	60	70	80
Чистова оброблена поверхня	25	30	35	40	25	30	35	40
Методи отримання базових поверхонь	Установка в патроні з гвинтовим затиском							
	в радіальному напрямку				в осьовому напрямку			
	Інтервали діаметрів, мм							
	до 50	50-120	120-260	260-500	до 50	50-120	120-260	260-500
Литво в піщані форми	300	400	500	600	100	120	150	200
Литво в кокіль	200	300	400	500	80	100	120	150
Литво в оболонкові форми	100	150	200	250	50	80	100	120
Гаряча штамповка на молотах	300	400	500	600	100	120	150	200
Штамповка на пресах	200	300	400	500	80	100	120	150
Обробка чорнова	100	150	200	250	50	80	100	120
Обробка чистова	50	80	100	120	30	50	80	100

Методи отримання базових поверхонь	Установка в пневматичному патроні									
	в радіальному напрямку				в осьовому напрямку					
	Інтервали діаметрів, мм									
	до 50	50-120	120-260	260-500	до 50	50-120	120-260	260-500		
Литво в піщані форми	250	32	400	500	80	90	120	150		
Литво в кокіль	160	250	320	400	65	75	100	120		
Литво в оболонкові форми	80	120	160	200	40	65	80	100		
Гаряча штамповка на молотах	250	320	400	500	80	90	120	150		
Штамповка на пресах	160	250	320	400	65	75	100	120		
Обробка чорнова	80	120	160	200	40	65	80	100		
Обробка чистова	40	65	80	100	25	40	65	80		
Методи отримання базових поверхонь	Установка на опорні штифти пристрою при ручному затиску деталі									
	Відстань між опорами, мм									
	6-18		18-50		50-120		120-360		260-500	
Литво в піщані форми	80		125		175		225		325	
Литво в кокіль	50		100		120		150		200	
Литво в оболонкові форми	40		80		100		120			
Гаряча штамповка	80		125		175		225		325	
Гарячекатана поверхня	80		125		175		225		325	
Попередньо оброблена поверхня	80		100		120		150		170	
Чистова обробка поверхні	50		80		100		120		150	
Шліфувана поверхня	40		70		90		100		130	

Методи отримання базових поверхонь	Установка на опорні штифти пристрою при пневматичному затиску деталі				
	Відстань між опорами, мм				
	6-18	18-50	50-120	120-360	260-500
Литво в піщані форми	70	100	150	200	250
Литво в кокіль	60	90	100	125	160
Литво в оболонкові форми	40	70	80	100	120
Гаряча штамповка	70	100	150	200	250
Гарячекатана поверхня	60	90	100	130	160
Попередньо оброблена поверхня	40	60	75	80	100
Чистова обробка поверхні	40	60	75	80	100
Шліфувана поверхня	40	70	90	100	130
Методи отримання базових поверхонь	Установка на опорні пластини при ручному затиску				
	Відстань між опорами, мм				
	6-18	18-50	50-120	120-360	260-500
Литво в піщані форми	80	120	150	200	250
Литво в кокіль	60	80	100	120	140
Литво в оболонкові форми	50	70	90	100	
Гаряча штамповка	80	100	150	200	250
Гарячекатана поверхня	80	100	140	180	220
Попередньо оброблена поверхня	50	70	90	100	120
Чистова обробка поверхні	40	60	80	100	120
Шліфувана поверхня	30	40	60	80	100

Методи отримання базових поверхонь	Установка на опорні пластини при пневматичному затиску деталі				
	Відстань між опорами, мм				
	6-18	18-50	50-120	120-360	260-500
Литво в піщані форми	70	100	120	160	200
Литво в кокіль	55	65	80	100	110
Литво в оболонкові форми	40	55	70	80	
Гаряча штамповка	70	100	120	160	200
Гарячекатана поверхня	70	90	110	150	
Попередньо оброблена поверхня	40	55	70	90	110
Чистова обробка поверхні	30	40	60	80	100
Шліфувана поверхня	20	30	50	70	80

Таблиця 2. Середня економічна точність розмірів, отриманих методом литва

Вид литва	Розміри для вимірювання, мм					
	до 50	50-120	120-260	260-500	500-800	800-1250
Литво у земляні форми I кл.	$\pm 0,2$	$\pm 0,3$	$\pm 0,6$	± 1	$\pm 1,4$	$\pm 1,6$
Литво у земляні форми II кл.	$\pm 0,5$	$\pm 0,8$	± 1	$\pm 1,5$	$\pm 2,5$	± 3
Литво у земляні форми III кл.	± 1	$\pm 1,5$	± 2	$\pm 2,5$	± 4	± 5
Литво в кокіль з литими необроблюваними поверхнями	$\pm 0,4$	$\pm 0,5$	± 1	$\pm 1,2$	$\pm 0,25$	± 2
Литво в кокіль з оброблюваними поверхнями	$\pm 0,2$	$\pm 0,3$	$\pm 0,6$	± 1	$\pm 1,2$	$\pm 1,5$
Литво в оболонкові форми	$\pm 0,15$	$\pm 0,2$	$\pm 0,4$	$\pm 0,5$		
Литво по виплавленим моделям	$\pm 0,1$	$\pm 0,12$	$\pm 0,15$	$\pm 0,25$		
Литво під тиском	$\pm 0,05$	$\pm 0,07$	$\pm 0,1$	$\pm 0,15$		

Таблиця 3. Середня економічна точність розмірів, отриманих ковкою і штамповкою (вали, важелі, кронштейни)

Вид обробки	Довжина, мм							
	150-180				180-260			
	Діаметр або товщина, мм							
	18-30	30-50	50-80	80-120	30-50	50-80	80-120	120-180
	Точність діаметральних і поперечних розмірів, мм							
Вільна ковка	±1	±1,5	±2	±2,5	±1,5	±2,5	±2,5	±3,5
Штамповка звичайної точності	+1 - 0,5	+1,2 - 0,6	+1,4 - 0,7	+1,6 - 0,8	+1,4 - 0,6	+1,6 - 0,8	+1,8 - 0,9	+2 - 1
Штамповка на молотах підвищеної точності	+0,7 - 0,3	+0,8 - 0,4	+0,9 - 0,5	+1 - 0,5	+0,9 - 0,5	+1,1 - 0,6	+1,2 - 0,6	+1,3 - 0,7
Вид обробки	Точність повздовжніх розмірів, мм							
Вільна ковка	±1,5	±2	±3	±4	±2	±3	±4	±5
Штамповка на молотах звичайної точності	+1 - 0,5	+1,2 - 0,6	+1,6 - 0,8	+1 - 1	+1,4 - 0,7	+1,8 - 0,9	+2,2 - 1,1	+2,8 - 1,4
Штамповка на молотах підвищеної точності	+0,8 - 0,4	+1 - 0,5	+1,2 - 0,6	+1,6 - 0,8	+1,2 - 0,6	+1,4 - 0,7	+1,8 - 0,9	+2 - 1

Продовження таблиці 3

Вид обробки	Довжина, мм							
	260-360				360-500			
	Діаметр або товщина, мм							
	30-50	50-80	80-120	120-180	30-50	50-80	80-120	120-180
	Точність діаметральних і поперечних розмірів, мм							
Вільна ковка	±2	±2,5	±3	±5	±2	±3	±4	±5
Штамповка на молотах звичайної точності	+1,6 - 0,8	+1,8 - 0,9	+2,2 - 1,1	+2,4 - 1,2	+2 - 1	+2,2 - 1,1	+2,4 - 1,2	+2,8 - 1,4
Штамповка на молотах підвищеної точності	+1,2 - 0,6	+1,3 - 0,6	+1,4 - 0,7	+1,6 - 0,8				

Вид обробки	Точність повздовжніх розмірів, мм							
	±3	±4	±5	±6	±3	±5	±6	±7,5
Вільна ковка	±3	±4	±5	±6	±3	±5	±6	±7,5
Штамповка на молотах звичайної точності	+1,6 - 0,8	+2 - 1	+2,6 - 1,2	+3,2 - 1,6	+2 - 1	+2,4 - 1,2	+2,8 - 1,4	+3,6 - 1,8
Штамповка на молотах підвищеної точності	+1,4 - 0,7	+1,6 - 0,8	+2 - 1	+2,2 - 1,1				

Таблиця 4. Середня економічна точність розмірів, отриманих ковкою і штамповкою (диски, барабани, стакани, фланці)

Вид обробки	Висота виробу, мм							
	18-30				30-50			
	50-80	80-120	120-200	200-300	50-80	80-120	120-200	200-300
	Точність діаметральних розмірів, мм							
Вільна ковка	±1,2	±2	±2,5	±4				
Штамповка звичайної точності	+0,8 - 0,4	+1,7 - 0,5	+1,4 - 0,7	+2 - 1	+0,9 - 0,4	+1,2 - 0,6	+1,4 - 0,7	+2 - 1
Штамповка на молотах підвищеної точності	+0,6 - 0,3	+0,8 - 0,4	+1 - 0,5	+1,4 - 0,7	+0,6 - 0,3	+0,8 - 0,4	+1 - 0,5	+1,4 - 0,7
Штамповка на ГКМ	+0,6 - 0,3	+0,7 - 0,4	+0,8 - 0,4	+0,6 - 0,3	+0,6 - 0,3	+0,8 - 0,4	+1 - 0,5	
Вид обробки	Точність повздовжніх розмірів, мм							
Вільна ковка					±2	±2	±2,5	±2,5
Штамповка на молотах звичайної точності		+1 - 0,5	+1,4 - 0,7	+2 - 1	+1,1 - 0,6	+1,4 - 0,7	+1,8 - 0,9	+2,2 - 1,1
Штамповка на молотах підвищеної точності		+0,8 - 0,4	+1 - 0,5	+1,4 - 0,7	+0,8 - 0,4	+1,1 - 0,5	+1,2 - 0,6	+1,5 - 0,8
Штамповка на ГКМ	+0,7 - 0,3	+0,8 - 0,4	+1 - 0,5		+0,8 - 0,4	+1 - 0,5	+1,2 - 0,6	

Таблиця 5. Середня економічна точність розмірів, отриманих з прокату
(круг, квадрат,шестигранник і інші)

Вид обробки	Поперечні розміри, мм							
	50- 80	80- 120	120- 200	200- 300	50- 80	80- 120	120- 200	200- 300
	Точність діаметральних розмірів, мм							
Гарячекатана сталь звичайної точності	+0,3 - 0,5	+0,4 - 0,5	+0,4 - 0,7	+0,4 - 1	+0,4 - 1,1	+0,5 - 1,3	+6,4 - 1,7	+0,8 - 2
Гарячекатана сталь підвищеної точності	+0,2 - 0,3	+0,2 - 0,4	+0,2 - 0,6	+0,2 - 0,9	+0,3 - 1	+0,4 - 1,2	+0,5 - 1,5	+0,6 - 1,8
Холоднотягнута сталь нормальної точності	-0,12	-0,14	-0,17	-0,2	-0,2	-0,23		
Холоднотягнута сталь калібрована	-0,24	-0,28	-0,34	-0,4	-0,6			
Холоднотягнута сталь калібрована високої точності	Відповідно до ДСТУ 1022							
Вид обробки	Точність різання прокату, мм							
Рубка на ножицях і пресах	2,5	3	4					
Розрізання приводними ножівками	2	2,5	3	3,5	4	4	4,5	4,5
Розрізання дисковими пилками на відрізних верстатах		2,5	3	3,5	4	4	4,5	4,5
Розрізання дисковими фрезами і відрізними різцями	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,8	1	

Таблиця 6. Шорсткість і величина дефектного шару в залежності від методу отримання поверхонь

Метод обробки	Шорсткість R_z , мкм	Дефектний шар T , мкм
Литво у земляні форми при ручній формовці	100-500	200-600
Литво у земляні форми при машинній формовці	80-300	150-400
Литво у металеві форми	100-200	100-300
Відцентрове литво	40-100	100-200
Литво в оболонкові форми	20-80	150-250
Литво по виплавним моделям	10-40	80-150
Литво під тиском	10-40	80-150
Вільна ковка	300-500	400-600
Штамповка на молотах звичайної точності	100-250	200-400
Штамповка на молотах підвищеної точності	80-200	150-300
Прокат гарячекатаний звичайної точності	80-150	100-150
Прокат підвищеної точності	50-100	80-150
Прокат холодно тягнутий калібрований	40-80	50-100
Рубка на пресах і ножицях	100-300	150-300
Точіння чорнове	80-150	50-100
Точіння чистове	15-25	20-30
Точіння тонке	6-10	10-20
Свердління	80-150	50-100
Свердління глибоке	15-30	25-50
Зенкерування чорнове	30-50	40-50
Зенкерування чистове	20-30	30-40
Розгортання попереднє	10-20	15-25
Розгортання чистове	6-10	5-10
Фрезерування чорнове	80-150	80-100
Фрезерування чистове	20-50	40-60
Протягування	6-10	10-20
Розточування чорнове	40-80	10-20
Розточування чистове	10-20	15-30
Шліфування попереднє	20-40	30-50
Шліфування чистове	5-10	15-25

Шліфування тонке	1,5-3,5	5-10
Хонінгування	1-3	3-6
Притирання	0,7-2,5	2-5

Таблиця 7. Просторові відхилення поверхонь

Метод отримання поверхні	Діаметр або товщина деталі, мм				
	18-30	30-50	50-80	80-120	120-180
	Питома вгнутість і короблення Δ_i , мкм/мм				
Литво в земляні форми деталей типу плит	4	4	3	3	2,5
Литво в металеві форми корпусних деталей	2	2	1	1	0,7
Гаряча штамповка без правки	2,4	2	1,6	1,2	0,8
Гаряча штамповка після правки	0,4	0,3	0,2	0,2	0,15
Прокат гарячекатаний без правки	12	10	10	8	5
Прокат гарячекатаний після правки	2	2	1,5	1	1
Прокат калібрований без правки	4	4	3	3	2
Прокат калібрований після правки	2	2	1,5	1,5	1
Прокат холодно тягнутий без правки	8	6	4	2	
Прокат холодно тягнутий після правки	2	1,5	1	1	
Загартовані деталі після правки	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5
Деталі після гартування ТВЧ	0,5	0,4	0,4	0,3	0,3
Вали після чорнового точіння	$\Delta_i \approx 0,06\Delta_i$ заготовки				
Вали після чистового точіння	$\Delta_i \approx 0,05\Delta_i$ чорнові				
Вали після шліфування	0,06	0,05	0,04	0,03	
Вали, загартовані ТВЧ після шліфування	0,03	0,03	0,02	0,02	
Площини після фрезерування	0,05	0,04	0,04	0,03	0,015

Таблиця 8. Просторові відхилення поверхонь

Метод отримання деталі	Величина висоти деталі або діаметру, мм				
	до 20	20-50	50-100	100-200	300-500
	Відхилення від перпендикулярності торців відносно осі і бокових поверхонь				
Литво у земляну форму	1-1,5	1,5-2	1,5-2,5	2-3	4-5
Литво в металеву форму	0,5-1	0,8-1,2	1-1,5	1,5-2	2-4
Вільна ковка	2	2-3	3-5	5-7	7-10
Гаряча штамповка	0,3-1	0,8-1,5	1-2	2,5-5	5-8
Рубка на ножицях і пресах	0,2-0,4	0,5-1,2	1-2,5		
Різка приводними ножівками	0,2-0,3	0,4-0,6	0,6-0,8	0,8-1	
Різка дисковими пилками	0,2-0,3	0,3-0,5	0,4-0,6	0,5-0,8	
Підрізання торцю чорнове	$\rho = 0,015 (R - r)$				
Підрізання торцю чистове	$\rho = 0,01 (R - r)$ – перепад діаметрів валу				

Таблиця 9. Просторові відхилення поверхонь

Метод отримання	Відстань від отвору до бази				Довжина, мм		
	до 50	50-120	130-260	260-300	до 18	18-50	50-120
	зміщення отворів, мм				питомий перекид, мкм/мм довжини		
Литво у земляні форми	± 1	$\pm 1,5$	± 2	$\pm 2,5$		4-20	3-15
Литво в кокіль	$\pm 0,3$	$\pm 0,7$	± 1	$\pm 2,5$			
Литво по виплавним моделям	$\pm 0,1$	$\pm 0,12$	$\pm 0,15$	$\pm 0,25$	2-4	1,5-3	1-2
Вільна ковка	$\pm 1,5$	± 2	± 3	± 4			
Штамповка звичайної точності	± 1	$\pm 1,5$	± 2	± 5			
Штамповка підвищеної точності	$\pm 0,8$	$\pm 1,2$	$\pm 1,5$	± 3			
Штамповка високої точності	$\pm 0,5$	$\pm 0,6$	$\pm 1,2$	± 2			
Свердління спіральними свердлами по кондуктору	$\pm 0,2$	$\pm 0,25$	$\pm 0,3$	$\pm 0,4$	2,1	0,7	

Свердління спіральними свердлами по розмітці	$\pm 0,5$	$\pm 0,8$	± 1	$\pm 1,5$	3	1	
Свердління глибоких отворів	$\pm 0,2$	$\pm 0,25$	$\pm 0,3$	$\pm 0,4$	1,5	0,6	0,3
Свердління рушничними свердлами	$\pm 0,2$	$\pm 0,25$	$\pm 0,3$	$\pm 0,4$	0,8	0,2	0,1
Зенкерування	$\pm 0,2$	$\pm 0,25$	$\pm 0,3$	$\pm 0,35$	0,8	0,2	0,1
Розточування	$\pm 0,25$	$\pm 0,4$	$\pm 0,5$	$\pm 0,7$			

Таблиця 10. Точність і якість поверхні при обробці зовнішніх циліндричних поверхонь

Метод обробки	Шорсткість поверхні, R_a , мкм	Глибина дефектного шару T , мкм	Квалітет допуску розміру	Ступінь точності форми
Обточування чорнове	50-6,3	120-60	14-13-12	11-12-13
Обточування напівчистове або одноразове	25-1,6	50-20	13-12-11	9-10-11
Обточування чистове	6,3-0,4	30-20	10-9-8	7-8-9
Обточування тонке	1,6-0,8	10-5	9-8-7-6	6-7-8
Шліфування попереднє	6,3-0,4	20	9-8	6-7-8
Шліфування чистове	3,2-0,2	15-5	7-6	4-5-6
Шліфування тонке	1,6-0,1	5	6-5	3-4-5
Притирання, суперфініш	0,8-0,1	5-3	5-4	2-3-4
Обкочування, алмазне вигладжування	0,8-0,05	-	10-5	2-3-4

Таблиця 11. Точність обробки зовнішніх циліндричних поверхонь

Обробка	Технологічні допуски (мкм) на розмір при нормальних діаметрах поверхонь, мм											
	3-6	6-10	10-18	18-30	30-50	50-80	80-120	120-180	180-250	250-315	315-400	400-500
Обточування чорнове	-	-	-	-	620	740	870	1000	1150	1300	1400	1550
Обточування одноразове	120	150	180	210	250	300	350	400	460	520	570	630
Обточування чистове	48	58	70	84	100	120	140	160	185	210	230	250
Обточування тонке	30	36	43	52	62	74	87	100	115	130	140	155
Шліфування попереднє	18	22	27	33	39	46	57	63	72	81	89	97
Шліфування чистове	12	15	18	21	25	30	35	40	46	52	57	63
Шліфування тонке	8	9	11	13	16	19	22	25	29	32	36	40
Притирання, суперфініш	5	6	8	9	11	13	15	18	20	23	25	27

Таблиця 12. Точність поверхонь при обробці отворів

Обробка	Технологічні допуски (мкм) на розмір при нормальних діаметрах поверхонь, мм											
	3-6	6-10	10-18	18-30	30-50	50-80	80-120	120-180	180-250	250-315	315-400	400-500
Свердління	-	-	270	330	390	460	-	-	-	-	-	-
Зенкерування чорнове	-	-	180	210	250	300	350	-	-	-	-	-
Зенкерування литого або прошитого отвору	-	-	110	130	160	190	220	-	-	-	-	-

Зенкерування чистове після чорнового або свердління	-	-	70	84	100	120	140	-	-	-	-	-
Розгортання нормальне	48	58	70	84	100	120	140	160	185	210	230	-
Розгортання точне	30	36	43	52	62	74	87	100	115	130	140	-
Розгортання тонке	18	22	27	33	39	46	57	63	72	81	89	-
Протягування чорнове	-	-	-	-	160	190	220	250	-	-	-	-
Протягування литого або прошитого отвору	-	-	-	-	100	120	140	1600	-	-	-	-
Протягування чистове після чорнового або свердління	-	-	43	52	62	74	87	100	-	-	-	-
Розточування чорнове	120	150	180	210	250	300	350	400	460	520	570	630
Розточування чистове	30	36	43	52	62	74	87	100	115	130	140	150
Розточування тонке	8	9	11	13	16	19	22	25	29	32	36	40
Шліфування попередне	-	-	27	33	39	46	57	63	72	81	89	97
Шліфування чистове	-	-	11	13	16	19	22	25	29	32	36	40
Шліфування тонке	-	-	8	9	11	13	15	18	20	23	25	27
Притирання, хонінгування	4	4	5	6	7	8	10	12	14	16	18	20
Розкочування, калібрування	-	36	43	52	62	74	87	100	115	130	140	155