

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Запорізька політехніка»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до проведення практичних занять з дисципліни «Розмірні розрахунки при проектуванні технологічних процесів виготовлення деталей» для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка» освітньої програми «Технології машинобудування» денної та заочної форм навчання

Методичні вказівки до проведення практичних занять з дисципліни «Розмірні розрахунки при проектуванні технологічних процесів виготовлення деталей» для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка» освітньої програми «Технології машинобудування» денної та заочної форм навчання / Укл. В.О. Логомінов, Н.В. Гончар, Л.О. Тумарченко – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2023. – 42 с.

Укладачі: В.О. Логомінов, доцент каф. ТМБ, канд. техн. наук
Н.В. Гончар, доцент каф. ТМБ, канд. техн. наук
Л.О. Тумарченко, асистент каф. ТМБ

Рецензент: О.Б. Козлова, доцент, канд. техн. наук

Відповідальний
за випуск: С.І. Дядя, доцент, канд. техн. наук, зав.каф. ТМБ

Затверджено на
засіданні кафедри
«Технологія машинобудування»
протокол № 2 від 12.09.2023 р.

Рекомендовано до видання НМК
машинобудівного факультету
протокол № 2
від 14.09.2023 р.

ЗМІСТ

1 Лабораторна робота №1. Підготовка розмірної схеми технологічного процесу.....	4
2 Лабораторна робота №2. Виявлення технологічних розмірних ланцюгів.....	17
3 Лабораторна робота №3. Розв'язання розмірних ланцюгів методом максимуму-мінімуму.....	29
Перелік посилань.....	42

1 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1 ПІДГОТОВКА РОЗМІРНОЇ СХЕМИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

1.1 Основні теоретичні положення

У масовому і серійному виробництві обробка заготовок здійснюється, як правило, на заздалегідь налагоджених верстатах, що дозволяє забезпечувати автоматичне отримання потрібних розмірів деталей.

При проектуванні технологічного процесу (ТП) механічної обробки на кожну операцію розробляють операційний ескіз, а для багатоінструментальної обробки розробляють також схеми настроювання або розрахунково-технологічні карти. У цій документації технолог вказує умовними позначками поверхні базування і кріплення, на поверхні обробки показує розміри і допуски, шорсткість, технічні вимоги. Всі ці характеристики якості поверхні можуть бути проміжними (тобто включати припуск під наступну обробку) або остаточними. Проміжні показники якості встановлюються технологом і тому називаються технологічними, на відміну від конструкторських, які конструктор встановлює при проектуванні виробу.

При обробці поверхонь, пов'язаних з іншими поверхнями лінійними розмірами і технічними вимогами, слід враховувати, що в цьому процесі беруть участь дві поверхні, одна з них підлягає обробці, а друга є та поверхня, від якої має бути витриманий потрібний лінійний розмір. Остання поверхня має назву вимірювальної бази.

При обробці на налагоджуваних верстатах є ще налагоджувальна база, тобто поверхня на верстаті або пристрої, від якої встановлюються (налагоджується) ріжучий інструмент або упор верстата. У багатьох випадках вимірювальна база не співпадає з налагоджувальною базою що, як відомо, приводить до похибок базування.

При розробці ТП механічної обробки кожного разу доводиться розв'язувати проблему вибору баз. Базування заготовок є багатоваріантною задачею. Як призначити технологічні розміри і, перш

за все, налагоджувальні, які дозволили б при мінімальних витратах досягти заданої точності одержуваних розмірів, якщо при цьому немає можливості виконати основні принципи базування – правило єдності і правило постійності баз.

Всі ці запитання вирішує технолог за допомогою розмірного аналізу [1-5].

Під розмірним аналізом розуміють сукупність графо-аналітичних процедур, які здійснюють при розробці ТП механічної обробки. Це – метод виявлення і фіксування розмірних зв'язків оброблюваної заготовки, а також методи розв'язання розмірних ланцюгів.

В задачі розмірного аналізу ТП входить визначення:

- а) технологічних розмірів і допусків;
- б) граничних значень припусків і розрахунок розмірів заготовки;
- г) найбільш раціональної послідовності обробки окремих поверхонь деталей. Які забезпечують потрібну точність лінійних розмірів.

Розв'язання всіх цих задач можливе на підставі виявлення і розрахунку технологічних розмірних ланцюгів. Для виявлення технологічних ланцюгів необхідно розробити ТП механічної обробки заготовки і на його основі скласти розмірну схему ТП.

Розмірний аналіз ТП проводять після визначення способу одержання заготовки, розроблення МОП і МОЗ, схем установки і обробки, вибору технологічного устаткування, визначення мінімальних припусків $z_{i \min}$.

Виявлення розмірних ланцюгів проводять за допомогою карти розмірного аналізу в такій послідовності.

Підготовлюють форму (бланк) карти розмірного аналізу (див. табл. 1.1).

У графі «ескізи, схеми» креслять операційні ескізи – схеми обробки по кожній операції і позиції із зазначенням баз, оброблюваних поверхонь і технологічних розмірів. Технологічний розмір на операційному ескізі і розмірній схемі ТП показують стрілкою з точкою, де точка – є вимірювальна база, стрілка – оброблювана поверхня.

Далі креслять ескіз заготовки із зазначенням необхідних розмірів.

Після цього підготовлюють розмірну схему ТП в наступній послідовності.

Креслять ескіз (зручний, із збільшеними або зменшеними

поверхніми довжини) деталі в одній проекції. Для тіл обертання припустимо накреслити половину деталі по осі симетрії. Для корпусних деталей можуть бути необхідними декілька проекцій в залежності від розташування розмірів.

Над ескізом деталі показують конструкторські розміри довжини з допусками. Конструкторські розміри позначають A_γ , де γ – порядковий номер конструкторського розміру.

На ескізі деталі на торцеві поверхні (поверхні, пов'язані лінійними розмірами і технічними вимогами) наносять припуски відповідно з кількістю раніше прийнятих переходів (див. МОП і МОЗ). Припуск позначають Z_ξ , де ξ – номер поверхні, до якої відноситься припуск.

Всі поверхні заготовки з урахуванням стадії її обробки нумерують зліва направо. Номер кожної поверхні показують внизу під ескізом на горизонтальній лінії.

Через нумеровані поверхні проводять вертикальні лінії.

Між вертикальними лініями проводять розмірні лінії технологічних розмірів. Технологічні розміри позначають S_w , де w – порядковий номер лінійного технологічного розміру, починаючи з першої операції механічної обробки і закінчуючи останньою операцією. Розміри заготовки позначають буквою Z_q , де q – порядковий номер розміру заготовки.

На операційних ескізах обробки бажано пронумерувати торцеві поверхні у відповідності із номерами вертикальних ліній-поверхонь на розмірній схемі ТП. Ця процедура дозволить запобігти помилки при перенесенні відповідних відрізків на розмірну схему ТП. В цьому випадку буде чітко визначено, між якими вертикальними лініями повинен знаходитись певний розмірний відрізок на розмірній схемі ТП. Крім того слід пам'ятати правило, що до вертикальної лінії – торцевої поверхні повинна підходити тільки одна стрілка (поверхню отримують за один прохід). Точка на вертикальній лінії розмірної схеми ТП може бути відсутньою або їх може бути і декілька. Це означає, що дана поверхня не використовується як настроювальна чи вимірювальна база, або, навпаки, використовується один чи декілька разів.

Виконуємо перевірку розмірної схеми ТП на відповідність певним умовам:

- кількість лінійних конструкторських розмірів A_γ плюс кількість

відомих мінімальних припусків Z_{ξ} повинні бути рівні кількості невідомих технологічних розмірів S_w плюс пошукова кількість лінійних розмірів заготовки Z_q :

$$A_{\gamma} + Z_{\xi} = Z_q + S_w, \quad (1.1)$$

або

$$k + m = l + p, \quad (1.2)$$

де k – кількість лінійних конструкторських розмірів A_{γ} ;

m – кількість відомих мінімальних припусків Z_{ξ} ;

l – кількість невідомих технологічних розмірів S_w ;

p – кількість лінійних розмірів заготовки Z_q ;

N – кількість вертикальних ліній на розмірній схемі ТП має дорівнювати:

$$N = K + m + 1 = l + p + 1. \quad (1.3)$$

Як конструкторський розмір A_{γ} , так і припуск Z_{ξ} повинні входити в технологічний розмірний ланцюг 1 раз і при цьому лише A_{γ} , або лише Z_{ξ} .

1.2 Приклад розв'язання задачі

Постановка задачі. Підготувати форму (бланк) карти розмірного аналізу. Накреслити операційні ескізи, схеми обробки по кожній операції і позиції із зазначенням баз, оброблюваних поверхонь і технологічних розмірів.

Побудувати розмірну схему ТП. Для цього накреслити ескіз деталі в одній проекції. Показати конструкторські розміри. На ескізі деталі на торцеві поверхні нанести припуски відповідно з кількістю раніше прийнятих переходів. Пронумерувати торцеві поверхні. Нанести технологічні розміри. Перевірити правильність побудови

розмірної схеми ТП.

Вихідні дані. Деталь – вал-шестерня. Матеріал – Сталь 40. Заготовка – гаряча штамповка, рис. 1.1. Виробництво серійне. Установлено маршрути обробки (МОП) торцевих поверхонь і маршрут виготовлення деталі (МВД), а також призначено припуски і допуски в залежності від стадії обробки поверхні.

Обробка деталі за наступними операціями:

– оп.10 - фрезерування торців та центрування з двох боків на фрезерно-центрувальному полуавтоматі (рис. 1.3);

– оп.15 - обточування валу з правої сторони на токарному верстаті з ЧПК (рис. 1.4);

– оп.20 - обточування валу з лівої сторони на токарному верстаті з ЧПК;

– оп.25 - шліфування ступені та правого торця деталі на круглошліфувальному верстаті;

30) шліфування ступені та лівого торця деталі на круглошліфувальному верстаті.

Значення припусків:

- припуск на шліфування – $Z_{шл}^{\min} = 0,05$ мм;

- припуск на чистове точіння – $Z_{точ.чист.}^{\min} = 0,5$ мм;

- припуск на чистове точіння – $Z_{точ.чорн}^{\min} = 1,0$ мм;

- припуск на фрезерування торців – $Z_{фр}^{\min} = 1,5$ мм.

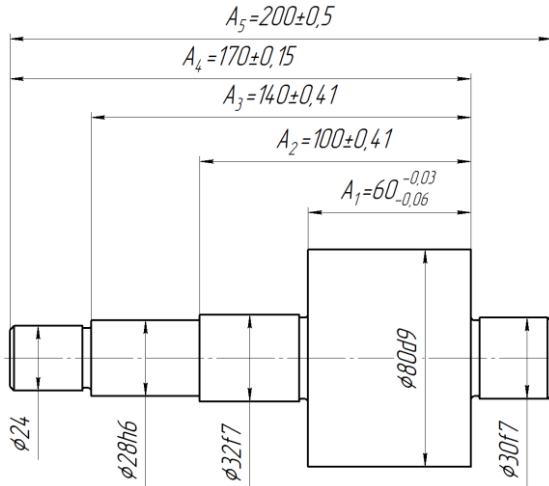


Рисунок 1.1 – Ескіз деталі вал-шестерня

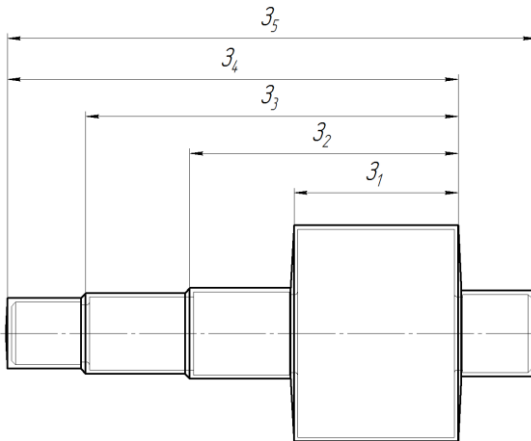


Рисунок 1.2 – Ескіз заготовки

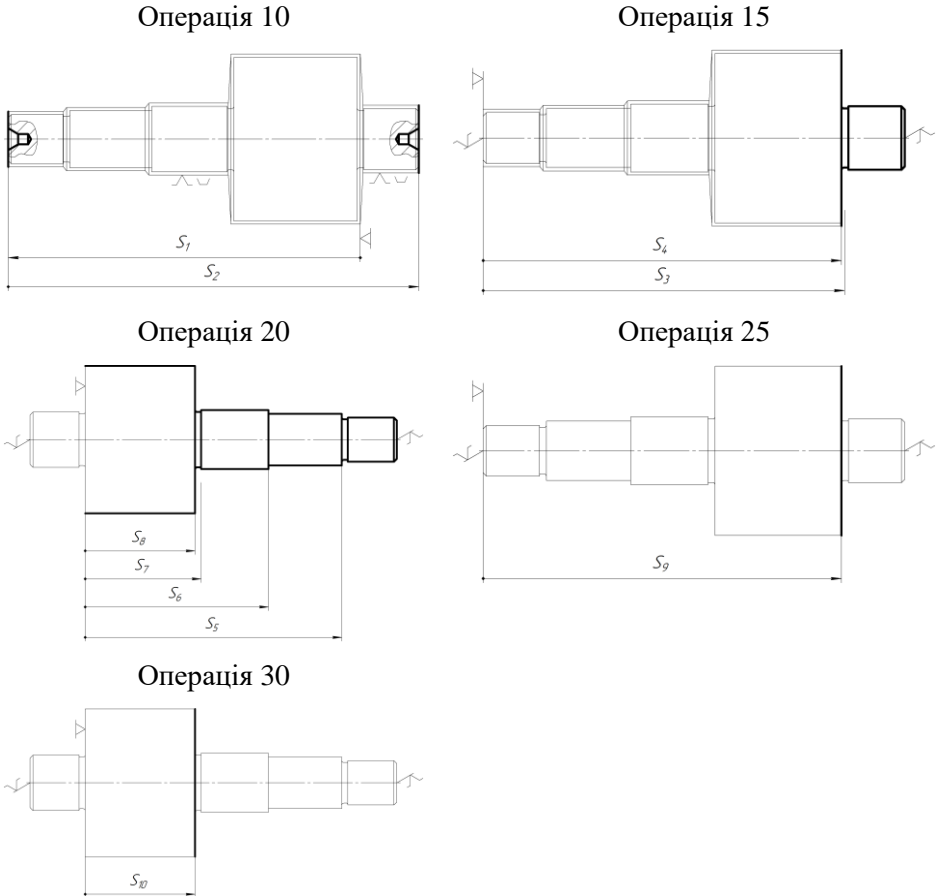


Рисунок 1.3 – Маршрут виготовлення деталі вал-шестерня

Розв'язання прикладу.

Підготовлюємо форму таблиці-карти розрахунку технологічних розмірів виготовлення деталі, див. табл. 3.1.

У графі «Розмірна схема ТП» виконуємо ескіз деталі (зручний, зменшений-збільшений) із лінійними розмірами і прикладеними припусками (рис. 1.4).

Таблиця 1.1 – Розрахунок технологічних розмірів

Номер і найменування операції	Операційні ескізи-схеми обробки	Розмірна схема ТП	Схеми розмірних ланцюгів	Визначити	Замикаюча ланка	Вихідні рівняння розмірних ланцюгів	Допуск	Виконавчий розмір	Припуски
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

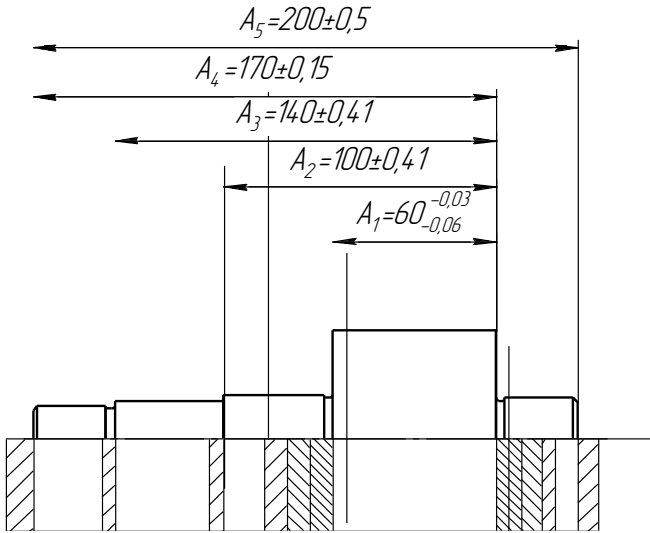


Рисунок 1.4 – Ескіз деталі з прикладеними припусками

На виконаному ескізі через торцеві поверхні, що утворюються в процесі виготовлення деталі, проводимо вертикальні лінії на все поле таблиці-карти. На горизонтальній лінії під ескізом точками фіксуємо ці вертикальні лінії і позначаємо їх арабськими цифрами зліва направо – $\xi = 1, 2, 3, \dots, 10$. Нижче цієї горизонтальної лінії для зручності виявлення замкнутих розмірних контурів показуємо конструкторські розміри A_γ (рис. 1.5).

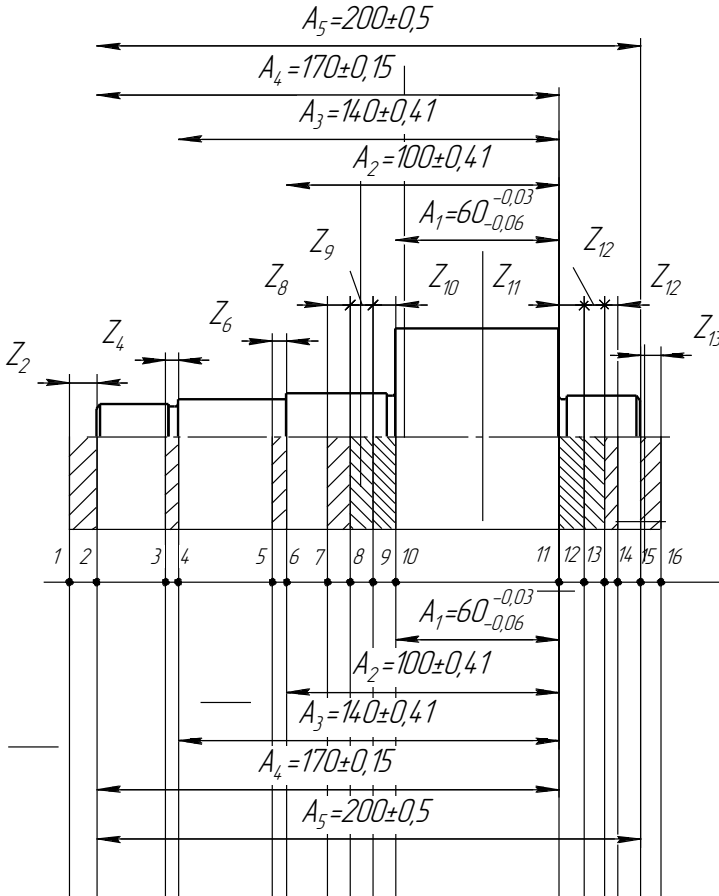


Рисунок 1.5 – Ескіз деталі з виконавчими розмірами

У графі «Операційний ескіз-схема обробки» креслимо схеми обробки заготовки, починаючи із останньої операції. Показуємо осьову опорну, настроювальну базу, елементи різального інструмента і технологічні настроювальні розміри S_W . Позначаємо ці розміри, починаючи з першої операції механічної обробки, див. таблицю-карту на рис. 1.6. Виконуємо ескіз заготовки і проставляємо лінійні розміри заготовки Z_q .

Заповнюємо графу «Номер і найменування операції» (рис. 1.6).

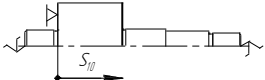
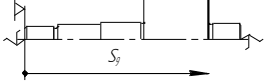
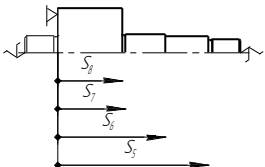
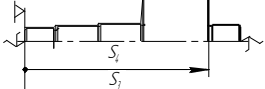
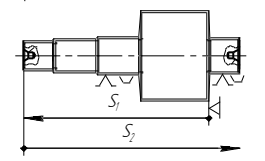
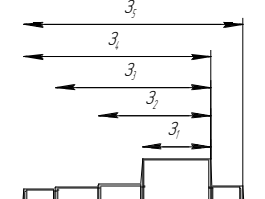
Номер та найменування операції	Операційні ескізи-схеми обробки	Розмірна схема ТП
Оп. 30 Шліф.		
Оп. 25 Шліф.		
Оп. 20 Токарн.		
Оп. 15 Токарн.		
Оп. 10 Фрез-центр.		
Оп. 05 Загот.		

Рисунок 1.6 – Фрагмент таблиці-карти з операційними ескізами

Переносимо розмірні відрізки S_w і Z_q із операційних ескізів-схем обробки на розмірну схему ТП так, щоб точка розмірного відрізка знаходилась на відповідній базовій поверхні – вертикальній лінії, а

стрілка підходила до вертикальної лінії-поверхні, яку обробляють (рис. 1.7).

Виконуємо перевірку розмірної схеми ТП на відповідність певним умовам:

- кількість лінійних конструкторських розмірів A_γ плюс кількість відомих мінімальних припусків Z_ξ повинні бути рівні кількості невідомих технологічних розмірів S_w плюс пошукова кількість лінійних розмірів заготовки Z_q .

Кількість лінійних конструкторських розмірів $A_\gamma - k = 5$;

Кількість відомих мінімальних припусків $Z_\xi - m = 10$;

Кількість невідомих технологічних розмірів $S_w - l = 10$;

Кількість лінійних розмірів заготовки $Z_q - p = 5$.

$$5 + 10 = 10 + 5,$$

Кількість вертикальних ліній на розмірній схемі ТП має дорівнювати:

$$N = K + m + l = l + p + l = 10 + 5 = 16.$$

1.3 Індивідуальне завдання

Завдання за варіантами додається окремо (див. Moodle)

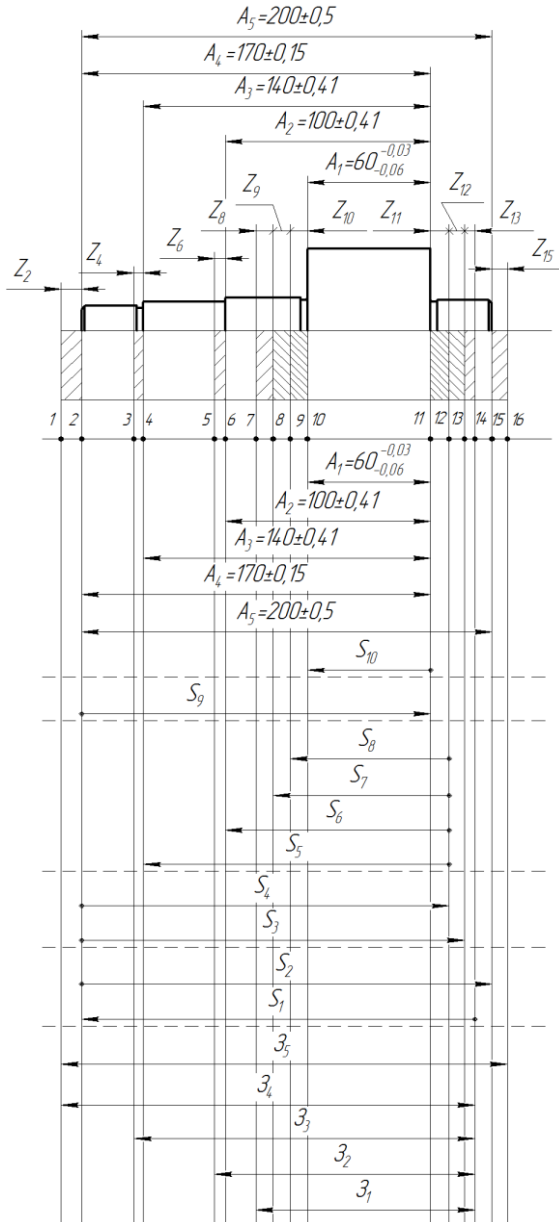


Рисунок 1.7 – Розмірна схема технологічного процесу

1.4 Контрольні питання

1. Що є предметом розмірного аналізу?
2. Які цільові задачі розв'язуються при розмірному аналізі ТП механічної обробки?
3. Що таке розмірна схема ТП?
4. Основні характеристики розмірної схеми ТП?
5. Що є вихідними даними для побудови розмірної схеми ТП?
6. Яку інформацію містить розмірна схема ТП, як її вносять до розмірної схеми, як вона зображується і в якій послідовності розташовується?
7. За якими показниками перевіряють правильність оформлення розмірної схеми ТП?

2 ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ №2 ВИЯВЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РОЗМІРНИХ ЛАНЦЮГІВ

2.1 Основні теоретичні положення

Виявлення за розмірною схемою ТП розмірних зв'язків – замкнених розмірних контурів із мінімальною кількістю складових ланок потребує дотримування наступних правил.

Правило 1 (процедурне). На розмірній схемі ТП необхідно «стати» на точку – початок шуканого розмірного відрізка і «піти» в напрямку стрілки – кінця цього відрізка, але переміщуючись при цьому за іншими відрізками. Пошук можливо здійснювати і навпаки – від стрілки до точки, або за годинниковою стрілкою чи проти годинникової стрілки.

Більш раціонально замкнений розмірний контур можна виявити, якщо його пошук розпочинати не від шуканого технологічного розміру S_w чи Z_q а від замикаючої ланки – припуску Z_ξ або конструкторського розміру A_γ . В цьому випадку перше процедурне правило формулюється так: «стати» на вертикальну лінію, що обмежує припуск Z_ξ , і шукати розмірні відрізки S_w і Z_q , за якими можна прийти до вертикальної лінії, що розташована поряд і обмежує другу сторону припуску Z_ξ . Аналогічно, якщо замикаючою ланкою є A_γ .

Правило 2 (процедурне). На перших операціях (переходах) механічної обробки заготовки, коли технологічні бази (настроювальна і вимірювальна) є чорновими, шукані замкнуті контури можуть не замикатись. В таких випадках замикання завершують одним або декількома розмірами заготовки.

Правило 3 (контрольне). Стрілка шуканого технологічного розміру S_w і припуск, що знімається, Z_ξ або одержуваний конструкторський розмір A_γ , як замикаючі ланки розмірного ланцюга, повинні знаходитись поряд у виявленому розмірному контурі.

Правило 4 (умова). В технологічному розмірному ланцюзі замикаючою ланкою може бути або тільки один конструкторський розмір A_γ або тільки один припуск Z_ξ . В один розмірний контур не

можуть одночасно входити припуск Z_ξ і конструкторський розмір A_γ .

Правило 5 (умова). Визначений конструкторський розмір A_γ і визначений припуск Z_ξ у технологічний розмірний ланцюг можуть входити замикаючою ланкою тільки один раз. Після того, як визначений Z_ξ або A_γ увійшли в замкнутий розмірний контур, при подальшому виявленні замкнутих розмірних контурів за цими відрізками переміщуватись не можливо (тут «глухий кут», ходу нема), слід шукати інший шлях.

Правило 6 (умова). В одному розмірному ланцюзі повинен бути невідомим (шуканим) тільки один технологічний розмір S_w чи Z_q .

Правило 7 (умова). Технологічний відрізок S_w чи Z_q на розмірній схемі ТП в різних варіантах може входити до складу декількох розмірних контурів, які будуть мати при цьому різну кількість складових ланок. До розмірного аналізу слід вибрати замкнений розмірний контур, який має мінімальну кількість складових ланок.

Правило 8 (умова). При виконанні розмірної схеми ТП необхідно акуратно проводити лінії розмірних відрізків, тобто повинне бути їх чітке положення між відповідними вертикальними лініями, і слідкувати за номером цих вертикальних ліній як на схемах обробки, так і на схемах замкнутих розмірних контурів.

2.2 Практична методика виявлення технологічних розмірних ланцюгів

Виявлення технологічних розмірних ланцюгів за розмірною схемою ТП розпочинають з останньої операції ТП, з розміру, який отримують останнім, тобто по схемі зверху-донизу. У такій же послідовності виконується і розв'язання розмірних ланцюгів. При цьому необхідно стежити, щоб у кожному новому розмірному ланцюзі був невідомим тільки один технологічний розмір.

Процедура виявлення технологічного розмірного зв'язку – замкнутого розмірного контуру, що включає шуканий технологічний розмір, полягає у дотриманні першого процедурного правила, за яким необхідно «стати» на розмірній схемі ТП на точку – початок шуканого розмірного відрізка і знайти шлях в кінець цього відрізка, переміщуючись при цьому по розмірному ланцюгу за іншими

відрізками. Якщо шуканий розмірний контур не замикається, то його побудову завершують одним чи декількома вже знайденими розмірами заготовки.

Замикаючою ланкою в технологічному розмірному ланцюзі, як правило, є конструкторський розмір A_7 , який безпосередньо не отримується в даній операції, або припуск Z_5 , як компенсатор похибок попередніх переходів. Ці величини відомі, тобто є вихідними. Невідомими є технологічні розміри S_w і Z_q .

Якщо технологічний розмір на розмірній схемі ТП співпадає з конструкторським, то отримують дволанковий розмірний ланцюг.

Виконують обхід усіх розмірних контурів на розмірній схемі ТП, впевнюються в тому, що ланцюг замкнутий, і записують вихідне рівняння розмірного ланцюга.

У графі «Схеми розмірних ланцюгів» накреслюють схеми виявлених розмірних ланцюгів.

2.3 Приклад розв'язання задачі

Постановка задачі. Визначити технологічні розмірні ланцюги за розмірною схемою ТП виготовлення деталі вал-шестерня.

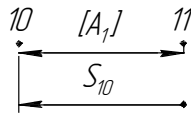
Вихідні дані. Деталь – вал-шестерня, рис.1.1. Матеріал – Сталь 40. Заготовка – гаряча штамповка, рис.1.2. Виробництво серійне. Установлено маршрути обробки (МОП) торцевих поверхонь і маршрут виготовлення деталі (МВД), а також призначено припуски і допуски в залежності від стадії обробки поверхні.

Розв'язання прикладу.

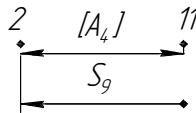
Зверху над розрахунковою таблицею-картою (чи на окрему аркуші) пишемо рядок усіх відомих ланок, що є замикаючими: $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, Z_2, Z_4, Z_6, Z_8, Z_9, Z_{10}, Z_{11}, Z_{12}, Z_{13}, Z_{15}$ і рядок усіх невідомих технологічних розмірів: $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6, S_7, S_8, S_9, S_{10}, Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5$. Потім коли буде виявлено замкнутий розмірний контур, ланка, яка увійшла у розмірний контур, буде викреслена.

Останньою операцією ТП виготовлення вала-шестерні є шліфувальна операція 30 (рис. 1.3). В цій операції невідомим технологічним розміром є розмір S_{10} , що знаходиться між

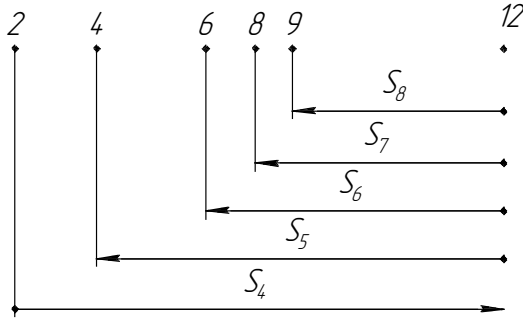
вертикальними лініями 10 і 11 розмірної схеми (рис. 1.6). Для пошуку замкнутого розмірного контуру «стаємо» в точку шуканого відрізка S_{10} , розташованої на лінії 11. Установлюємо, який розмірний відрізок підходить до цієї вертикальної лінії. Бачимо, що до вертикальної лінії 11 підходить розмірний відрізок $[A_1]$ – конструкторський розмір, який другим кінцем підходить до вертикальної лінії 10, тобто утворюється замкнутий розмірний контур: $S_{10} \Rightarrow [A_1]$. Отримали дволанковий розмірний ланцюг, що є свідченням того, що настроювальна і вимірювальна база суміщені – правило єдності баз дотримано. З метою контролю із записаного рядка конструкторських розмірів A_γ і припусків Z_ξ викреслюємо використаний (той, що увійшов в технологічний розмірний ланцюг) як замикаюча ланка A_1 , а також шуканий технологічний розмір S_{10} .



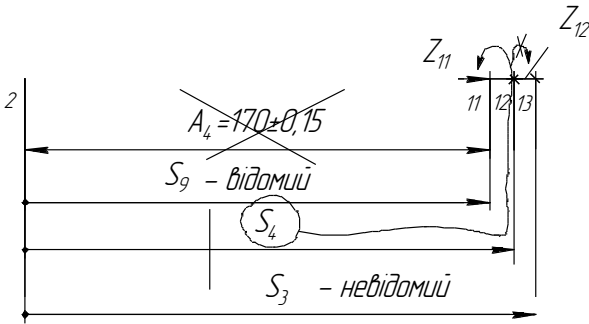
Далі аналізуємо операцію 025 (Шліфувальна). Розмірний ланцюг, що замикається технологічним розміром S_9 , визначається аналогічним чином. В даному випадку також утворюється простий дволанковий замкнутий розмірний контур: $S_9 \Rightarrow [A_4]$. Викреслюємо розмір A_4 зі списку замикаючих ланок, та технологічний розмір S_9 зі списку невідомих технологічних розмірів.



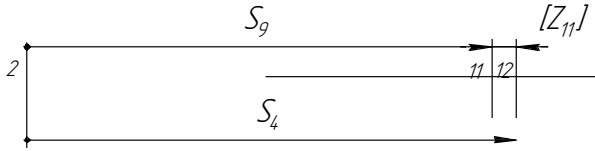
Перед операцією 025 виконується операція 020 (Токарна). Невідомими технологічними розмірами в цій операції є наступні розміри: S_5, S_6, S_7, S_8 . Всі ці розміри починаються від лінії 12, до якої стрілкою підходить невідомий технологічний розмір S_4 . Тому для визначення розмірів S_5, S_6, S_7, S_8 необхідно спочатку визначити технологічний розмір S_4 .



Точка розміру S_4 знаходиться на лінії 2, а стрілка підходить до лінії 12. Установлюємо, який розмірний відрізок підходить до вертикальної лінії 12. Це два відрізки – припуски Z_{11} та Z_{12} . Ми можемо «піти» вздовж Z_{11} або Z_{12} . Якщо підемо направо вздовж Z_{12} , то опинимось на розмірній лінії 13, до якої стрілкою підходить невідомий відрізок S_3 . Якщо «підемо» наліво вздовж Z_{11} , то опинимось на лінії 11. До цієї лінії підходять два відомих розміри: A_4 , який ми вже використовували і тому не можемо взяти його до розрахунку другий раз, та S_9 .

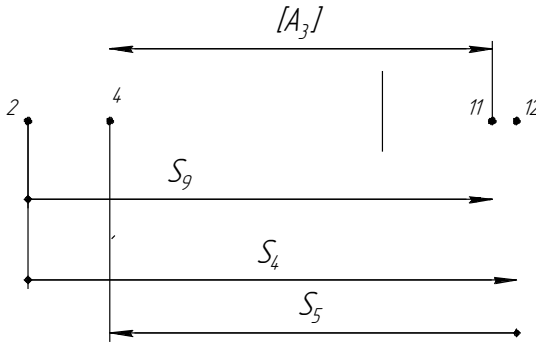


Вибираємо розмірний ланцюг, що складається з Z_{11} , S_4 та S_9 . Замикаючою ланкою в даному розмірному ланцюзі є припуск $[Z_{11}]$. Відповідний розмірний контур $S_4 \Rightarrow S_9 \Rightarrow [Z_{11}]$. Креслимо розмірний ланцюг та викреслюємо припуск Z_{11} зі списку замикаючих ланок, та технологічний розмір S_4 зі списку невідомих технологічних розмірів.



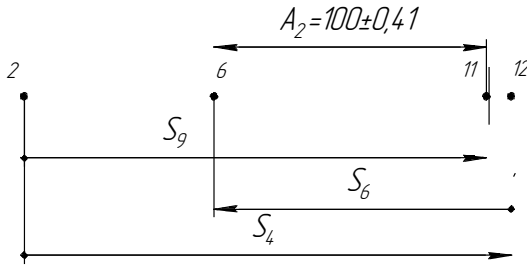
Точка (тобто база) технологічних розмірів S_5 , S_6 , S_7 , S_8 знаходяться на лінії 12. Відомі конструкторські розміри A_2 та A_3 дотикаються лінії 11. Вже визначенні технологічні розміри S_9 та S_4 дозволяють зв'язати лінії 11 та 12 або, іншими словами, технологічну базу розмірів S_4 та S_9 з вимірювальною базою розмірів A_2 та A_3 .

Розмір S_5 визначається з наступного розмірного ланцюга. Креслимо розмірний ланцюг.



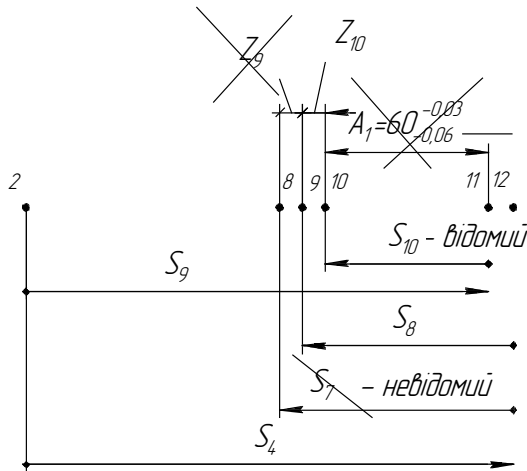
Відповідний розмірний контур $S_5 \Rightarrow [A_3] \Rightarrow S_9 \Rightarrow S_4$. Викреслюємо конструкторський розмір A_3 зі списку замикаючих ланок, та технологічний розмір S_5 зі списку невідомих технологічних розмірів.

Визначимо технологічний розмір S_6 . Він знаходиться аналогічно розміру S_5 .



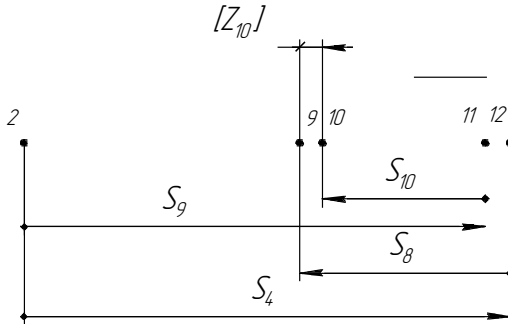
Відповідний розмірний контур $S_6 \Rightarrow [A_2] \Rightarrow S_9 \Rightarrow S_4$. Креслимо розмірний ланцюг та викреслюємо конструкторський розмір A_2 зі списку замикаючих ланок, та технологічний розмір S_6 зі списку невідомих технологічних розмірів.

Визначення технологічних розмірів S_7 , S_8 відрізняється від визначення розмірів S_5 , S_6 . Стрілка розміру S_8 дотична до лінії 9. Справа від цієї лінії розташовано припуск Z_{10} , який, в свою чергу, дотичний до вже визначеного технологічного розміру S_{10} і конструкторського розміру A_1 , який ми вже використовували в розрахунках. Зліва до лінії 9 дотикається припуск Z_9 , який в свою чергу утворює замкнутий контур з невідомим розміром S_7 .



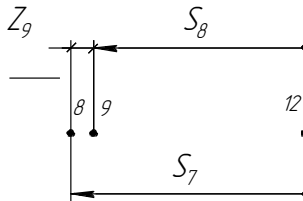
Якщо до розмірного ланцюга входять два невідомі технологічних розміри (S_7 та S_8), то стає неможливим розв'язати

розмірний ланцюг. Виходячи з цього визначаємо технологічний розмір S_8 з наступного розмірного ланцюга. Креслимо розмірний ланцюг.



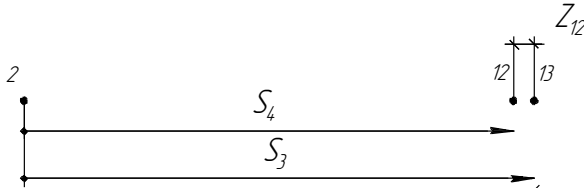
Відповідний розмірний контур $S_8 \Rightarrow [Z_{10}] \Rightarrow S_{10} \Rightarrow S_9 \Rightarrow S_4$. Викреслюємо припуск Z_{10} зі списку замикаючих ланок, та технологічний розмір S_8 зі списку невідомих технологічних розмірів.

Знаходимо технологічний розмір S_7 з простого розмірного ланцюга. Креслимо розмірний ланцюг.



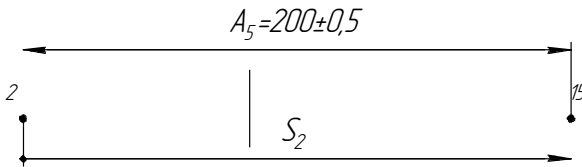
Відповідний розмірний контур $S_7 \Rightarrow [Z_9] \Rightarrow S_8$. Викреслюємо припуск $[Z_9]$ зі списку замикаючих ланок, та технологічний розмір S_7 зі списку невідомих технологічних розмірів.

Наступним визначаємо технологічний розмір S_3 . Креслимо розмірний ланцюг.



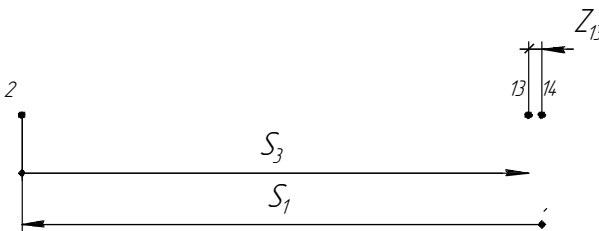
Відповідний розмірний контур $S_3 \Rightarrow [Z_{12}] \Rightarrow S_4$. Викреслюємо припуск Z_{12} зі списку замикаючих ланок, та технологічний розмір S_3 зі списку невідомих технологічних розмірів.

Далі визначаємо технологічний розмір S_2 . Креслимо розмірний ланцюг.



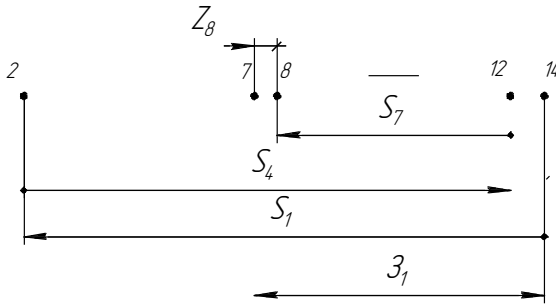
Відповідний розмірний контур дволанкового ланцюга $S_2 \Rightarrow [A_5]$. Викреслюємо конструкторський розмір $[A_3]$ зі списку замикаючих ланок, та технологічний розмір S_5 зі списку невідомих технологічних розмірів.

Визначаємо технологічний розмір S_1 . Відповідний розмірний контур $S_1 \Rightarrow [Z_{13}] \Rightarrow S_3$. Креслимо розмірний ланцюг та викреслюємо припуск $[Z_{13}]$ зі списку замикаючих ланок, та технологічний розмір S_1 зі списку невідомих технологічних розмірів.

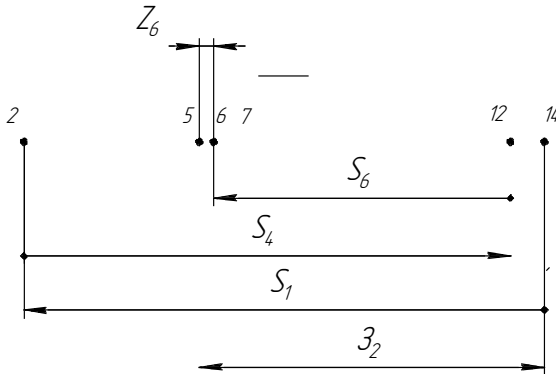


Визначаємо розмір заготовки Z_1 . Відповідний розмірний контур $Z_1 \Rightarrow [Z_8] \Rightarrow S_7 \Rightarrow S_4 \Rightarrow S_1$. Креслимо розмірний ланцюг та викреслюємо

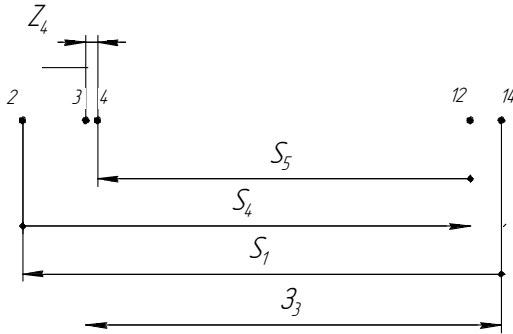
припуск Z_8 зі списку замикаючих ланок, та розмір заготовки $З_1$ зі списку невідомих технологічних розмірів.



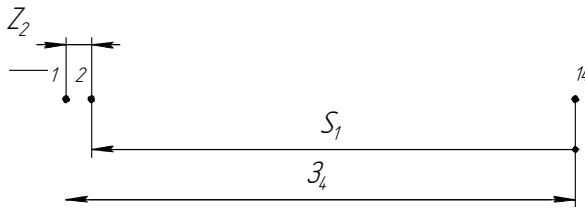
Визначаємо розмір заготовки $З_2$. Відповідний розмірний контур $З_2 \Rightarrow [Z_6] \Rightarrow S_6 \Rightarrow S_4 \Rightarrow S_1$. Креслимо розмірний ланцюг та викреслюємо припуск Z_6 зі списку замикаючих ланок, та розмір заготовки $З_2$ зі списку невідомих технологічних розмірів.



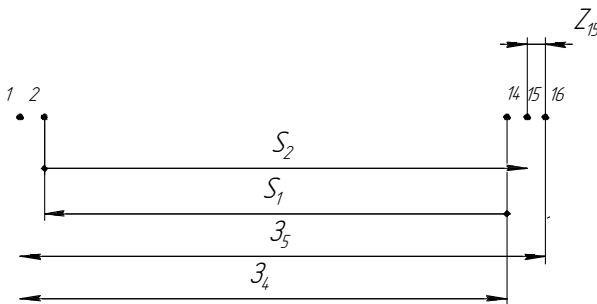
Визначаємо розмір заготовки $З_3$. Відповідний розмірний контур $З_3 \Rightarrow [Z_4] \Rightarrow S_5 \Rightarrow S_4 \Rightarrow S_1$. Креслимо розмірний ланцюг та викреслюємо припуск Z_4 зі списку замикаючих ланок, та розмір заготовки $З_3$ зі списку невідомих технологічних розмірів.



Визначаємо розмір заготовки Z_4 . Відповідний розмірний контур $Z_4 \Rightarrow [Z_2] \Rightarrow S_1$. Креслимо розмірний ланцюг та викреслюємо припуск Z_6 зі списку замикаючих ланок, та розмір заготовки Z_2 зі списку невідомих технологічних розмірів.



Визначаємо розмір заготовки Z_5 . Відповідний розмірний контур $Z_5 \Rightarrow [Z_{15}] \Rightarrow S_2 \Rightarrow S_1 \Rightarrow Z_4$. Креслимо розмірний ланцюг та викреслюємо припуск Z_2 зі списку замикаючих ланок, та розмір заготовки Z_3 зі списку невідомих технологічних розмірів.



Усі 15 невідомих технологічних розмірів увійшли складовими ланками в 15 технологічних розмірних ланцюгів, замикаючими ланками яких є 5 конструкторських розміра і 10 призначених мінімальних припусків.

Креслимо схеми розмірних ланцюгів у відповідну графу таблиці-карти (див. табл. 1). Заповнюємо графи: «Визначити», «Замикаюча ланка». У графі «Визначити» записуємо в послідовності від останньої до першої операцій позначення технологічних розмірів S_w та Z_q , які визначають у виявленій ланці. У графі «Замикаюча ланка» записуємо позначення та числове значення замикаючої ланки, котрі увійшли у виявлений – Z_ξ або A_γ .

2.4 Індивідуальне завдання

Вихідними даними для лабораторної роботи №2 є вирішена лабораторна робота №1.

2.5 Контрольні питання

1. В чому полягає процедура пошуку розмірного ланцюга для визначення невідомого технологічного розміру – основні кроки пошуку замкнутого розмірного контуру?

2. Які розміри на розмірній схемі ТП є замикаючими ланками, а які – складовими ланками?

3. Назвіть методи призначення припусків на обробку торцевих поверхонь деталей?

3 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3 РОЗВ'ЯЗАННЯ РОЗМІРНИХ ЛАНЦЮГІВ МЕТОДОМ МАКСИМУМУ-МІНІМУМУ

Відомо, що існує два методи розв'язання розмірних ланцюгів: метод максимуму-мінімуму (max-min) та ймовірнісний метод.

Метод максимуму-мінімуму гарантує повну відсутність браку (відмови), потребує менше інформації про складові ланки i , відповідно, має меншу трудомісткість розрахунків. Цей метод допускає можливість будь-якого, часто небажаного сполучення граничних значень складових ланок розмірного ланцюга. Ймовірність виникнення таких сполучень при обробці заготовок невелика, однак при цьому доводиться робити більш жорсткими допуски складових ланок.

Ймовірнісний метод позбавлений цього недоліку. Він враховує закономірність розподілу при обробці розмірів, що витримуються. Допуски складових ланок, розраховані цим методом, не мають зайвого запасу точності, що зрештою дозволяє знижувати витрати на механічну обробку. Разом з тим ймовірнісний метод розрахунку допускає можливість браку, є більш складним і трудомістким.

Метод розв'язання технологічних розмірних ланцюгів вибирають в залежності від кількості складових ланок розмірного ланцюга. Якщо кількість складових ланок $n \leq 4$, то розрахунок проводять за методом max-min. У випадку, коли $n \geq 5$, розрахунок проводять ймовірнісним методом.

Методика розрахування технологічних розмірних ланцюгів залежить також від того, є замикаючою ланкою розмір припуску чи конструкторський розмір.

3.1. Основні розрахункові формули теорії розмірних ланцюгів

Основні розрахункові формули теорії розмірних ланцюгів наведено нижче.

Номінальне значення замикаючої ланки:

$$A_{\Delta} = \sum_{i=1}^n A_i = \sum_{j=1}^{n_j} A_j - \sum_{\eta=1}^{n_{\eta}} A_{\eta}, \quad (3.1)$$

де A_i – складова ланка розмірного ланцюга;

$i=1, 2, 3, \dots, n$ – номер складової ланки;

A_j – збільшувальна ланка розмірного ланцюга;

$j=1, 2, 3, \dots, n_j$ – номер збільшуваної складової ланки;

A_{η} – зменшувальна ланка розмірного ланцюга;

$\eta=1, 2, 3, \dots, n_{\eta}$ – номер зменшувальної складової ланки;

$n=n_j+n_{\eta}$ – кількість складових ланок розмірного ланцюга.

Збільшувальна ланка – це ланка при збільшені якої, замикаюча ланка збільшується при незмінності останніх складових ланок.

Зменшувальна ланка – це ланка при збільшені якої, замикаюча ланка зменшується при незмінності останніх складових ланок.

Граничні значення замикаючої ланки:

$$A_{\Delta \max} = \sum_{j=1}^{n_j} A_{j \max} - \sum_{\eta=1}^{n_{\eta}} A_{\eta \min} \cdot \quad (3.2)$$

$$A_{\Delta \min} = \sum_{j=1}^{n_j} A_{j \min} - \sum_{\eta=1}^{n_{\eta}} A_{\eta \max} \cdot \quad (3.3)$$

Допуск замикаючої ланки:

$$TA_{\Delta} = \sum_{i=1}^n TA_i = \sum_{j=1}^{n_j} TA_j + \sum_{\eta=1}^{n_{\eta}} TA_{\eta} = A_{\Delta \max} - A_{\Delta \min} \cdot \quad (3.4)$$

Методика розрахування технологічних розмірних ланцюгів залежить від того, чиє замикаючою ланкою розмір припуску чи конструкторський розмір.

У технологічних розмірних ланцюгах часто зустрічається припуск як складова ланка. Таку ланку слід приймати замикаючою, тому що припуск безпосередньо не отримують при обробці, а також

тому, що припуск акумулює похибки попередніх переходів.

Щоб виключити можливість отримання при розрахунках $z_i \leq 0$, слід користуватися при розрахунках $z_{i \min}$, а не номінальним значенням z_i .

Мінімальний розмір припуску визначають за таблицями довідкової літератури або за формулою:

$$z_{i \min} = Rz_{i-1} + h_{i-1} + \rho_{i-1} + \varepsilon_i, \quad (3.5)$$

де i – номер технологічного переходу по МОП.

Визначивши тим чи іншим методом $Z_{i \min}$, складають рівняння розмірного ланцюга відносно $Z_{i \min}$:

$$Z_{i \min} = \sum_{j=1}^{n_j} S_{j \min} - \sum_{v=1}^{n_v} S_{v \max} \quad (3.6)$$

де $S_{j \min}$ – мінімальний розмір збільшувальної ланки розмірного ланцюга;

$S_{v \max}$ – максимальний розмір зменшувальної ланки;

n_j – кількість збільшувальних ланок;

n_v – кількість зменшувальних ланок розмірного ланцюга.

Оскільки в кожному розмірному ланцюзі має бути тільки одна невідома складова ланка, то задача розв'язання наведеного вище рівняння полягає в тому, щоб знайти невідому ланку, яка при цьому може бути або збільшувальною, або зменшувальною ланкою. Позначимо шуканий розмір через S_x .

Якщо шуканий розмір є зменшувальною ланкою, то її величина дорівнює:

$$S_{xv \max} = \sum_{j=1}^{n_j} S_{j \min} - \sum_{v=1}^{n_v-1} S_{v \max} - Z_{i \min} \quad (3.7)$$

Якщо ж шуканий розмір є збільшувальною ланкою, то:

$$S_{xj\min} = Z_{i\min} - \sum_{j=1}^{n_{j-1}} S_{j\min} + \sum_{v=1}^{n_v} S_{v\max} \quad (3.8)$$

Визначивши величину $S_{xv\max}$ і $S_{xj\min}$, встановлюють допуск TS_x в залежності від призначення технологічного переходу (див. МОП). Граничні відхилення EsS_x і EIS_x призначають, звичайно, по h , H або Js .

Визначають номінальний розмір шуканої ланки:

$$S_{xj} = S_{xj\min} + EIS_x \quad (3.9)$$

$$S_{xv} = S_{xv\max} - EsS_x \quad (3.10)$$

Далі визначаємо номінальний розмір припуску і його найбільший граничний розмір $Z_{i\max}$. Для цієї мети складається вихідне рівняння розмірного ланцюга відносно Z_i з вказівкою для всіх складових ланок граничних відхилень. На підставі цього рівняння обчислюється сума номінальних розмірів і граничні відхилення окремо для збільшувальних і зменшувальних ланок.

$$Z_i = \left(\sum_{j=1}^{n_j} S_j \right) \sum_j EsS_j - \left(\sum_{v=1}^{n_v} S_v \right) \sum_v EsS_v + \sum_j EIS_j - \sum_v EIS_v \quad (3.11)$$

За різницею номінальних розмірів збільшуваних і зменшувальних ланок визначають номінальний розмір припуску:

$$z_i = \sum_j S_j - \sum_v S_v, \quad (3.12)$$

А за різницею підсумків граничних відхилень збільшуваних і зменшувальних ланок визначають граничні розміри припуску Z_i і отже, $Z_{i \max}$:

$$EsZ_i = \sum_j EsS_j - \sum_v EIS_v, \quad (3.13)$$

$$EIZ_i = \sum_j EIS_j - \sum_v EsS_v, \quad (3.14)$$

тобто для визначення граничних відхилень Z_i необхідно виконувати віднімання сум за схемою хрест – нахрест. Наприклад:

$$Z = 100_{-0.4}^{+0} - 97_{-0.9}^{+0} = 3 \begin{pmatrix} 0 & -0 \\ -0.4 & -0.9 \end{pmatrix} = 3_{-0.4}^{+0.9},$$

тобто $Z_{\min} = 2,4$; $Z_{\max} = 3,9$.

Граничні значення припуску:

$$Z_{i \max} = Z_i + EsZ_i, \quad (3.15)$$

$$Z_{i \min} = Z_i - EIZ_i. \quad (3.16)$$

Це є контрольне правило, тому що $Z_{i \max}$ відома, прийнята величина.

Якщо замикаючою ланкою розмірного ланцюга є конструкторський розмір A , то розрахунок такого технологічного ланцюга зводиться до визначення номінального розміру, допуску і граничних відхилень шуканого розміру складової ланки по відомим значенням номінальних розмірів, допусків і граничних відхилень замикаючої ланки і складових ланок ланцюга.

Номінальне значення шуканої ланки:

- для збільшуваних складових ланок:

$$S_{xj} = A_{\Delta} - \sum_{j=1}^{n_{j-1}} S_j + \sum_{v=1}^{n_v} S_v ; \quad (3.17)$$

- для зменшувальних складових ланок:

$$S_{xv} = \sum_{j=1}^{n_j} S_j + \sum_{v=1}^{n_{v-1}} S_v - A_{\Delta} . \quad (3.18)$$

Допуск шуканої ланки:

$$TS_x = TA_{\Delta} - \sum_{i=1}^{n-1} TA_i . \quad (3.19)$$

Граничне відхилення шуканої ланки:

- для збільшуваних складових ланок:

$$EsS_{xj} = EsA_{\Delta} + \sum_{v=1}^{n_v} EIS_v - \sum_{j=1}^{n_{j-1}} EsS_j , \quad (3.20)$$

$$EIS_{xj} = EiA_{\Delta} + \sum_{v=1}^{n_v} EsS_v - \sum_{j=1}^{n_{j-1}} EIS_j ; \quad (3.21)$$

- для зменшувальних складових ланок:

$$EsS_{xv} = \sum_{j=1}^{n_j} EIS_j - \sum_{v=1}^{n_{v-1}} EsS_v - EIA_{\Delta} , \quad (3.22)$$

$$EIS_{xv} = \sum_{j=1}^{n_j} EsS_j - \sum_{v=1}^{n_{v-1}} EIS_v - EsA_{\Delta} . \quad (3.23)$$

3.2 Приклад розв'язання задачі

Постановка задачі. Розрахувати технологічні розміри S_w і Z_q та максимальні значення припусків $Z_{\xi_{max}}$, необхідних для реалізації ТП виготовлення вала-шестерні, рис.1.3.

Вихідні дані. Деталь – вал-шестерня рис.1.1. Матеріал – Сталь 40. Заготовка – гаряча штамповка, рис.1.2. Виробництво серійне. Установлено маршрути обробки (МОП) торцевих поверхонь і маршрут виготовлення деталі (МВД), а також призначено припуски і допуски в залежності від стадії обробки поверхні.

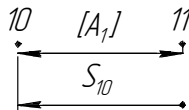
Значення припусків:

- припуск на шліфування – $Z_{шл}^{\min} = 0,05$ мм;
- припуск на чистове точіння – $Z_{точ.чист.}^{\min} = 0,5$ мм;
- припуск на чистове точіння – $Z_{точ.чорн.}^{\min} = 1,0$ мм;
- припуск на фрезерування торців – $Z_{фр}^{\min} = 1,5$ мм;

Розв'язання прикладу.

Визначити технологічний розмір – це означає, що необхідно знайти (призначити) виконавчий розмір, який необхідно проставити на операційному ескізі чи кресленні заготовки. А також визначити максимальне значення припуску, яке необхідно при призначенні режимів різання. Розрахунок ведуть починаючи із останнього переходу механічної обробки і закінчують розмірами заготовки.

Визначаємо технологічний розмір S_{10} . За виявленою раніше схемою технологічного розмірного ланцюга запишемо вихідне рівняння:



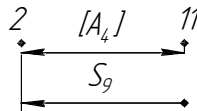
$$[A_1] = S_{10}$$

Визначаємо технологічний розмір:

$$S_{10} = [A_1] = 60_{-0,06}^{-0,03}.$$

Отриманий результат заносимо в таблицю-карту (табл. 1.1).

Визначаємо технологічний розмір S_9 . За виявленою раніше схемою технологічного розмірного ланцюга запишемо вихідне рівняння:



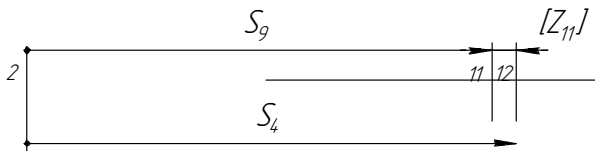
$$[A_4] = S_9.$$

Визначаємо технологічний розмір:

$$S_9 = [A_4] = 170 \pm 0,15.$$

Отриманий результат заносимо в таблицю-карту (табл. 1.1).

Визначаємо технологічний розмір S_4 . За виявленою раніше схемою технологічного розмірного ланцюга запишемо вихідне рівняння:



$$-[Z_{11}] - S_9 + S_4 = 0.$$

$$S_4 = -[Z_{11}] - S_9.$$

$$S_{4 \min} = S_{9 \max} + [Z_{11 \min}].$$

Мінімальне значення технологічного розміру:

$$S_{4 \min} = 170,15 + 0,05 = 170,2 \text{ мм.}$$

Виконавчий розмір будемо проставляти по $js11$ – точіння чистове $TS_4 = 0.25$ або $(\pm 0,13)$. Визначаємо номінал розміру S_4 :

$$S_{4 \text{ ном}} = 170,2 + 0,13 = 170,33 \text{ мм.}$$

Виконавчий розмір $S_4 = 170,33 \pm 0,13$.

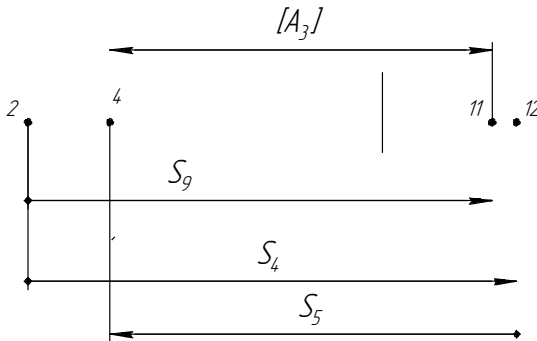
Знаходимо граничні значення припуску Z_{11} :

$$Z_{11} = S_4 - S_9 = 170,33 \pm 0,13 - 170 \pm 0,15 = 0,33 \pm 0,28 \text{ мм.}$$

$$Z_{11 \max} = 0,33 + 0,28 = 0,61 \text{ мм.}$$

Отриманий результат заносимо в таблицю-карту (табл. 1.1).

Визначаємо технологічний розмір S_5 . За виявлену раніше схемою технологічного розмірного ланцюга запишемо вихідне рівняння:



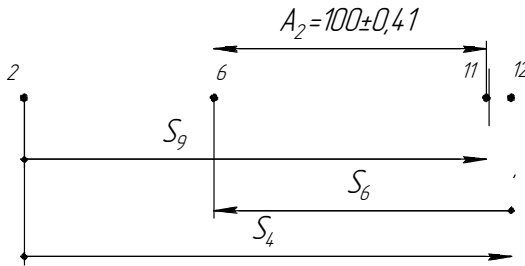
$$-[A_3] + S_5 - S_4 + S_9 = 0.$$

$$S_5 = [A_3] + S_4 - S_9.$$

$$S_5 = 140 \pm 0,41 + 170,33 \pm 0,13 - 170 \pm 0,15 = 140,33 \pm 0,13 \text{ мм.}$$

Отриманий результат заносимо в таблицю-карту (табл. 1.1).

Визначаємо технологічний розмір S_6 . За виявленою раніше схемою технологічного розмірного ланцюга запишемо вихідне рівняння:



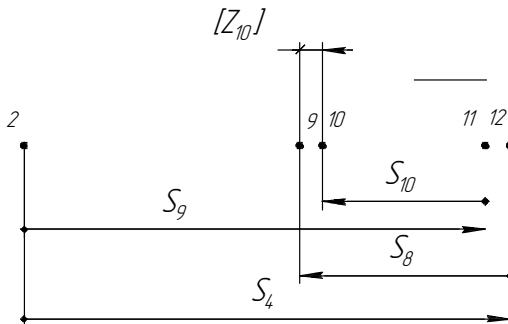
$$-[A_2] + S_6 - S_4 + S_9 = 0.$$

$$S_6 = [A_2] + S_4 - S_9.$$

$$S_6 = 100 \pm 0,41 + 170,33 \pm 0,13 - 170 \pm 0,15 = 100,33 \pm 0,13 \text{ мм.}$$

Отриманий результат заносимо в таблицю-карту (табл. 1.1).

Визначаємо технологічний розмір S_8 . За виявленою раніше схемою технологічного розмірного ланцюга запишемо вихідне рівняння:



$$-[Z_{10}] + S_8 - S_4 + S_9 - S_{10} = 0.$$

$$S_8 = [Z_{10}] + S_4 - S_9 + S_{10}.$$

$$S_{8 \min} = [Z_{10 \min}] + S_{4 \max} - S_{9 \min} + S_{10 \max}.$$

Мінімальне значення технологічного розміру:

$$S_{8 \min} = 0,05 + 170,46 + 59,97 - 169,85 = 60,63 \text{ мм.}$$

Виконавчий розмір будемо проставляти по *IT11* – точіння чистове $TS_8 = 0,2$. Визначаємо номінал розміру S_8 :

$$S_{8 \max} = 60,63 + 0,2 = 60,83 \text{ мм.}$$

Виконавчий розмір $S_8 = 60,8_{-0,17}^{+0,03}$.

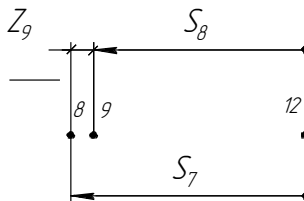
Знаходимо граничні значення припуску Z_{10} :

$$Z_{10} = S_8 - S_4 + S_9 - S_{10} = 60,8_{-0,17}^{+0,03} - 170,33 \pm 0,13 +$$

$$+ 170 \pm 0,15 - 60_{-0,06}^{-0,03} = 0,47_{-0,42}^{+0,37} \text{ мм.}$$

Отриманий результат заносимо в таблицю-карту (табл. 1.1).

Визначаємо технологічний розмір S_7 . За виявленою раніше схемою технологічного розмірного ланцюга запишемо вихідне рівняння:



$$-[Z_9] + S_7 - S_8 = 0.$$

$$S_7 = S_8 + [Z_9].$$

$$S_{7 \min} = S_{8 \max} + [Z_{9 \min}].$$

Мінімальне значення технологічного розміру:

$$S_{7 \min} = 60,83 + 0,5 = 61,33 \text{ мм.}$$

Виконавчий розмір будемо проставляти по *h13* – точіння чорнове $TS_8 = 0,4$. Визначаємо номінал розміру S_8 :

$$S_{8 \max} = 61,33 + 0,4 = 61,73 \text{ мм.}$$

Виконавчий розмір $S_8 = 61,73_{-0,4}$.

Знаходимо граничні значення припуску Z_9 :

$$Z_9 = S_8 - S_7 = 61,73_{-0,4} - 60,8^{+0,03}_{-0,17} = 0,93^{+0,17}_{-0,43} \text{ мм.}$$

Отриманий результат заносимо в таблицю-карту (табл. 1.1).

Визначаємо технологічний розмір S_3 . За виявленою раніше схемою технологічного розмірного ланцюга запишемо вихідне рівняння:

$$-[Z_{12}] - S_3 + S_4 = 0.$$

$$z_{12 \min} = S_{4 \min} - S_{3 \max}.$$

$$S_{3 \max} = S_{4 \min} - z_{12 \min}$$

Максимальне значення технологічного розміру:

$$S_{7 \min} = 170,2 - 0,5 = 169,7 \text{ мм.}$$

Допуск на розмір S_8 дорівнює 0,53 мм.

Розраховуємо аналогічно інші технологічні розміри і заносимо результати до таблиці-карти (табл. 1.1)

Таблиця 1.1 – Таблиця-карта розрахунку технологічних розмірів

Вихідний розмір		Розміри, що визначаються			
A_1	$60_{-0,06}^{-0,03}$	A_1	$60_{-0,06}^{-0,03}$		

Завдання до «Розмірні розрахунки» додається окремо (див. Moodle)

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Приходько, В. П. Розмірне моделювання та аналіз технологічних процесів [Електронний ресурс] : навчальний посібник для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка» / В. П. Приходько ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 249 с.
2. Основи технології машинобудування [Навчальний посібник] / В.О. Богуслаєв, В.І. Ципак, В.К. Яценко. – Запоріжжя: ОАО „Мотор Січ”, 2003. – 336с. Рудь В.Д., Герасимчук О.О., Маркова Т.П.
3. Розмірно-точнісний аналіз конструкцій та технологій. Навч. посібник.- Луцьк: РВВ ЛДТУ, 2008 - 344с.
4. Додатки до методичних вказівок для виконання практичних занять з дисциплін «Технологічні основи машинобудування» та ін. для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка» освітньої програми «Технології машинобудування» та ін. всіх форм навчання // Укл.: В.І. Ципак (перевидання 3-е). Під ред. Гончар Н.В. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2023 – 61 с.
5. Кравченко, Л. С. Розмірний аналіз при проєктуванні, виготовленні і складанні [Електронний ресурс] : навч. посібник для студ. машинобудівних спеціальностей / Л. С. Кравченко: Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» - Електронні текстові дані - Харків : НТУ «ХПІ», 2009 - 356 с. ISBN 978-966-593-750-0
6. Бондаренко С.Г. Розмірні розрахунки механоскладального виробництва. – К.: ІСДО, 1993. - 544с.
7. Основи теорії розмірних ланцюгів для рішення задач технології машинобудування. Режим доступу: <https://studfile.net/preview/5201615/>
8. Розмірні ланцюги. Навчальний посібник. Режим доступу: <https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/26135/1/%D0%A0%D0%BE%D0%B7%D0%BC%D1%96%D1%80%D0%BD%D1%96%20%D0%BB%D0%B0%D0%BD%D1%86%D1%8E%D0%B3%D0%B8.pdf>
9. Tolerance analysis of 2-D and 3-D dimensional chains. Електронний ресурс. Режим доступу: <https://www.mitcalc.com/doc/tolanalysis3d/help/en/tolanalysis3d.htm>
10. Tolerance analysis - How to perform one. Електронний ресурс. Режим доступу: <https://www.youtube.com/watch?v=oSL3E0IKonA>