

МІНІСТЕРСТВО НАУКИ ТА ОСВІТИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Логомінов В.О.

ТЕКСТИ (конспект) лекцій з дисципліни

**з дисципліни «Розмірні розрахунки при проектуванні
технологічних процесів виготовлення деталей»**

для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка»
за освітньою програмою «Технології машинобудування»
усіх форм навчання

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

Укладачі: В.О. Логомінов, к.т.н., доцент, доцент каф. ТМБ
В.І.Ципак, к.т.н., доцент, доцент кафедри ТМБ

Рецензент: С.І. Дядя, к.т.н., доцент, зав. каф. ТМБ

Відповідальний за випуск:

С.І. Дядя, к.т.н., доцент, зав. каф. ТМБ

Затверджено
на засіданні кафедри
“Технології машинобудування”
протокол № 1 від 24.08.2020р.

Рекомендовано до видання
НМК М ф-та
Протокол № 1 від 02.09.2020

ЗМІСТ

Вступ	4
1 Основні поняття. Терміни і визначення.....	5
1.1 Актуальність розмірних розрахунків.....	5
1.2 Поняття технологічного розміру і методів його визначення.....	5
1.3 Поняття розмірного зв'язку ТП.....	9
1.4 Бази і базування	10
1.5 Вивчення і аналіз технологічних розмірних зв'язків	11
1.5.1 Призматична заготовка.....	11
1.5.2 Призматична заготовка з уступом	13
1.5.4 Валик	14
2 Технологічні розмірні розрахунки і розмірний аналіз технологічних процесів	17
2.1 Предмет, мета і задачі розмірного аналізу	17
2.2 Перша (проектна) задача розрахунку технологічних розмірів.....	18
2.3 Друга (перевірочна) задача розмірного аналізу ТП.....	18
2.4 Методика розв'язання проектної задачі розрахунку технологічних розмірів.....	19
2.4.1 Розмірні схеми ТП та їх характеристики	19
2.4.2 Правила виявлення технологічних розмірних ланцюгів	22
2.4.3 Практична методика виявлення технологічних розмірних ланцюгів	23
2.4.4. Призначення припусків і допусків	25
2.5 Методи розрахунку технологічних розмірних ланцюгів (проектна задача).....	27
2.5.1 Схеми і рівняння технологічних розмірних ланцюгів.....	27
2.5.2 Вибір метода розв'язання розмірного ланцюга.....	29
2.5.3 Основні розрахункові формули теорії розмірних ланцюгів....	30
2.5.4 Розрахункові формули для розв'язання технологічних розмірних ланцюгів.....	33
Загальні висновки	38
Контрольні питання	39
Перелік джерел посилання	40

ВСТУП

Сучасні тенденції розвитку машинобудівного виробництва вимагають підготовки кваліфікованих фахівців, які мають не тільки глибокі теоретичні знання, але й спроможні їх використати у своїй виробничій діяльності. Тому інженери-механіки найбільш поширених спеціальностей «Технологія машинобудування», «Металорізальні верстати і системи» та інші повинні уміти установлювати недоліки технологічного процесу (ТП) безпосередньо як на етапі розробки, так і у процесі виготовлення деталей, оцінюючи якість ТП: виявляти за допомогою розмірного аналізу ознаки технологічних (параметричних) відмов, виконувати їх прогностичні оцінки, розробляти відповідні рекомендації по удосконаленню ТП.

Вивчення дисципліни «Розмірні розрахунки при проектуванні технологічних процесів виготовлення деталей» має сприяти розвитку технічного мислення студентів, стимулювати їх активність і самостійну роботу, полегшити виконання індивідуальних завдань курсових і дипломних проєктів. Працюючи з конспектом лекцій, студент засвоїть методику оцінки якості ТП і, таким чином, буде спроможним своєчасно установлювати його недоліки, щоб попередити брак деталей, що виготовляються.

В конспекті лекцій розглядаються методичні прийоми розмірно-статистичного аналізу на прикладі ТП, який має наочні технологічні недоліки, що обумовлюють параметричні відмови. Окрім відомих і необхідних даних з розмірного аналізу і статистичної оцінки точності, в конспекті лекцій наведені нові відомості, які суттєво уточнюють і доповнюють існуючу методику розмірного аналізу, що буде сприяти підвищенню якості розроблюваних ТП.

1 ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ. ТЕРМІНИ І ВИЗНАЧЕННЯ

1.1 Актуальність розмірних розрахунків

При обробці деталей в одиничному чи дрібносерійному неавтоматизованому виробництві не існує проблеми технологічних розмірних розрахунків, тому що настройку різальних інструментів для отримання необхідних розмірів кожен раз здійснюють індивідуально методом пробних проходів.

Проблема технологічних розмірних розрахунків є актуальною для автоматизованого виробництва, в якому більшість конструкторських розмірів забезпечується автоматично за рахунок призначених технологічних налагоджувальних розмірів. Необхідна точність обробки заготовок забезпечується технологом, який на етапі проектування ТП прораховує і досліджує задану точність і якість поверхонь, і наладчиком, який забезпечує відповідну наладку технологічної системи верстат – пристосування – інструмент – деталь (ВПД).

Особливо складним при цьому є отримання лінійних (координатних) розмірів, що пов'язують неодноразово оброблювані протилежні поверхні. Розрахувати такі технологічні розміри відомими методами (методом накладання припуску) не має можливості, тому що ці методи не враховують можливість порушення основних принципів базування заготовки при механічній обробці.

1.2 Поняття технологічного розміру і методів його визначення

Що таке технологічний розмір? Які розміри називають технологічними?

Розміри, які проставляють в технологічній документації (на операційних ескізах, схемах налагоджування, розміри багатьох мірних різальних інструментів, копіїв і таке інше), називають технологічними. Ці розміри безпосередньо забезпечуються в процесі обробки, за цими розмірами виконується контроль оброблених поверхонь. Технологічні розміри відрізняються від конструкторських тим, що вони включають до себе припуск.

Як розраховують технологічні розміри?

Це залежить від характеру поверхні, на яку призначають технологічний розмір.

Будь-яка поверхня деталі має розміри і технічні вимоги, що визначають її зв'язок з іншими поверхнями. У зв'язку з цим розрізняють поверхні симетричні і несиметричні або поверхні двосторонньої обробки (циліндричні, конічні, сферичні і таке інше) і односторонньої обробки (торцеві, плоскі і таке інше). При цьому слід звернути увагу на один важливий момент. При механічній обробці протилежних поверхонь (торцевих, плоских), зв'язаних лінійними (координатними) розмірами, слід розрізняти поверхню, яку оброблюють, і поверхню, від якої задано координатний розмір. Цю поверхню називають вимірювальною базою.

При роботі на налагоджених верстатах є ще установча або настроювальна база – поверхня на верстаті чи пристрої, від якої здійснюється установка на розмір обробки різальних інструментів і упорів верстата. Дотримати єдність вимірювальної і настроювальної баз при механічній обробці в багатьох випадках неможливо через складності обробки заготовки з однієї установки.

При індивідуальній обробці настроювальна база не приймає участі у взаємодії складових технологічної системи ВПІД, бо не виконується попереднє настроювання різальних інструментів. Однак ігнорувати її можливо до тих пір, поки обробляються симетричні поверхні. В інших випадках це обумовлює похибки обробки і наявність браку («чорнота» - недостатньо припуску чи, навпаки, великий припуск). Тому порушення правила єдності і сталості технологічних баз необхідно враховувати при розрахунках технологічних розмірів.

Як визначають технологічні розміри?

Для ілюстрації спочатку розглянемо два приклади: втулка і валик (рис. 1.1).

При визначенні технологічних розмірів d_i , D_i , і l_i , послідовно додають односторонній припуск Z_i до поверхонь 1, 2, 3 і 4, тобто технологічний розмір (рис.1.2) буде визначатись за наступними формулами. При обробці зовнішніх циліндричних поверхонь:

$$d_i = d_{i+1} + 2Z_{i+1}. \quad (1.1)$$

При обробці отворів:

$$D_i = d_{i+1} - 2Z_{i+1}, \quad (1.2)$$

де $i = 1, 2, 3 \dots$ – номер технологічного переходу згідно маршруту обробки поверхні (МОП).

При обробці торцевих поверхонь 1 і 3 спочатку обробляють один торець, а потім другий.

При обробці першого торця:

$$l_i = l_{i+1} + Z_{i+1}. \quad (1.3)$$

При обробці другого торця (при умові $Z_{i+1} = Z_{i+2}$):

$$l_i = l_{i+2} + Z_{i+2} + Z_{i+1} = l_{i+2} + 2Z_{i+1}. \quad (1.4)$$

Тобто при обробці торцевих поверхонь 1 і 3 технологічний розмір l_i ., визначається як для симетричних поверхонь d_i та D_i .

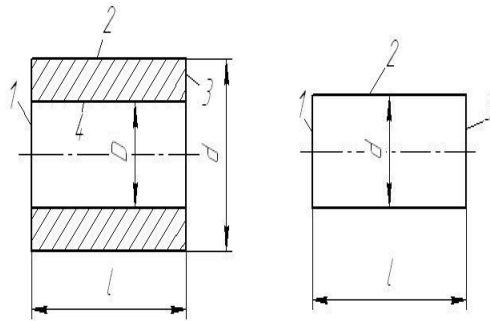


Рисунок 1.1 – Ескіз втулки і валика із технологічною розміткою поверхонь

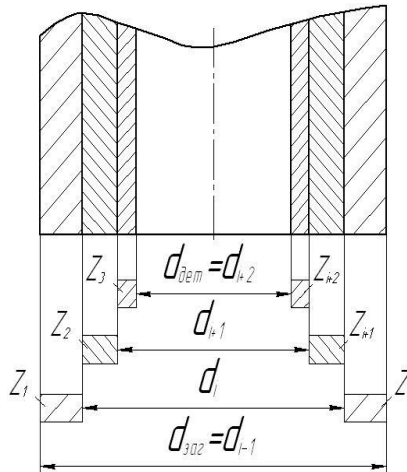


Рисунок 1.2 – Схема розташування технологічних розмірів і припусків при обробці циліндричної поверхні (двостороння обробка)

Чому так просто розраховуються технологічні розміри в цих випадках?

Тому що при забезпеченні розмірів d і D фіксується положення вісі заготовки при її обробці на верстаті. При обробці торцевих поверхонь також необхідно чітко фіксувати осьове (координатне) положення заготовки, тобто кожна заготовка втулки чи валика при установленні повинні мати точку опори – осьову настроювальну базу. В розглянутому прикладі заготовки мають тільки дві торцеві поверхні (можливий мінімум) – по одному торцю заготовку базують, а другий обробляють. Інших варіантів в цьому випадку немає.

Якщо узагальнювати, то простота розрахунку технологічного розміру пояснюється тим, що в цих випадках не порушується принцип єдності вимірювальної і настроювальної баз. В даному випадку установити заготовку по іншому не можливо.

Далі розглядаються більш складні конструкції втулки і валика (рис.1.3).

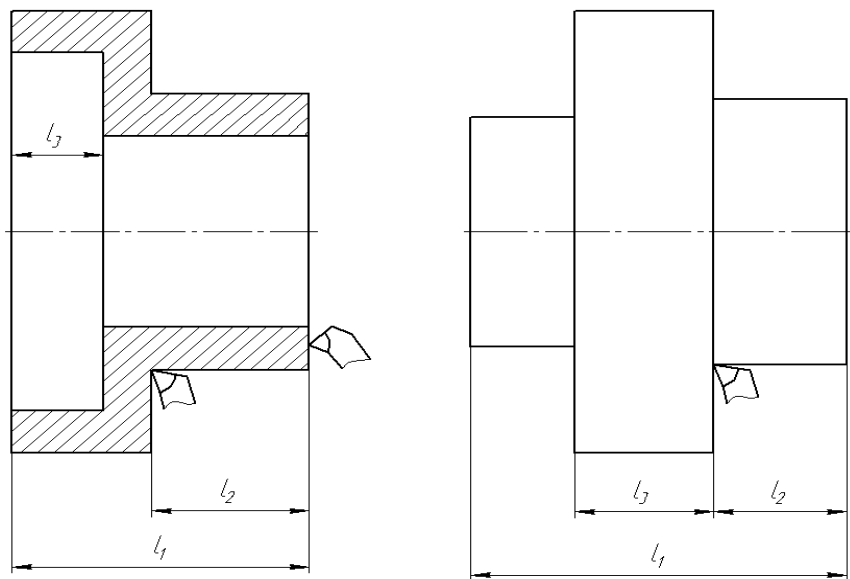


Рисунок 1.3 – Схема обробки торців ступінчатих втулки і валика

В першому випадку (рис.1.1) конструкції втулки і валика мали один координатний розмір. В іншому прикладі (рис.1.3) координатних розмірів стало три. Як при установленні і обробці торців заготовок дотримати основні принципи базування? В цьому випадку (рис.1.3) розраховувати технологічні розміри методом прикладання припусків не вдається, тому

що координатні розміри пов'язують одночасно поверхні обробки, поверхні, що є вимірювальними базами і вільні поверхні.

Простановку як лінійних розмірів, так і установку заготовки можна здійснювати за декількома варіантами, тобто в цьому випадку немає однозначності як при виборі технологічних баз, так і при визначенні технологічних (настроювальних) розмірів. Від чого це залежить? Як в подібних випадках призначати технологічні координатні розміри?

Щоб відповісти на ці питання, необхідно ознайомитись з поняттям «розмірний зв'язок», дослідити і проаналізувати схеми базування, налагоджування і обробки різноманітних заготовок.

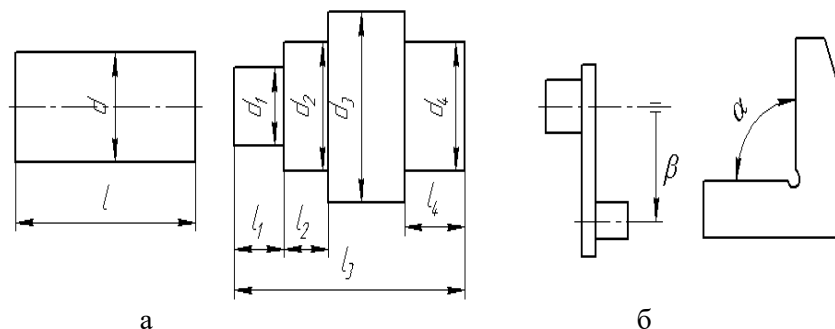
1.3 Поняття розмірного зв'язку ТП

Будь-яка машина створюється для задоволення певної потреби людини. Своє функціональне призначення машина виконує за допомогою визначених властивостей, які вона отримує при виготовленні. Ці різноманітні властивості прийнято називати зв'язками. Вперше поняття «зв'язок», розмірний зв'язок при конструюванні механізмів і машин, проектуванні ТП запровадили Балакшин Б.С. і Пузанова В.П. [1, 2] – «...виконавчі поверхні машин зв'язуються один з одним за допомогою низки зв'язків, що здійснюються за допомогою деталей» цих машин [3]. Під час роботи механізму між його виконавчими (робочими) поверхнями виникають і діють різноманітні зв'язки [4]: розмірні, кінематичні, динамічні, електричні, магнітні і електронні, оптичні, гідравлічні, пневматичні, теплові, хімічні, часові та інші. Також діють зв'язки властивостей матеріалів деталей: міцності, жорсткості, втомленості, тертя, зносу та інші.

Слід підкреслити, що усі види зв'язків закладаються у машину в процесі її створення.

Розмірні зв'язки ТП характеризують взаємне положення елементів ВПД при обробці заготовки. Розрізняють два виду розмірних зв'язків:

- точність взаємного положення, тобто точність розмірів між поверхнями. Позначають: d , l , h (рис.1.4, а);
- точність взаємних поворотів, тобто точність кутового положення між поверхнями (як повернені поверхні деталей відносно один одного). Позначають: α , β , γ , ... (рис.1.4, б).



а – точність взаємного положення; б – точність взаємних поворотів

Рисунок 1.4 – Види розмірних зв'язків

Технологічний розмірний зв'язок – це зв'язок, розмірними ланками (елементами) якого є розміри чи відносні повороти поверхонь оброблювальної заготовки чи деталі, які отримують при виконанні операцій ТП.

Розмірні зв'язки конструкцій механізмів і машин і ТП виготовлення деталей зображують і досліджують за допомогою розмірних ланцюгів. Установлення розмірних зв'язків і розв'язання відповідних задач називають розмірним аналізом. Розмірний аналіз базується на положенні теорії розмірних ланцюгів і методах їх розв'язання [1, 5, 6, 7, 8, 9, 10].

1.4 Бази і базування

Згідно з ГОСТ 21495-80 бази – це поверхні, лінії чи точки, що належать заготовці чи деталі і використовуються для базування. Базування – це надання заготовці чи деталі необхідного положення відносно вибраної системи координат. При складанні – надання деталі необхідного положення у виробі відносно інших, раніше установлених деталей чи виробів. При механічній обробці – надання заготовці необхідного положення на верстаті відносно траєкторії переміщення інструмента. При вимірюванні – надання заготовці чи деталі необхідного положення відносно вимірювального інструмента. В першому випадку,

тобто при складанні, поверхні базування називають конструкторськими базами; в другому випадку, тобто при механічній обробці – технологічними базами; а в третьому випадку, тобто при вимірюванні – вимірювальними чи метрологічними. До технологічних баз також відноситься настроювальна база. Настроювальна база – це поверхня, лінія чи точка на робочому пристрої чи верстаті, від якої здійснюється установка на розмір обробки різальних інструментів і упорів верстата.

Вибір чи призначення технологічних баз є найбільш важливою задачею при проектуванні ТП механічної обробки. Технологічні і вимірювальні бази безпосередньо приймають участь у формуванні розмірних зв'язків ТП.

1.5 Вивчення і аналіз технологічних розмірних зв'язків

Вивчення технологічних розмірних зв'язків здійснюється на наочних і характерних прикладах. Чи залежить технологічний розмірний зв'язок, а відповідно, і точність обробки від вибраної поверхні базування заготовки? Щоб відповісти на це питання і зрозуміти сутність технологічного розмірного зв'язку, розглядаються і досліджуються декілька варіантів проставляння координатних розмірів, які необхідно забезпечити при обробці, і відповідні схеми установки заготовки і налагодження різальних інструментів.

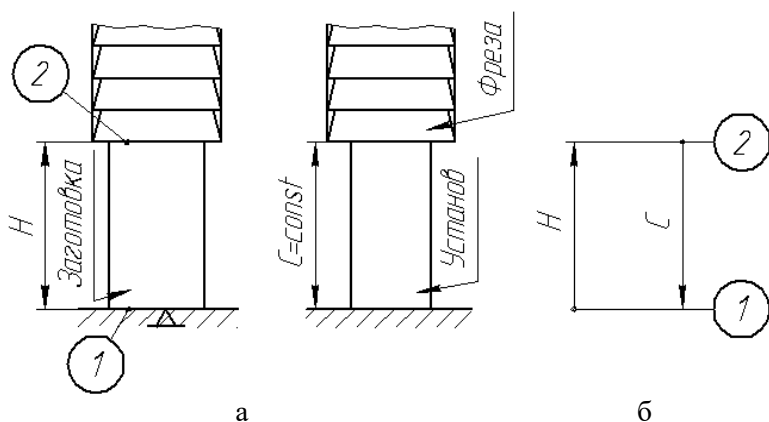
Спочатку показують і визначають поверхні – бази, що беруть участь у формуванні розмірних зв'язків і впливають на точність одержуваного розміру. Далі аналізують дотримання принципу єдності настроювальної і вимірювальної баз при обробці партії заготовок.

Розмірні зв'язки зображають у вигляді схем чи записують у вигляді послідовностей, наприклад $C \Rightarrow H \Rightarrow [h]$.

Визначення кількості поверхонь і розмірів, що приймають участь у формуванні розмірного зв'язку, розглянемо на прикладах обробки призматичних заготовок і валика.

1.5.1 Призматична заготовка

Потрібно фрезерувати поверхню 2 (рис.1.5) на налагодженому верстаті. Необхідно встановити і визначити поверхні і розміри, що формують розмірний зв'язок.



1 – установча база;
2 – оброблювана поверхня.

Рисунок 1.5 – Схема базування і налагоджування (а) та схема розмірного зв'язку (б)

На установчу базу 1 (рис.1.5, а) встановлюють заготовку для обробки. Одночасно ця поверхня є настроювальною базою, тому що від цієї поверхні задається настроювальний розмір C для установки фрези. Настроювальна база – це зафіксована поверхня на верстаті чи пристрої, завдяки чому базуюча поверхня заготовки не змінює своє положення при обробці партії заготовок. Ця ж поверхня є вимірювальною базою, тому що від цієї поверхні виконують відлік – вимірювання отриманого координатного розміру H . Вимірювальна база заготовки в багатьох випадках вільна, якщо не зафіксована поверхня при обробці заготовок. Зафіксованою вимірювальна база буває тільки у випадках, коли суміщені (поєднані) настроювальна і вимірювальна бази, тобто коли дотримується принцип єдності баз.

На рис. 1.5 позначені наступні розміри:

– H – одержуваний координатний розмір – розмір між поверхнями 1 та 2;

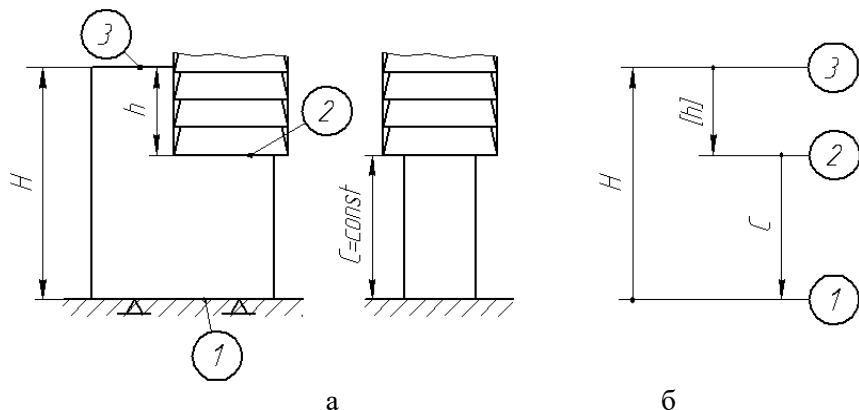
– $C = \text{const}$ – висота установка пристрою – розмір налагоджування фрези на обробку партії заготовок.

Поверхні 1, 2 і розмірні відрізки C і H утворюють замкнутий розмірний контур (рис.1.5, б) з розмірним зв'язком $C \Rightarrow [H]$, де $C = \text{const}$ – настроювальний розмір; $[H]$ – замикаюча ланка – розмір, що отримується

автоматично, як результат обробки на налагодженому верстаті, як результат отримання технологічних розмірів.

1.5.2 Призматична заготовка з уступом

Потрібно фрезерувати поверхню 2 (рис.1.6) на налагодженому верстаті. Установити і визначити поверхні і розміри, що формують розмірний зв'язок.



1 – установча і настроювальна база;

2 – оброблювальна поверхня;

3 – вимірювальна база – вільна, не зафіксована поверхня.

Рисунок 1.6 – Схема базування і налагоджування при обробці уступу призматичної деталі (а) і схема розмірного зв'язку (б)

Вимірювальна і настроювальна бази не суміщені, це різні поверхні.

Розміри, які має схема:

– H – координатний розмір – відстань між поверхнями 1 і 3, отримано на попередній операції;

– $C = \text{const}$ – настроювальний розмір, що безпосередньо отримується при обробці;

– h – забезпечуємий координатний розмір – отримують автоматично, як наслідок забезпечення розмірів H і C .

Замкнутий розмірний контур утворюють поверхні 1, 2, 3 і розміри C , H і h (рис.1.6 б).

Схема рис.1.6 б дозволяє сформулювати послідовність і правило виявлення технологічного розмірного зв'язку: від оброблюваної поверхні 2 (леза інструмента) «піти» по розмірному відрізку C до настроювальної бази 1, далі по розмірному відрізку H дійти до вимірювальної бази 3. Між

настроювальною і вимірювальною базами можуть бути проміжні поверхні і, відповідно, проміжні розміри, тобто настроювальна і вимірювальна бази не зв'язані одним розміром, тому розмірний зв'язок буде багатоланковим. Далі по відрізьку h піти до леза інструмента – поверхні 2. Розмірні відрізьки C, H і h утворюють замкнутий контур (рис.1.6 б), який зображує розмірний зв'язок $C \Rightarrow H \Rightarrow [h]$, в якому $[h]$ – замикаюча ланка – шуканий технологічний розмір.

1.5.4 Валик

Оброблюються торцеві поверхні 2 і 3 (рис.1.7) на налагодженому верстаті. При цьому координатні розміри валика мають три варіанта проставлення. Установити і визначити поверхні і розміри, що формують розмірні зв'язки.

Розміри які має схема (рис.1.7):

- l_1 – координатний розмір між поверхнями 1 і 3;
- l_2 – координатний розмір між поверхнями 1 і 2;
- C_1 – настроювальний розмір між поверхнями 1 і 3;
- C_2 – настроювальний розмір між поверхнями 1 і 2.

В 1-му випадку правило єдності баз дотримано. Розмірні зв'язки для цього випадку позначаються: $C_1 \Rightarrow [l_1]$, $C_2 \Rightarrow [l_2]$.

2-й варіант проставлення координатних розмірів (рис.1.7, б):

- $C_1 \Rightarrow [l_1]$ – правило єдності баз дотримано;
- $C_2 \Rightarrow l_1 \Rightarrow [l_2]$ – правило єдності баз не дотримано.

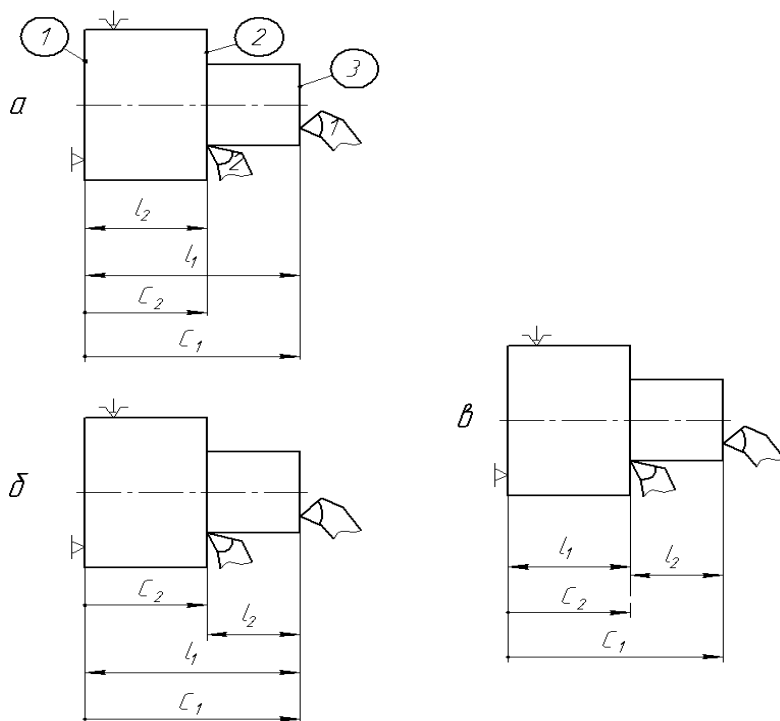
3-й варіант проставлення координатних розмірів (рис.1.7, в):

- $C_1 \Rightarrow [l_1]$ – правило єдності баз дотримано;
- $C_2 \Rightarrow l_1 \Rightarrow [l_2]$ – правило єдності баз не дотримано.

Проведене дослідження технологічних розмірних зв'язків дозволяє зробити наступні висновки.

При формуванні технологічного розмірного зв'язку, і відповідно, при забезпеченні необхідної точності координатного розміру (довжини, висоти, глибини), безпосередньо приймають участь як мінімум три поверхні оброблюваної заготовки:

- оброблювана поверхня (лезо різального інструмента);



1-й варіант проставлення координатних розмірів (рис.1.7, а)

1 – опорна, настроювальна і вимірювальна база;

2 – оброблювана поверхня;

3 – оброблювана поверхня. (Ця поверхня є вимірювальною базою у варіантах б і в).

а, б, в – варіанти проставлення розмірів

Рисунок 1.7 – Схеми установки деталі і налагоджування інструменту

- настроювальна база – поверхня, від якої задається настроювальний розмір;

- вимірювальна база – поверхня, від якої задається шуканий і забезпечує технологічний розмір;

- а також проміжні поверхні, які зв'язують настроювальну базу з вимірювальною і при цьому забезпечують мінімальний розмірний зв'язок. Чим менше розмірних відрізків утворюють замкнутий розмірний контур, тим краще, бо мають більш короткий розмірний зв'язок, тим якісніше проект ТП виготовлення деталі.

Якщо при забезпеченні потрібного координатного розміру оброблюваної заготовки дотримано принцип єдності настроювальної і вимірювальної баз, то отримують мінімально короткий – дволанковий розмірний зв'язок. Якщо при забезпеченні потрібного координатного розміру не дотримано принципу єдності баз, тобто настроювальна і вимірювальна бази – це різні поверхні, то отримують багатоланковий розмірний зв'язок (як мінімум трьохланковий). Кількість ланок у розмірному зв'язку обумовлена кількістю проміжних розмірів між настроювальною і вимірювальною базами.

2 ТЕХНОЛОГІЧНІ РОЗМІРНІ РОЗРАХУНКИ І РОЗМІРНИЙ АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

2.1 Предмет, мета і задачі розмірного аналізу

Предметом розмірного аналізу є: в конструкціях механізмів і машин – складальні розмірні зв'язки; в технологічних процесах виготовлення деталей – технологічні розмірні зв'язки.

Під розмірним аналізом розуміють сукупність графо-аналітичних процедур, які здійснюються як над проектуємим, так і над діючим ТП виготовлення деталі.

Мета розмірного аналізу ТП – установлення і дослідження розмірних зв'язків ТП, оцінка їх якості і розробка заходів з удосконалення ТП.

Основні цільові задачі – напрямки розмірного аналізу. Слід розрізняти розрахунок технологічних координатних розмірів при проектуванні ТП виготовлення деталей від розмірного аналізу ТП. Це різні за цільовим напрямком задачі, хоча при їх розв'язанні використовують теорію розмірних ланцюгів.

В теорії розмірних ланцюгів (складальні розмірні ланцюги) [1, 6, 7] розв'язуються дві задачі:

- перша, пряма задача передбачає визначення величин характеристик складових ланок, таких як номінальні розміри (A_i), допуски (TA_i), верхні та нижні відхилення (ESA_i , EIA_i), за відомими значеннями характеристик замикаючої ланки: A_Δ – номінальне значення замикаючої ланки; TA_Δ – допуск; ESA_Δ , EIA_Δ – відповідно верхнє і нижнє граничне відхилення; $\Delta_0 A_\Delta$ – координата середини поля допуску замикаючої ланки;

- друга, обернена (перевірочна) задача передбачає визначення величин характеристик замикаючої ланки за відомими значеннями величин характеристик складових ланок.

Аналогічні задачі (технологічні розмірні ланцюги [8, 10, 11, 12], але з декілька іншими акцентами розв'язуються при проектуванні ТП виготовлення деталей [13, 18, 19].

2.2 Перша (проектна) задача розрахунку технологічних розмірів

передбачає призначення технологічних розмірів механічної обробки, котрі забезпечують у автоматизованому виробництві отримання необхідних конструкторських розмірів і призначених мінімальних припусків на механічну обробку. В цьому випадку відомими є конструкторські розміри A_γ і мінімальні припуски Z_ξ^{min} , а невідомими, шуканими – технологічні розміри $S_{\omega i}$ (індекси: ξ – номер припуску на розмірній схемі ТП [11], γ – номер конструкторського розміру; ω – номер технологічного розміру за розмірною схемою ТП; i – номер технологічного розміру як складової ланки розмірного ланцюга). Розв’язання прямої задачі має специфіку, яка полягає у наступному:

- за кресленням деталі установлюють характеристики координатних розмірів;
- призначають припуски на виконання технологічних переходів;
- за проектом ТП складають розмірну схему ТП;
- виявляють розмірні зв’язки ТП;
- розв’язують розмірні ланцюги, розраховуючи технологічні розміри.

2.3 Друга (перевірочна) задача розмірного аналізу ТП

передбачає перевірку того, чи будуть забезпечені необхідні значення координатних розмірів A_γ і значення мінімальних припусків Z_ξ^{min} за відомими, призначеними ТП технологічних розмірів S_ω . Тобто за відомими значеннями складових ланок розраховують чи перевіряють значення замикаючої ланки – конструкторського розміру $A_{\gamma \Delta}$ чи припуску $Z_{\xi \Delta}^{min}$. Ця задача розв’язується на етапі реалізації ТП, коли спроектована, виготовлена і функціонує відповідна технологічна лінія виготовлення деталей. Розмірний аналіз діючого (базового) ТП виконують з метою виявлення операцій і переходів, при виконанні яких можливі параметричні відмови типу:

- не забезпечується потрібна точність координатного розміру;
- відсутній припуск на обробку – «чорнота» на обробленій поверхні;
- не вистачає припуску чи, навпаки, наявність великого припуску, який необхідно знімати за два проходи.

Специфікою розв'язання як першої, так і другої задач розмірного аналізу ТП є:

- оцінка якості розмірних зв'язків ТП [14];
- розробка альтернативних варіантів ТП із більш короткими (меншою кількістю складових ланок) розмірними зв'язками.

2.4 Методика розв'язання проектної задачі розрахунку технологічних розмірів

Розв'язання першої проектної задачі (розрахунок технологічних розмірів) виконують за допомогою розрахункової таблиці-карти, в якій приводиться в певній послідовності весь ТП у графічному вигляді з необхідними лінійними технологічними розмірами. Центральним місцем цієї карти-таблиці є розмірна схема ТП, на якій виявляють технологічні розмірні ланцюги. Таблиця-карта містить також відомості про призначені припуски і допуски, вихідні рівняння розмірних ланцюгів і їх розв'язання. Така розрахункова таблиця дозволяє не тільки виявити розмірний зв'язок для визначення шуканого технологічного розміру, але й паралельно аналізувати як хід розв'язання поставленої задачі, так і отримані результати.

Форму розрахункової таблиці-карти наведено у прикладах.

2.4.1 Розмірні схеми ТП та їх характеристики

Розмірні зв'язки ТП виготовлення деталей зображають і досліджують за допомогою замкнених розмірних контурів-схем технологічних розмірних ланцюгів [8, 10, 11, 15]. Практично будь-який ТП механічної обробки може бути представленим у вигляді розмірної схеми, за якою виявляють розмірні зв'язки. Розмірна схема ТП представляє систему пронумерованих вертикальних ліній і горизонтальних розмірних відрізків, певним чином розташованих поміж цими вертикальними лініями (рис.2.1). Вертикальні лінії нумерують зліва направо на перехресті з горизонтальною лінією під ескізом – $\xi = 1, 2, 3 \dots b$, де b – кількість вертикальних ліній.

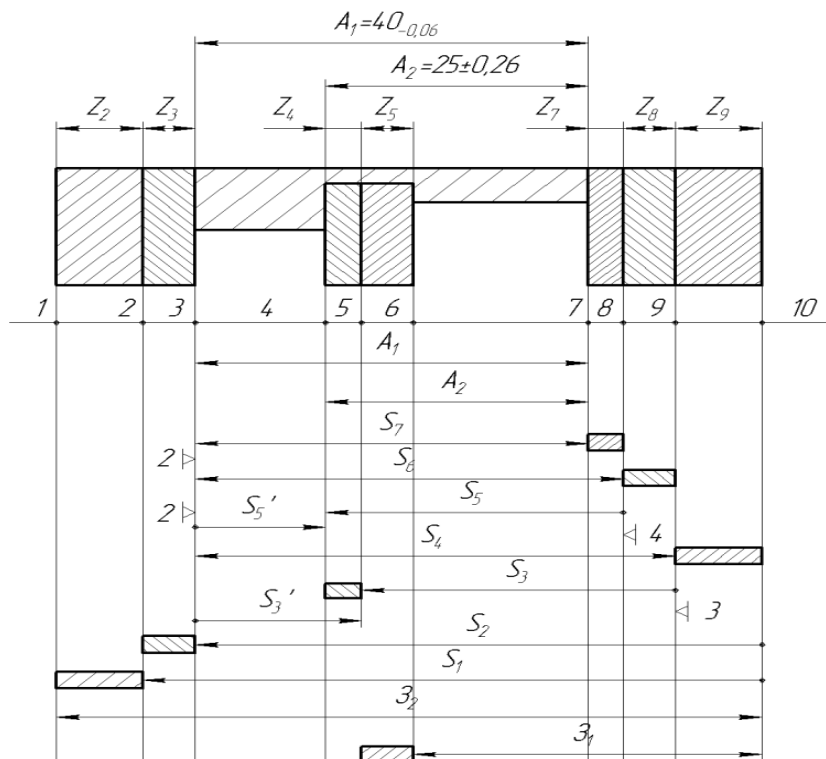


Рисунок 2.1 – Розмірна схема ТП виготовлення втулки

Розмірними відрізками на розмірній схемі ТП є задані конструкторські розміри A_γ , призначені припуски Z_ξ^{min} , розміри, які отримують при механічній обробці $S_{\omega i}$ і розміри заготовки Z_q . Індекси позначають: $\gamma = 1, 2, 3, \dots, k$ – номер координатного конструкторського розміру, k – кількість конструкторських розмірів; $\xi = 1, 2, 3, \dots, m$ – номер припуску, m – кількість припусків, як розмірних відрізків на розмірній схемі ТП; $\omega = 1, 2, 3, \dots, l$ – номер технологічного розміру, який отримують в результаті механічної обробки, l – кількість технологічних розмірів S_ω на розмірній схемі ТП; $q = 1, 2, 3, \dots, p$ – номер розміру заготовки, p – кількість розмірів заготовки Z_q .

В процесі досліджень визначені наступні характеристики розмірної схеми ТП:

– сума k розмірних відрізків конструкторських розмірів A_γ та m розмірних відрізків призначених припусків Z_ξ^{min} , як відомих замикаючих

ланок, дорівнює сумі l розмірних відрізків S_{ω} та p розмірних відрізків Z_q , як ланок розмірних ланцюгів, тобто:

$$k + m = l + p. \quad (2.1)$$

– сума вертикальних ліній – торцевих поверхонь, які належать заготовці, що є проміжними і є поверхнями деталі, повинна бути рівною кількості вертикальних ліній b на розмірній схемі ТП або через кількість розмірних відрізків:

$$b = k + m + 1. \quad (2.2)$$

Індекси З, П, Д, Σ свідчать про належність і характер поверхні:

- З – заготовка;
- П – проміжна;
- Д – деталь;
- Σ – сумарна кількість вертикальних ліній на розмірній схемі ТП.

Для зручності і запобіганню помилок ці лінії рекомендується показувати на схемі різними кольорами.

Дія технологічного переходу механічної обробки на розмірній схемі ТП зображується у вигляді стрілки розмірного відрізка S_{ω} , на одному кінці якого точка-початок відліку – вимірювальна чи настроювальна база, а на другому – стрілка, що свідчить про положення леза різального інструмента, встановленого на розмір обробки, чи положення оброблюваної поверхні. До кожної вертикальної лінії крім ліній заготовки, стрілка розмірного відрізка S_{ω} підходить тільки один раз (один перехід механічної обробки поверхні – одна стрілка);

– точки-початки розмірних відрізків S_{ω} можуть знаходитись на вертикальних лініях, але можуть бути і відсутніми. Належність точки розмірного відрізка S_{ω} на вертикальній лінії – торцевій поверхні свідчить про те, що ця поверхня використовується у якості технологічної (настроювальної і/або вимірювальної) бази;

– шуканий розмірний відрізок (S_{ω} чи Z_q) і замикаюча ланка розмірного контуру розташовані поряд;

– розмірна схема ТП характеризується також способом проставлення технологічних розмірів: координатним, ланцюговим чи комбінованим [1].

2.4.2 Правила виявлення технологічних розмірних ланцюгів

Виявлення за розмірною схемою ТП розмірних зв'язків – замкнених розмірних контурів із мінімальною кількістю складових ланок потребує дотримання 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_{ω} чи а від замикаючої ланки – припуску Z_{ξ} і конструкторського розміру A_{γ} . В цьому випадку перше процедурне правило формуються так: «стати» на вертикальну лінію, що обмежує припуск Z_{ξ} , і шукати розмірні відрізки S_{ω} 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). Впливає із 1-ої характеристики розмірної схеми ТП. На розмірній схемі ТП сума конструкторських розмірів A_{γ} і припусків Z_{ξ} , дорівнює сумі технологічних розмірів S_{ω} і розмірів заготовки Z_q (формула 2.1):

Правило 4 (контрольне). Стрілка шуканого технологічного розміру S_{ω} і знімаємий припуск Z_{ξ} або отримувемий конструкторський розмір A_{γ} , як замикаючі ланки розмірного ланцюга, повинні знаходитись поряд у виявленому розмірному контурі.

Правило 5 (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 6 (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 7 (умова). В одному розмірному ланцюзі повинен бути невідомим (шуканим) тільки один технологічний розмір S_{ω} чи Z_q .

Правило 8 (умова). Технологічний відрізок S_{ω} чи Z_q на розмірній схемі ТП може входити до складу декількох розмірних контурів, котрі будуть мати при цьому різну кількість складових ланок. До розмірного аналізу/розгляду слід приймати замкнутий розмірний контур, який має мінімальну кількість складових ланок.

Правило 9 (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.

2.4.3 Практична методика виявлення технологічних розмірних ланцюгів

Виявлення технологічних розмірних ланцюгів-розмірних контурів виконують послідовно:

1. Після того, як визначена заготовка (метод її отримання і конфігурація), установлені технологічні бази, розроблені маршрути обробки основних торцевих поверхонь і маршрут виготовлення деталі, розроблені відповідні схеми установки і обробки на кожній операції, прийняте технологічне обладнання, призначені припуски Z_{ξ} підготовляють форму розрахункової таблиці-карти (Приклади п. 1.7.1 і 1.7.2).

2. У графі «Розмірна схема ТП» розрахункової таблиці-карти:

- 2.1. Накреслюють ескіз (змінений, зручний, із збільшеними-зменшеними поверхнями довжини) деталі, як правило, в одній проекції. Для тіл обертання можна накреслювати половину проекції по вісі симетрії.

- 2.2. Над ескізом деталі показують конструкторські розміри довжини з допусками. Конструкторські (креслярські) розміри позначають A_{γ} .

2.3. На ескізі до торцевих поверхонь прикладають припуски у відповідності за кількістю призначених переходів механічної обробки. Припуски позначають Z_{ξ} .

2.4. Усі поверхні заготовки з урахуванням стадій її обробки нумерують по порядку зліва направо із зазначенням номера знизу під ескізом на горизонтальній лінії.

2.5. Через пронумеровані поверхні проводять вертикальні лінії на усе поле розмірної схеми ТП, тобто вниз від горизонтальної лінії.

2.6. Між вертикальними лініями (знизу-догори) викреслюють розмірні відрізки технологічних розмірів, отриманих по ходу виконання ТП. Технологічні розміри позначають S_{ω} . Розміри заготовки - 3_q .

3. У графі «Операційні ескізи – схеми обробки» дається графічне представлення ТП механічної обробки і заготовки, починаючи з останньої операції, тобто ескізи викреслюють за схемою від останньої до першої операції – зверху-донизу. Тут слід розглядати і, відповідно, викреслювати тільки ті операції, в яких отримують лінійні розміри.

3.1. У графі «Ескізи-схеми» накреслюють схеми обробки на кожній операції із зазначенням технологічних баз, особливо настрою вальних; оброблювальних поверхонь, які виділяють потовщеними (жирними) лініями; різальні інструменти – в кінці робочого ходу і обов'язково розмірні лінії технологічних розмірів з позначеннями за послідовністю операцій ТП. Бажано розмірні відрізки показувати так, щоб на одному кінці відрізка була стрілка. Це свідчить про те, що дана поверхня обробляється або що тут знаходиться лезо різального інструмента. А на другому кінці цього відрізка – точка, яка свідчить про те, що поверхня, на якій знаходиться точка, є настроювальною чи вимірювальною базою.

3.2. Ескіз заготовки із зазначенням розмірних ліній усіх поверхонь, особливо розмірів довжини.

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.

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

4.1. Виявлення технологічного розмірного ланцюга 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 розмірами заготовки.

4.2. Замикаючою ланкою в технологічному розмірному ланцюзі, як правило, є конструкторський розмір A_{γ} , який безпосередньо не отримується в даній операції, або припуск Z_{ξ} , як компенсатор похибок попередніх переходів. Ці величини відомі, тобто є вихідними. Невідомими є технологічні розміри S_{ω} і Z_q .

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

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

2.4.4. Призначення припусків і допусків

Припуск – це шар матеріалу, що містить різні дефекти, недопустимі за умовами службового призначення, і який необхідно усунути із поверхні заготовки з метою досягнення заданих властивостей оброблюваної поверхні. Розрізняють загальний припуск $Z_{\text{заг}}$ і припуск на перехід (операційний) $Z_{\text{заг}}$. Крім того, в технологічних розрахунках розрізняють припуск мінімальний, номінальний і максимальний.

Загальний припуск дорівнює сумі припусків на переходи механічної обробки поверхні:

$$Z_{\text{заг}} = Z_1 + Z_2 + \dots + Z_i + \dots + Z_k = \sum_{i=1}^k Z_i, \quad (2.3)$$

де $i = 1, 2, 3, \dots, k$ – номер технологічного переходу в маршруті обробки поверхні; k – кількість переходів механічної обробки на поверхні заготовки.

Звичайно, розраховують чи призначають мінімальні значення припусків. Мінімальний припуск визначають двома методами: розрахунково-аналітичним та дослідно-статистичним (табличним).

При призначенні припусків розрахунково-аналітичним методом визначають складові елементи припуску у залежності від конкретних умов обробки і стану заготовки за довідковою літературою [16].

Дослідно – статистичний (табличний) метод має широке розповсюдження в машинобудуванні, тому що дозволяє досить швидко визначити мінімальний припуск. Табличні значення припусків на механічну обробку поверхонь регламентовані відповідними стандартами і наведені в довідниках [3, 17].

Частіше за все припуски на обробку різних поверхонь призначають табличним методом, розподіляючи загальний припуск $Z_{\text{заг}}^{\text{min}}$ між переходами в залежності від стадії механічної обробки (чорнова, чистова чи оздоблювальна), використовуючи при цьому коефіцієнт співвідношення припуску на перехід Z_i до загального припуску $Z_{\text{заг}}$.

$$\gamma_i = \frac{Z_i}{Z_{\text{заг}}}, \quad (2.4)$$

тут γ_i – коефіцієнт співвідношення припусків. Тоді мінімальний припуск на i -й перехід визначають як:

$$Z_i^{\text{min}} = \gamma_i \cdot Z_{\text{заг}}^{\text{min}}. \quad (2.5)$$

Коефіцієнт співвідношення припусків γ_i , оцінений на підставі дослідно-статистичних даних, має значення в межах:

- при чорновій обробці – $\gamma = 0,65 - 0,75$;
- при чистовій обробці – $\gamma = 0,15 - 0,25$;
- при чорновому шліфуванні після термообробки – $\gamma = 0,05 - 0,1$;
- при чистовому шліфуванні – $\gamma = 0,01 - 0,015$.

При цьому сума прийнятих коефіцієнтів повинна бути:

$$\sum_i \gamma_i = 1. \quad (2.6)$$

Допуски на технологічні розміри призначають в залежності від стадії механічної обробки поверхні:

- при чорновій обробці – $IT14 \dots IT12$;
- при чистовій обробці – $IT11 \dots IT9$;
- при оздоблювальній обробці – $IT8 \dots IT5$.

Допуски на розміри заготовки призначають в залежності від виду заготовки (відливка, штамповка чи прокат) за відповідними стандартами [3, 16, 17].

Граничні відхилення для технологічних розмірів призначають, як правило:

- для зовнішніх поверхонь у системі валу (h);
- для внутрішніх поверхонь у системі отвору (H);
- для вільних поверхонь передбачають симетричне розташування відхилень $\left(\pm \frac{1}{2} TS\right)$.

При призначенні системи граничних відхилень на технологічний розмір рекомендується дотримуватись тієї системи допусків і посадок, яку призначив конструктор на кресленні деталі.

2.5 Методи розрахунку технологічних розмірних ланцюгів (проектна задача)

2.5.1 Схеми і рівняння технологічних розмірних ланцюгів

Технологічні розмірні зв'язки зображають графічно у вигляді схем і описують за допомогою відповідних рівнянь.

У технологічних розмірних ланцюгах замикаючою ланкою є конструкторський розмір A_γ чи припуск Z_ξ . Складовими ланками є технологічні розміри S_ω , що отримують при механічній обробці, і розміри заготовки $З_q$.

Розрізняють два види складових ланок в залежності від характеру їх впливу на замикаючу ланку: збільшувальні, із збільшенням яких замикаюча ланка збільшується, і зменшувальні, із збільшенням яких замикаюча ланка зменшується [2, 7, 12, 15]. Для ілюстрації розглянуто декілька схем технологічних розмірних ланцюгів і визначено характер їх складових ланок (рис.1.9).

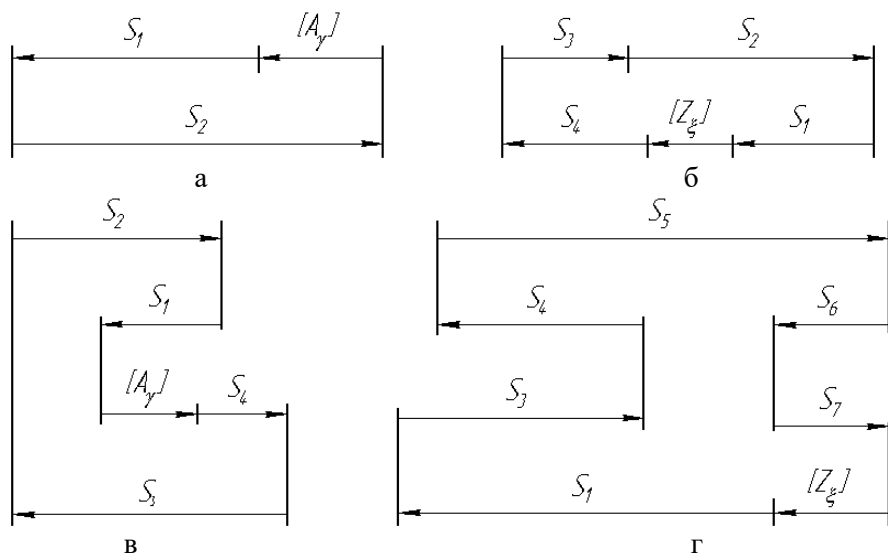


Рисунок 2.2 – Схеми технологічних розмірних ланцюгів

На схемах розмірних ланцюгів характер складових ланок зручно установлювати, якщо стрілки усіх розмірних відрізків розташовані в одному напрямку – по годинниковій чи проти годинникової стрілки (рис.2.2):

- відрізки-ланки, стрілки яких мають протилежний напрямок відносно стрілки замикаючої ланки, є збільшувальними ланками;
- відрізки-ланки, стрілки яких співпадають з напрямком замикаючої ланки, є зменшувальними ланками;

Характер складових ланок в розмірних ланцюгах рис. 1.9:

- схема а: $|A_\gamma|$ – замикаюча ланка – конструкторський розмір, S_2 – збільшувальна ланка; S_1 – зменшувальна ланка;
- схема б: $|Z_\xi|$ – замикаюча ланка – припуск; S_2, S_3 – збільшувальні ланки; S_1, S_4 – зменшувальна ланки;
- схема в: $|A_\gamma|$ – замикаюча ланка; S_1, S_3 – збільшувальні ланки; S_2, S_4 – зменшувальна ланки;
- схема г: $|Z_\xi|$ – замикаюча ланка; S_3, S_5, S_7 – збільшувальні ланки; S_1, S_2, S_4, S_6 – зменшувальна ланки.

Рівняння розмірного ланцюга, записане відносно замикаючої ланки, називають вихідним. У вихідному рівнянні збільшувальні ланки завжди із плюсом (додатні), а зменшувальні – із мінусом (від’ємні).

Вихідні рівняння відповідних схем розмірних ланцюгів (рис. 1.9):

$$\begin{aligned}
|A_\gamma| &= S_2 - S_1. \\
|Z_\xi| &= S_2 + S_3 - S_4 - S_1. \\
|A_\gamma| &= S_1 - S_2 + S_3 - S_4. \\
|Z_\xi| &= S_7 - S_6 + S_5 - S_4 + S_3 - S_2 - S_1.
\end{aligned}
\tag{2.7}$$

2.5.2 Вибір метода розв'язання розмірного ланцюга

Існує два метода розв'язання розмірних ланцюгів [4, 6, 7, 9, 15]: метод максимуму - мінімуму (max-min) та імовірнісний метод.

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

Імовірнісний метод позбавлений цього недоліку. Він враховує закономірності розподілу витримуваних при обробці технологічних розмірів. Допуски розмірів, розраховані цим методом, не мають зайвого запасу точності, що дозволяє знижувати витрати на механічну обробку. Разом з тим імовірнісний метод розрахунку допускає можливість браку, є більш складним (потребує більшої кількості інформації про складові ланки) і відповідно більш трудомістким.

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

2.5.3 Основні розрахункові формули теорії розмірних ланцюгів

2.5.3.1 Метод максимуму-мінімуму

Номінальне значення замикаючої ланки розмірного ланцюга:

$$A_{\Delta} = \sum_{i=1}^n A_i = \sum_{j=1}^{n_j} A_j - \sum_{v=1}^{n_v} A_v, \quad (2.8)$$

де A_i – складова ланка розмірного ланцюга; A_j – збільшувальна ланка; A_v – зменшувальна складова ланка; $i = 1, 2, 3, \dots, n$ – номер складової ланки; $j = 1, 2, 3, \dots, n_j$ – номер збільшувальною складової ланки; $v = 1, 2, 3, \dots, n_v$ – номер зменшувальної складової ланки; $n = n_j + n_v$ – кількість складових ланок розмірного ланцюга.

Граничні значення замикаючої ланки:

$$\begin{aligned} A_{\Delta}^{min} &= \sum_{j=1}^{n_j} A_j^{min} - \sum_{v=1}^{n_v} A_v^{max}. \\ A_{\Delta}^{max} &= \sum_{j=1}^{n_j} A_j^{max} - \sum_{v=1}^{n_v} A_v^{min}. \end{aligned} \quad (2.9)$$

Допуск замикаючої ланки:

$$TA_{\Delta} = \sum_{i=1}^n TA_i = \sum_{j=1}^{n_j} TA_j - \sum_{v=1}^{n_v} TA_v = TA_{\Delta}^{max} - TA_{\Delta}^{min}. \quad (2.10)$$

Допуск однієї із складових ланок розмірного ланцюга:

$$TA_{i^*} = TA_{\Delta} - \sum_{i=1}^n TA_i, \quad (2.11)$$

де i^* – номер шуканої складової ланки.

Граничні відхилення замикаючої ланки:

$$\begin{aligned}
ESA_{\Delta} &= \sum_{j=1}^{n_j} ESA_j - \sum_{v=1}^{n_v} EIA_v. \\
EIA_{\Delta} &= \sum_{j=1}^{n_j} EIA_j - \sum_{v=1}^{n_v} ESA_v.
\end{aligned}
\tag{2.12}$$

Координата середини поля допуску замикаючої ланки:

$$\Delta_0 A_{\Delta} = \sum_{i=1}^n \Delta_0 A_i = \sum_{j=1}^{n_j} \Delta_0 A_j - \sum_{v=1}^{n_v} \Delta_0 A_v.
\tag{2.13}$$

Координата середини поля допуску i -ої складової ланки:

$$\Delta_0 A_i = \frac{ESA_i + EIA_i}{2}.
\tag{2.14}$$

Координата середини поля допуску замикаючої ланки, яку призначив конструктор за умов службового призначення чи експлуатації:

Граничні відхилення через координату середини поля допуску:

$$\begin{aligned}
ESA_i &= \Delta_0 A_i + \frac{TA_i}{2}. \\
EIA_i &= \Delta_0 A_i - \frac{TA_i}{2}.
\end{aligned}
\tag{2.15}$$

2.5.3.2 Імовірнісний метод

Допуск замикаючої ланки розраховують за формулою:

$$TA_{\Delta} = t_{\Delta} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot TA_i^2},
\tag{2.16}$$

або

$$TA_{\Delta} = t_{\Delta} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n k_i^2 \cdot TA_i^2}, \quad (2.17)$$

Граничні відхилення замикаючої ланки:

$$\begin{aligned} ESA_{\Delta} &= t_{\Delta} \cdot \sqrt{\sum_{j=1}^{n_j} \lambda_i \cdot ESA_i^2} - \sum_{v=1}^{n_v} \lambda_v \cdot EIA_v^2, \\ EIA_{\Delta} &= t_{\Delta} \cdot \sqrt{\sum_{j=1}^{n_j} \lambda_i \cdot EIA_i^2} - \sum_{v=1}^{n_v} \lambda_v \cdot ESA_v^2. \end{aligned} \quad (2.18)$$

де t – коефіцієнт ризику – нормативний параметр розподілу;

λ_i (чи k_i) – коефіцієнт відносного розсіювання.

Значення коефіцієнта t залежить від прийнятого відсотка ризику P і закону розподілу. При нормальному законі розподілу і збігання центру групування із координатою середини поля допуску значення коефіцієнта ризику t вибирається із таблиці 2.1 [7]:

Таблиця 2.1 – Коефіцієнт ризику

Відсоток ризику P	32	10	45	1	0,27	0,1	0,01
Коефіцієнт t	1,0	1,65	2,0	2,57	3,0	3,29	3,89

Коефіцієнти λ і k мають значення в залежності від наступних умов [7, 8, 10]:

– $\lambda = \frac{1}{9}$, $k = 1$ – для закону нормального розподілу, коли деталі виготовляють в умовах багатосерійного та масового виробництва;

– $\lambda = \frac{1}{6}$, $k = 1,2$ – для закону розподілу Сімпсона (трикутника);

– $\lambda = \frac{1}{3}$, $k = 1,73$ –

$\lambda=1/6$, $k=1,2$ – для закону рівної ймовірності, коли деталі виготовляють в умовах дрібносерійного та одиничного виробництва.

Допуск однієї із складових ланок TA_{i^*} при умові, що допуски останніх ланок відомі або призначені раніше, розраховується за формулою:

$$TA_{i^*} = \frac{1}{t} \cdot \sqrt{\frac{TA_{\Delta}^2 - \sum_{i=1}^{n-1} t_i^2 \cdot \lambda_i \cdot TA_i^2}{\lambda_{i^*}}}, \quad (2.19)$$

В проектних розрахунках, коли закони розподілу похибок складових ланок невідомі, звичайно, приймають $t = 3$ і коефіцієнт $t = \frac{1}{6}$ або $k = 1,2$ для усіх складових ланок.

2.5.4 Розрахункові формули для розв'язання технологічних розмірних ланцюгів

Методика розв'язання технологічних розмірних ланцюгів залежить від того, чи є замикаючою ланкою припуск Z_{ξ} чи конструкторський розмір A_{γ} .

2.5.4.1 Розрахункові формули для випадку, коли замикаючою ланкою є припуск

Щоб виключити можливість отримання при розмірному аналізі від'ємного значення припуску $Z_{\xi} \leq 0$, слід користуватися при розрахунках Z_{ξ}^{min} , а не номінальним значенням.

Мінімальний розмір припуску визначають за таблицями довідкової літератури [10] або розрахунком за формулою:

$$Z_{\xi}^{min} = Rz_{i-1} + h_{i-1} + \rho_{i-1} + \varepsilon_i, \quad (2.20)$$

де i – номер технологічного переходу у маршруті виготовлення поверхні (МОП).

Визначивши тим чи іншим способом Z_{ξ}^{min} , і маючи при цьому схему виявленого розмірного ланцюга із зазначеним припуском складають вихідне рівняння розмірного ланцюга:

$$Z_{\xi\Delta}^{min} = \sum_{j=1}^{n_j} S_j^{min} - \sum_{v=1}^{n_v} S_v^{max}, \quad (2.21)$$

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.

Формула (2.21) є основною перевіркою формулою, за допомогою якої визначають і аналізують значення припуску, як замикаючої ланки.

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. Позначають шуканий розмір як S_x .

Якщо шуканий розмір є зменшувальною ланкою, то її визначають за наступною формулою:

$$S_{xv}^{max} = \sum_{j=1}^{n_j} S_j^{min} - \sum_{v=1}^{n_v-1} S_v^{max} - Z_{\xi\Delta}^{min}, \quad (2.22)$$

Якщо ж шуканий розмір є збільшувальною ланкою, то:

$$S_{xj}^{min} = Z_{\xi\Delta}^{min} - \sum_{j=1}^{n_j-1} S_j^{min} - \sum_{v=1}^{n_v} S_v^{max}. \quad (2.23)$$

Визначивши величину S_{xv}^{max} чи S_{xj}^{min} , призначають допуск TS_x в залежності від стадії механічної обробки. Граничні відхилення ESS_x і EIS_x призначають, звичайно, за системою "h", "H" чи "js" (СТ СЭВ 144-75).

Визначають номінальний розмір шуканої ланки:

$$\begin{aligned} S_{xj} &= S_{xj}^{mix} - EIS_x, \\ S_{xv} &= S_{xv}^{max} - ESS_x. \end{aligned} \quad (2.24)$$

Далі визначається номінальний розмір припуску і його найбільший граничний розмір $Z_{\xi\Delta}^{max}$. Для цього складається вихідне рівняння розмірного ланцюга відносно $Z_{\xi\Delta}$ з вказівкою для усіх складових ланок

граничних відхилень. На підставі цього рівняння обчислюються суми номінальних розмірів і граничних відхилень для збільшувальної і зменшувальної ланок:

$$Z_{\xi_{\Delta}} = \left(\sum_{j=1}^{n_j} S_j \right) \frac{\sum ESS_j}{\sum EIS_j} - \left(\sum_{v=1}^{n_v} S_v \right) \frac{\sum ESS_v}{\sum EIS_v}. \quad (2.25)$$

За різницею номінальних розмірів збільшувальних та зменшувальних ланок визначають номінальний розмір припуску:

$$Z_{\xi_{\Delta}} = \sum_{j=1}^{n_j} S_j - \sum_{v=1}^{n_v} S_v. \quad (2.26)$$

А за різницею підсумків граничних відхилень збільшувальних та зменшувальних ланок визначають граничні відхилення розміру припуску:

$$ESZ_{\xi_{\Delta}} = \sum_{j=1}^{n_j} ESS_j - \sum_{v=1}^{n_v} EIS_v. \quad (2.27)$$

$$EIZ_{\xi_{\Delta}} = \sum_{j=1}^{n_j} EIS_j - \sum_{v=1}^{n_v} ESS_v. \quad (2.28)$$

Тобто для визначення граничних відхилень Z_{ξ} за формулою (2.26) необхідно виконувати віднімання сум за схемою хрест на хрест – за формулами (2.27) і (2.28). Наприклад:

$$Z_{\xi_{\Delta}} = 100_{-0,4}^0 - 97_{-0,9}^0 = 3 \left(\begin{matrix} 0 \\ -0,4 \end{matrix} - \begin{matrix} 0 \\ -0,9 \end{matrix} \right) = 3_{-0,4}^{+0,9}.$$

Тобто $Z_{\xi_{\Delta}}^{min} = 2,6$ мм; $Z_{\xi_{\Delta}}^{max} = 3,9$ мм.

Граничні значення припуску:

$$\begin{aligned} Z_{\xi_{\Delta}}^{max} &= Z_{\xi_{\Delta}} + ES_{\xi_{\Delta}}. \\ Z_{\xi_{\Delta}}^{min} &= Z_{\xi_{\Delta}} + EI_{\xi_{\Delta}}. \end{aligned} \quad (2.29)$$

Це контрольне правило, тому що Z_{ξ}^{min} є відомим, як раніше призначена величина.

2.5.4.2 Розрахункові формули, для випадку коли замикаючою ланкою є конструкторський розмір

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

Номінальний розмір шуканого технологічного розміру:

– для збільшуваних складових ланок:

$$S_{xj} = A_{\gamma\Delta} - \sum_{j=1}^{n_j-1} S_j - \sum_{v=1}^{n_v} S_v. \quad (2.30)$$

– для зменшувальних ланок:

$$S_{xv} = - \sum_{j=1}^{n_j} S_j - \sum_{v=1}^{n_v-1} S_v - A_{\gamma\Delta}; \quad (2.31)$$

– допуск шуканої ланки:

$$TS_x = TA_{\gamma\Delta} - \sum_{i=1}^{n-1} TS_i. \quad (2.32)$$

Граничні відхилення шуканої ланки:

– для збільшуваних складових ланок

$$ESS_x = EIA_{\gamma\Delta} + \sum_{v=1}^{n_v} ESS_v - \sum_{j=1}^{n_j-1} EIS_j; \quad (2.33)$$

– для зменшувальних ланок:

$$EIS_x = \sum_{j=1}^{n_j} ESS_j - \sum_{v=1}^{n_v-1} EIS_v - ESA_{\gamma\Delta}. \quad (2.34)$$

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Розмірно-статистичний аналіз ТП дозволяє на першому етапі досліджень – розмірному аналізі проекту ТП – визначити ознаки і прогнозні оцінки параметричних відмов, а далі, на другому етапі, на підставі статистичних досліджень при апробації і реалізації ТП підтвердити чи спростувати ймовірність таких відмов.

2. Наявність ознак параметричних відмов (браку), як показали розмірно-статистичні дослідження технологічних процесів, обумовлюють:

- помилково призначені чи проставлені на операційних ескізах технологічні розміри;

- не обґрунтована схема базування заготовки, особливо на перших операціях ТП (наприклад, двічі використовуються чорнові бази);

- проставлення технологічних лінійних розмірів ланцюговим способом, особливо розмірів заготовки;

- завищені допуски на технологічні розміри як механічної обробки, так і заготовок;

- невідповідність величини призначеного припуску етапу механічної обробки тощо.

3. Запропоновані розмірно-статистичні показники дозволяють зробити оцінку якості, як розмірних зв'язків ТП, так і самих ТП.

4. Визначені шляхи/напрямки удосконалення розмірних зв'язків і, відповідно, підвищення якості проектів ТП:

- технологічний – зменшення кількості проміжних поверхонь, які використовуються у якості технологічних баз; проставлення технологічних розмірів виконувати переважно координатним методом; проставлення лінійних розмірів заготовки доцільно виконувати на підставі оптимізації;

- конструкторський – проставлення лінійних розмірів деталі і особливо заготовки виконувати комбінованим методом з перевагою координатного.

5. Розмірно-статистичний аналіз і наступне корегування (удосконалення) ТП повинні стати невід'ємною частиною (одним із етапів) технологічного проектування.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ І ЗАХІД.

1. Що є предметом розмірного аналізу?
2. Що таке розмірний ланцюг?
3. Типи розмірних ланцюгів: технологічні і складальні.
4. Види розмірних ланцюгів: площинні, просторові, кутові, змішані.
5. Які цільові задачі розв'язуються при розмірному аналізі ТП механічної обробки?
6. Що таке розмірна схема ТП?
7. Основні характеристики розмірної схеми ТП?
8. Що є вихідними даними для побудови розмірної схеми ТП?
9. Яку інформацію містить розмірна схема ТП, як її вносять до розмірної схеми, як вона зображується і в якій послідовності розташовується?
10. Принципи розрахунку розмірних ланцюгів.
11. Пряма задача. Мета і сутність розрахунку.
12. Обернена задача. Мета і сутність розрахунку.
13. За якими показниками перевіряють правильність оформлення розмірної схеми ТП?
14. В чому полягає процедура пошуку розмірного ланцюга для визначення невідомого технологічного розміру – основні кроки пошуку замкнутого розмірного контуру?
15. Які розміри на розмірній схемі ТП є замикаючими ланками, а які – складовими ланками?
16. Збільшувальні ланки.
17. Зменшувальні ланки.
18. Назвіть методи призначення припусків на обробку торцевих поверхонь деталей?

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

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. Кравченко, Л. С. Розмірний аналіз при проектуванні, 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
5. Бондаренко С.Г. Розмірні розрахунки механоскладального виробництва. – К.: ІСДО, 1993. - 544с.
6. Основи теорії розмірних ланцюгів для рішення задач технології машинобудування. Режим доступу: <https://studfile.net/preview/5201615/>
7. 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>
8. Kugaevskii S.S. Using Local Coordinate Systems for Dimensional Analysis in the Machining / S.S. Kugaevskii, V.N. Ashikhmin // Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. – 2019. – P. 301-309.
9. Ashikhmin, V.N. Dimensional analysis in the machining of housing components with cast holes / V.N. Ashikhmin,, S.S. Kugaevskii // Russ. Engin. Res. 33. – 2013. – P. 509–513. <https://doi.org/10.3103/S1068798X13090049>.
10. Tolerance analysis of 2-D and 3-D dimensional chains. Електронний ресурс. Режим доступу: <https://www.mitcalc.com/doc/tolanalysis3d/help/en/tolanalysis3d.htm>
11. Tolerance analysis - How to perform one. Електронний ресурс. Режим доступу: <https://www.youtube.com/watch?v=oSL3E0lKonA>