

Міністерство освіти і науки України

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

**АРТЮХ О. М.**

Навчальний посібник

**ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ АВТОМОБІЛЕБУДУВАННЯ**

для студентів спеціальності 133  
«Галузеве машинобудування»  
(«Експлуатація, випробування та сервіс  
автомобілів та тракторів»),  
усіх форм навчання

**ЧАСТИНА 2**



**2024**

УДК 629.33.023 (075.8)  
А 86

*Рекомендовано до друку Вченою радою  
Національний університет «Запорізька політехніка»  
(Протокол № 7 від 5.03.2024 р.)*

**Рецензенти:**

*Крайник Л. В.* – д.т.н., професор, кафедри автомобілів і тракторів Львівського національного університету природокористування (м. Дубляни).

*Монастирський Ю. А.* – д.т.н., професор, завідувач кафедри автомобільного транспорту «Криворізького національного університету» (м. Кривий Ріг).

*Таран І. О.* – д.т.н., професор, завідувач кафедри «Управління на транспорті» Національного ТУ «Дніпровська політехніка» (м. Дніпро).

А 86    **Артюх О. М.** Технологічні основи автомобілебудування.  
Частина 2 : навч. посібник. Запоріжжя : НУ «Запорізька  
політехніка», 2024. – 268 с.

ISBN 978-617-529-445-1

Навчальний посібник призначений для вивчення студентами процесів проектування, технологій і процесів виготовлення деталей, а також складання вузлів автомобілів, включаючи виробництво кузовів. У даному посібнику наведені основні відомості з класифікації, формотворчих рухів, основних вузлів, устрою ЧПУ металорізальних верстатів. Розглянуто питання налагодження верстата з ЧПУ на виконання технологічної операції. Описані корекції при обробці на верстатах і їх вплив на витримувани технологічні розміри. Велика увага приділяється забезпеченню заданої точності обробки деталей і якості продукції в цілому. Розглянуто методи оптимізації виробництва та підвищення його ефективності. Посібник призначений для студентів які навчаються за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування.

УДК 629.33.023 (075.8)

ISBN 978-617-529-445-1

© Національний університет  
«Запорізька політехніка», 2024  
© Артюх О. М., 2024

## ЗМІСТ

### Частина 2

Вступ .....	351
Тема 7. Види заготовок для деталей машин та способи їх виготовлення.....	354
7.1 Загальні положення щодо вибору заготовок.....	354
7.2 Методи виготовлення заготовок. Характеристика конструктивних, технологічних та економічних параметрів заготовок .....	355
7.3 Однорідність матеріалу заготовок.....	359
7.4 Техніко–економічне обґрунтування вибору заготовок..	360
7.5 Попередня обробка заготовок .....	364
7.5.1 Термообробка заготовок .....	364
7.5.2 Очищення заготовок перед механічною обробкою ..	365
7.5.3 Виправлення заготовок .....	366
7.5.4 Відрізка заготовок.....	367
7.5.5 Центрування заготовок .....	378
7.6 Класифікація параметрів поверхневого шару деталей та їх характеристика.....	380
7.7 Вплив якості поверхневого шару матеріалу на експлуатаційні властивості деталей машин .....	388
7.8 Управління формуванням поверхневого шару деталей машин .....	398
Питання для самоперевірки.....	400
Тема 8. Технологічні розмірні ланцюги. Припуски на обробку деталей машин .....	401
8.1 Види технологічних розмірних ланцюгів .....	401
8.2 Основні поняття та визначення, які належать до теорії розмірних ланцюгів .....	402
8.3 Розрахунок похибки замикаючої ланки розмірного ланцюга .....	404
8.4 Методи досягнення точності замикаючої ланки.....	405
8.5 Припуски на обробку деталей машин .....	409
8.5.1 Основні поняття та визначення .....	410
8.5.2 Основні фактори, що впливають на величину припуску .....	416

8.5.3	Методи визначення припусків на обробку.....	427
8.5.4	Розрахунок довжинних технологічних операційних розмірів із застосуванням теорії графів .....	429
8.6	Основні причини похибок при механічній обробці.....	438
8.6.1	Похибки кінетичної схеми обробки .....	438
8.6.2	Вплив похибок виготовлення ріжучого інструменту та пристроїв на точність обробки .....	440
8.6.3	Вплив на точність обробки температурних деформацій верстата.....	441
8.6.4	Вплив на точність обробки температурних деформацій різального інструменту .....	442
8.6.5	Вплив на точність обробки температурних деформацій оброблюваних заготовок .....	443
8.6.6	Вплив на точність обробки розмірного зносу різця..	445
8.6.7	Вплив на точність обробки внутрішніх напруг у заготовках .....	447
8.6.8	Жорсткість технологічної системи та її вплив на точність обробки .....	448
8.6.9	Визначення сумарної похибки механічної обробки .	453
8.7	Статистичні методи дослідження якості виробів.....	453
	Питання для самоперевірки.....	463
Тема 9.	Вибір та розрахунок режимів різання. Забезпечення точності механічної обробки .....	465
9.1	Загальні вимоги, яким має задовольняти режим різання .....	465
9.2	Призначення періоду стійкості ріжучого інструменту..	466
9.3	Теоретичні положення щодо призначення режимів різання.....	466
9.4	Загальні положення щодо оптимізації режиму різання.	473
9.4.1	Вибір економічного режиму різання .....	475
9.4.2	Вибір режиму різання найбільшої продуктивності ..	475
9.5	Вибір та розрахунок режиму різання при багатоінструментній обробці.....	478
9.6	Забезпечення точності механічної обробки .....	479
9.6.1	Методи налаштування верстатів .....	479
9.7	Розрахунок режимів різання, які забезпечують потрібну якість обробки .....	483

9.8	Управління процесом обробки .....	487
	Питання для самоперевірки.....	499
Тема 10.	Конструкція і принципи роботи сучасного верстата з ЧПУ.....	500
10.1	Основи числового програмного управління .....	500
10.1.1	Особливості устрою та конструкції фрезерного верстата з ЧПУ .....	502
10.1.2	Функціональні складові (підсистеми) ЧПУ .....	504
10.1.3	Підсистема приводів .....	506
10.1.4	Підсистема зворотного зв'язку .....	509
10.1.5	Функціонування системи ЧПУ .....	512
10.1.6	Мови для програмування обробки .....	514
10.2	Основи програмування обробки.....	515
10.2.1	Прямокутна система координат .....	515
10.2.2	Написання простої управляючої програми .....	517
10.2.3	Створення УП на персональному комп'ютері.....	519
10.2.4	Передача управляючої програми на верстат .....	524
10.2.5	Перевірка управляючої програми на верстаті.....	525
10.3	Верстатна система координат.....	531
10.3.1	Нульова точка верстата та напрями переміщень .....	531
10.3.2	Нульова точка програми обробки та робоча система координат .....	535
10.3.3	Компенсація довжини інструменту.....	540
10.3.4	Абсолютні та відносні координати.....	541
10.3.5	Коментарі в УП та карта наладки .....	543
10.4	CAD/CAM .....	546
10.4.1	Методи програмування.....	546
10.4.2	Що таке CAD та CAM?.....	547
10.4.3	Загальна схема роботи з CAD/CAM–системою .....	548
10.4.4	Види моделювання.....	549
10.4.5	Рівні САМ–системи .....	552
10.4.6	Геометрія та траєкторія.....	553
10.4.7	Алгоритм роботи у САМ–системі.....	554
10.4.8	Вибір стратегії та інструменту, призначення параметрів обробки.....	557
10.4.9	Бекплот та верифікація .....	563
10.5	Постпроцесування.....	565
10.5.1	Передача УП на верстат з ЧПУ .....	568

10.5.2	Асоціативність .....	570
10.5.3	П'ятикоординатне фрезерування та 3D–корекція .....	571
10.5.4	Високошвидкісна обробка (ВШО) .....	573
10.5.5	Вимоги до сучасної САМ–системи .....	575
10.6	Управління верстатом з ЧПУ .....	577
10.6.1	Органи управління .....	577
10.6.2	Основні режими роботи .....	579
10.6.3	Індикація системи координат .....	581
10.6.4	Встановлення робочої системи координат .....	582
10.6.5	Алгоритм знаходження нульової точки деталі по осі Z .....	582
10.6.6	Алгоритм знаходження нульової точки деталі по осях X і Y .....	584
10.6.7	Алгоритм знаходження нульової точки в центрі отвору .....	585
10.6.8	Вимірювання інструменту та деталі .....	586
10.7	Корисні програми .....	588
10.7.1	Моніторинг ЧПУ .....	588
10.7.2	Редактор УП Cimco Edit 7 .....	595
10.7.3	Сімейство сучасних САМ–систем «Техтран» .....	598
	Питання для самоперевірки .....	606
	Література .....	608

## ВСТУП

В усьому світі саме автомобілебудування вважається провідною галуззю машинобудування, що чинить істотний вплив на розвиток низки суміжних галузей та економіку країн загалом. Такі галузі промисловості, як металургійна, нафтохімічна, приладобудівна, електротехнічна та електронна, текстильна, гумовотехнічна тісно пов'язані з виробництвом автомобілів, тому розвиток автомобілебудування сприяє створенню нових робочих місць, нових підприємств, а, отже, стимулює технічний прогрес загалом.

Сьогодні в автомобілебудуванні зайнято понад 50 млн. осіб у світі, понад 120 млн. осіб працюють у суміжних виробництвах. У США, наприклад, кожен шостий, хто працює в промисловості, а це приблизно 12,5 млн. осіб, прямо чи опосередковано пов'язаний із виробництвом, продажем, експлуатацією, технічним обслуговуванням автомобілів. Щорічні інвестиції в автомобілебудування США перевищують 30 млрд. дол. США.

Саме автомобілебудування сприяло перетворенню США, Японії, Франції, Італії, Англії, Південної Кореї на високорозвинені промислові країни. Зараз цим шляхом ідуть Чехія, Словаччина, Китай, Іспанія та інші країни, оскільки саме виробництво автомобілів, крім зайнятості населення, ще й підвищує товарообіг, зміцнює грошову систему, сприяє створенню нових товарів і послуг.

Автомобілебудування має особливе значення для розвитку економіки тому що, одне робоче місце на автомобільному заводі створює щонайменше 8 робочих місць у суміжних галузях. Таким чином, розвиток автомобілебудування має не просто галузеве, а державне значення.

Автомобілебудування, також як авіакосмічна галузь і військово–промисловий комплекс, є тією галуззю, де споживають і розробляють наукомісткі технології, а за умов масового виробництва – автомобілебудування навіть перевершує інші передові галузі виробництва.

Успішна реалізація продукції на світовому ринку залежить від конструкції, експлуатаційних параметрів і якості автомобілів, тобто від технічного рівня самої галузі машинобудування. Тому зусилля фахівців, що працюють в автомобілебудуванні країни, мають бути спрямовані не тільки на збільшення випуску, а насамперед на

забезпечення надійності, безпеки, довговічності автомобілів, скорочення матеріалоемності, трудомісткості та енерговитрат під час виготовлення, зниження собівартості продукції, підвищення екологічної безпеки під час експлуатації та подальшої утилізації машин.

Ці проблеми вирішуються шляхом розроблення досконалих конструкцій автомобілів, застосування досконалих технологій під час їхнього створення та раціональних методів організації й управління виробничими процесами.

Удосконалення конструкцій машин потребує і безперервного вдосконалення технології їхнього виробництва, застосування сучасного високопродуктивного устаткування, новітніх засобів механізації та автоматизації виробничих процесів. Від технології виробництва багато в чому залежить надійність продукції, що випускається, та її собівартість.

Вивчення і використання функціональних, конструктивних і технологічних параметрів автотранспортних засобів під час проектування дасть змогу конструкторам знизити трудомісткість їхнього виготовлення, скоротити строки освоєння і постановки виробництва нової продукції.

Конструктор має вміти використовувати новітні досягнення науки і техніки для отримання найкращих параметрів виробу з найменшими витратами під час його виготовлення. Для цього слід орієнтуватися на маловідходні виробництва, застосування сучасних технологій і автоматизованих засобів підготовки виробництва.

Особливість автомобілебудування полягає в тому, що за великосерійного характеру виробництва та численності модифікацій машин існує необхідність швидкої зміни моделей для підвищення конкурентоспроможності продукції, що слід враховувати ще на стадіях проектування технологічних ліній виробництва, розроблення конструкції автомобіля та його вузлів.

Поділ завдань проектування і виробництва виробів уже не відповідає вимогам сьогодення, оскільки не може забезпечити ні високої якості проектів, ні сучасного рівня організації виробництва.

Зараз проектування виробів, технологій їх виготовлення і підготовка виробництва ведуться практично одночасно. У процесі проектування виробів виокремлюється основна інформація, яка одночасно використовується для розроблення технологічних процесів,

підготовки та організації виробництва. Особливо цьому сприяє використання потужної комп'ютерної техніки. Паралельне розроблення різних етапів проектування вимагає від проєктанта хороших технологічних знань. Виникає необхідність у підготовці висококваліфікованих фахівців з проектування зі знаннями технологічної науки. Тому у цьому посібнику увага приділяється питанням взаємозв'язку конструкції виробів з методами обробки деталей та їх складання.

З огляду на швидкозмінні вимоги ринку необхідно забезпечувати не тільки високу продуктивність технологічного обладнання, а й можливість його переналагодження під наступне покоління розроблюваних автомобілів. У зв'язку з цим сьогодні велика увага приділяється створенню автоматизованих виробничих систем, які можна переналагоджувати і реконфігурувати.

До появи гнучких систем, автоматизація виробничих процесів обмежувалася, в основному, масовим виробництвом. Однак зі зменшенням життєвого циклу автомобілів унаслідок науково-технічного прогресу і зі збільшенням номенклатури продукції, що виготовляється, виникла потреба у створенні таких виробництв, які забезпечували б виготовлення деталей невеликими партіями за умови збереження продуктивності, якості та собівартості, притаманних багатосерійному виробництву, тобто створювали б умови для розвитку реконфігуруємих виробничих систем, на основі яких будувалися би нові сучасні машинобудівні заводи.

Такі автоматизовані системи проєктування і виготовлення виробів особливо ефективні в умовах динамічного виробництва, пов'язаного з багаторазовими переналагодженнями технологічного обладнання.

Кадрові та сировинні ресурси України, її величезний науково-технічний потенціал можуть стати базою створення високоєфективних конструкцій автомобілів нових поколінь, сучасних виробничих та інформаційних технологій.

Всі ці питання знайшли відображення в цьому посібнику.

## ТЕМА 7. ВИДИ ЗАГОТОВОК ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ТА СПОСОБИ ЇХ ВИГОТОВЛЕННЯ

### 7.1 Загальні положення щодо вибору заготовок

Вибір заготовки – важлива стадія проектування технологічного процесу. Від того, наскільки правильно обрано заготовку, великою мірою залежить складність механічної обробки деталі. Від правильності встановлення форми, розмірів та припусків на обробку, точності розмірів та твердості матеріалу залежать: витрата матеріалів, кількість операцій або переходів, витрата інструменту, трудомісткість і, в результаті, вартість процесу обробки та виготовлення деталі в цілому.

При точній заготовці з малими припусками, собівартість механічної обробки буде низькою. При грубій заготовці з великими припусками собівартість механічної обробки буде високою, витрати металу на один виріб великими.

При розробці технологічного процесу виготовлення деталі можуть бути **два принципові напрями**:

- отримання заготовок, що найбільш наближаються за формою та розмірами до готових деталей. У цьому випадку на заготівельні цехи припадає значна частка трудомісткості виготовлення деталі та відносно менша частка припадає на механічні цехи;
- отримання грубої заготовки з великими припусками; тоді на механічні цехи припадає основна частка трудомісткості та вартості виготовлення деталі.

**Перший напрям** відповідає, як правило, масовому та великосерійному виробництву, оскільки дороге сучасне обладнання заготівельних цехів, яке забезпечує високопродуктивні процеси отримання точних заготовок, економічно виправдовується лише при великих масштабах виробництва. **Другий напрям** типово для індивідуального та дрібносерійного виробництва, коли застосування дорогого обладнання в заготівельних цехах абсолютно неекономічне.

Вибір заготовок для деталей, що не виготовляються безпосередньо із сортового прокату (матеріалу), обумовлюється

такими факторами:

- геометричними формами та розмірами деталей;
- технічними умовами на матеріал деталі (хімічний склад, механічні властивості, структура, розташування волокон і т.п.);
- мінімальною вартістю виготовлення деталі в цілому;
- наявністю наявного обладнання та оснащення загальних цехів;
- капітальними витратами та тривалістю підготовки нових технологічних процесів виготовлення заготовок.

Особливо виділимо заготовки із сортового матеріалу. Вибір їх простий, потрібно визначити тільки діаметр і довжину, наприклад, при заготовках із сортового прокату круглого перерізу.

При грубих неточних заготовках зазвичай потрібно введення розмітки перед механічною обробкою для того, щоб викроїти деталь з таких заготовок. В іншому випадку може виявитися, що на деяких поверхнях не вистачить припуску для обробки і залишаться деякі поверхні необробленими.

Розмітка також буває необхідна при заготовках складної конфігурації та великих розмірів, навіть якщо вони виконані за формою та розмірами задовільно.

## **7.2 Методи виготовлення заготовок. Характеристика конструктивних, технологічних та економічних параметрів заготовок**

У машинобудуванні застосовуються такі *види заготовок*:

- виливки з сірого та ковкого чавуну, сталі та кольорових сплавів;
- поковки та штампування, що виробляються в гарячому стані, зі сталі та деяких кольорових сплавів, наприклад латуні;
- холодні штампування з тонкого листового матеріалу;
- сортовий матеріал (гаряче– і холоднопрокатний і холодно–тягнутий, прутковий, смуговий та листовий, зі сталі та кольорових металів);
- заготовки із сортового матеріалу, із пластмас.

Способи виготовлення литих заготовок та характеристика їх за точністю розмірів описані в спеціалізованій літературі і не є темою

цього навчального курсу. Проте слід відзначити що найменш точними, а отже, і з найбільшими припусками виходять виливки при ручному формуванні в піщано-глинисті форми за шаблоном та дерев'яними моделями. Ці методи вимагають водночас найменших капітальних витрат для здійснення, тому їх застосовують головним чином в індивідуальному і дрібносерійному виробництві.



Рисунок 7.1 – Процес гарячого об'ємного штампування

Найбільш точні *заготовки з найменшими припусками* отримують виливкою в кокіль, литтям під тиском і литтям в оболонкові форми (точне лиття). У багатьох випадках цими методами можна отримати виливки з точністю, що виключає необхідність застосування механічної обробки (точність до 0,02 мм при деталях невеликих розмірів).

Методи виготовлення точних виливків вимагають наявності дорогого обладнання та оснащення. Обладнання та оснащення складні при переналагодженні з одних деталей на інші. Тому ці методи

економічно доцільні лише при значних масштабах виробництва і застосовуються головним чином у великосерійному та масовому виробництві.

Способи виготовлення кованих та штампованих заготовок, що широко застосовуються в машинобудуванні, вказані нижче.

***Основні методи виготовлення кованих заготовок:***

- вільне кування під молотом;
- штампування під молотом у відкритих штампах;
- штампування під молотом у закритих багатострумкових штампах;
- штампування у штампах на механічних пресах;
- штампування на горизонтально кувальних машинах;
- періодичний прокат (фасонне вальцювання);
- штампування на калібрувальних пресах;
- карбування та калібрування у штампах на карбункових пресах.



Рисунок 7.2 – Загальний вигляд поковок (заготовки чорнових або проміжних деталей, одержуваних під час кування (пресування) або штампування)

Точні методи штампування можуть бути економічно вигідні лише за порівняно великих обсягах виробництва. Так, наприклад, для карбування в холодному стані навіть щодо невеликих заготовок необхідно мати спеціальні преси великої потужності (від 500 до 3000 т).

При застосуванні точного штампування та карбування механічна обробка ряду поверхонь деталей може бути зведена лише до чистових видів обробки, чернові операції при цьому можуть бути виключені.

**Штамповані заготовки** в порівнянні з поковками, крім значно більшої точності в сенсі виконання окремих розмірів, мають менші припуски, кращу поверхню, кращу структуру матеріалу (в сенсі розташування волокон), вимагають меншої кваліфікації робітників і менших витрат на виробничу заробітну плату при виготовленні заготовки.

Однак для виготовлення штамповок необхідні відносно великі витрати на дорогий інструмент – штампи та дороге обладнання (молоти, преси, кувальні машини та ін.). Зі збільшенням розмірів штамповок зростають розміри штампів і швидко зростає вартість штампів, складність їх виготовлення та ще більше зростає вартість кувальних агрегатів.

Тому зазвичай великі поковки виготовляють методом вільного кування (*рос.* – «методом свободнойковки»). Точні методи штампування знаходять застосування головним чином при виготовленні дрібних та середніх деталей при великих масштабах виробництва.

**Сортовий прокат для механічної обробки** зазвичай застосовують наступних видів:

- нормальний та якісний прокатний (прутковий) матеріал круглого, квадратного та шестигранного перерізу;
- холоднотягнутий якісний (калібрувальний) прутковий матеріал круглого, квадратного та шестигранного перерізу;
- профільний (спеціальний) та смуговий прокатний матеріал;
- труби;
- дріт;
- листи різної товщини.

Сортова сталь круглого, квадратного та шестигранного перерізу застосовується за відповідними ГОСТами. За спеціальним

замовленням може бути отриманий сортовий матеріал будь-якої форми поперечного перерізу, але це пов'язано зі значним збільшенням вартості і можливо лише при великих розмірах замовлення на такий матеріал.

Точність розмірів поперечного перерізу прутків та інших видів прокату передбачена відповідними ГОСТами. Ця точність має велике значення при обробці на револьверних верстатах і токарних автоматах, коли затискач здійснюється цанговими патронами, дуже чутливими до відхилень розмірів перерізу матеріалу, що затискається.

При відхиленнях круглого за формою (еліптичність) перерізу, або за розмірами (утоніння або потовщення по діаметру) – може вийти недостатнє затискання прутка в цангу, або заклинювання. Як перше, так і друге неприпустимо.

Щоб уникнути таких неприємних явищ, при роботах на револьверних верстатах або токарних автоматах застосовують прутковий холодноотягнутий (калібрований) матеріал. Цей же матеріал застосовують також для багатьох деталей – валів. При цьому для низки поверхонь можна не застосовувати механічну обробку.

*Холодноотягнута (калібрована) сталь* виготовляється трьох класів точності: III клас – висока точність; IV клас – нормальна і V клас (автоматна) при дуже низькій шорсткості зовнішньої поверхні. Точність цих сортів пруткової сталі визначаються такими стандартами:

- сталь кругла ГОСТ 2590–2006;
- сталь квадратна ГОСТ 2591–2006;
- сталь шестигранна ГОСТ 2879–2006;
- труби сталеві безшовні ГОСТ 8734–75.

Сортівий матеріал використовується для виготовлення деталей, що наближаються в перерізі до профілю вихідного матеріалу, тобто коли для виготовлення деталей з такого матеріалу не потрібно знімати занадто велику кількість матеріалу.

### **7.3 Однорідність матеріалу заготовок**

Одна з основних вимог до якості заготовок – однорідність матеріалу заготовок (або сортового матеріалу) як за хімічним складом, так і за властивостями, отриманими в результаті термічної обробки. Тільки при дотриманні цих вимог в певних межах можна надійно

витримувати високі, економічно вигідні режими різання при обробці на верстатах. Підвищення твердості матеріалу заготовок викликає підвищену витрату різального інструменту, а також призводить до необхідності знижувати режими різання, отже, зниження продуктивності верстатів і норм вироблення.

Твердість в цьому випадку розуміється як найпростіша ознака, що визначає оброблюваність металу. Слід зазначити, що на оброблюваність матеріалів різанням впливають крім твердості також в'язкість, чистота металу від сторонніх включень та інших.

Зазначені вимоги відносяться і до сортового матеріалу, що розрізається на заготовки на різних верстатах, а також до пруткового матеріалу, що призначається для обробки на револьверних верстатах і автоматах, на яких зазвичай застосовуються високі режими різання.

З метою забезпечення однорідності по твердості і оброблюваності, штамповки і поковки з високовуглецевих сталей перед передачею їх в механічну обробку зазвичай піддаються термічній обробці: віджигу або нормалізації.

У деяких випадках такі заготовки піддаються так званому поліпшенню (загартуванню з високим відпуском). Зазначені вище вимоги однорідності заготовок за хімічним складом і за властивостями, отриманими в результаті термічної обробки, змушують заводи, матеріал що надходить, контролювати за хімічним складом і встановлювати в термічних цехах контроль заготовок, що пройшли термічну обробку за твердістю за шкалою Брінеля або Роквелла.

#### **7.4 Техніко–економічне обґрунтування вибору заготовок**

Позначимо через  $q$  – масу деталі і  $G$  – масу заготовки. Тоді коефіцієнт використання матеріалу:

$$\eta = \frac{q}{G}. \quad (7.1)$$

Цей коефіцієнт має бути не менше 0,6. У багатьох випадках можна отримати  $\eta > 0,8$ . Однак у деяких галузях промисловості він може бути 0,2 і навіть нижче. Значення коефіцієнтів використання матеріалів для деяких видів заготовок наведені в табл. 7.1 та табл. 7.2.

Таблиця 7.1 – Використання матеріалу при різних способах лиття

Спосіб лиття	Коефіцієнт		
	виходу придатного	масової точності	використання матеріалу
У піщано-глинисті форми	0,3...0,5	0,6...0,7	0,20...0,35
В оболонкові форми	0,5...0,6	0,85...0,9	0,40...0,55
У металеві форми (кокіль)	0,4-0,5	0,70...0,75	0,30...0,40
За виплавлюваними моделями	0,6...0,8	0,85...0,90	0,50...0,75
Під тиском	0,6...0,8	0,95...0,98	0,60...0,80
Відцентрове	0,4...0,5	0,7...0,8	0,30...0,40
Середні значення	0,45...0,65	0,80...0,85	0,40...0,60

Таблиця 7.2 – Середні значення характеристик використання матеріалу для цехів масового та великосерійного ковальсько-пресового виробництва

Середня маса поковки, кг	Коефіцієнт		
	використання матеріалу	виходу придатного	масової точності
З індукційним нагріванням			
До 1	0,45	0,75	0,60
1,2... 2,5	0,51	0,80	0,64
2,6... 5,0	0,55	0,83	0,66
5,1...6,0	0,58	0,85	0,68
6,1...10	0,59	0,86	0,69
10,1...16	0,60	0,87	0,69
16,1...25	0,61	0,88	0,69
25,1...40	0,61	0,88	0,69
Більше 40	0,62	0,89	0,70
З полум'яним нагріванням			
До 1	0,40	0,72	0,56
1,1...2,5	0,45	0,75	0,60
2,6... 5,0	0,49	0,78	0,63
5,1...6,0	0,52	0,80	0,65
6,1...10	0,53	0,81	0,66
10,1...16	0,54	0,82	0,66
Більше 40	0,57	0,84	0,68

Шлях підвищення цього коефіцієнта - зменшення припусків на

обробку на заготовці, наближення форми і розмірів заготовки до форми і розмірів готової деталі. Обираючи заготовку, перевагу слід віддати тій, у якій коефіцієнт використання матеріалу є вищим.

Поряд із цим, вартість виготовлення заготовки має бути мінімальною. Порівнюючи кілька можливих варіантів заготовок, слід оцінювати не тільки коефіцієнт, а й вартість виготовлення деталі, для якої призначена заготовка.

Вибір заготовки з погляду мінімальної собівартості виготовлення деталі здійснюється шляхом зіставлення порівнюваних величин собівартості деталі, тобто частин повної собівартості, які змінюються за різних видів заготовки. Така порівняльна частка собівартості виготовлення деталі може бути підрахована за формулою:

$$C = M + Z_3 \left( 1 + \frac{H_3}{100} \right) + Z_M \left( 1 + \frac{H_M}{100} \right) + \frac{K_{об} + K_{осн}}{W}, \quad (7.2)$$

де  $M$  – вартість матеріалу для однієї деталі;

$Z_3$  і  $Z_M$  – виробнича зарплата відповідно по заготівельним і механічним цехам, де виготовлялася деталь;

$H_3$  і  $H_M$  – накладні витрати по заготівельному та механічному цехам;

$K_{об}$  і  $K_{осн}$  – капітальні витрати відповідно на нове обладнання та обладнання для виготовлення заготовки та деталі;

$W$  – виробнича програма одного виду заготовок.

Вартість матеріалу для однієї деталі:

$$M = mG - m_1K(G - g), \quad (7.3)$$

де  $m$  – вартість 1 кг вихідного матеріалу заготовок, грн;

$m_1$  – вартість 1 кг відходів, грн;

$K$  – коефіцієнт використання відходів;

$G$  і  $g$  – маса заготовки та маса деталі, кг.

Заробітна плата (3) робітника може бути визначена за формулою:

$$Z = \sum_{i=1}^{i=n} (Z_p t_{шт})_i + \sum_{i=1}^n (Z_n t_{пз})_i, \quad (7.4)$$

де  $Z_p$  – зарплата виробничого робітника на годину;

$Z_H$  – заробітна плата наладчика на годину, грн;

$t_{шт}$ ,  $t_{пз}$  – штучний і підготовчо–заклучний час (год), по кожній з операцій процесів виготовлення деталі, що залежать від виду заготовки;

$n$  – число операцій.

Якщо потрібно вибрати раціональну заготовку з трьох можливих варіантів, то необхідно порівнювати величини собівартості виготовлення заготовок для кожного варіанту. Очевидно, що заготовку треба взяти ту, за якої забезпечується мінімальна собівартість. Якщо потрібно вирішити питання, яку взяти заготовку – з прокату, поковку, отриману вільним куванням, або поковку, отриману шляхом гарячого штампування в штампах, – то слід вчинити наступним чином.

Нехай витрати, прямопропорційні кількості заготовок, що виготовляються, будуть:

$$A = M + Z_3 \left( 1 + \frac{H_3}{100} \right) + Z_M \left( 1 + \frac{H_M}{100} \right). \quad (7.5)$$

Витрати, що розподіляються на всю кількість виготовлених заготовок за певний відрізок часу (одноразові або періодичні витрати),

$$B = K_{об} + K_{осн}. \quad (7.6)$$

Тоді

$$C = A + \frac{B}{x}, \quad (7.7)$$

де  $x=W$ , або  $C = Ax + B$ , де  $C$  – вартість виготовлення деталей на готову програму.

Потрібно визначити, який спосіб виготовлення заготовки прийняти:

- прокат:  $C' = A'x + B'$ ;
- вільна ковка:  $C'' = A''x + B''$ ;
- штампування:  $C''' = A'''x + B'''$ .

Побудуємо графік залежності вартості виготовлення  $C$  від річної програми  $x$  (рис. 7.3).

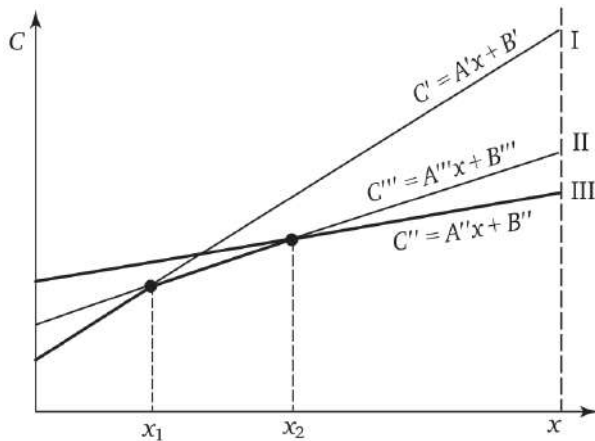


Рисунок 7.3 – Залежність собівартості виготовлення деталей від програми випуску при різних методах отримання заготовки

З графіка видно, що якщо  $x < x_1$  то заготовка повинна бути з прокату. При  $x_2 > x > x_1$  заготовка має бути отримана вільним куванням. При  $x > x_2$  – штампуванням, так як у цих випадках вартість виготовлення заготовок та їх механічної обробки будуть мінімальними. Таким чином, кожен з варіантів заготовок має свою область застосування.

## 7.5 Попередня обробка заготовок

До операцій попередньої обробки заготовок відносяться:

- термообробка;
- очищення перед механічною обробкою;
- калібрування та правка;
- відрізка;
- центрування;
- попередня механічна обробка.

### 7.5.1 Термообробка заготовок

Проводиться для ковано–штампованих заготовок зі сталі та кольорових сплавів, а також литих із сірого чавуну та сталі,

кольорових сплавів. **Цілі термообробки** наступні.

**Зняття внутрішніх напруг (віджиг, відпуск).** Проводиться відпуск (нагрів до температури нижче інтервалу структурних перетворень, витримка при цій температурі і подальше охолодження), а також віджиг (нагрів до температури, що перевищує на  $30\div 50^{\circ}\text{C}$  інтервал перетворень; витримка при цій температурі і повільне охолодження разом з пічкою). Відмінність відпуску від віджигу полягає в тому, що при відпуску не відбувається значного зниження твердості заготовки, тоді як при віджигу, навпаки, відбувається зниження твердості заготовки.

**Зменшення твердості матеріалу (віджиг).**

**Поліпшення структури матеріалу (нормалізація)**

здійснюється при нагріванні до температури яка перевищує на  $30\div 50^{\circ}\text{C}$  інтервал структурних перетворень, витримка при цій температурі з подальшим охолодженням на спокійному повітрі.

Відрізняється від віджигу лише процесом охолодження після витримки при температурі віджигу. Під час нормалізації підвищується твердість і механічні властивості матеріалу.

**Прискорення остаточного завершення структурних перетворень у матеріалі (старіння).** Для сталі – нагрівання деталей до  $150\div 180^{\circ}\text{C}$ , витримка при цій температурі та охолодження разом із пічкою.

## **7.5.2 Очищення заготовок перед механічною обробкою**

Застосовується для попередження сильного абразивного характеру зношування ріжучого інструменту та підвищення швидкостей різання при обробці.

Простим і високопродуктивним методом є очищення в барабані, що обертається. Недолік полягає в тому, що в цьому випадку не очищаються поглиблення та внутрішні поверхні заготовок, а також створюється значний шум при очищенні.

Застосовуються для очищення заготовок обертові сталеві щітки, і гідропіскоструминні апарати. Використовується також хімічний метод очищення заготовок – травлення заготовок  $10\div 15\%$  - вому розчині сірчаної кислоти за нормальної температури  $80\div 90^{\circ}\text{C}$ . Після травлення заготовки промивають у гарячій воді та нейтралізують у розчині кальцінованої соди.

### 7.5.3 Виправлення заготовок

Здійснюється з метою усунення викривлення осей або окремих частин заготовок. Розрізняють такі методи виправлення:

- гаряче та холодне виправлення під молотом (для кованих та штампованих заготовок);
- на гідравлічних, пневматичних, ексцентрикових та ручних пресах;
- на правильно–калібрувальних верстатах; застосовується для виправлення гладких циліндричних валів. Схема такого верстата представлена на рис. 7.4;
- виправлення вручну молотком на плитах.

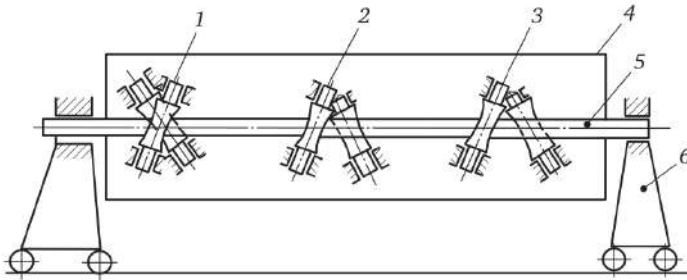


Рисунок 7.4 – Схема виправлення на правильно–калібрувальних верстатах

Правка на верстаті (рис. 7.4) здійснюється трьома парами роликів 1, 2 із з увігнутою робочою поверхнею. Ролики в парі 1 розташовані один над іншим і є подавальними. У парі 2 та 3 ролики зміщені один щодо іншого. Всі шість роликів розташовані в барабані 4, який обертається навколо осі прутка 5. При цьому ролики також обертаються і, обкочуючись навколо прутка, здійснюють процес його виправлення. Швидкість поступального руху дроту в межах  $5 \div 30$  м/хв, залежно від швидкості обертання барабану. Перед надходженням в барабани пруток закріплюється в спеціальних стійках 6. Залежно від ступеня викривлення дроту його пропускають через барабан від 1 до 6 разів. Точність виправлення досягає  $0,1 \div 0,2$  мм на 1 м довжини дроту при попередньо обробленому дроті, і від 0,5 до 0,9 мм на 1 метр довжини необробленого дроту.

## 7.5.4 Відрізка заготовок

Використовуються наступні методи розрізання заготовок.

**Газокисневе різання**, яке полягає в тому, що матеріал у зоні розрізки згорає в струмені чистого кисню. Газовому різанню піддаються матеріали, у яких температура займання менша за температуру плавлення. Якщо це не дотримується, то метал виплавлятиметься, а не згорятиме.

З цієї причини не ріжуться кольорові сплави та чавун. При розрізанні цих матеріалів розплавлені частинки матеріалу будуть видуватися з місця різку, не згоряючи в кисні, а кромки розрізаного виробу, покриваються шаром тугоплавких оксидів цих металів.

Добре ріжуться сталі із вмістом вуглецю до 0,3 %. При вмісті вуглецю 0,3÷0,7 % різання не погіршується, але сталь схильна до загартування та утворення тріщин. При вмісті вуглецю понад 0,7 % процес різання дуже погіршується. Важко різати леговані сталі. Так, легована сталь із вмістом марганцю близько 14 % газовому розрізанню взагалі не піддається. Легована сталь із вмістом хрому вище 1,5 % газовому розрізанню також не піддається.

Продуктивність різання залежить від товщини матеріалу, що розрізається:

- до 10 мм – 16 погонних м/год;
- 50÷100 мм – 7 погонних м/год;
- 510÷200 мм – 3 погонні м/год.

**Відрізка на пресах.** Може виконуватися як холодне ламання матеріалу, відрізка за допомогою ножів, відрізка спеціальними штампами.

При холодній ломці матеріал розмічають і в місцях розмітки роблять газорізанням підріз, щоб протилежні пуансону волокна були перерізані (рис. 7.5).

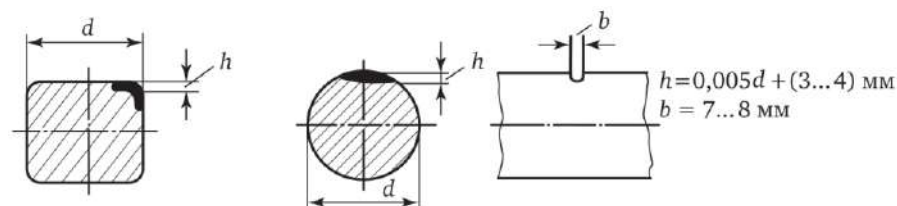


Рисунок 7.5 – Підріз матеріалу під час холодного ламання

Схема холодного ламання матеріалу представлена на рис. 7.6. Цей метод дозволяє різати заготовки досить великих перерізів (150÷200 мм). Сталь ламається легко, якщо вміст вуглецю в ній становить більше 0,4 %.

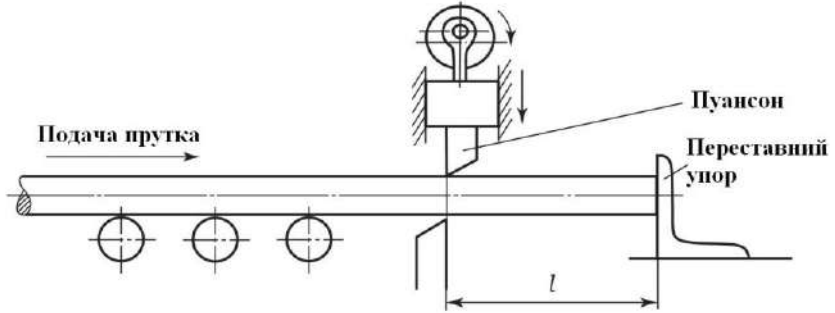


Рисунок 7.6 – Схема холодної ломки матеріалу

Різання ножами проводиться на спеціальних пресах з силою від 100 до 10 000 кН з числом подвійних ходів від 15 до 160 на хв. Під час відрізання на пресах, на поверхні виникає облоя, і припуск на механічну обробку торця дорівнює сумі власне припуску і величини облою (рис. 7.7).

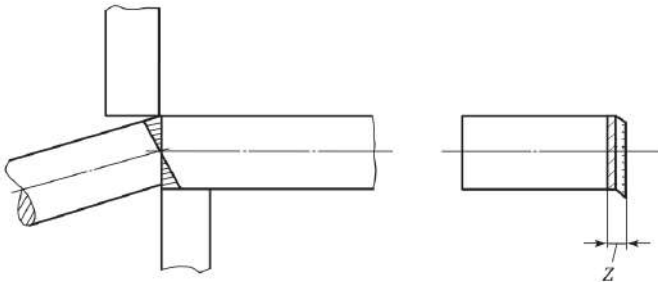


Рисунок 7.7 – Схема різання на пресах

При відрізанні у спеціальних штампах величина цього облою менша (рис. 7.8).

**Відрізання пилами** може здійснюватися наступними методами.

**1. Ножівковими пилами** на ножівкових верстатах (рис. 7.9). Ножівкове полотно отримує зворотно-поступальний рух від

механічного приводу. Під час робочого ходу (вліво) ножівка притискається із силою  $Q$ . Товщина прорізу приблизно дорівнює товщині ножівкового полотна ( $1\div 3$  мм). Довжина ходу ножівки має дорівнювати  $\sim 1,2d$ .

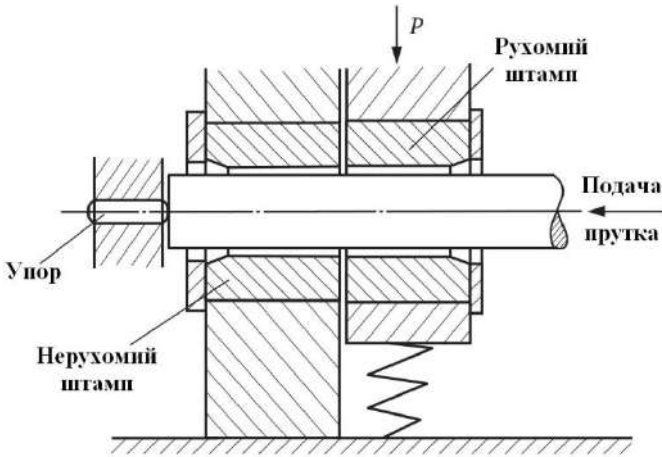


Рисунок 7.8 – Схема різання на спеціальних пресах

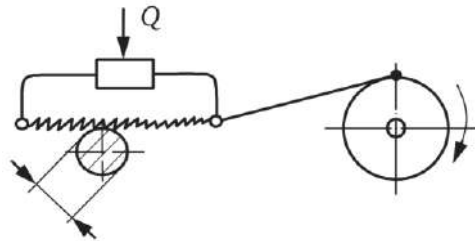


Рисунок 7.9 – Схема відрізання матеріалу ножівковими пилами

Цей метод вигідний для розрізання дорогих матеріалів через малі втрати металу. Недоліками його є: низька продуктивність, дефіцитність полотен, косий проріз, що змушує додатково підрізати торці після відрізки.

**2. Стрічковими пилами** завтовшки  $1,0\div 1,5$  мм. Верстати для роботи стрічковими пилами застосовуються в основному для розрізання кольорових сплавів (рис. 7.10). При розрізанні цими

пилками виходить чистий зріз по торцю, підвищена точність довжини заготовки, мала витрата металу у відхід. Заготовки можна різати під будь-яким кутом (рис. 7.11, а). З листа можна таким чином вирізати фігурні заготовки (рис. 7.11, б). Недоліки: низька продуктивність; подача проводиться вручну; дефіцитність стрічкових пилок.

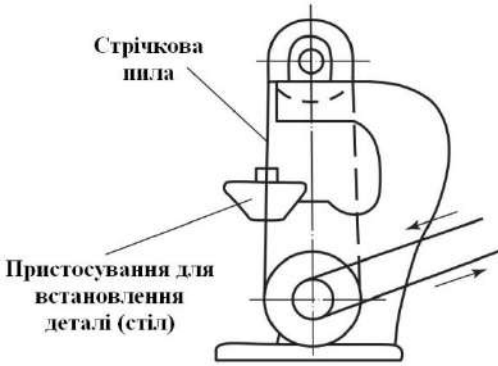


Рисунок 7.10 – Схема різання матеріалу

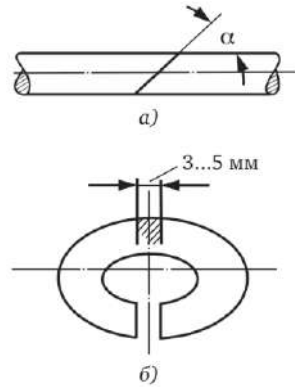


Рисунок 7.11 – Схема різання стрічковими пилами

**3. Розрізання дисковими пилами** широко застосовується для розрізання прокату, прутків, труб, балок різних профілів. Оскільки виготовлення пил великого діаметра цілком зі швидкорізальної сталі нерациональне і обходиться дорого, їх виготовляють складеними – з диска вуглецевої сталі з прикріпленими зубчастими сегментами зі швидкорізальної сталі (рис. 7.12).

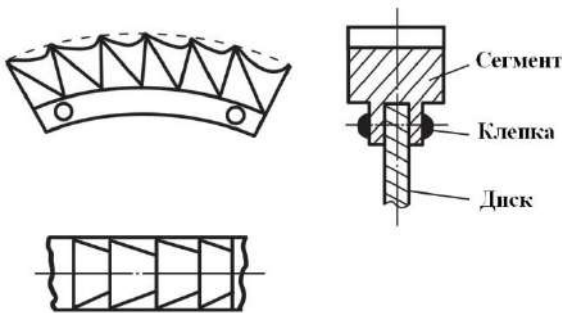


Рисунок 7.12 – Зубці дискових пил

Діаметр диска  $D = 500 \div 1000$  мм, товщина  $5 \div 12$  мм. Під час різання сталі швидкість різання  $v = 18 \div 30$  м/хв, при різанні чавуну -  $v = 10 \div 30$  м/хв, при різанні кольорових сплавів  $v = 160 \div 200$  м/хв. Подача на зуб  $S_z = 0,02 \div 0,2$  мм.

При різанні сталі швидкість різання  $v = 18 \div 30$  м/хв, при різанні чавуну -  $v = 10 \div 30$  м/хв, при різанні кольорових сплавів  $v = 160 \div 200$  м/хв. Подача зуб  $S_z = 0,02 \div 0,2$  мм.

При розрізанні великих прутків або балок довжина контакту диска з деталлю постійно змінюється в міру проходження пилки. Це викликає зміну сили різання за постійної подачі. Зміна сили різання негативно відбивається на роботі верстата, викликаючи сильну напругу в окремих його частинах. Для усунення цього верстата мають автоматичну безступінчасту зміну подачі в залежності від дуги контакту диска  $AB$  з деталлю так, щоб сила різання була постійною (рис. 7.13).

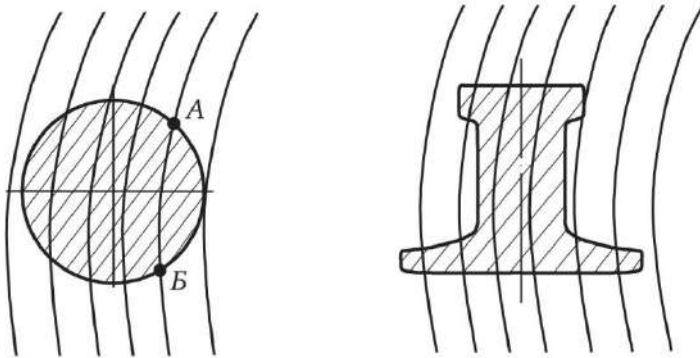


Рисунок 7.13 – Довжина контакту диска з матеріалом, що розрізається

З метою підвищення продуктивності заготовки також ріжуть пачками (рис. 7.14).

**Розрізання фрикційними пилами.** Фрикційною пилкою називається тонкий сталевий диск, що обертається від електродвигуна зі швидкістю  $100 \div 150$  м/с (рис. 7.15). При подачі прутка і обертанні диска внаслідок тертя нагріваються частки матеріалу в прорізі до температури плавлення. Розплавлений матеріал видаляється з прорізу самим диском, який охолоджується повітрям і водою. Для збільшення тертя на поверхні диска роблять насічку.

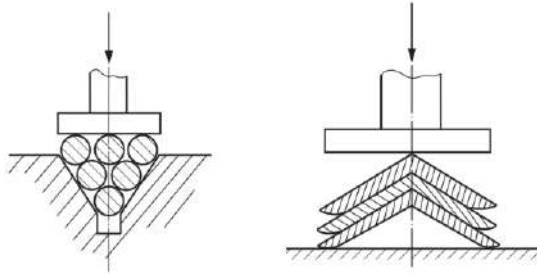
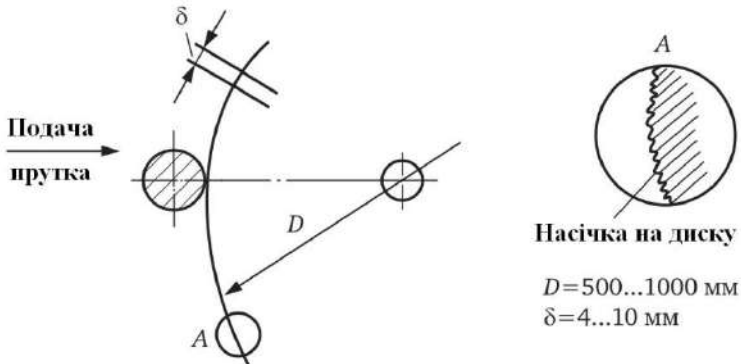


Рисунок 7.14 – Схеми різання матеріалу пачками

Подача буває ручна та механічна. Висока продуктивність. Ці пили дозволяють розрізати загартовані сталеві деталі, які не розрізаються звичайними пилами. Недоліком цього методу є великі задирки на торці після відрізки. Застосовується при розрізанні профілів невеликих розмірів ( $\text{Ø}20\div30$  мм).



$D$  - діаметр диска;  $\delta$  - товщина диска

Рисунок 7.15 – Схеми різання фрикційною пилою

**Розрізання електропилами.** Диск і прутки включаються в мережу з напругою, що дорівнює  $20\div30$  В, і силою струму в залежності від діаметра прутка. У місці різання виникає вольтова дуга, матеріал дроту плавиться, а диск видаляє розплавлений метал. Можна різати прутки діаметром до 50 мм.

**Відрізка різцями на токарних, револьверних, токарних автоматах і спеціальних відрізних верстатах** (рис. 7.16, а).

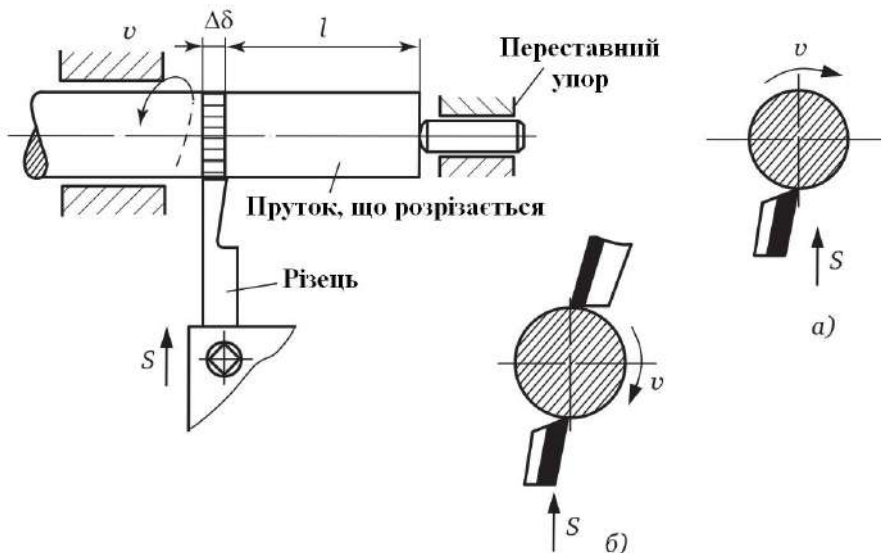


Рисунок 7.16 – Схема відрізання різцями

Ширина ріжучої кромки  $\delta = 3 \div 12$  мм, тому втрати матеріалу при різанні більші. Цей метод забезпечує більшу точність по довжині та високу якість поверхні.

Продуктивність висока для дрібних перерізів (до 150 мм), а при великих перерізах розміру деталі продуктивність різко падає, тому що виліт різця збільшується і внаслідок цього зменшується жорсткість системи та подача. Для збільшення продуктивності застосовують твердосплавні різці та розрізку двома різцями (рис. 7.16, б), використовують спеціальні верстати з числом обертів шпинделя, що поступово збільшується, у міру наближення вершини різця до центру прутка.

***Відрізка шліфувальними кругами на вулканітовій основі.***

Діаметр круга 400 мм, товщина  $\delta = 2 \div 3$  мм, тож втрати металу невеликі. Швидкість різання 80 м/с, подача до 5 мм/с. Розрізається матеріал діаметром до 100 мм. Продуктивність висока, пруток  $\varnothing 40 \dots 50$  мм розрізається за  $5 \div 6$  с, а куток  $30 \times 30 \times 3$  за 3 с. Можна розрізати матеріал будь-якої твердості. Застосовується в серійному та масовому виробництві.

***Анодно-механічне різання*** (рис. 7.17).

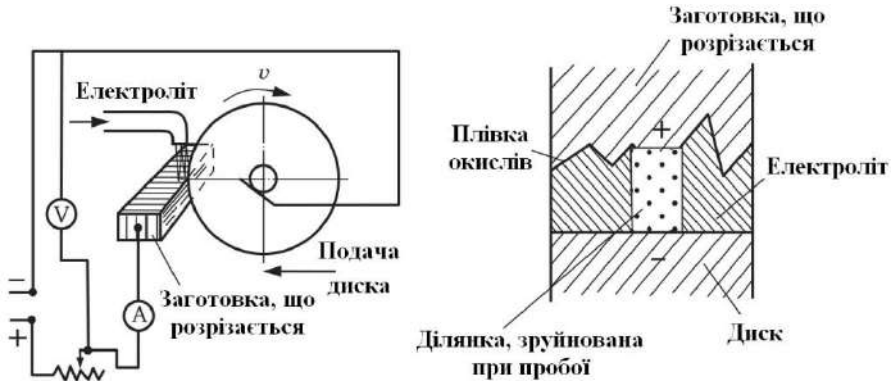


Рисунок 7.17 – Схема анодно-механічного різання

Заготовка підключається до позитивного полюса, диск – до негативного. До місця різі підводиться рідина, яка в результаті хімічної взаємодії створює на поверхні матеріалу що розрізається, анодну плівку, яка погано проводить електричний струм.

Інструмент, безперервно переміщуючись, знімає більшу частину плівки, що утворилася на виступаючих поверхнях деталі. У тих місцях, де плівка тонша, проходить струм, і в них різко зростає температура з імпульсним оплавленням металу без загального нагрівання деталі.

Робочою рідиною служить рідке скло, яке розчиняється водою до щільності  $1,28 \div 1,32 \text{ г/см}^3$ . Напруга електричного струму приймається  $U = 20 \div 30 \text{ В}$ , сила струму  $40 \div 45 \text{ А}$ . Окружна швидкість обертання диска  $12 \div 25 \text{ м/с}$ .

Продуктивність анодно-механічного методу різання не залежить від механічних властивостей металу, що розрізається, але знижується при підвищенні температури плавлення і теплопровідності металу, що розрізається.

**Розрізання на інших верстатах.** Крім зазначених вище способів різання заготовок може застосовуватися різка на горизонтально-фрезерних і стругальних верстатах. Ці способи менш продуктивні і застосовуються не в заготівельних цехах, а в невеликих механічних цехах. Найчастіше застосовують розрізання на горизонтально-фрезерних верстатах відрізними фрезами.

**Лазерне різання.** Лазерна різання матеріалів заснована на процесах, що виникають внаслідок теплового впливу випромінювання: випаровування матеріалу, плавлення та видалення розплаву із зони обробки. При цьому утворюються вузькі прорізи з мінімальною зоною термічного впливу. При різанні відсутня механічна дія на оброблюваний матеріал і виникають мінімальні деформації.

Практичний інтерес представляє лазерна різка та вирізання по контуру деталей та інструментів з конструкційних, інструментальних та композиційних матеріалів. При лазерній вирізці заготовок із листових матеріалів швидкість різання залежить від мінімального радіусу кривизни контуру.

При автоматизованій вирізці радіус деталі повинен бути меншим за розходження між початковою і кінцевою точками замкнутого контуру. При різанні та вирізці матеріалів по криволінійному контуру при обході його кутів, швидкість переміщення змінюється згідно величини різання. Крім того, зменшення швидкості різання призводить до спотворення профілю різку та збільшення шорсткості поверхні.

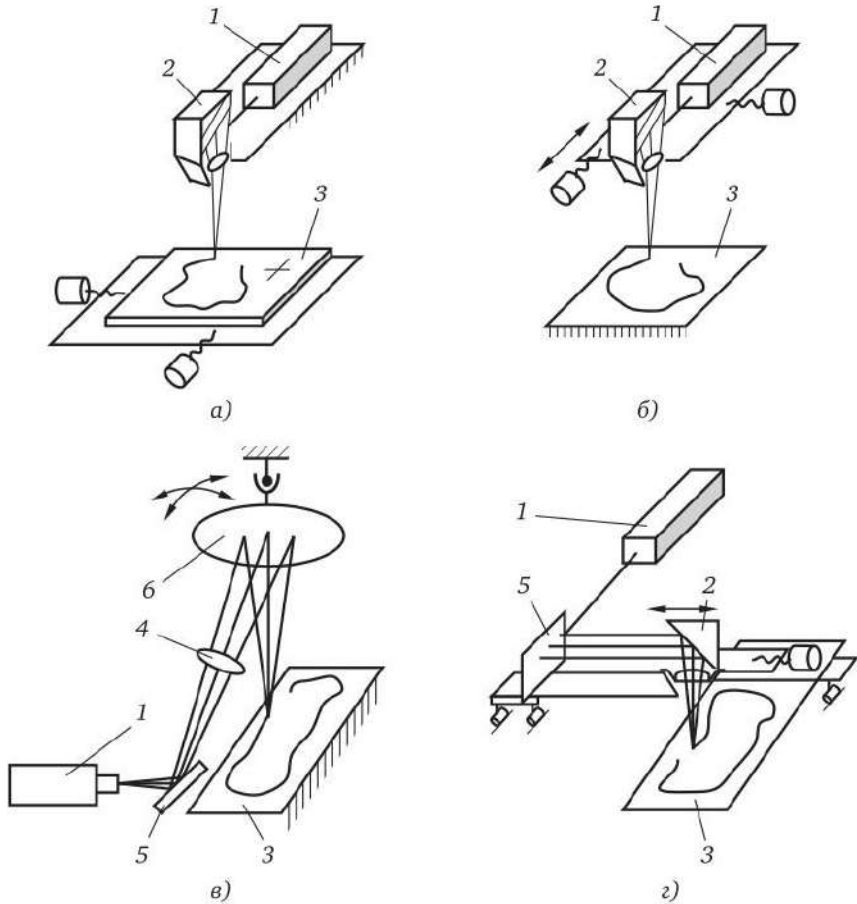
Лазерне різання матеріалів має великі перспективи застосування. Це пояснюється тим, що пучок лазерного випромінювання – це універсальний інструмент, придатний для різання різних матеріалів, що дає якісний тонкий різ, приблизно рівний діаметру плями випромінювання у фокальній площині, що не утворює стружку і працює без передачі сил різання на матеріал, який обробляється.

**Лазерне розрізання** матеріалів проводиться *двома способами*.

При першому способі за рахунок видалення продуктів руйнування матеріалу із зони впливу сфокусованого пучка лазерного випромінювання. У такий спосіб ріжуть метали, тканини тощо. У цьому випадку для збільшення ефективності процесу співвісно променю подають струмінь хімічно активного або інертного газу.

Другий спосіб застосовують для поділу крихких матеріалів (наприклад, скла, кераміки). При цьому способі керованого термосколювання, сфокусований лазерний промінь, який переміщається по поверхні крихкого матеріалу (наприклад скла), викликає появу термічної напруги та мікротріщин, що йдуть за ним. Поділ матеріалу відбувається по лінії дії лазерного променя.

Цей спосіб певною мірою подібний до алмазного різання крихких матеріалів. Для різання матеріалів можуть бути застосовані різні схеми взаємного розташування та переміщення лазера, фокусуєної системи та заготовки, деякі з них показані на рис. 7.18.



1 – випромінювач; 2 – різальна голівка з відхиляючим дзеркалом і збірною лінзою; 3 – заготовка; 4 – лінза (оптична система); 5 – відхиляюче дзеркало; 6 – поворотне фокусуєне дзеркало

Рисунок 7.18 – Схеми підведення пучка лазерного випромінювання до оброблюваної поверхні

Всі зазначені варіанти дозволяють проводити програмну обробку з переміщенням лазерного променя або заготовки за певною програмою.

**Схема а** – сфокусований пучок лазерного випромінювання нерухливий по відношенню до заготовки. Необхідна конфігурація різу виходить за рахунок руху заготовки 3, встановленої на координатному столі.

Працюючи за схемами б–г задана конфігурація різу виходить з допомогою переміщення сфокусованого лазерного випромінювання, заготовка нерухома.

**Схема б** здійсненна, наприклад, при спільному переміщенні випромінювача 1 і ріжучої головки 2 у поперечному напрямку та русі останньої паралельно осі променя випромінювача в поздовжньому напрямку. Тут певну складність представляє підведення до випромінювача засобів, що забезпечують його нормальне функціонування.

**Схема в** – переміщення сфокусованого пучка лазерного випромінювання здійснюється за рахунок повороту дзеркала б, підвішеного на кардані. У цьому випадку положення дзеркала б щодо поверхні обробки 3 вибирається значно більше половини максимального розміру столу.

В іншому випадку пучок випромінювання ковзатиме по поверхні обробки. Крім того, кромки різу виходять не перпендикулярними до поверхні обробки, а є частиною сфери з центром, що збігається з центром обертання дзеркала б. Звісно, у цьому випадку розміри обробки більш обмежені, ніж під час роботи із використанням інших схем.

**Схема г** – задана конфігурація різу виходить за рахунок переміщення сфокусованого пучка лазерного випромінювання у двох взаємно перпендикулярних напрямках за рахунок поздовжнього руху траверси з ріжучою головою 2 і поперечного переміщення різальної головки по траверсі.

Випромінювач 1 і заготовка 3 нерухомі. На траверсі встановлено відхиляюче дзеркало 5, яке направляє пучок випромінювання від випромінювача 1 до ріжучої головки 2, при будь-якому положенні траверси щодо випромінювача.

### 7.5.5 Центрування заготовок

Центрові отвори є базою для виконання ряду операцій: обточування, нарізання різьби, шліфування, нарізання зубів тощо. Тому до них пред'являються певні вимоги:

- кут конічної частини центрального отвору та кут центру повинні збігатися;
- обидва центрові отвори повинні мати загальну осьову лінію (рис. 7.19);
- засвердлювання центрових отворів повинно бути проведене так, щоб припуск був рівномірно розподілений по сторонах заготовки.



Рисунок 7.19 – Схема розташування центрових отворів

Форми та розміри центрових отворів вибираються за ГОСТ 3725 (рис. 7.20). В центрові отвори типу *K* для збереження під час транспортування, ввертаються пробки (заглушки).

Центрові отвори типу *K* найчастіше роблять з кутом  $60^\circ$ , але іноді при обробці великих і важких деталей цей кут збільшують до  $75^\circ$  і  $90^\circ$ .

Вершина центру не повинна вpirатися в заготовку, тому центрові отвори мають циліндричну частину малого діаметра  $d$  і конічну поверхню.

Конусна поверхня під кутом  $120^\circ$  робиться для запобігання задирок при зносі центрових отворів або вибоїн.

Застосовується два методи засвердлювання центрових отворів:

- двома нормальними свердлами;
- комбінованим центровим свердлом (рис. 7.21).

Центрування заготовок проводиться на вертикально– і горизонтально–свердлильних, токарних та револьверних верстатах, а в серійному та масовому виробництвах — на спеціальних одно– або двосторонніх центрувальних верстатах, а також на фрезерно–

центрувальних верстатах, на яких спочатку фрезерують торцеві поверхні одночасно з обох сторін, після чого комбінованими центровими свердлами центрують отвори (рис. 7.22).

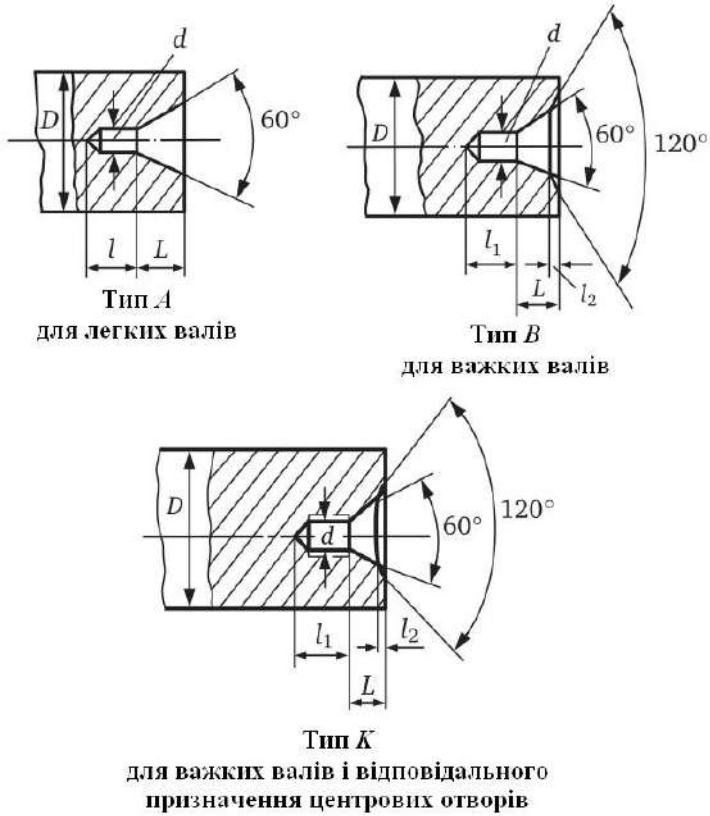


Рисунок 7.20 – Формы центровых отверстий

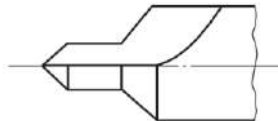


Рисунок 7.21 – Схема центрального сверла

Попередня механічна обробка заготовок здійснюється з метою

усунення дефектів заготовок, надання їм нормальної форми і розмірів.

Для обдирки застосовують безцентрово–обдирні верстати, на яких можна робити обдирку пруткового матеріалу діаметром від 15 до 80 мм і завдовжки до 7 м.

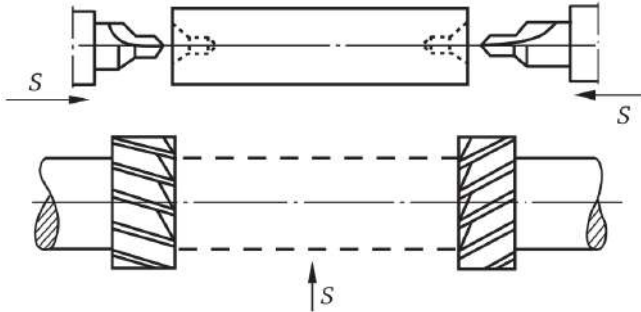


Рисунок 7.22 – Оброблення центрових отворів на фрезерно-центрових верстатах

## 7.6 Класифікація параметрів поверхневого шару деталей та їх характеристика

З урахуванням особливостей механізму формування поверхневого шару при механічній обробці та сучасних законів фізики твердого тіла про пластичну деформацію та руйнування існує наступна класифікація параметрів поверхневого шару (табл. 7.3).

Складні умови роботи деталей машин, зокрема деталей двигунів, зумовлені високої температурою і питомими навантаженнями, змушують конструктора задавати ті чи інші поєднання параметрів, що характеризують поверхневий шар. Характеристику параметрів поверхневого шару наведено нижче.

Нерівності поверхневого шару характеризуються *шорсткістю* (мікронерівності) і *хвилястістю* (макронерівності). Під мікронерівностями розуміють відхилення реальної поверхні від ідеальної в межах невеликих її ділянок (менше 8 мм до сотих часток міліметрів). Хвилястість являє собою періодичні нерівності великого кроку на ділянках протяжністю до 10 мм.

До макрогеометричних відхилень форми відносяться:

- нерегулярні відхилення (відсутність площинності у площин,

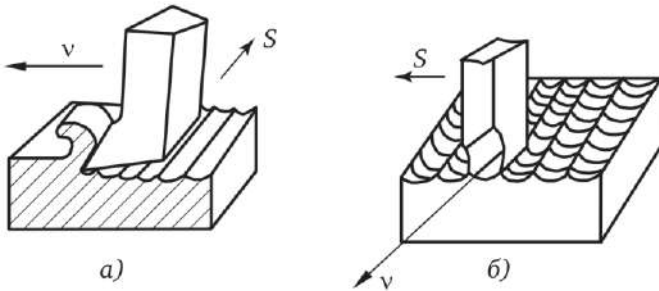
- конусність, еліптичність);
- закономірно повторювані відхилення (хвилястість поверхні).

Таблиця 7.3 – Класифікація параметрів поверхневого шару

Група параметрів	Підгрупа параметрів	Найменування параметрів	Позначення	Одиниця виміру
Нерівності поверхні ості	Шорсткість	Висота нерівностей	$Rz$	мкм
		Найбільша висота нерівностей	$R_{max}$	мкм
		Середнє арифметичне відхилення профілю	$Ra$	мкм
		Середній крок нерівностей профілю	$S_m$	мм
		Середній крок нерівностей профілю за вершинами	$S$	мм
		Відносна опорна довжина профілю на заданому рівні перерізу профілю	$t_{pw}$	%
	Хвилястість	Висота хвиль поверхні	$Wz$	мкм
		Крок хвиль поверхні	$S_{m_w}$	мм
	Напрямок нерівностей	Кут між напрямком нерівностей і напрямком дії зовнішнього навантаження	$\alpha_{ш}$	град.
Фізичний стан поверхневого шару	Ступінь деформації	Ступінь пластичної деформації шару	$\varepsilon_+$	%
		Ступінь деформації зерен	$\varepsilon_{зр}$	
	Наклеп (деформаційне зміцнення)	Глибина наклепу	$h_{н+}$	мкм
		Ступінь наклепу	$U_n$	%
	Кристалічна структура	Параметри решітки	$a, b, c$ $\alpha, \beta, \gamma$	нм
		Щільність дислокацій	$\rho_D$	см <sup>-2</sup>
Концентрація вакансій		$C_U$	–	
Напруженість поверхневого шару	Залишкові напруження	Мікронапруги (напруги першого роду)	$\sigma'_{ост}$	Па
		Мікронапруги (напруги другого роду)	$\sigma''_{ост}$	Па
		Субмікронапруги (напруги третього роду)	$\sigma'''_{ост}$	Па

Макронерівності покриті мікронерівностями, які мають різну форму, величину та орієнтацію. Поява мікрогеометричних нерівностей на обробленій поверхні в першу чергу обумовлюється так званими геометричними факторами, а саме: наявністю певної геометрії різального леза інструменту і певної величини подачі, тобто геометричний профіль обробленої поверхні являє собою регулярно повторювані западини, профіль яких копіює форму різальних кромek інструменту.

Шорсткість поверхні буває поздовжня (рис. 7.23, а) – у напрямку швидкості різання і поперечна – у напрямку подачі (рис. 7.23, б).



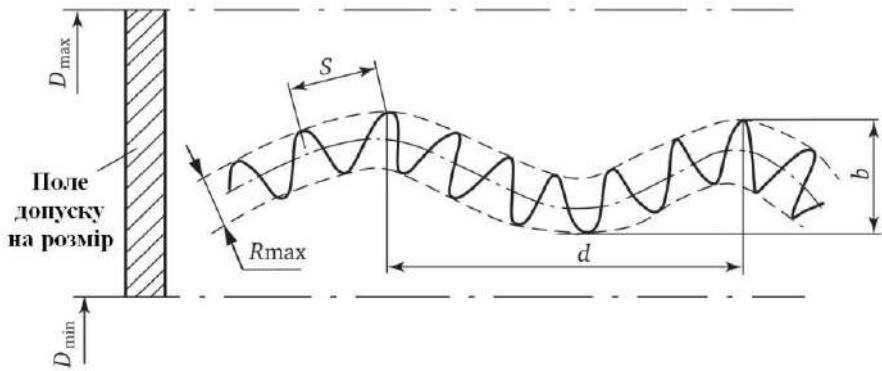
а – поздовжня; б – поперечна  
Рисунок 7.23 – Шорсткість поверхні

Поздовжня шорсткість утворюється внаслідок коливань сили різання при обробці, які можуть викликати вібрації, що збільшують поздовжню шорсткість, а також внаслідок утворення наросту. Поперечна шорсткість зазвичай більша, ніж поздовжня.

Макро- і мікронерівності характеризують параметри:  $d$  і  $b$  – макронерівності,  $R_{\max}$  і  $S$  – мікронерівності (рис. 7.24).

Шорсткість поверхні відповідно до ГОСТ 2789–73 характеризується наступними параметрами (рис. 7.25):

- висота нерівностей  $R_z$  – сума середніх арифметичних абсолютних відхилень п'яти найбільших мінімумів і найбільших максимумів профілю в межах базової довжини;
- найбільша висота нерівностей  $R_{\max}$  – відстань між лінією виступів профілю та лінією западин профілю в межах базової довжини;



$D_{\min}$  і  $D_{\max}$  - мінімальний і максимальний розміри деталі

Рисунок 7.24 – Макро- та мікрогеометричні нерівності поверхні

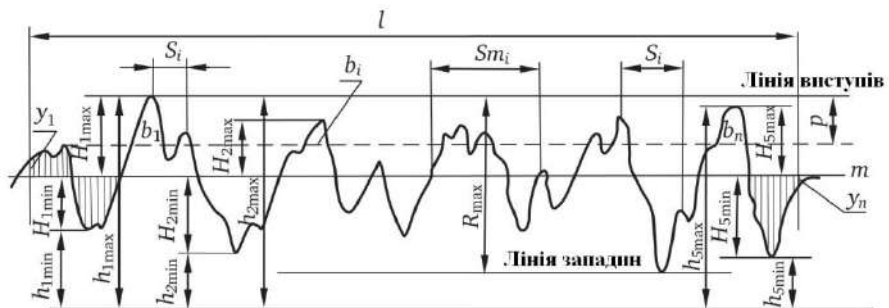


Рисунок 7.25 – Профіль мікронерівностей на обробленій поверхні

- середнє арифметичне відхилення профілю  $R_a$  – середнє арифметичне абсолютних значень відхилень профілю в межах базової довжини;
- середній крок нерівностей профілю  $S_m$  – середнє арифметичне значення кроку нерівностей профілю в межах базової довжини;
- середній крок нерівностей профілю  $S$  по вершинах – середнє арифметичне значення профілю по вершинах у межах базової довжини;

- відносна опорна довжина профілю  $t_p$  – відношення опорної довжини профілю до базової довжини. Водночас під **опорною довжиною профілю** розуміють суму довжин відрізків у межах базової довжини, що відсікаються на заданому рівні в матеріалі лінією, паралельною середній лінії. Відносна опорна довжина на різних рівнях різна. Рівнем перерізу профілю  $p$  називається відстань між лінією виступів профілю і лінією, що перетинає профіль.

**Хвилястістю поверхні** вважають нерівності з кроком від 1 до 10 мм. Характеристики хвилястості визначаються аналогічно характеристикам шорсткості. За рекомендацією ГОСТ 3951-73 для оцінки хвилястості поверхні встановлено три параметри:

- висота хвилястості  $W_z$  – середнє арифметичне значення із п'яти значень висоти хвилястості, виміряних на базовій довжині;
- найбільша висота хвилястості  $W_{\max}$  – відстань між найвищою та нижчою точками профілю хвилястості, виміряна на одній повній хвилі в межах базової довжини;
- середній крок хвилястості  $S_u$  – середнє арифметичне значення відстаней між однойменними сторонами сусідніх хвиль, виміряних по середній лінії в межах базової довжини.

Зіставлення хвилястості та шорсткості наведено на рис. 7.26.

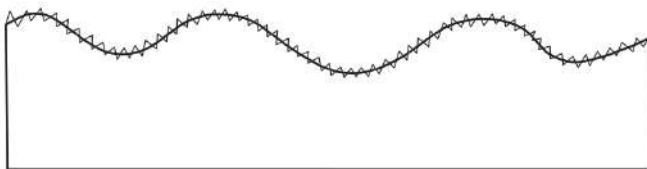


Рисунок 7.26 – Зіставлення хвилястості та шорсткості поверхні

Нерівності поверхні характеризують зовнішню поверхню, що має безпосередній контакт із зовнішнім середовищем. Нижчі шари характеризуються фізичними параметрами, пов'язаними з характеристиками деформації, зміцнення і напруженості.

У металів, що перебувають у ненапруженому стані, є кристалічна структура із зерен неправильної форми (розмірами від 0,01 до 1 мм), пов'язаних міжзеренними прошарками товщиною  $5 \div 20$

атомних шарів. Зерна складаються з кристалітів (найменший розмір 18 нм, включає 100 елементарних осередків, 400 атомів).

У кристалітах завжди існують атоми, що мають енергію, яка перевершує середнє значення енергії сусідніх атомів і здатні тому залишити за певних умов свої місця, створюючи в них порожнечі (вакансії), і зайняти нові місця у міжвузлах решітки або у вакансіях інших кристалічних осередків. Безладний рух атомів призводить до зникнення та появи нової вакансії.

При кімнатній температурі кількість вакансій невелика, проте вона різко зростає при підвищенні температури та пластичній деформації металу, що характерно для процесу механічної обробки лезовим та іншими інструментами.

Виникнення вакансій змінює щільність матеріалу, призводить до значних спотворень кристалічної решітки, що істотно впливає на механічні та інші властивості матеріалів. Вакансії можуть поєднуватися в групи, створюючи зародки мікроскопічної порожнини – тріщини.

Опір деформуванню та руйнуванню матеріалу визначається енергією міжатомних зв'язків, оскільки кожен атом кристалічної решітки піддається одночасному впливу сил тяжіння (електростатичне тяжіння протилежно заряджених іонів та електронів) та сил відштовхування (відштовхування однойменно заряджених електронів). Загальна потенційна енергія взаємодії іонів та електронів є функцією міжатомної відстані, і тому що за наявності вакансій міжатомні відстані в окремих точках змінюються, то в цих точках змінюється потенційна енергія поверхневого шару та енергія, необхідна для руйнування матеріалу.

Теоретична міцність твердого тіла зростає із зростанням модуля пружності та величини поверхневої енергії, яка вище у матеріалів зі зменшенням відстані між сусідніми атомними площинами.

У зв'язку з цим *високоміцними матеріалами*, є матеріали з високими значеннями модуля пружності, великою поверхневою енергією (енергією тяжіння атомів), великою кількістю атомів в одиниці об'єму.

Розрахунки показують, що теоретична та практична міцність матеріалів різняться. Так, теоретичне значення напруги зсуву у заліза 2 300 МПа, а експериментальне 29 МПа, у міді – відповідно 1 540 та 1 МПа, а у нікеля – 2 600 та 5,8 МПа відповідно. Значна розбіжність

теоретичної та фактичної міцності пояснюється наявністю у матеріалі різних недосконалостей та дефектів кристалічних решіток (вакансії, дислоковані атоми, дислокації).

**Дислокація** – це лінійний дефект кристалічної решітки (рис. 7.27). Атомний ряд 1 і всі горизонтальні ряди атомів, розташовані вище за нього, мають на один атом більше другого і нижче рядів атомів.

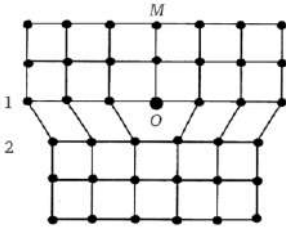


Рисунок 7.27 – Дислокація кристалічної решітки

Це призводить до спотворення будови решітки, за якої відстань між атомами верхнього ряду біля точки  $O$  (центр дислокації) менша за нормальну (решітка стиснута), а відстань між атомами нижнього ряду більша за нормальну (решітка розтягнута).

У міру віддалення від точки  $O$  в кристалі відновлюється нормальне розташування атомів.

Аналогічне розташування атомів спостерігається в площинах, розташованих паралельно площині креслення, тому центри дислокації кожної атомної площини утворюють лінію найбільших викривлень решітки, спрямовану перпендикулярно площині креслення.

Утворення лінійної дислокації можна уявити як введення в частину об'єму кристала зайвої атомної площини  $MO$ . Найбільше спотворення зосереджене поблизу нижнього краю напівплощини зайвих атомів  $M-O$ , тому **під дислокацією** зазвичай і **розуміють лінію спотворення, що проходить уздовж краю зайвої атомної площини** (лінія, що проходить через точку  $O$  перпендикулярно площині креслення).

Дислокація проходить через весь кристал або значну частину його на довжину порядку  $10^{-4}$  мм, зливаючись зазвичай з іншими дислокаціями. Середня відстань між окремими дислокаціями становить  $10^4$  міжатомних відстаней, що відповідає для: відіжженого металу 1 мкм, а наклепаного металу до 0,001 мкм. Сумарна довжина дислокацій в одиниці об'єму металу є великою.

Так, за  $1 \text{ см}^3$  відіжженого металу довжина дислокацій може змінюватися від 100 до 1 000 мкм. Дислокації в кристалі призводить до спотворення атомних шарів і виникає локальна концентрація напруг. При прикладенні до матеріалу сили або температури, дислокація може зміщуватися в напрямку результуючої сили.

Загальна довжина всіх ліній дислокацій в одиниці об'єму кристала називається **щільністю дислокацій**,  $\text{см}^{-2}$ :

$$\rho_D = \frac{L}{V}, \quad (7.8)$$

де  $L$  – загальна довжина ліній дислокацій у кристалі;  
 $V$  – об'єм кристала.

Щільність дислокацій в деформованих металевих кристалах може сягати  $10^{11} \div 10^{12} \text{ см}^{-2}$  і більше. Пластична деформація пов'язана з рухом дислокацій та виникненням перешкод, що ускладнюють рух дислокацій, викликає зміцнення кристалів. Відбувається деформаційне зміцнення, яке характеризується глибиною наклепу та ступенем наклепу. Деформаційне зміцнення проявляється у підвищенні мікротвердості поверхневого шару.

Глибина шару  $h_H$ , на якій виникає підвищена мікротвердість, називається **глибиною наклепу**. Вона визначається глибиною залягання пластичних деформацій у поверхневому шарі, яка розраховується з умови рівності межі плинності алгебраїчної суми напруг у поверхневому шарі, обумовлених силовим та тепловим впливом.

Ступінь наклепу визначається за формулою:

$$U_H = \frac{H_{\mu_{\text{пов}}} - H_{\mu_{\text{исх}}}}{H_{\mu_{\text{исх}}}} 100 \%, \quad (7.9)$$

де  $H_{\mu_{\text{пов}}}$  – мікротвердість обробленої поверхні;

$H_{\mu_{\text{исх}}}$  – мікротвердість ненаклепаного (вихідного) матеріалу.

Величина деформації характеризується ступенем деформації, яка може визначати деформацію всього тіла  $\varepsilon$  і деформацію зерен  $\varepsilon_{\text{зр}}$ :

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}, \quad (7.10)$$

де  $l$  – довжина тіла, що деформується;

$\Delta l$  – абсолютна величина деформації.

Напруженість поверхневого шару характеризується різного роду залишковою напругою.

*Субмікроскопічні напруги*, створювані в об'ємах кристалічної решітки. Ці напруги обумовлені поглинанням енергії пластичного деформування, яка становить 10÷15 % загальної енергії деформації (решта 85÷90 % переходять у тепло), і вся ця енергія зберігається у вигляді спотворень кристалічних решіток. Ці спотворення та напруження характеризуються щільністю дислокацій.

*Залишкові мікронапруги кристалітні, або напруги другого роду*, врівноважуються в межах окремих зерен. Напруги ці пов'язані з тим, що різні кристаліти, що входять до зерна, мають різної величини модулі пружності та деформованість одного і того ж кристаліту по різних осях різна. Тому пластична деформація кристалів розподіляється в мікрооб'ємах нерівномірно, що пов'язано з виникненням напруг. Напруги другого роду також пов'язані з фазовими перетвореннями металу, що викликають зміну об'єму окремих кристалів, оскільки різні фазові структури мають питомі об'єми.

*Макронапруги* – це напруги, що врівноважуються в межах областей, розміри яких можна порівняти з розмірами тіла. Вони викликані неоднорідністю силового та температурного полів по всьому перерізу металу, що деформується.

Коли зовнішнє навантаження, що викликає деформацію, знімається, ділянка металу, розтягнута більше за інших і зазнала пластичної деформації, не дає сусіднім ділянкам повністю повернутися у вихідне положення, в результаті чого у всіх ділянках з'являються напруги різного знаку.

## **7.7 Вплив якості поверхневого шару матеріалу на експлуатаційні властивості деталей машин**

Вплив параметрів поверхневого шару на експлуатаційні властивості досить вивчений з урахуванням шорсткості, залишкової напруги та наклепу. Вплив інших параметрів нині досліджений недостатньо.

Немає єдиної думки про ступінь впливу шорсткості, залишкових напруг, ступеня та глибини наклепу на характеристики втоми та інші експлуатаційні властивості деталей машин. Проте є рекомендації, які можна використовувати для виробничих умов.

Так витривалість жароміцних сплавів при робочих температурах

та високочастотному навантаженні істотно залежить від шорсткості поверхні. Встановлено, що збільшення параметра шорсткості поверхні  $Rz$  від 0,05 до 2 мкм знижує втомну міцність на 13,3 %.

Зниження опору втоми сплавів після шліфування, коли мікронерівності спрямовані перпендикулярно до осі зразка, в 1,5 рази більше, ніж при мікронерівності, спрямованих уздовж осі зразка при однаковій шорсткості. Таким чином, важлива не тільки висота нерівностей та форма, а й їхня спрямованість.

**Вплив наклепу на циклічну міцність** також неоднозначний. Наскрізний наклеп викликає підвищення межі витривалості. Дослідженнями встановлено, що вплив наклепу в поверхневому шарі на міцність жароміцних сплавів двоякий:

- при роботі деталей в області порівняно низьких температур та при відносно невеликому ресурсі експлуатації, наклеп підвищує опір жароміцних сплавів руйнуванню, що пов'язано з підвищенням опору відриву внаслідок структурних змін під впливом пластичної деформації;
- з підвищенням температури експлуатації та зі збільшенням тривалості ресурсу експлуатації, наклеп сприяє інтенсифікації процесів зміни складу матеріалу в результаті окислення, вигорання та випаровування легуючих елементів, що може призводити до крихкості та втрати жароміцності. Вважається, що для деталей із жароміцних сталей і сплавів, що працюють при високих температурах, бажаний поверхневий шар без наклепу або з вельми незначним наклепом, який повинен встановлюватись залежно від робочої температури.

Фактори, що сприяють процесу утворення мікротріщин втоми та полегшують їх подальший розвиток, будуть знижувати межу втоми, а фактори, що ускладнюють утворення тріщин та уповільнюють їх розвиток, сприятимуть зростанню витривалості.

До факторів, що утруднюють утворення мікротріщин, відносяться залишкові напруги стиснення в поверхневому шарі, які в сумі із зовнішніми напругами зменшують циклічні розтягуючі напруги. На противагу стискаючим, залишкові напруги, що розтягують, спільно з діючими циклічно прикладеними напруженнями, що розтягують – прискорюють утворення тріщин втоми і знижують межу втоми. Оцінити ступінь впливу залишкових

напружень на опір втомі поряд з іншими параметрами якості поверхневого шару важко, оскільки вони змінюються за величиною в процесі роботи. Проте встановлено, що вплив залишкових напружень переважає для металів високої міцності, а вплив наклепу – для металів низької міцності.

Характер впливу залишкових напруг у поверхневому шарі, глибини та ступеня наклепу залежить від технології виготовлення. Дослідженнями встановлено, що при обробці пластичного матеріалу на обробленій поверхні виникають залишкові розтягуючі напруження, при обробці крихкого матеріалу – стискаючі.

Попереднє деформування зміцнює матеріал, знижуючи його пластичні властивості, тому при обробці матеріалу в зміцненому стані формуються розтягуючі залишкові напруги невеликої величини, і на деякій глибині вони переходять в стискаючі, що повинно підвищувати межу витривалості.

В якості прикладу розглянемо результати досліджень трьох партій зразків із нормалізованої сталі 12Х18Н9Т. Всі зразки остаточно проточувалися (швидкість різання  $v = 15$  м/хв; глибина різання  $t = 0,1$  мм; подача  $S = 0,05$  мм/об), а потім полірувалися абразивною шкіркою.

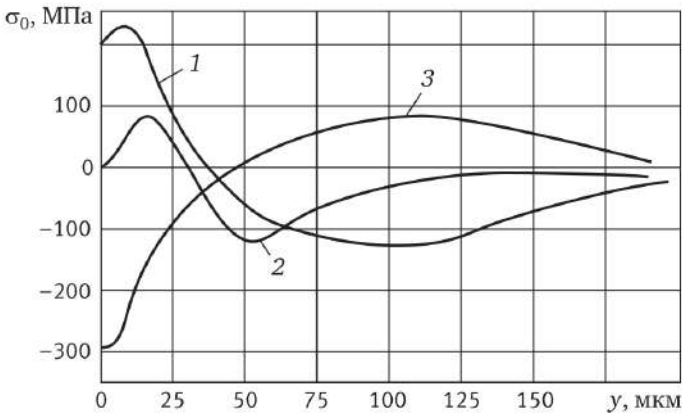
Перша партія була виготовлена із недеформованого матеріалу. Зразки другої партії після виготовлення деформувалися з відносним подовженням 20 %, а зразки третьої партії виготовлялися із прутків, попередньо деформованих з відносним подовженням до 20 %.

Як показали епюри осьових залишкових напруг, в поверхневому шарі першої партії сформувалися розтягуючі залишкові напруги  $\sigma_{0\max} = 230$  МПа. У другому випадку залишкові напруги знизилися до  $\sigma_{0\max} = 80$  МПа, а в третьому випадку виникли залишкові напруги стиснення  $\sigma_{0\max} = -300$  МПа (рис. 7.28).

Випробування трьох партій зразків показали, що найбільшу межу витривалості мають зразки, виготовлені з попередньо деформованих прутків, у поверхневому шарі яких напруження є стискаючими. Спостережуване збільшення межі витривалості в попередньо деформованих зразках, пов'язане з одночасним впливом залишкових напружень стиснення і наклепу.

З даних щодо **впливу технології виготовлення**, а також **ступеня впливу наклепу на межу витривалості** випливає, що наклепані зразки після точіння мають межу витривалості  $\sigma_{-1} = 375$

МПа, а не наклепані  $\sigma_1 = 355$  МПа. Збільшення межі витривалості внаслідок зміцнення становить 5,7 %. При **одночасному впливі наклепу і залишкових напруг** аналогічне зіставлення дає 18,2 %, тобто зміна межі витривалості внаслідок дії лише залишкових напруг становить 12,5 %. Таким чином, частка впливу залишкових напружень на межу втоми становить 69 %, а наклеп – 31 %.



1 – недеформовані зразки; 2 – деформовані зразки ( $\delta = 20\%$ ) після виготовлення; 3 – деформовані зразки ( $\delta = 20\%$ ) до виготовлення

Рисунок 7.28 – Графіки осевих залишкових напруг  $\sigma_0$  на глибині у шару, що розглядається (від поверхні) для зразків зі сталі 12Х18Н9Т:

Дослідженнями також встановлено, що **залишкові напруги, наклеп і шорсткість поверхні** змінюють опір втоми як 1,5; 1,25 та 1,03. Відповідно вплив шорсткості поверхні та глибини наклепу на опір втоми більш значний, а наклеп у ряді випадків знижує межу витривалості.

Однак відомо, що **зміцнювальна технологія, підвищує межу витривалості**. Це удаване протиріччя пояснюється тим, що під час зміцнення наводяться сприятливі залишкові напруги, які своїм позитивним впливом перебивають шкідливу дію наклепу.

Відносна значимість кожного параметра якості поверхневого шару в зниженні опору втоми зразків після шліфування становить: шорсткість поверхні до 50÷70 %; наклеп поверхневого шару 25÷45 %;

технологічні залишкові макронапруги до  $5 \div 15$  %. При цьому опір втоми жароміцних сталей і сплавів при робочих температурах і високочастотному навантаженні суттєво залежить від шорсткості, глибини та ступеня наклепу.

Залишкові напруги в умовах високих температур релаксуються і не впливають на опір втоми, проте в умовах низьких температур їх вплив суттєвий. Деформаційне зміцнення поверхневого шару після обробки різальним інструментом знижує межу витривалості жароміцних матеріалів при підвищених температурах.

Якщо розглядати вплив наклепу на тривалу міцність при підвищених температурах ( $700^{\circ}\text{C}$  і вище), слід зазначити, що наклеп знижує тривалу міцність. Найбільша міцність спостерігається при поліруванні, найменша – при зміцнюючій обробці.

Дослідженнями встановлено, що найефективнішим технологічним варіантом обробки деталей із жароміцних сталей і сплавів, що забезпечує максимальний опір втоми за робочих температур, є електрохімічна обробка з подальшим віброконтактним поліруванням або деформаційним зміцненням, що створює поверхневий наклеп малої глибини та інтенсивності. В цьому випадку в поверхневому шарі створюються також сприятливі залишкові напруження.

Отже можна зробити висновок що для кожного оброблюваного матеріалу існують свої температурно-ресурсні бар'єри працездатності в залежності від параметрів якості поверхневого шару, які повинні визначитися експериментально.

Зносостійкість поверхні, окрім багатьох інших факторів, залежить від її якості. Шорсткість поверхні деталей машин істотно впливає на зносостійкість. На знос поверхонь деталей впливають макронерівність, хвилястість і мікронерівність.

Залежність величини зносу від часу роботи третьових поверхонь, видно з графіка (рис. 7.29). Спочатку (період  $T_{\text{ГР}}$ ) відбувається процес стирання виступаючих нерівностей (рис. 7.30), тобто протікає процес опрацювання поверхонь. Далі процес стирання протікає повільніше і цей період часу  $T_{\text{СЛ}}$  визначає **термін служби деталі**. За періодом  $T_{\text{СЛ}}$  настає період різкого збільшення зносу третьових поверхонь.

При великій шорсткості зазори у сполучних поверхнях, швидко збільшуються і до кінця періоду приробітку доходять до граничних

розмірів, і термін служби машин скорочується. Підвищення терміну служби машин може бути збільшено за рахунок зменшення шорсткості.

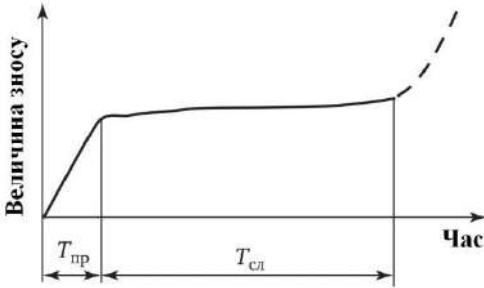


Рисунок 7.29 – Залежність величини зносу від часу роботи тертьових поверхонь

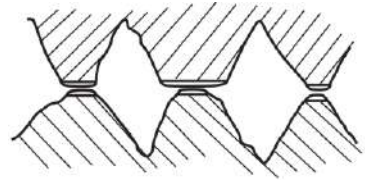
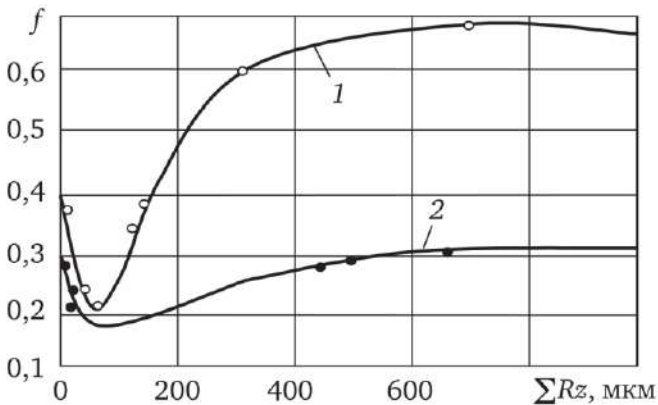


Рисунок 7.30 – Процес приробітки поверхонь

Однак встановлено, що не завжди найбільш зносостійкою виявляється поверхня з мінімальною шорсткістю. Це пояснюється тим, що дуже тісне зближення двох твердих тіл призводить до молекулярної взаємодії їх поверхонь і збільшує зчеплення, що підвищує знос (рис. 7.31).



1 - чавуну і сталі; 2 - бронзи і сталі

Рисунок 7.31 – Залежність коефіцієнта тертя  $f$  від сумарної шорсткості  $\Sigma R_z$  контактуючих поверхонь

Таким чином, при малих значеннях висоти нерівностей на поверхні відбувається схоплювання, а при грубих поверхнях – механічне зачеплення та зріз нерівностей оброблених поверхонь. Зі зменшенням шорсткості обробленої поверхні збільшується опір холодоламокості. Робота руйнування за зниженої температури збільшується зі зниженням висоти нерівностей поверхні.

Вплив шорсткості поверхні на її зношування залежить також від форми нерівностей: тонкі та численні нерівності забезпечують більшу зносостійкість, ніж великі нерівності більшого кроку.

При терті в поверхневому шарі деталі відбуваються значні пластичні деформації, що супроводжуються інтенсивним наклепом і створенням значних залишкових напруг. Залишкові напруги, створені в процесі механічної обробки можуть змінюватися. Це, як правило, відбувається залежно від умови тертя, але незалежно від знака та величини залишкової напруги, створеної при механічній обробці.

Аналогічні результати випробувань зразків, що мали до зносу залишкові напруги стиснення, і зразків, які не мали ніяких напруг (зразки після віджигу), показали, що в процесі тертя в поверхневому шарі виникають залишкові напруги стиснення, які не пов'язані з напругами в поверхневому шар до зносу.

На основі експериментальних досліджень зроблено такі висновки:

- зношування деталей залежить від напруженого стану, ступеня та товщини зміцненого шару. Напруги стиснення і збільшення поверхневої твердості сприятливі і, як правило, знижують знос;
- ефективність зміцнення визначається конкретними умовами роботи третьових поверхонь. В одних умовах попереджувальний наклеп набагато підвищує опірність зносу, в інших – незначно, або навіть знижує її.

Для отримання максимальної зносостійкості необхідно обробку заготовки проводити так, щоб створювалося так зване оптимальне зміцнення, що забезпечує мінімальний знос:

- при сухому терті, коли температура в зоні контакту досягає високих значень, можлива релаксація залишкових напружень, знеміцнення і підвищення зносу порівняно з незміцненими поверхнями;
- при ковзанні зі змащенням третьових поверхонь їхній

розігрів невисокий і зносостійкість, як правило, підвищується. Однак за високих тисків ковзання, особливо за обмеженого змащення, ефект від зміцнення може бути незначним.

Що більша шорсткість обробленої поверхні, то активніший вплив корозії. На шорсткій поверхні осідають речовини, що спричиняють корозію; корозія поширюється в напрямку основи гребінців, унаслідок чого вони під впливом сили тертя відриваються від поверхні, утворюючи нові западини та виступи (рис. 7.32).

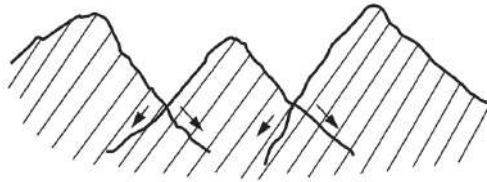


Рисунок 7.32 –Схема корозії поверхні

Шорсткість впливає також на якість нерухомих з'єднань. Під час запресовування гребінці мнуться, і діаметри сполучних деталей змінюються: у вала діаметр стає меншим за попередньо вимірний, у отвору - більшим. Натяг виходить меншим. За чистішої поверхні сполучних деталей, коли висота гребінців дуже мала, надійність і якість нерухокої посадки збільшуються.

Технологічне забезпечення якості поверхневого шару і експлуатаційних властивостей деталей машин зміцненням здійснюється в послідовності, представленій на схемі (рис. 7.33).



Рисунок 7.33 – Технологічне забезпечення якості поверхневого шару і експлуатаційних властивостей деталей

Підвищення опору деталі руйнуванню при різних видах експлуатаційного навантаження може бути досягнуто технологічними методами об'ємного або поверхневого зміцнення. Об'ємне зміцнення підвищує статичну міцність деталей, у яких робочі напруги

розподілені за перерізом більш менш рівномірно. Для таких деталей використовують високоміцні сталі та сплави, композиційні матеріали.

Однак більшість деталей працює в умовах, за яких експлуатаційне навантаження (тиск, нагрівання, дія навколишнього середовища тощо) сприймається головним чином їх поверхневим шаром. Тому зносостійкість, зародження та розвиток втомної тріщини, виникнення вогнищ корозії залежить від опору руйнуванню поверхневого шару.

Для деталей, руйнування яких починається з поверхні, розроблено велику кількість методів поверхневого зміцнення, що ґрунтуються на нанесенні покриттів або зміні стану (модифікації) поверхні.

При нанесенні покриттів зміцнення деталей досягається шляхом осадження на їх поверхні матеріалів, які за своїми властивостями відрізняються від основного металу, але і найбільш повно відповідають умовам експлуатації (знос, корозія, хімічна дія тощо).

При модифікації поверхневого шару відбувається фізико-хімічна зміна в металі, що підвищує опір його руйнуванню. Модифікація поверхневого шару може здійснюватися деформаційним зміцненням, поверхневою термообробкою, дифузійним нанесенням легуючих елементів.

Немає універсального методу зміцнення деталей, оскільки один і той самий метод в одних умовах експлуатації може дати позитивний ефект, а в інших негативний. Тому в ряді випадків застосовують комбіноване зміцнення деталей, засноване на використанні двох або трьох методів зміцнення, кожен з яких дозволяє посилити ту чи іншу експлуатаційну якість.

**Усі відомі методи зміцнення можна об'єднати у 6 груп.**

**1. Зміцнення зі створенням плівки на поверхні:**

- осадження в результаті хімічної реакції (оксидування, сульфидування, фосфатування, нанесення змащувального зміцнюючого матеріалу, осадження з газової фази);
- осадження з пари (термічне випаровування тугоплавких з об'єднань, катодно-іонове бомбардування, пряме електронно-променеве випаровування, реактивне електронно-променеве випаровування, електронно-хімічне випаровування);
- електролітичне осадження (хромування, нікелювання,

нікельфосфатування, борування, борохромування, хромофосфатування);

- напилення зносостійких з'єднань (плазмове напилення порошкових матеріалів, детонаційне напилення, електродугове напилення, лазерне напилення, вихрове напилення).

## **2. Зміцнення зі зміною хімічного складу поверхневого шару металу:**

- дифузійне насичення (борування, ціанування, азотування, нітроцементация тощо);
- хімічна та фізико-хімічна дія (хімічна обробка, іонна імплантація, електроіскрова обробка тощо).

## **3. Зміцнення із зміною структури поверхневого шару:**

- фізико-термічна обробка (лазерне загартування, плазмове загартування);
- електрофізична обробка (електроконтактна, електроерозійна, магнітна обробка);
- механічна обробка (зміцнення вібрацією, фрикційно-зміцнююча обробка, дробоструминна, обробка вибухом, термомеханічна, електромеханічна);
- наплавлення легованим елементом (газовим полум'ям, електричною дугою, плазмою, лазерним променем, пучком іонів тощо).

## **4. Зміцнення зі зміною накопиченої енергії в поверхневому шарі:**

- обробка в магнітному полі (термомагнітна обробка, імпульсним магнітним полем, магнітним полем);
- обробка в електричному полі.

## **5. Зміцнення зі зміною мікрогеометрії поверхні та ступеня наклепу:**

- обробка різанням (точіння, шліфування, надшвидкісне різання);
- пластичне деформування (накочування, обкатування, розкочування, вигладжування, віброкативання, вібровигладжування, калібрування, відцентрово-ударне зміцнення, віброударне тощо.);
- комбіновані методи обробки (анодно-механічне, поверхнєве легування з вигладжуванням, різання з впливом

ультразвукових коливань, магнітно–абразивна обробка тощо).

#### **6. Зміцнення зі зміною структури всього обсягу металу:**

- термообробка при позитивних температурах (загартування, відпуск, поліпшення, загартовування струмами високої частоти, нормалізація, термомагнітне оброблення);
- кріогенна обробка (загартування з обробкою холодом, термоциклювання).

### **7.8 Управління формуванням поверхневого шару деталей машин**

Відомі характер і ступінь впливу параметрів поверхневого шару на експлуатаційні властивості дозволяють керувати якістю поверхневого шару для створення необхідних експлуатаційних властивостей за допомогою вибору режиму різання та геометрії інструменту, що забезпечують задані значення параметрів поверхневого шару.

При призначенні режимів різання з урахуванням якості поверхневого шару при обробці жароміцних сплавів доцільно визначати режими різання, що забезпечують у зоні різання оптимальну температуру, робота при якій дає мінімальний відносний знос різального інструменту. Швидкість різання, що відповідає оптимальній температурі різання, називається **оптимальною швидкістю**.

Це пов'язано з тим, що призначення оптимальних режимів різання забезпечує найбільш сприятливі показники якості поверхневого шару. При обробці на оптимальних режимах різання виходить мінімальне або мінімально-стабілізоване значення висоти нерівностей  $R_z$  обробленої поверхні, мінімальна глибина  $h$  та ступінь наклепу, які у ряді випадків є бажаними у поверхневому шарі обробленої деталі, як наприклад показано на рис. 7.34.

Оптимальні режими різання забезпечують максимальну стабільність показників якості поверхневого шару на різній відстані положення інструменту від осі диска  $R$  при обробці його торцевих поверхонь.

Так, при обробці диска отримано розподіл залишкових напружень  $\sigma_{ост}$  і мікротвердості в поверхневому шарі. Найбільша неоднорідність

залишкових напруг, ступеня і глибини наклепу спостерігаються при обробці з постійною частотою обертання. При обробці з постійною швидкістю різання розкид залишкових напруг та глибини їх залягання, а також мікротвердості та глибини наклепу менше.

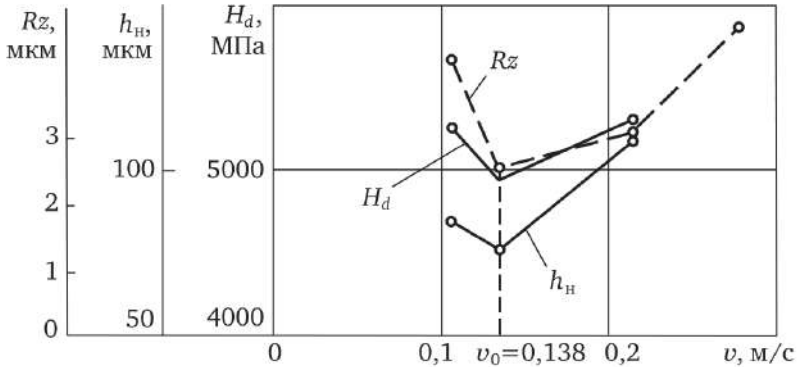


Рисунок 7.34 – Залежність шорсткості поверхні  $Rz$ , мікротвердості та глибини наклепу  $h_H$  від швидкості різання  $v$  при фрезеруванні циліндричною фрезою з P18 сплаву ХН50ВМКТЮР ( $S = 0,08$  мм/об;  $t = 1$  мм;  $\alpha = \gamma = 10^\circ$ )

Отже оптимальна швидкість різання забезпечує найбільш бажані з точки зору експлуатації показники втомної міцності, міцності на розрив і контактної жорсткості.

Це підтверджують експерименти з обробки торців дисків при оптимальній швидкості різання, що відповідає оптимальній температурі різання, а також при швидкості різання вище та нижче оптимальної.

Підсумовуючи цю тему залишається зазначити що визначення технологічних умов обробки різанням, які забезпечують задані технічними умовами експлуатаційні властивості деталей, визначається складними розрахунками які виконують з використанням ЕОМ за спеціальними методиками, описаними в спеціалізованій літературі, які не є темою цього навчального курсу.

## Питання для самоперевірки

1. Як здійснюється управління формуванням поверхневого шару деталей машин?
2. Чому вибір заготовки є важливою стадією проектування технологічного процесу?
3. Які два принципові напрями можуть бути при розробці технологічного процесу виготовлення деталі?
4. Якими факторами обумовлений вибір заготовок для деталей, що не виготовляються безпосередньо із сортового прокату?
5. Які види заготовок застосовуються у машинобудуванні?
6. Як отримують заготовки з найменшими припусками?
7. Назвіть основні методи виготовлення кованих заготовок.
8. Які переваги мають штаповані заготовки?
9. Яких видів сортовий прокат зазвичай застосовують для механічної обробки?
10. Назвіть одну з основних вимог до якості заготовок.
11. Які операції відносяться до попередньої обробки заготовок?
12. З якою метою проводиться термообробка заготовок?
13. Для чого робиться очищення заготовок перед механічною обробкою?
14. Для чого робиться виправлення заготовок?
15. Назвіть методи розрізання заготовок.
16. Які переваги й недоліки відрізання матеріалу стрічковими пилами?
17. Коли застосовується розрізання дисковими пилами?
18. Як працює лазерне різання матеріалів?
19. Як виконується центрування заготовок?
20. Якими параметрами характеризується шорсткість поверхні?
21. Які параметри визначають хвилястість поверхні?
22. Як впливає якість поверхневого шару матеріалу на експлуатаційні властивості деталей машин?

## ТЕМА 8. ТЕХНОЛОГІЧНІ РОЗМІРНІ ЛАНЦЮГИ. ПРИПУСКИ НА ОБРОБКУ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Створення та вдосконалення конструкцій, технологічних процесів виготовлення і складання машин різних типів, встановлення точності розмірів і розмірне налаштування верстатних технологічних систем взагалі неможливе без виконання розмірного аналізу.

Сам розмірний аналіз базується на теорії та практиці розрахунку розмірних ланцюгів і дає змогу на стадії проектування відпрацьовувати виріб на технологічність, обґрунтовувати вибір методу складання, розраховувати оптимальні допуски розмірів, визначати точнісні параметри конструкторського і технологічного плану.

### 8.1 Види технологічних розмірних ланцюгів

У загальному випадку незалежні один від одного, розташовані по замкнутому контуру один за одним, розміри прийнято називати **розмірним ланцюгом**. Розмірні ланцюги, що зв'язують операційні розміри та відносні повороти поверхонь оброблюваних деталей, а також розмірні ланцюги верстатів та пристроїв, за допомогою яких вони утворюються, називаються **технологічними розмірними ланцюгами**. Можна виділити два види технологічних розмірних ланцюгів.

1. Технологічний розмірний ланцюг, що встановлює взаємозв'язок розміру деталі з відповідними розмірами системи «верстат – пристосування – інструмент», від якого залежить отримання необхідного розміру деталі (остаточного або операційного) (рис. 8.1, а).

2. Технологічний розмірний ланцюг, що встановлює взаємозв'язок між розміром деталі  $A_{\Delta}$ , припуском на обробку  $Z_A$  і розміром заготовки  $A_3$  (рис. 8.1, б).

Перший вид розмірних ланцюгів служить для налаштування технологічного обладнання на обробку партії деталей у разі автоматичного отримання розмірів на налаштованому верстаті.

Другий вид розмірного технологічного ланцюга служить для

розрахунку операційних розмірів та визначення розмірів заготовки загалом.

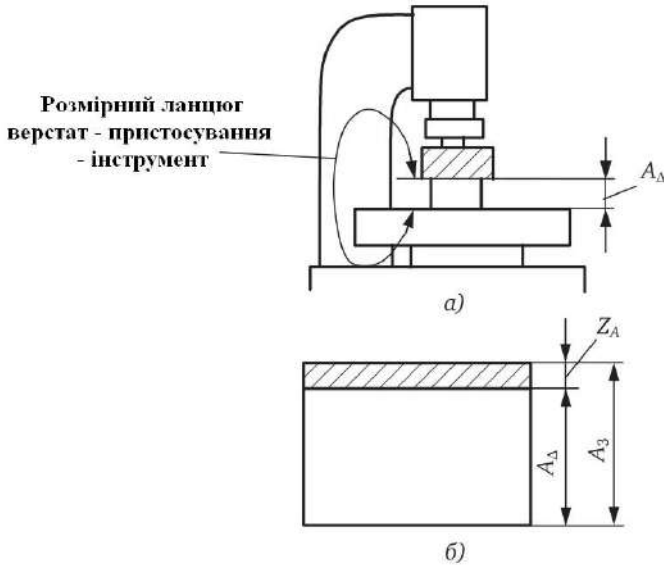


Рисунок 8.1 – Технологічний розмірний ланцюг розміру деталі та системи «верстат – пристосування – інструмент»

## 8.2 Основні поняття та визначення, які належать до теорії розмірних ланцюгів

*Ланка розмірного ланцюга* – розмір, що визначає відстань або поворот поверхонь деталей або їх осей.

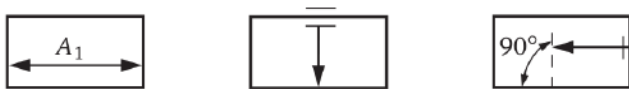


Рисунок 8.2 – Ланки розмірного ланцюга

Вихідна, або замикаюча, ланка розмірного ланцюга – ланка, яка безпосередньо зв'язує поверхні або осі деталей, відстань або поворот яких необхідно забезпечити.

*Вихідною* називають ланку тоді, коли з неї починається побудова розмірного ланцюга.

**Замикаючою** називається ланка, яка, включаючись останньою при побудові розмірного ланцюга, з'єднає поверхні або осі деталі, положення яких потрібно забезпечити.

Вихідну і замикаючу ланки позначають літерами з додаванням індексу  $\Delta$ , наприклад  $A_{\Delta}$ ,  $B_{\Delta}$  тощо.

**Складова ланка розмірного ланцюга** – ланка, зміна величини якого впливає на величину вихідної або замикаючої ланки.

**Збільшуюча ланка** – ланка, зі збільшенням якої зростає вихідна або замикаюча ланка  $A$  (рис. 8.3, а).

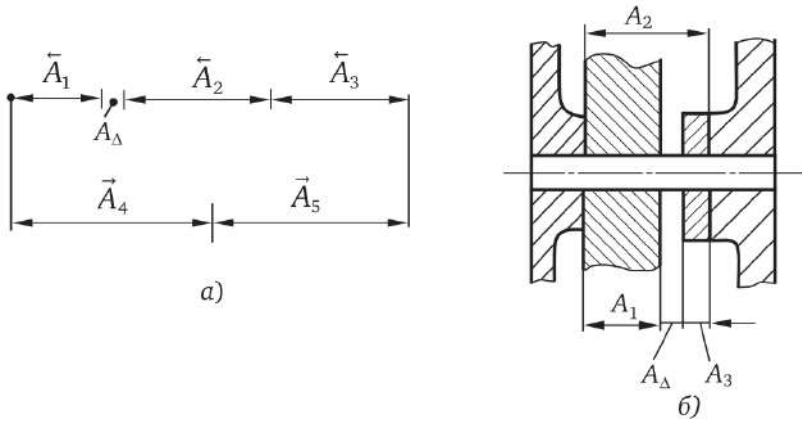


Рисунок 8.3 – Складові ланки розмірного ланцюга

**Зменшуюча ланка** — ланка, із збільшенням якої зменшується вихідна або замикаюча ланка  $A$  (рис. 8.3, а).

**Компенсуюча ланка** – ланка, в результаті зміни величини якої поглинається зайва величина відхилення замикаючої ланки (рис. 8.3, б). Прикладом компенсуючої ланки є товщина кільця проставки  $A_3$ , зміною якої забезпечується необхідний зазор  $A_{\Delta}$  між торцем деталі розміром  $A_1$  і кільця.

Величина замикаючої ланки розмірного ланцюга, що складається з паралельних ланок, дорівнює алгебраїчній сумі всіх складових її ланок, тобто:

$$A_{\Delta} = A_1 + A_2 + \dots + A_m = \sum_{i=1}^m A_i, \quad (8.1)$$

де  $m$  – загальна кількість складових ланок розмірного ланцюга.

### 8.3 Розрахунок похибки замикаючої ланки розмірного ланцюга

При визначенні похибки замикаючої ланки розмірного ланцюга слід розрізнати два випадки:

- визначення похибки в одній деталі чи виробі;
- визначення похибки у партії деталей чи виробів.

Похибка замикаючої ланки  $\Delta A_{\Delta}$  розмірного ланцюга у кожній деталі дорівнює алгебраїчній сумі похибок складових її ланок:

$$\Delta A_{\Delta} = \Delta A_1 + \Delta A_2 + \dots + \Delta A_m = \sum_{i=1}^m \Delta A_i, \quad (8.2)$$

де  $m$  – загальна кількість складових ланок розмірного ланцюга.

При визначенні похибки замикаючої ланки розмірного ланцюга (при виготовленні партії деталей або складання партії виробів) необхідно виходити з розсіювання замикаючої ланки розмірного ланцюга, оскільки є розсіювання всіх складових ланок.

Поле розсіювання замикаючої ланки розмірного ланцюга  $\omega_{\Delta}$  дорівнює сумі полів розсіювання складових ланок  $\omega_i$ :

$$\omega_{\Delta} = \omega_1 + \omega_1 + \dots + \omega_m = \sum_{i=1}^m \omega_i. \quad (8.3)$$

Оскільки поля розсіювання складових ланок розмірного ланцюга зміщуються щодо їх номінальної величини, то і поле розсіювання замикаючої ланки розмірного ланцюга також може зміститися щодо його номінального розміру.

Координата середини поля розсіювання  $\Delta\omega_A$  замикаючої ланки розмірного ланцюга з паралельними ланками, дорівнює алгебраїчній сумі координат середини полів розсіювання всіх складових ланок, тобто:

$$\Delta\omega_A = \sum_{i=1}^n \bar{\Delta}\omega_i - \sum_{i=n+1}^m \bar{\Delta}\omega_i, \quad (8.4)$$

де  $n$  – число збільшують ланок;

$m$  – загальна кількість ланок без замикаючої.

## 8.4 Методи досягнення точності замикаючої ланки

Існує п'ять методів досягнення точності замикаючої ланки розмірного ланцюга.

### 1. Метод повної взаємозамінності.

Сутність методу полягає в тому, що необхідна точність замикаючої ланки розмірної ланцюга досягається кожного разу, коли в розмірний ланцюг включають або замінюють ланки без їх вибору або підбору.

Переваги методу повної взаємозамінності:

- простота досягнення необхідної точності замикаючої ланки ланцюга;
- відносна простота механізації та автоматизації технологічних процесів;
- можливість широкого використання кооперування у виготовленні деталей та вузлів виробів;
- можливість використання робітників, які не мають високої кваліфікації;
- простота нормування процесів у часі.

Використання методу повної взаємозамінності можливе за умови дотримання певних умов:

а) допуск замикаючої ланки розмірного ланцюга дорівнює сумі допусків усіх складових ланок:

$$T_{\Delta} = \sum_{i=1}^m T_i, \quad (8.5)$$

та координата середин полів допусків

$$T_{0\Delta} = \sum_{i=1}^n \bar{\Delta}_{0i} - \sum_{n+1}^m \bar{\Delta}_{0i}, \quad (8.6)$$

де  $\Delta_{0\Delta}$  і  $\Delta_{0i}$  – відповідно величини координат замикаючого та складових ланок розмірного ланцюга;

б) при отриманні ланок розмірного ланцюга у всіх виробів партії обов'язково дотримання нерівностей:

$$\Delta_{\Delta}^{нб} \geq \sum_{i=1}^n \bar{\Delta}_{\omega i} - \sum_{n+1}^m \bar{\Delta}_{\omega i} + \sum_{i=1}^m \frac{\omega_i}{2}; \quad (8.7)$$

$$\Delta_{\Delta}^{\text{HM}} \leq \sum_{i=1}^n \bar{\Delta}_{\omega i} - \sum_{n+1}^m \bar{\Delta}_{\omega i} - \sum_{i=1}^m \frac{\omega_i}{2}, \quad (8.8)$$

де  $\Delta_{\Delta}^{\text{нб}}$  і  $\Delta_{\Delta}^{\text{HM}}$  – граничні відхилення замикаючої ланки розмірного ланцюга.

Використання методу повної взаємозамінності є економічно доцільним для забезпечення високої точності деталей за умов масового виробництва. Непридатний цей метод лише за великої кількості ланок розмірного ланцюга.

### **2. Метод часткової взаємозамінності.**

Сутність методу полягає в тому, що необхідна точність замикаючої ланки розмірного ланцюга досягається не у всіх випадках, а в переважній більшості виробів. Відмінність від попереднього методу полягає в тому, що встановлюються більші значення допусків на складові ланки, що робить виготовлення деталей більш економічним.

При цьому йдуть на ризик отримання невеликого відсотка випадків виходу похибки замикаючої ланки розмірного ланцюга за межі встановленого допуску.

В основі цього методу лежить положення теорії ймовірності про те, що можливі поєднання крайніх значень похибок усіх ланок, що складають розмірний ланцюг, трапляються значно рідше, ніж середніх значень, унаслідок чого можливий відсоток браку вкрай малий.

Додаткові витрати праці та коштів на виправлення розмірів невеликої кількості деталей, що вийшли за межі допуску, у переважній кількості випадків малі порівняно з економією праці та коштів, одержуваних завдяки виготовленню складових ланок із великими величинами допусків. Це є незаперечною перевагою методу неповної взаємозамінності порівняно з методом повної взаємозамінності.

### **3. Метод групової взаємозамінності.**

Сутність методу полягає в тому, що необхідна точність замикаючої ланки розмірного ланцюга досягається тим, що всі вироби поділяються (сортуються) на кілька груп, і далі в межах кожної групи виробів забезпечується повна взаємозамінність.

При методі повної взаємозамінності середній допуск замикаючої ланки:

$$T_{\text{ср}} = \frac{T_{\Delta}}{m}, \quad (8.9)$$

де  $m$  – число складових ланок розмірного ланцюга.

Припустимо, що обробка з такою величиною допуску в даних виробничих умовах виявилася неекономічною або через технічні причини взагалі неможливою. Тоді нам потрібно розширити допуск у  $n$  разів, і тоді ми вже отримаємо **середній виробничий допуск**:

$$T'_{\text{ср}} = nT_{\text{ср}}. \quad (8.10)$$

А далі вже виходячи з величини  $T'_{\text{ср}}$ , встановлюються допуски  $T'_1, T'_2, \dots, T'_m$  на кожну з ланок розмірного ланцюга і витримують відхилення розмірів у межах нововстановлених виробничих допусків.

Після обробки розміри всіх деталей вимірюють точним вимірювальним інструментом і всі деталі сортують на  $n$  груп з таким розрахунком, щоб забезпечувалася необхідна точність замикаючої ланки у всіх виробів (рис. 8.4).

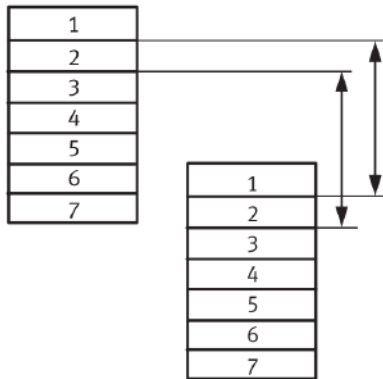


Рисунок 8.4 – Взаємозамінність деталей у межах групи

Перевага цього методу полягає в тому, що точність замикаючої ланки може бути підвищена в  $n$  раз (  $n$  приймається до 10) у порівнянні з точністю, яке може забезпечити устаткування на підприємстві.

#### 4. Метод пригонки.

Сутність методу пригонки полягає в тому, що необхідна

точність замикаючої ланки досягається в результаті зміни величини однієї з заздалегідь намічених складових ланок, шляхом зняття з неї необхідного шару матеріалу.

Під час використання методу пригонки на всі складові ланки розмірного ланцюга встановлюють економічно досяжні в даних виробничих умовах допуски  $T'_i$ . Відповідно до цього допуск складе:

$$T'_\Delta = \sum_{i=1}^m T'_i. \quad (8.11)$$

Для досягнення необхідної точності замикаючої ланки, що характеризується допуском  $T_\Delta$ , необхідно видалити з розмірного ланцюга отримувану зайву величину відхилення, котра отримала назву «**величини компенсації**». Можлива величина компенсації:

$$T_K = T'_\Delta - T_\Delta = \sum_{i=1}^m T_i - T_\Delta, \quad (8.12)$$

де  $T_\Delta$  – допуск замикаючої ланки розмірного ланцюга, що визначається службовим призначенням;

$T'_\Delta$  – можливий допуск замикаючої ланки, який отримується при призначенні економічно досяжних допусків на складові ланки;

$T_i$  – економічний допуск  $i$ -го складової ланки.

Основною перевагою методу пригонки є можливість виготовлення деталей з економічними для даних виробничих умов допусками. Найбільш істотним недоліком є необхідність виконання додаткових робіт, пов'язаних з пригонкою компенсуючих деталей, причому, як правило, вся ця робота виконується вручну. Потрібні робітники високої кваліфікації. Для виконання робіт потрібні значні колювання часу, порушується ритмічність роботи. Отже метод пригонки застосовується лише в одиничному виробництві.

### **5. Метод регулювання.**

Сутність методу полягає в тому, що необхідна точність замикаючої ланки досягається шляхом зміни величини заздалегідь обраної ланки без зняття з неї матеріалу.

Відмінність між методом регулювання та компенсації полягає у способі зміни величини компенсуючої ланки, яке при методі

регулювання здійснюється або зміною положення однієї з деталей шляхом її лінійного переміщення, або введенням у розмірний ланцюг спеціальної деталі необхідного розміру (рухомого компенсатора).

Переваги методу:

- можливість досягнення будь-якої необхідної точності замикаючої ланки, при економічних допусках на всі складові ланки;
- відсутність підгоночних робіт, а отже виконувана робота легше вкладається в такт виробництва;
- зберігається можливість у процесі експлуатації виконати необхідні регулювальні роботи.

Недоліки методу:

- необхідність використання робітників високої кваліфікації;
- збільшення кількості деталей у виробі.

## **8.5 Припуски на обробку деталей машин**

Одним з основних питань, з яким доводиться зустрічатися технологу при розробці технологічного процесу, є визначення загальних і операційних припусків на обробку. Встановлення оптимальних припусків на заготовках, що перетворюються на стружку при обробці різанням, має велике значення. Слід зазначити, що метал, який надалі перетворюється на стружку, становить відносно невелику вартість, проте вартість зняття його з заготовки – велика. Прибирання стружки, її подальше дроблення, транспортування від робочих місць за межі цеху – ускладнюють роботу цехів і вимагають спеціальних пристроїв: стружкодробарки, транспортери та ін.

Правильно встановлені припуски на обробку забезпечують:

- економію металу;
- мінімальний час обробки;
- скорочення браку;
- підвищення якості виробів.

Отже, економія металу та рентабельність технологічних процесів великою мірою залежать від встановлення раціональних загальних та операційних припусків.

Вченими цієї галузі знань розроблено наукову методику розрахунку припусків на обробку. Крім того, створено багатий нормативний матеріал щодо визначення припуску на механічну

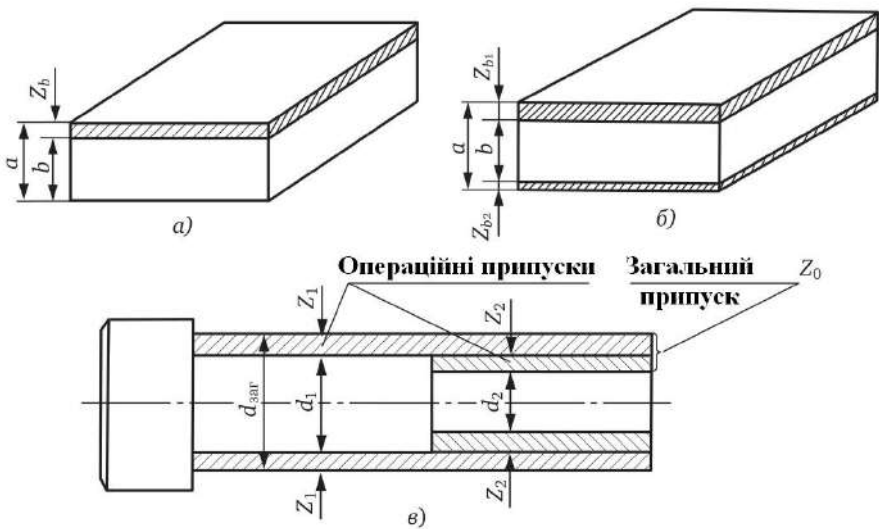
обробку у вигляді таблиць. З робіт у цій галузі найбільш відомі наукові праці проф. В.М. Кована, в яких запропоновано методику встановлення припусків розрахунковим шляхом на науковій основі.

### 8.5.1 Основні поняття та визначення

**Припуском на обробку** називається шар металу, що підлягає видаленню із заготовки для отримання готової деталі. Розмір припуску визначається розміром деталі за її робочим кресленням (рис. 8.5):

$$Z = a - b, \tag{8.13}$$

де  $Z$  – припуск на обробку;  
 $a$  – розмір заготовки;  
 $b$  – розмір деталі.



$a$  - односторонній;  $б$  - двосторонній асиметричний;  
 $в$  - симетричний операційний і загальний

Рисунок 8.5 – Припуск на обробку

Розрізняють:

- односторонні припуски;

- двосторонні асиметричні припуски;
- двосторонні симетричні припуски.

Розмір припуску вказується у більшості випадків як товщина шару матеріалу, яка підлягає видаленню при обробці цієї поверхні.

Однак при обробці деталей або поверхонь, що являють собою тіла або поверхні обертання (вали, отвори), часто припуск вказується на розмір (діаметр), тобто вказується подвійна товщина шару, що знімається.

Наприклад, припуск на сторону (рис. 8.5, в) дорівнює:

$$Z_1 = (d_{\text{заг}} - d_1) / 2. \quad (8.14)$$

Іноді натомість вказують припуск на діаметр:

$$2Z_1 = d_{\text{заг}} - d_1. \quad (8.15)$$

Поверхні, що підлягають обробці і мають припуски, можуть бути розбиті на такі групи:

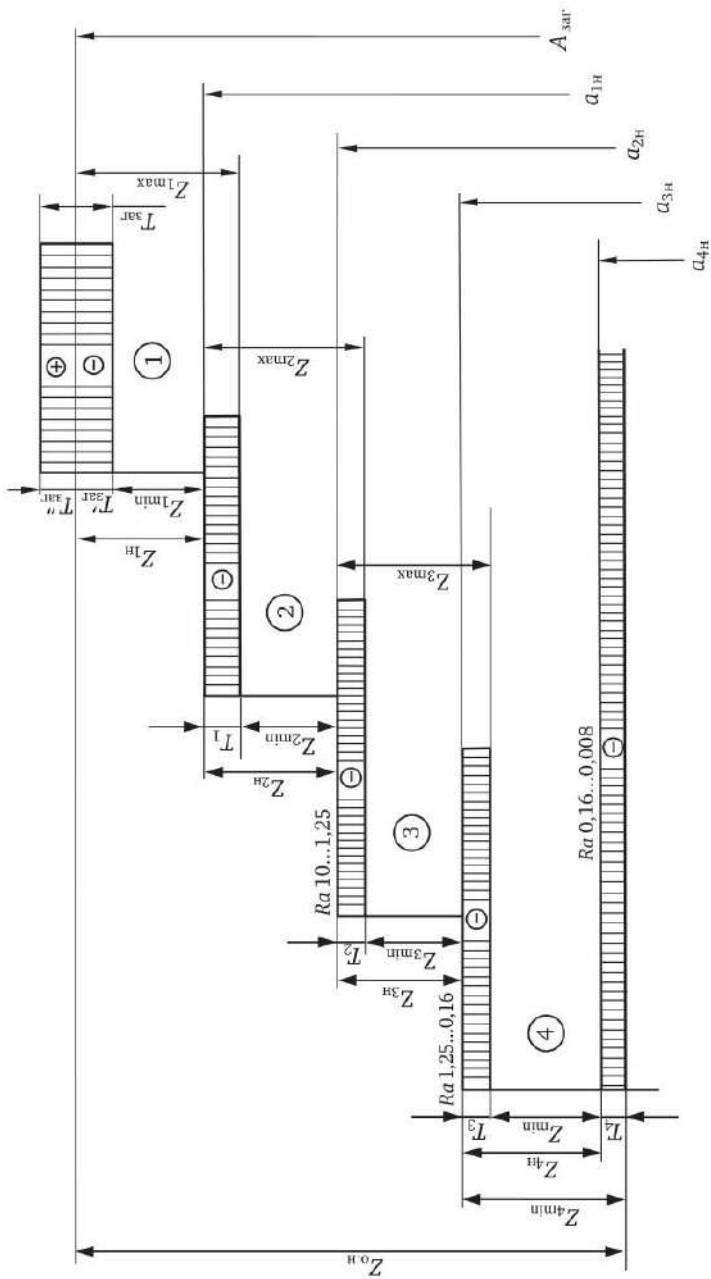
- зовнішні (охоплювані) циліндричні, конічні і фасонні поверхні;
- внутрішні (що охоплюють) циліндричні, конічні та фасонні поверхні.

**Загальним припуском** на обробку називається сумарний шар матеріалу, необхідний для повної обробки даної поверхні.

**Операційним припуском** називається шар матеріалу, який має бути видалено з поверхні під час виконання операції (переходу). Раніше вказувалося, що операції механічної обробки можуть бути поділені на:

- 1) обдирні (грубі);
- 2) напівчистові;
- 3) чистові;
- 4) оброблювальні (рос. «отделочные»).

Залежно від виду операції величина припуску може бути різною. Для грубих обдирних операцій вона більша, для чистових та оброблювальних операцій — значно менша. Припуски як загальні, так і операційні можуть бути задані з певною точністю, і на них необхідно призначати допуски. Допуск на загальний припуск є водночас і допуском на відповідний розмір заготовки. Операційний допуск визначає допустимі відхилення операційного розміру і допустимі коливання операційного припуску (рис. 8.6 ÷ 8.7).



операції: 1 – обдирна; 2 – напівчистова; 3 – чистова; 4 – обробна

Рисунок 8.6 – Схема розташування операційних припусків і допусків при обробці зовнішніх (охоплюваних) поверхонь

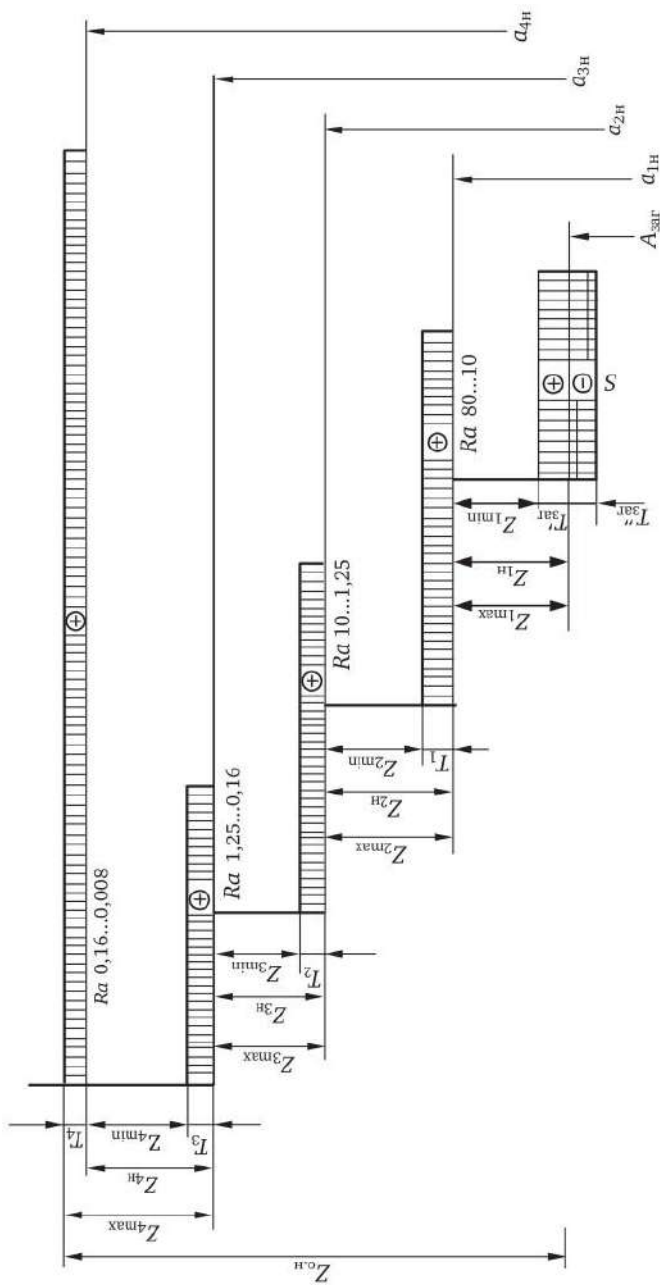


Рисунок 8.7 – Схема розташування операційних припусків і допусків при обробці внутрішніх (охолоджуючих) поверхонь (операції див. на рис. 8.6)

Слід зазначити, що операційні допуски відраховуються на матеріал, тобто для валів та інших охоплюваних розмірів значення операційних допусків приймаються зі знаком «-» (мінус), а для отворів та інших поверхонь, що охоплюють – зі знаком «+» (плюс).

Схеми розташування операційних припусків і допусків при обробці зовнішніх (охоплюваних) і внутрішніх поверхонь, що охоплюють, представлені на рис. 8.6 та рис. 8.7. Розглядаючи схеми розташування припусків і маючи на увазі, що операційний припуск це шар матеріалу, який підлягає видаленню на даній операції, а операційний допуск є величиною, яка визначає допустимі відхилення операційного припуску, **розрізнятимемо наступні види припусків.**

**Номинальний (розрахунковий) операційний припуск** – шар матеріалу, який слід зняти із заготовки на цій операції; являє собою різницю між номінальним розміром попередньої операції та номінальним розміром даної операції при обробці зовнішніх (охоплюваних) поверхонь або різницю між номінальним розміром наступної та номінальним розміром даної операції. Так наприклад, при обробці зовнішніх (охоплюваних) поверхонь

$$\begin{aligned} Z_{1H} &= A_{\text{заг}} - a_{1H}; & Z_{3H} &= a_{2H} - a_{3H}; \\ Z_{2H} &= a_{1H} - a_{2H}; & Z_{4H} &= a_{3H} - a_{4H}, \end{aligned} \quad (8.16)$$

при обробці внутрішніх (що охоплюють) поверхонь

$$\begin{aligned} Z_{1H} &= a_{1H} - A_{\text{заг}}; & Z_{3H} &= a_{3H} - a_{2H}; \\ Z_{2H} &= a_{2H} - a_{1H}; & Z_{4H} &= a_{4H} - a_{3H}. \end{aligned} \quad (8.17)$$

Номинальний операційний припуск є сумою мінімального припуску на цю операцію і допуску на попередню операції:

$$\begin{aligned} Z_{1H} &= Z_{1\text{min}} - T'_{\text{заг}}; & Z_{3H} &= Z_{3\text{min}} - T_2; \\ Z_{2H} &= Z_{2\text{min}} - T_1; & Z_{4H} &= a_{4\text{min}} - T_3. \end{aligned} \quad (8.18)$$

**Найменший (мінімальний) припуск на обробку для однієї операції або переходу** – це найменший шар металу, достатній для отримання необхідної форми та розміру виробу при подальшій обробці.

Найменший операційний припуск дорівнює номінальному операційному припуску мінус допуск попередньої операції:

$$\begin{aligned}
Z_{1\min} &= Z_{1\text{н}} - T'_{\text{заг}}; \\
Z_{2\min} &= Z_{2\text{н}} - T_1; \\
Z_{3\min} &= Z_{3\text{н}} - T_2; \\
Z_{4\min} &= Z_{4\text{н}} - T_3.
\end{aligned}
\tag{8.19}$$

Підставляючи значення операційних номінальних припусків, отримаємо:

при обробці зовнішніх поверхонь

$$\begin{aligned}
Z_{1\min} &= A_{\text{заг}} - a_{1\text{н}} - T'_{\text{заг}}; \\
Z_{2\min} &= a_{1\text{н}} - a_{2\text{н}} - T_1; \\
Z_{3\min} &= a_{2\text{н}} - a_{3\text{н}} - T_2; \\
Z_{4\min} &= a_{3\text{н}} - a_{4\text{н}} - T_3;
\end{aligned}
\tag{8.20}$$

при обробці внутрішніх поверхонь

$$\begin{aligned}
Z_{1\min} &= a_{1\text{н}} - A_{\text{заг}} - T'_{\text{заг}}; \\
Z_{2\min} &= a_{2\text{н}} - a_{1\text{н}} - T_1; \\
Z_{3\min} &= a_{3\text{н}} - a_{2\text{н}} - T_2; \\
Z_{4\min} &= a_{4\text{н}} - a_{3\text{н}} - T_3.
\end{aligned}
\tag{8.21}$$

Найбільший (максимальний) операційний припуск  $Z_{\max}$  дорівнює сумі номінального операційного припуску та допуску на цю операцію:

$$\begin{aligned}
Z_{1\max} &= Z_{1\text{н}} + T_1; & Z_{3\max} &= Z_{3\text{н}} + T_3; \\
Z_{2\max} &= Z_{2\text{н}} + T_2; & Z_{4\max} &= Z_{4\text{н}} + T_4.
\end{aligned}
\tag{8.22}$$

Загальний або сумарний припуск на обробку даної поверхні дорівнює сумі номінальних припусків усіх операцій:

$$Z_{\text{о.н}} = Z_{1\text{н}} + Z_{2\text{н}} + Z_{3\text{н}} + Z_{4\text{н}}
\tag{8.23}$$

або

$$Z_{\text{о.н}} = A_{\text{заг}} - a_{4\text{н}}.
\tag{8.24}$$

## 8.5.2 Основні фактори, що впливають на величину припуску

Розмір операційних припусків визначається наступними факторами:

- розмірами та конфігурацією деталі;
- шорсткістю поверхні, одержуваної в результаті обробки поверхні на попередній операції;
- глибиною дефектного шару (поверхневого шару), що утворився в результаті обробки поверхні на попередній операції;
- точністю установки заготовки при виконанні даної операції;
- точністю розмірів і форми, отриманих в результаті виконання попередньої операції.

Чим більше деталь за розмірами і чим складніше її конструкція, тим величина припуску на поверхнях, що обробляються, повинна бути більшою. Найменші розміри деталі і простіша її форма дають можливість призначити менші припуски.

Похибки заготовки, які мають бути компенсовані операційним припуском, поділяють на дві групи:

- похибки, отримані внаслідок виконання попередньої операції;
- похибки, отримані внаслідок виконання поточної операції.

До похибок, які утворюються в результаті виконання попередньої операції, відносяться:

- нерівності (шорсткість) на поверхні;
- дефектний поверхневий шар;
- викривлення заготовки під першу механічну операцію після виправлення, або після термічної обробки;
- залишкова деформація від попередньої механічної обробки;
- допустиме відхилення розміру після виконання попередньої механічної операції або допустиме відхилення (в метал) розміру заготовки.

До похибок, що отримуються в результаті виконання цієї операції, відносяться:

- похибки встановлення заготовки у площині поперечного перерізу;
- похибки встановлення заготовки в осьовій площині.

В результаті виконання технологічних операцій чи переходів ми не отримуємо ідеально гладкої обробленої поверхні. На поверхні завжди залишаються сліди: результати впливу інструменту (при механічній обробці), високої температури штампів (при куванні–штампуванні) або високої температури стінок форми (при виготовленні литих заготовок).

Поверхня виходить певною мірою шорсткою, деталь отримує відповідну точність розмірів та форми. Поверхневий шар матеріалу заготовки або деталі за своїми фізико–механічними властивостями відмінний від основного матеріалу деталі і містить ряд дефектів (пригари, обезуглена, окалину, мікроскопічні тріщини та ін.).

При обробці шорсткість і дефектний шар, отримані в результаті попередньої операції, повинні бути видалені. Остання операція (чистова або обробна) або останній перехід повинні забезпечити шорсткість поверхні за кресленням деталі та видалення дефектів матеріалу в поверхневому дефектному шарі.

У табл. 8.1 зазначені, як приклад, шорсткість, глибина дефектного шару та точність при різних методах обробки, а в табл. 8.2÷8.6 – для заготовок, отриманих різними методами.

Таблиця 8.1 – Шорсткість, глибина дефектного шару та точність деяких видів обробки

Метод обробки	Параметр шорсткості <i>Rz</i> , мкм	Глибина дефектного шару <i>T</i> <sub>деф.</sub> , мкм	Похибка обробки розмірів, мкм
Поковка	100...225	500	1000
Чорнове фрезерування	45...100	50	160
Чистове фрезерування	15...25	40	80
Шліфування	3...5	20	35

З цих таблиць, і навіть з рис. 8.8 випливає, що мінімальна товщина шару металу, який має бути видалений при обробці (тобто мінімальний припуск):

$$Z_{\min} = Rz + T_{\text{деф.}} \quad (8.25)$$

Розмір цього припуску визначиться так (табл. 8.1):  
 при чорновому фрезеруванні  $Z_{\min} = 225 - 4 - 500 = 725$  мкм;  
 при чистовому фрезеруванні  $Z_{\min} = 100 + 50 = 150$  мкм;

при шліфуванні  $Z_{\min} = 25+40 = 65$  мкм.

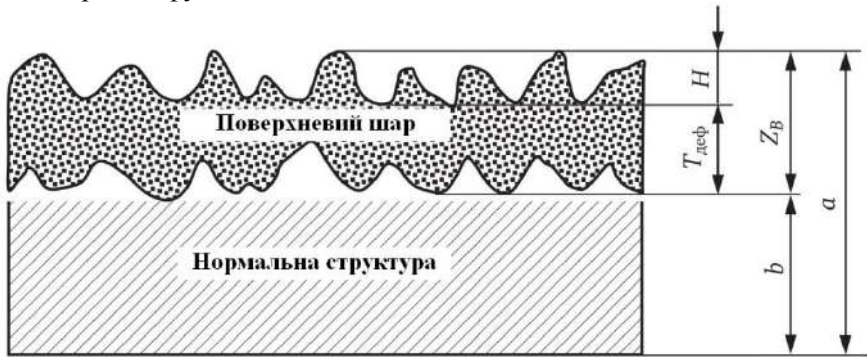


Рисунок 8.8 – Структура мінімального операційного припуску

Номінальний припуск на цих операціях, маючи на увазі, що  $Z_H = Z_{\min} + T$ , буде дорівнювати наступним значенням:

при чорновому фрезеруванні  $Z_H = 725 + 1000 = 1\ 725$  мкм;

при чистовому фрезеруванні  $Z_H = 150 + 160 = 310$  мкм;

при шліфуванні  $Z_H = 65 + 80 = 145$  мкм.

Таблиця 8.2 – Якість поверхні виливків ( $Rz + T_{\text{деф}}$ ), що досягається різними способами формування

Матеріал виливки	Клас точності виливки	Найбільший розмір виливки, мм				
		до 500	від 500 до 1250	від 1250 до 3150	від 3150 до 6300	від 6300 до 10 000
$(Rz + T_{\text{деф}})$ , мкм						
Чавун	I	400	600	800	–	–
	II	500	700	900	–	–
	III	600	800	1000	1500	2000
Сталь	I	300	500	700	–	–
	II	400	600	800	–	–
	III	500	700	900	1300	1700
Кольорові метали та сплави	I	200	400	–	–	–
	II	300	500	–	–	–
	III	400	600	800	1100	–

**Примітка.** Класи точності виливки досягаються: I – литтям у форми, виготовлені машинним формуванням за металевими моделями; II – машинним формуванням за дерев'яними моделями; III – ручним формуванням за дерев'яними моделями.

Таблиця 8.3 – Якість поверхні виливків,  
що досягається спеціальними способами лиття

Лиття	Квалітет точності	Rz, мкм	$T_{\text{деф}}$ , мкм, для заготовки з		
			чавуну	сталі	кольорових металів
У кокіль	14...15	200	300	200	100
Відцентрове	14...15	200	300	200	100
В оболонкові форми для елементів, одержуваних					
в одній напівформі	11...12	40	260	160	100
в обох напівформах	14	40	260	160	100
під тиском	11...12	50	–	–	100
По виплавлених моделях	11...12	32	170	100	63

Розрахований таким чином припуск виявиться недостатнім. При визначенні припуску слід врахувати похибки установки заготовки при виконанні даної операції, а також можливу деформацію заготовки на попередній операції.

Розглянемо на прикладі обробки зовнішньої поверхні деталі, що є тілом обертання (вал), можливі похибки установки заготовки (рис. 8.9). Можливі похибки установки будуть:

- у площині поперечного перерізу – ексцентричність через розбіжність осей центрових отворів із віссю заготовки  $\varepsilon_d$ ;
- у площині поздовжнього перерізу – перекис через зміщення центрових отворів у різні сторони по відношенню до осі заготовки  $\varepsilon_l$ .

Деформація заготовки на попередніх операціях може призвести до викривлення осі, внаслідок чого припуск на одній стороні зменшиться на величину  $C$  у перерізі  $AA$  (рис. 8.9, в). Облік величин  $\varepsilon_d$ ,  $\varepsilon_l$  і  $C$  необхідний щодо величини припуску. В іншому випадку припуск, як було зазначено, виявиться недостатнім.

Враховуючи вищевикладене, можна схематично представити структуру припуску на обробку поверхні.

Визначимо величину припуску, позначаючи через:

$Z_H$  – величина номінального (розрахункового) операційного припуску;

$Rz$  – висота нерівностей на оброблюваній поверхні від попередньої обробки;

$T_{\text{деф}}$  – найбільша глибина дефектного шару;

Таблиця 8.4 – Шорсткість поверхні виливків

Спосіб лиття	Максимальний розмір виливки, мм	Параметр шорсткості $R_a$ , мкм, поверхні виливків з				сталі	чавуну
		алюмінієвих та магнієвих сплавів	цинкових сплавів	бронзи та латуні	стали		
Під тиском	До 500	До 20	До 20	До 40	-	-	
		20...120	20...120	40...320			
У кокль	До 100	10...80	10...40	20...80	10	-	
		10...80	10...80	20...80			
По випалюваних моделях	Від 100 до 200 » 200 » 500 »	10...80	-	20...80	20...40	-	
		20...160	-	80...320			
В оболонковій формі	Від 200 до 700	20...160	-	80...320	160...320	10...80	
		80...320	-	160...630			
У піщані форми: при ручному формуванні при розмірах	Від 800 до 1500	160...320	-	320...1000	-	-	
		40...160	-	80...320			
машинним струшуванням при розмірах	Від 800 до 700 » 700 » 1200 »	80...320	-	160...450	160...320	80...320	
		160...450	-	160...630			
вакуум-плівкової при розмірах	Від 150 до 800 » 800 » 1200 »	40...80	-	40...120	-	-	
		40...160	-	40...160			

Таблиця 8.5 – Основні показники якості заготовок, одержаних способами гарячого штампування

Спосіб гарячого штампування	Допуски основного розміру, мм, або квалітет IT	Параметр шорсткості, мкм
На молотах та пресах	0,7-11,0	Rz 20...160
З наступним калібруванням	IT8...IT12	Ra 0,32...2,5
З висадкою на горизонтально-кувальних Машинах	0,7...3,4	Rz 20...160
Видавлюванням	0,2...0,5	Rz 20...80
На карбункових пресах	IT8... IT14	Rz 20...80

Таблиця 8.6 – Мінімальні радіуси, мм, переходів заготовок, отриманих холодним видавлюванням

Діаметр заготовки, мм	Зовнішні радіуси		Внутрішні радіуси	
	нормальної точності	високої точності	нормальної точності	високої точності
До 10	0,5...2,0	0,3...1,0	1,0...3,0	0,5...1,5
10...25	0,7...2,0	0,5...1,5	1,5...4,0	0,7...2,0
25...50	1,0...3,0	0,7...2,0	2,0...5,0	1,0...3,0
50...80	1,5...5,0	1,0...3,0	2,5...7,0	1,5...5,0
80...120	2,0...6,0	1,5...5,0	3,0...9,0	2,0...7,0
120...160	3,0...9,0	2,0...8,0	4,0...10,0	3,0...9,0

$C$  – найбільше значення залишкової деформації у заготовки, отриманої або в результаті виконання попередньої операції, або в результаті виправлення заготовки;

$\varepsilon_d$  – найбільше значення похибки установки в площині поперечного перерізу;

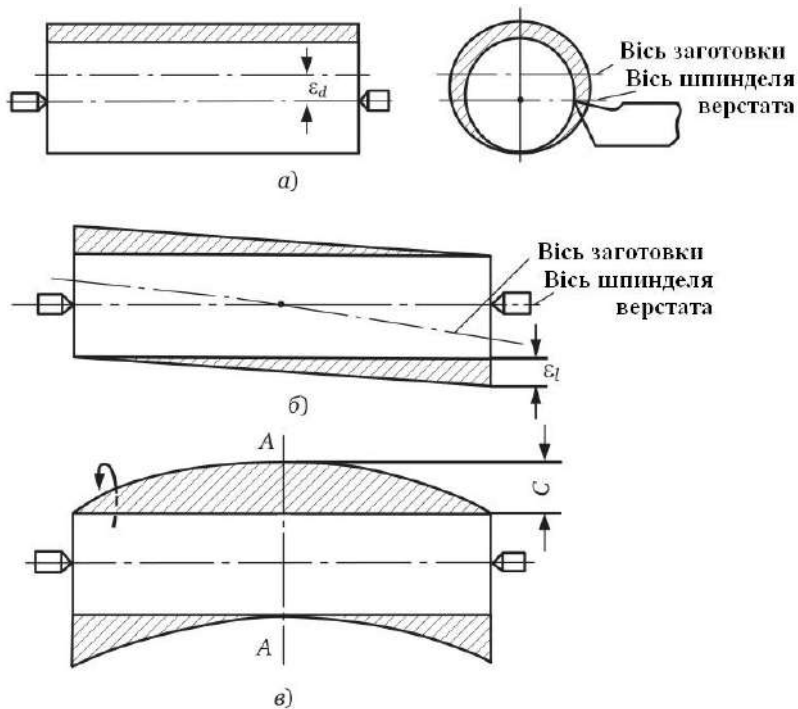
$\varepsilon_l$  – найбільше значення похибки установки в площині поздовжнього перерізу;

$T$  – допуск на попередню операцію;

$K$  – коефіцієнт перекриття одних похибок іншими (одні можуть мати знак «+» плюс, інші – «-» мінус).

При односторонньому розташуванні припуску (торцеві поверхні, площини):

$$Z_H \geq (Rz + T_{\text{деф}} + \varepsilon_l + C + T)K. \quad (8.26)$$



*a* – у площині поперечного перерізу; *б* – у площині поздовжнього перерізу; *в* – деформація (викривлення) заготовки та її вплив на величину припуску

Рисунок 8.9 – Можливі похибки встановлення заготовки

При симетричному розташуванні припуску (зовнішні та внутрішні циліндричні, конічні та фасонні поверхні тіл обертання):

$$2Z_H \geq (2Rz + 2T_{\text{деф}} + \varepsilon_d + \varepsilon_l + C + T)K. \quad (8.27)$$

Професором В.М. Кованом формули для визначення припуску подані трохи в іншому вигляді, а саме:

$$Z_H \geq (H + T_{\text{деф}}) + T + |\bar{T}a + \bar{\varepsilon}Ta_3|; \quad (8.28)$$

$$2Z_H \geq 2(H + T_{\text{деф}}) + T + 2|\bar{T}a + \bar{\varepsilon}Ta_3|, \quad (8.29)$$

де  $\bar{T}a$  – векторна сума просторових відхилень взаємозалежних поверхонь оброблюваної деталі, що виявилися на попередній операції;

$\bar{\epsilon}T_{a3}$  – векторна сума похибок базування та закріплення, тобто похибка установки при виконуваний операції.

Формули (8.28) і (8.29) більш суворо науково обґрунтовані, проте визначення суми величин  $\bar{T}_a$  і  $\bar{\epsilon}T_{a3}$  часом є справою громіздкою і досить витратною, тому ми користуємося надалі простими формулами (8.26) і (8.27), і отже визначати величини  $\epsilon_d$ ,  $\epsilon_l$  і  $C$  будемо за емпіричними формулами. Це йде на шкоду точності розрахунків, проте скорочує витрати часу на їхнє виконання.

Наведені формули дають можливість визначити величину номінального операційного припуску, яка виходить при цьому мінімальною, але цілком достатньою для обробки та отримання якісної поверхні, що не має слідів обробки попередньої операції.

При виконанні розрахунків значення  $Rz$  і  $T_{\text{деф}}$  беруться з таблиць довідників, допуски на розміри заготовок, а також допуски на розміри при виконанні різних операцій вибираються по довідкових таблицях. Допуск на останню операцію та остаточний розмір деталі призначаються за її робочим кресленням.

Значення величин  $\epsilon_d$ ,  $\epsilon_l$  і  $C$  визначаються за емпіричними формулами:

$$\epsilon_d = a\sqrt[3]{M}; \tag{8.30}$$

$$\epsilon_l = b l_p; \tag{8.31}$$

$$C = m l_p, \tag{8.32}$$

де  $a$ ,  $b$ ,  $m$  – коефіцієнти, що залежать від характеру і точності заготовки, характеру установки і т.п. Значення цих коефіцієнтів наведено в табл. 8.7.

Таблиця 8.7 – Значення коефіцієнтів  $a$ ,  $b$  і  $m$

Характер операцій	Коефіцієнти (граничні значення)		
	a	b	m
Грубі	0,1...0,2	1...2	1...2
Напівчистові	0,05...0,1	0,3...0,6	0,2...0,4
Чистові	0,01...0,03	0,1...0,3	0,1...0,2
Обробні	0,05...0,01	–	–

Менші значення коефіцієнтів приймаються для заготовок

підвищеної точності та для великосерійного та масового виробництва;  
 $m$  – номінальний розмір заготовки – діаметр для циліндричних поверхонь, довжина для торцевих поверхонь, ширина для плоских поверхонь;

$l_p$  – розрахункова довжина в погонних метрах.

У випадках обробки поверхні без перебазування (з однієї установки) заготовки після попереднього переходу значення  $\epsilon_d$  і  $\epsilon_l$  дорівнюватимуть нулю, оскільки в цьому випадку похибки установки практично відсутні.

Коефіцієнт  $K$  вибирається в межах від 0,8 до 1,0:

$K = 0,8$  при індивідуальному (одиничному) виробництві;

$K = 0,9$  при серійному виробництві;

$K = 1,0$  при масовому виробництві.

Схему складових операційного припуску наведено на рис. 8.10.

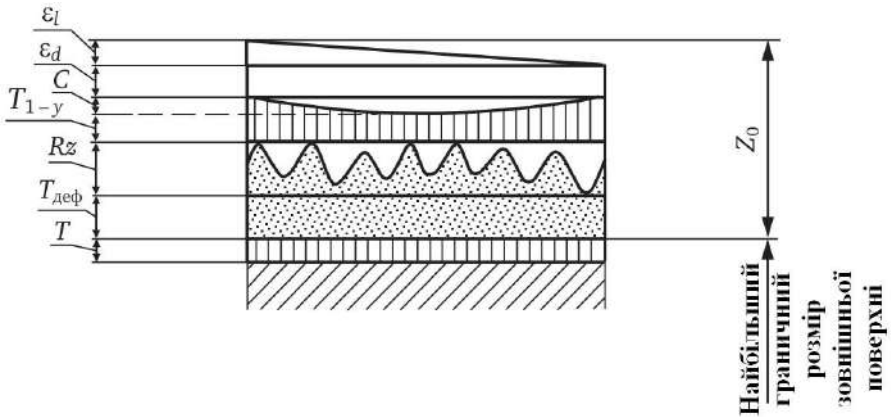


Рисунок 8.10 – Схема складових операційного припуску

Величина  $l_p$  для зовнішніх циліндричних поверхонь визначається наступним чином.

При обробці валів у патроні, цанзі тощо, без підтримки заготовки заднім центром, за розрахункову довжину  $l_p$  слід прийняти довжину, що дорівнює подвійній відстані від найбільш віддаленого торця оброблюваної ділянки до кулачків патрона або до цанги.

Наприклад, припуск на обробку ділянки  $a$  (рис. 8.11,  $a$ ) слід прийняти виходячи з подвоєної довжини  $l_1$ , а на обробку ділянки  $b$  – з подвоєної довжини  $l$ . При  $l/d > 12$ , де  $l$  – довжина ділянки, що обробляється або відстань між люнетами, операційний припуск розраховується виходячи з подвоєної довжини.

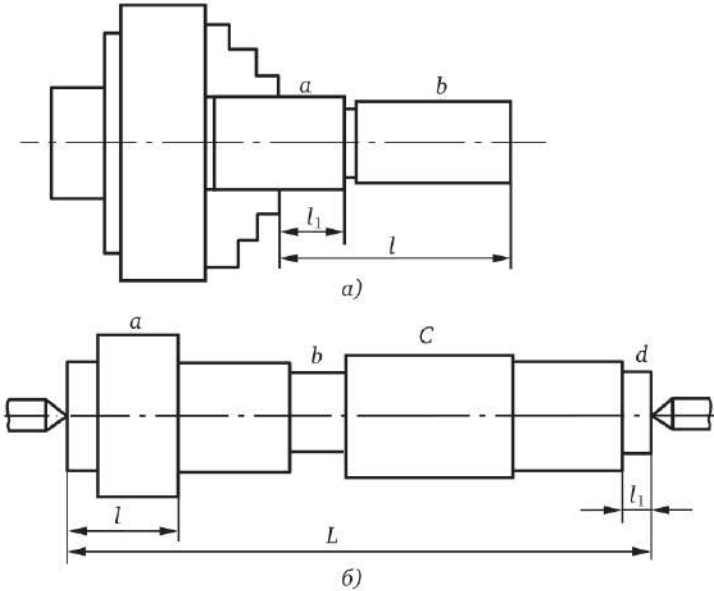


Рисунок 8.11 – До розрахунку величини  $\epsilon_d$  та  $C$

При обробці на оправках за розрахункову довжину  $l_p$  слід приймати довжину оправки, яка може бути визначена за формулою:

$$l_{\text{опр}} = l_g + (50 \dots 100) \text{ мм}, \quad (8.33)$$

де  $l_g$  – довжина деталі, що обробляється на оправі.

Загальні формули для розрахунку операційних припусків мають такий вигляд:

– для зовнішніх і внутрішніх циліндричних поверхонь:

$$z_d = K(2Rz + 2T_{\text{деф}} + \epsilon_d + \epsilon_l + C + T) \quad (8.34)$$

– для торцевих поверхонь і площин, тобто при односторонньому розташуванні припуску:

$$z_l = z_t = K(Rz + T_{\text{деф}} + \varepsilon_d + \varepsilon_l + C + T) \quad (8.35)$$

де  $T$  – допуск на операційний розмір попередньої операції;  
 $K$  – коефіцієнт, що враховує перекриття одних похибок іншими.

Похибки можуть накладатися одна на одну і таким чином зменшувати величину припуску. Це перекриття враховується коефіцієнтом  $K$ .

При обробці ступінчастих валів у центрах припуск береться на кожний окремий рівень за його розміром. За розрахункову довжину кожної ділянки (рівня) валу слід прийняти:

а) для ділянок, розташованих у середній частині валу, повну довжину валу;

б) для ділянок, розташованих біля торців валу – довжину, що дорівнює подвійній відстані від торця валу до найбільш віддаленого кінця оброблюваної ділянки.

Наприклад, на обробку ділянок  $b$  і  $C$  (рис. 8.11) слід прийняти припуск, виходячи із загальної довжини валу  $l$ , тобто у цьому випадку  $l_p = L$ , а припуск для ділянок  $a$ ,  $d$  – виходячи з подвоєної довжини  $l$  і  $l_1$ .

На основі розрахунку операційних припусків розрахунок операційних розмірів проводиться наступним чином:  $a_{4н}$  – вибирається за робочим кресленням деталі (остаточний чистовий розмір деталі).

Для зовнішніх (охоплюваних) поверхонь (рис. 8.9):

$$\begin{aligned} a_{3н} &= a_{4н} + Z_{4н}; \\ a_{2н} &= a_{3н} + Z_{3н}; \\ a_{1н} &= a_{2н} + Z_{2н}; \\ A_{\text{заг}} &= a_{1н} + Z_{1н}. \end{aligned} \quad (8.36)$$

Для внутрішніх (що охоплює) поверхонь (рис. 8.10):

$$\begin{aligned} a_{3н} &= a_{4н} - Z_{4н}; \\ a_{2н} &= a_{3н} - Z_{3н}; \\ a_{1н} &= a_{2н} - Z_{2н}; \\ A_{\text{заг}} &= a_{1н} - Z_{1н}. \end{aligned} \quad (8.37)$$

**Загальний хід та послідовність робіт при розрахунку операційних припусків** можна подати у наступному вигляді.

1. За наявності робочого креслення деталі вибирається вид заготовки (лита, кована або штампована) та техніко–економічними розрахунками обґрунтовується метод її виготовлення.

2. Розробляється технологічний процес обробки деталей. Намічаються операції, позиції, переходи та порядок їх виконання.

3. Для кожної операції за табличними даними довідників визначаються величини  $Rz$ ,  $T_{\text{деф}}$  і  $T$ . Для останньої операції допуск  $T$  береться за робочим кресленням виробу.

4. Користуючись даними таблиць, розрахунковим шляхом за вищенаведеними формулами визначаються величини  $\varepsilon_d$ ,  $\varepsilon_l$  і  $C$ .

5. Залежно від характеру виробництва вибирається значення коефіцієнта  $K$ .

6. Для кожної з операцій визначається величина номінального (розрахункового) припуску  $Z_H$ .

7. Визначаються операційні номінальні розміри  $a_{1н}$ ,  $a_{2н}$ ,  $a_{3н}$  тощо, а також розмір заготовки  $A_{\text{заг}}$ .

### **8.5.3 Методи визначення припусків на обробку**

Існують три методи визначення припусків: розрахунково–аналітичний; за укрупненими нормативами; загальних припусків за табличними даними.

**1. Розрахунково–аналітичний метод.** Цей метод розрахунку операційних припусків заснований на дослідженні та обліку похибок, одержуваних на виконуваних та попередніх операціях. Побудований він на аналізі фізичної сутності явищ, що породжують похибки, та обліку явищ, тісно пов'язаних із методами та умовами обробки порівняно з іншими методами. Розрахунково–аналітичний метод забезпечує більш точне та науково–обґрунтоване визначення припусків на механічну обробку. Величина припуску, будучи суворо обґрунтованою, є мінімальною, але цілком достатньою для отримання в результаті обробки придатної деталі.

До недоліків цього методу відносяться великий обсяг розрахунків, значна витрата часу на його виконання, труднощі створення нормативного матеріалу для всіх видів обробки та великий обсяг, а також складність виявлення окремого впливу кожного

технологічного фактора (наприклад похибки установки) на величину припуску. Все це ускладнює та обмежує застосування цього методу. Розрахунок припусків цим методом застосовують в масовому та великосерійному виробництві.

**2. Метод визначення операційних припусків за укрупненими табличними нормативами** ґрунтується на узагальненні заводських нормативних даних. Суть його полягає в тому, що на кожну операцію припуск  $Z_n$  вибирається за табличними даними залежно від методу обробки та від розмірів деталі. Загальний припуск на обробку конкретної поверхні визначається як сума операційних припусків, визначених за таблицями.

Цей метод значно простіший за попередній, не потребує великих витрат часу, скорочує обсяг нормативного матеріалу (таблиць) і дає достатню для практики точність розрахунку, хоча ця точність і поступається точності попереднього методу. Внаслідок цих переваг цей метод розрахунку є основним і може застосовуватися як у масовому, так і в серійному та одиничному виробництві.

**3. Визначення загальних припусків за табличними даними.** Метод простий, для визначення загальних припусків на механічну обробку – не вимагає ніяких обчислювальних робіт. Загальні припуски на поверхнях заготовок визначаються за таблицями залежно від методу виготовлення заготовки та її складності, габаритів або ваги. Ці таблиці є систематизацію заводського досвіду щодо визначення оптимальних припусків.

Оскільки навіть в одній і тій же галузі машинобудівної промисловості на різних заводах обладнання, технологічні процеси, кваліфікація робітників тощо – різні, то такі таблиці неспроможні відображати різноманіття технологічних і виробничих процесів. Припуски, визначені у таких таблицях, зазвичай, є завищеними.

Метод визначення сумарного припуску за таблицями вимагає мінімальної витрати часу, порівняно з двома попередніми методами, але не дає змоги встановити величини операційних припусків. За точністю він поступається двом попереднім методам.

Цей метод може застосовуватися при індивідуальному (одиничному) виробництві, а також у випадках попереднього проектування та попередніх розрахунків заготовок та технологічних процесів.

Таблиці загальних припусків на заготовки у вигляді заводських

нормалей є у багатьох машинобудівних заводах. Частково такі таблиці видано у вигляді ГОСТов. Також є стандарти, що містять таблиці припусків на механічну обробку.

#### **8.5.4 Розрахунок довжинних технологічних операційних розмірів із застосуванням теорії графів**

*Довжинний операційний розмір* – це розмір, що характеризує поверхню з одностороннім розташуванням припуску (площини, торцеві поверхні та ін.), а також розміри між осями.

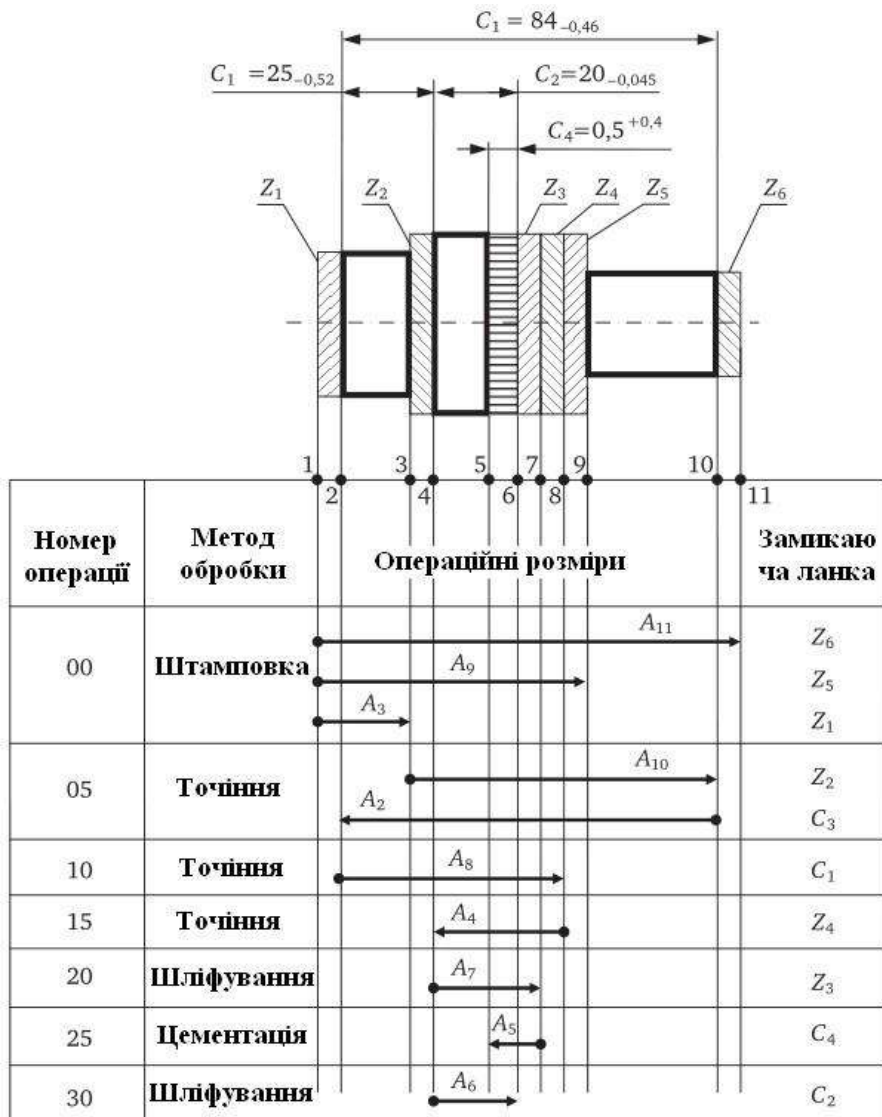
Вихідними даними для розрахунку довжинних операційних розмірів є:

- креслення деталі;
- креслення заготовки (за наявності);
- план обробки або безпосередньо технологічні карти, що містять ескізи оброблюваної деталі із зазначенням технологічних баз, операційних розмірів у вигляді розмірних ліній, типу і моделі обробного обладнання, розмірної точності обробки (квалітету) і шорсткості оброблених поверхонь для кожної операції.

Розрахунок довжинних операційних розмірів ведеться в наступному порядку.

**I. Складання схеми обробки.** На підставі даних креслень деталі та заготовки (за наявності), а також маршрутного технологічного процесу складається схема обробки деталі, приклад якої показаний на рис. 8.12. Схема обробки є ескізом деталі із зазначенням всіх креслярських розмірів, припусків і операційних розмірів. На схемі (нижче ескізу) проводиться горизонтальна лінія, на яку вертикальними лініями проєктуються всі без винятку поверхні: поверхні готової деталі, поверхні заготовки і всі проміжні поверхні, що утворюються на операціях. На горизонтальній поверхні всі розміри нумеруються зліва направо.

Над ескізом вказуються всі креслярські розміри деталі в одному напрямку (крім фасок), включаючи глибину термозміцнюваного шару, по кожній поверхні окремо. Креслярські розміри з допусками позначаються літерою *C* з нижнім індексом, що відповідає порядковому номеру креслярського розміру (наприклад,  $C_1$ ,  $C_2$  та ін.).



розмір  $C_4$  відповідає глибині цементованого шару (за кресленням);  
розмір  $A_5$  – глибині цементованого шару для термічного цеху

Рисунок 8.12 – Схема обробки деталей

Також над ескізом деталі на схемі вказуються всі операційні припуски. Вони позначаються буквою  $Z$  з нижнім індексом, який відповідає порядковому номеру припуску (наприклад,  $Z_1, Z_2$  тощо).

Нанесення припусків на схему проводиться з кінцевих операцій у порядку, зворотному ходу технологічного процесу. Розташування цифр рекомендується приймати в порядку рахунку зліва направо.

У правильно складеній схемі обробки кількість поверхонь завжди на одиницю більша за сумарну кількість креслярських розмірів і припусків.

Нижня частина схеми обробки містить таблицю, у якій вказуються номери операцій та методи обробки. При заповненні таблиці операції, які непов'язані зі зміною розмірів у цьому напрямі, може бути виключені. У таблиці під ескізом вказуються розмірні лінії, що характеризують розміри заготовки та операційні розміри у послідовності їх виконання. Односторонні стрілки розмірних ліній орієнтують строго у бік оброблюваних поверхонь.

Для розмірних ліній заготовки напрямом стрілок вибирається довільно. При цьому до однієї з поверхонь не повинна підходити жодна стрілка (поверхня 1 на рис. 8.12), до інших поверхонь повинна підходити тільки одна стрілка.

Розміри заготовки та операційні розміри рекомендується позначати літерами  $A$  з індексами, що відповідають номерам тих поверхонь, до яких спрямована стрілка (наприклад,  $A_{11}, A_2$  і т.п.; до поверхні 1 на рис. 8.12 не підходить жодної стрілки, тому немає і позначення  $A_1$ ). Позначення замикаючих ланок розмірних ланцюгів будуть проставлятися пізніше, після формування графа розмірних ланцюгів.

Після складання схеми обробки для подальших розрахунків необхідно визначити мінімальні величини операційних припусків з використанням одного з раніше перерахованих методів.

**II. Побудова графа вихідних структур.** Даний граф відповідає вихідній структурі, утвореній зв'язками між поверхнями у вигляді креслярських розмірів та припусків. Вершини графа характеризують поверхні деталі з відповідними номерами, а ребра — креслярські розміри та припуски. Орієнтація ребер (напрямок стрілок) графа вихідних структур вибирається довільно. Для схеми обробки, розглянутої на рис. 8.12, граф вихідних структур набуде вигляду, представленого на рис. 8.13.

**III. Побудова графа похідних структур.** Даний граф відповідає похідній структурі, утвореній зв'язками між поверхнями у вигляді розмірів заготовки та операційних розмірів. Вершини графа характеризують поверхні деталі з відповідними номерами, а ребра — операційні розміри та розміри заготовки.

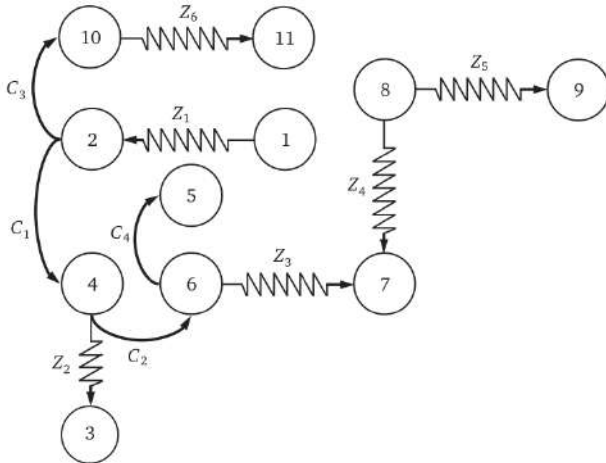


Рисунок 8.13 – Граф вихідних структур

Побудову графа починають із поверхні, до якої не підходить жодної стрілки. Орієнтація ребер графа похідних структур має суворо відповідати напрямку відповідних стрілок на побудованій раніше схемі обробки. На рис. 8.14 показано граф похідних структур для схеми обробки, представленої на рис. 8.12.

**IV. Побудова графа розмірних ланцюгів.** Даний граф (рис. 8.15) утворюється шляхом накладання поєднання графа похідних структур (рис. 8.14) з графом вихідних структур (рис. 8.13). За графом розмірних ланцюгів досить легко можна встановити зв'язок операційних розмірів, операційних припусків та креслярських розмірів на підставі теорії розмірних ланцюгів.

Для того, щоб граф розмірних ланцюгів повністю змоделивав функції креслення деталі та технології, на його ребрах необхідно проставити величини допусків, причому *на графі проставляється лише абсолютна величина допуску*.

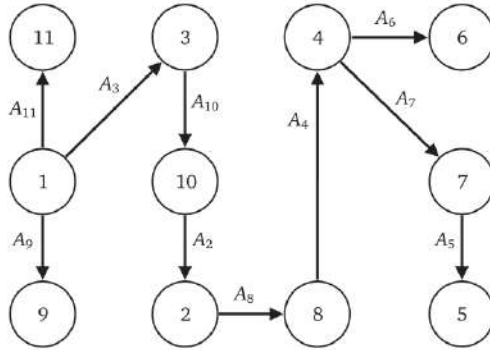


Рисунок 8.14 – Граф похідних структур

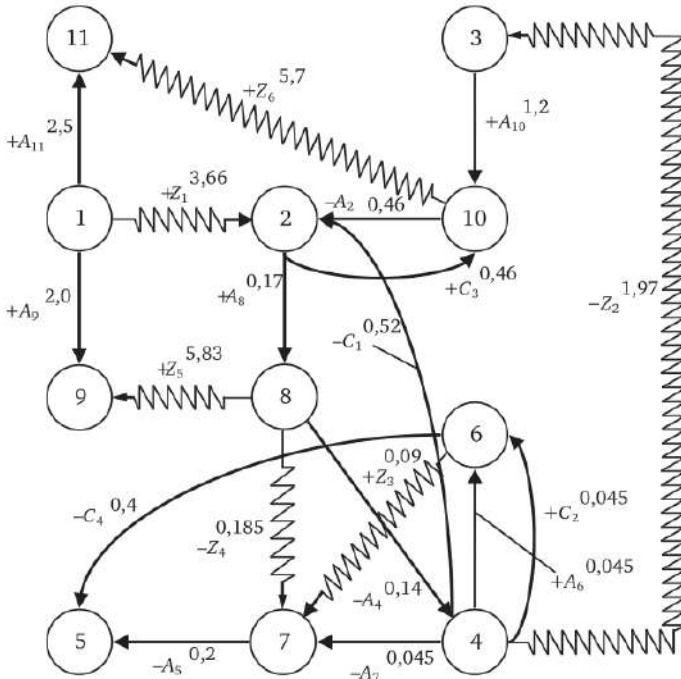


Рисунок 8.15 – Граф розмірних ланцюгів

На ребрах графа ставиться знак «+», якщо стрілка ребра спрямована з вершини графа найменшим номером у вершину з

великим номером, і знак «—», якщо стрілка спрямована у протилежний бік. Допуски на креслярські розміри призначаються відповідно до креслення деталі.

**Під час призначення допусків на операційні розміри та розміри заготовки діють наступним чином.**

1. Наближено визначають величини розмірів, використовуючи креслярські розміри та припуски. Для розглянутого прикладу отримаємо:

$$\begin{aligned}A_6 &= C_2; \\A_5 &= C_4 + Z_3; \\A_7 &= C_2 + Z_3 \text{ і т.д.}\end{aligned}$$

2. За таблицями економічної точності для відповідного методу обробки вибирають допуски на операційні розміри. Допуски на розміри заготовки призначаються, виходячи зі способу її отримання.

При призначенні допусків на операційні розміри та розміри заготовки необхідно враховувати таке:

- при витримуванні розміру від необробленої поверхні (у прикладі це розмір  $A_{10}$ ) допуск на розмір визначається за формулою:

$$T_{\text{оп}} = \frac{T_{\text{заг}} + T_{\text{м}}}{2}, \quad (8.38)$$

де  $T_{\text{заг}}$  – допуск на відповідний розмір заготовки;

$T_{\text{м}}$  – допуск на обробку на цій операції, призначений за таблицями економічної точності методів обробки;

- допуски на деякі операційні розміри обмежені допуском на креслярський розмір, наприклад, у цьому випадку:  $C_3 = A_2$ ;  $C_2 = A_6$ ;  $C_1 = A_8 - A_4$  тощо, тому повинні дотримуватися нерівності:  $TC_3 \geq TA_2$ ,  $TC_2 \geq TA_6$ ,  $TC_1 \geq TA_8 + TA_4$  тощо.

3. Починаючи з останньої операції, вибирається такий розмірний ланцюг, до якого входить лише один невідомий — операційний розмір.

Замикаюча ланка цього розмірного ланцюга заноситься в схему обробки. Замикаючими ланками можуть бути лише відомі параметри — креслярські розміри і величини припусків. Якщо замикаючий розмір не дорівнює сумі складових ланок розмірного ланцюга, то необхідно або зменшити допуски на складові ланки, або змінити

схему обробки за допомогою коригування маршруту обробки.

4. Проставивши допуски на операційні розміри та перевіривши їх, визначають допуски на коливання величини припусків. Мінімальну величину припуску було визначено раніше з використанням розрахунково–аналітичного методу, а максимальний припуск визначається допусками на операційний розмір.

#### ***V. Заповнення відомості розрахунку операційних розмірів.***

Безпосередньо розрахунок операційних розмірів проводиться у відомості розрахунку операційних розмірів (табл. 8.8) у наступному порядку.

1. Операційні розміри розглядаються в послідовності, зворотній ходу технологічного процесу (в рамках однієї операції розміри можна розглядати в довільному порядку). При цьому у графах 4 та 5 відомості вказують позначення операційного розміру та прийнятий на нього допуск.

2. У графу 6 вносять рівняння розмірного ланцюга, складене для аналізованого операційного розміру на підставі графа розмірних ланцюгів. Для рівняння обирається розмірний ланцюг із замикаючою ланкою, вказаною у схемі обробки (рис. 8.15). При складанні рівнянь можна керуватися наступним правилом: при обході контуру розмірного ланцюга в напрямку стрілки замикаючої ланки всі ребра, що входять в цей контур, беруться зі своїм знаком, якщо напрям обходу збігається з напрямком їх стрілок, і з протилежним знаком – в іншому випадку.

3. У графі 1 записують позначення замикаючої ланки (припуску або креслярського розміру) розмірного ланцюга, у графі 2 – величину замикаючої ланки з допуском, що дорівнює сумі допусків з ланок, що залишають.

4. На підставі рівняння розмірного ланцюга з графі 6 визначають розрахункові граничні величини операційного розміру та заносять їх до графі 7. Нижче представлений розрахунок граничних значень двох операційних розмірів для прикладу.

Слід звернути увагу на необхідність розв'язування рівняння розмірного ланцюга щодо замикаючої ланки перед визначенням розрахункових значень невідомого операційного розміру.

5. Прийнятий операційний розмір повинен мати стандартне технологічне закінчення для можливості застосування стандартного вимірювального та ріжучого інструменту.

Таблиця 8.8 – Відомість розрахунку операційних розмірів (фрагмент)

Позначення розмірів	Вихідні розміри			Операційні розміри					Прийнятливий операційний розмір, мм
	Заданий початковий розмір, мм	Отриманий вихідний розмір з урахуванням коригування, мм	Позначення розмірів	Величина припуску, мм	Різниця розмірного ланцюга	Розрахунковий операційний розмір, мм	max	min	
1	2	4	5	6	7	8	9	10	11
$C_3$	$2D_{0,045}$	$19,955$	$A_6$	$-0,045$	$3_2 = A_6$	$20,0$	$19,955$	—	$20,0_{0,045}$
$Z_3$	$0,1 \pm 0,09$	$0,245$	$A_9$	$-0,045$	$Z_3 = A_7 - A_6$	$20,145$	$20,1$	$+0,055$	$20,0_{0,045}$

Таблиця 8.9 – Допустимі закінчення операційних розмірів

Інтервали розмірів, мм	Діаметри валів та інші охоплювані розміри									
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
До 30	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Від 30 до 50	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
« 50 « 120	*	*	(*)	*	*	*	*	*	*	*
« 120 « 360	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Діаметри валів та інші охоплювані розміри										
До 30	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Від 30 до 50	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
« 50 « 120	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
« 120 « 360	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

Примітка: 1. Застосовують закінчення, позначені знаком \*

2. Закінчення в дужках (\*) застосовувати тільки на останніх операціях

Розрахунок граничних значень двох операційних розмірів:

$$C_2 = A_6;$$

$$C_{2\max} = A_{6\max};$$

$$C_{2\min} = A_{6\min};$$

$$A_{6\max} = C_{2\max} = 20,0 \text{ мм};$$

$$A_{6\max} = C_{2\max} = 20,0 \text{ мм};$$

$$Z_3 = A_7 - A_6;$$

$$Z_{3\max} = A_{7\max} - A_{6\min};$$

$$Z_{3\min} = A_{7\min} - A_{6\max};$$

$$A_{7\max} = C_{3\max} + A_{6\min};$$

$$A_{7\min} = C_{3\min} + A_{6\max};$$

$$A_{7\max} = 0,19 + 19,955 = 20,145 \text{ мм};$$

$$A_{7\min} = 0,1 + 20,0 = 20,01 \text{ мм}.$$

Якщо номінальне значення операційного розміру має нестандартне закінчення, виконується його коригування до найближчого стандартного значення (табл. 8.9).

Коригування проводиться строго за рахунок замикаючої ланки розмірного ланцюга. Коригування виконується тільки у бік збільшення припуску, якщо замикаюча ланка – припуск, або ж у межах різниці розмірів із графі 7 відомості, якщо замикаюча ланка – креслярський розмір. Величина коригування припуску вказується зі знаком у графі 8, а прийнятий операційний розмір у графі 9.

Після цього проводиться коригування припуску, і отримані таким чином найбільше і найменше значення вказуються в графі 3. Так, у цьому прикладі ми отримали, що  $A_{7\max} = 20,145 \text{ мм}$ ,  $A_{7\min} = 20,1 \text{ мм}$ , тобто  $A_7 = 20,145_{-0,045} \text{ мм}$ .

Однак, як випливає з табл. 8.8, номінальне значення аналізованого розміру 50,145 мм не є стандартним. Замикаючою ланкою розмірного ланцюга в даному випадку є припуск  $Z_3$ , тому коригування слід проводити у бік його збільшення.

Операційний розмір  $A_7$  є збільшувальною ланкою розмірного ланцюга який розглядається, тому коригуємо його у бік збільшення до найближчого стандартного значення 20,2 мм. Таким чином, коригування операційного розміру становитиме + 0,055 мм (графі 8 відомості), а прийняте його значення  $-20,2_{-0,045} \text{ мм}$  (графі 9 відомості).

Для коригування припуску підставляємо прийняті значення операційного розміру рівняння розмірного ланцюга.

Отже отримаємо:

$$Z_{3\max} = 20,2 - 19,955 = 0,245 \text{ мм};$$

$$Z_{3\min} = 20,155 - 20,0 = 0,155 \text{ мм (графа 3 відомості)}.$$

## 8.6 Основні причини похибок при механічній обробці

Точність обробки заготовки на металорізальних верстатах залежить від наступних основних факторів:

- похибки кінематичної схеми обробки;
- похибки виготовлення верстата;
- ступені зносу верстата;
- точності виготовлення ріжучого інструменту і пристосування;
- температурних деформацій верстата;
- температурних деформацій різального інструменту;
- температурних деформацій заготовки;
- розмірного зносу різального інструмента;
- похибки вимірів;
- внутрішньої напруги в заготовках;
- жорсткості технологічної системи ВПЗ.

Розглянемо вплив деяких чинників на точність обробки.

### 8.6.1 Похибки кінетичної схеми обробки

При налаштуванні верстатів іноді трапляються випадки, коли не можна забезпечити необхідне передатне відношення в кінематичному ланцюгу верстата. Припустимо, що на токарному верстаті треба нарізати різьбу з кроком  $t = 2\pi = 6,28$  мм.

Верстат має зубчасті змінні колеса для отримання кроку  $t = 6,279$  мм. Виникає похибка кінематичного ланцюга при нарізанні різьби, що обумовлює похибку кроку різьби  $\Delta = 0,001$  мм. Аналогічна похибка може бути на зубообробних верстатах.

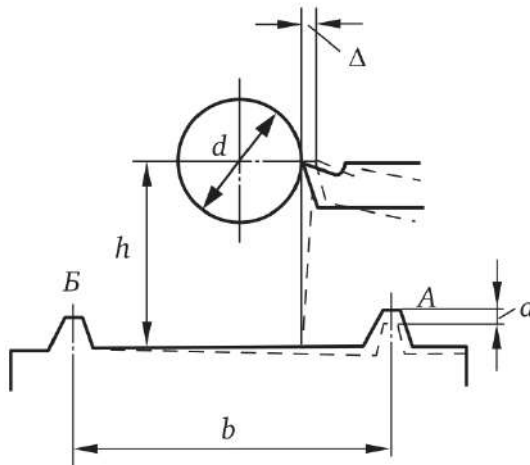
Деталі верстатів і самі верстати, на яких проводиться обробка, також виготовляються не зовсім точно. Є непрямолінійність направляючої станини, столів, супортів, неперпендикулярність або непаралельність направляючої станини до осі шпинделя, похибка виготовлення шпинделя та його опор, похибка ходового гвинта тощо.

Так, наприклад, радіальне биття шпинделів токарних і фрезерних верстатів у кінця шпинделя в ненавантажуваному стані

допускається не більше  $0,01 \div 0,015$  мм. Похибки прямолінійності та паралельності напрямних токарних та поздовжньостругальних верстатів на довжині 1 000 мм допускаються не більше 0,02 мм, і на всій довжині – не більше  $0,05 \div 0,08$  мм.

У міру зносу верстата збільшуються похибки, які були зумовлені неточністю його виготовлення, а це збільшує похибку деталі, що виготовляється. Зношуються передусім деталі, які при їх взаємному відносному переміщенні відчують найбільші питомі навантаження. Внаслідок зносу шпинделя і підшипників у верстатів, що працюють за принципом точення, з'являється биття шпинделя, що надає неточність геометричній формі деталі, яка обробляється.

Зношування направляючих токарного верстата також викликає похибку обробки. Найшвидше зношується та напрямна, до якої ближче розташований ріжучий інструмент (рис. 8.16).



$h$  – висота центрів над станиною;  $b$  – відстань між осями напрямних;  
 $d$  – діаметр оброблюваної заготовки;  $a$  – величина зносу напрямної;  
 $\Delta$  – похибка обробки

Рисунок 8.16 – Схема зносу напрямної у поперечному перерізі

На рис. 8.17 показана схема зносу напрямної  $A$  (рис. 8.16) у поздовжньому перерізі. Найбільше зношування спостерігається в зоні найчастіших переміщень супорта. За відсутності зносу різець займатиме положення, показане суцільними лініями на рис. 8.16. При

зносі різець буде займати положення, представлене штриховою лінією на рис. 8.16, за рахунок зносу, показаного на рис. 8.17, та обумовлювати похибку деталі  $\Delta$ . Фактичний діаметр оброблюваної деталі отримує бочкоподібність на величину  $\Delta$ .

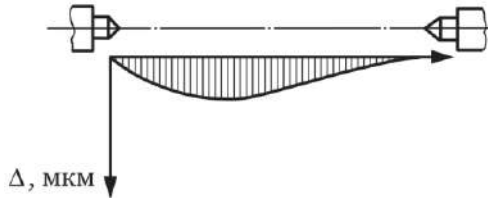


Рисунок 8.17 – Розподіл зношування направляючої в поздовжньому перерізі

Похибка може бути визначена зі співвідношення:

$$\frac{\Delta}{h} = \frac{a}{b}; \quad \Delta = \frac{a}{b} h. \tag{8.39}$$

### 8.6.2 Вплив похибок виготовлення ріжучого інструменту та пристроїв на точність обробки

Похибки механічної обробки можуть бути безпосередньо викликані неточністю виготовлення ріжучого інструменту у двох випадках:

- при роботі мірним інструментом, коли розмір інструменту переноситься на оброблювану деталь (свердла, зенкери, розгортки);
- при роботі фасонним інструментом, коли профіль інструменту визначає профіль деталі (фасонні різці, фрези, профільні круги, різьбонарізні різці).

У деяких випадках інструмент є одночасно і мірним, і фасонним (фасонні протяжки). Похибки розмірів та форми цих інструментів повністю переносяться на деталь.

Похибки виготовлення звичайних прохідних різців, циліндричних і торцевих фрез на точність обробки безпосередньо не впливають. Похибки виготовлення пристроїв також впливають на похибку обробки. Тому при обробці деталей за 13÷14 квалітетом

точності допуски на відповідальні розміри пристроїв беруться в межах  $1/2 \div 1/3$  від допуску на деталь. При 12 квалітеті точності та вище – в межах  $1/5 \div 1/10$  від допуску на деталь.

### 8.6.3 Вплив на точність обробки температурних деформаціях верстата

У процесі роботи верстата відбувається розігрів переднього підшипника, а отже, і передньої бабки верстата в цьому місці. Внаслідок нагрівання розміри  $H$  та  $L$  змінюються на  $\Delta H$  та  $\Delta L$  (рис. 8.18).

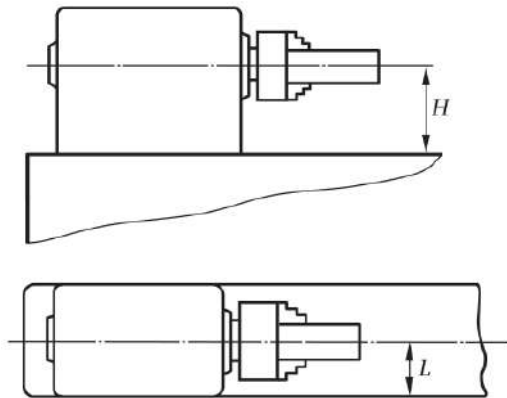


Рисунок 8.18 – Розміри токарного верстата, що змінюються внаслідок нагрівання переднього підшипника передньої бабки

Експериментально встановлені значення змін розмірів  $L$  та  $H$  залежно від часу роботи верстата, год:

$$\begin{aligned} \Delta H &= \alpha H(t_2 - t_1)K_1; \\ \Delta L &= \alpha L(t_2 - t_1)K_2, \end{aligned} \tag{8.40}$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт температурного лінійного розширення матеріалу корпусу передньої бабки (для чавуну  $\alpha = 11 \cdot 10^{-6} \cdot K^{-1}$ );

$t_1$  і  $t_2$  – температура (початкова та кінцева);

$K_1$  і  $K_2$  – коефіцієнти, що визначаються дослідним шляхом.

За даними професора Соколовського О.П., для токарних

верстатів середніх розмірів  $K_1 = 0,5$ ;  $K_2 = 0,26$ . Температура в різних точках корпусу бабки може змінюватися від 10 до 50°C.

Проте температурні деформації не відбуваються безкінечно. Після досягнення максимального значення вони стабілізуються. На рис. 8.19 показаний графік зміни температурних деформацій при нагріванні та охолодженні верстата.

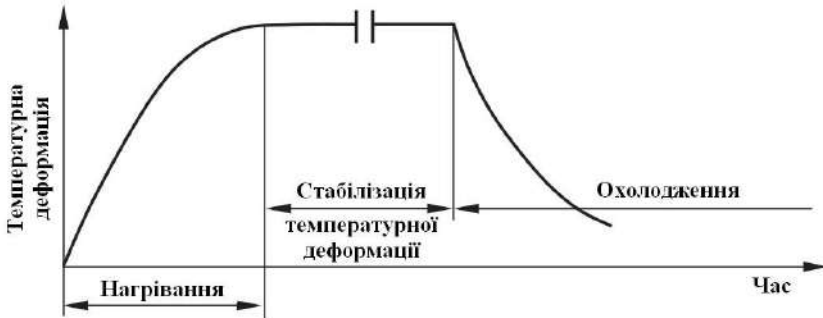


Рисунок 8.19 – Зміна температурних деформацій верстата при нагріванні та охолодженні

### 8.6.4 Вплив на точність обробки температурних деформацій різального інструменту

У процесі роботи також нагрівається інструмент, що позначається на розмірах оброблюваних деталей. На рис. 8.20 наведена залежність теплового подовження різця  $\Delta_r$  від часу різання.

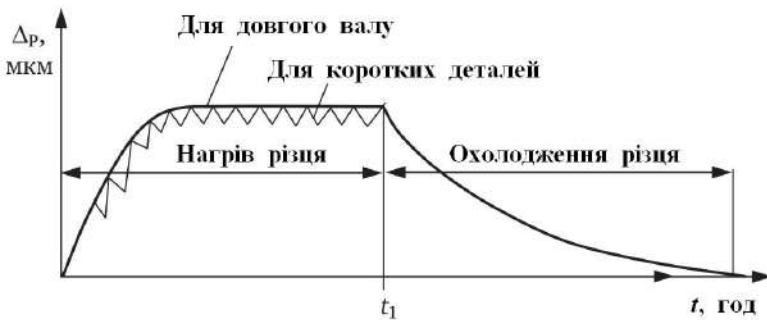


Рисунок 8.20 – Залежність похибки, обумовленої нагріванням ріжучого інструменту, від часу різання

Хоча в інструмент переходить невелика частка тепла (10÷20 %), він схильний до інтенсивного нагрівання. При обробці різцями зі швидкорізальної сталі температура на різці становить близько 800°C і більше. За звичайних умов роботи подовження різця може досягати 30÷50 мкм.

При обробці коротких деталей температурні деформації інструменту викликають зміну розмірів деталей, а при обробці довгих деталей можуть викликати похибку форми обробленої поверхні.

Приблизно температурні деформації різця можуть бути визначені за формулою:

$$\Delta L_p = \alpha L_p \tau_{cp}, \text{ мм} \quad (8.41)$$

де  $L_p$  – довжина вільоту різця, мм;

$\tau_{cp}$  – середнє збільшення температури робочої частини різця, °C;

$\alpha$  – коефіцієнт температурного лінійного розширення матеріалу державки різця, 1/°C.

Температурні деформації різального інструменту (або його подовження) можуть бути розраховані для теплового стану, що встановився, за формулою:

$$\xi = 10C \frac{L_p}{F} \sigma_B (tS)^{0,75} \sqrt{v}, \text{ мкм}, \quad (8.42)$$

де  $C$  – постійна процесу обробки;

$L_p$  – виліт інструменту з різцетримача, мм;

$F$  – площа поперечного перерізу державки різця, мм<sup>2</sup>;

$\sigma_B$  – межа міцності оброблюваного матеріалу, МПа;

$t, S, v$  – параметри процесу різання (глибина різання, подача, швидкість різання).

### **8.6.5 Вплив на точність обробки температурних деформацій оброблюваних заготовок**

В оброблювану деталь переходить незначна кількість тепла при точінні, фрезеруванні, струганні, зовнішньому протягуванні. При токарній обробці в деталь переходить від 3 до 9 %. При свердлінні більшість тепла переходить на деталь (52,5 %). Похибка деталі за рахунок температурних деформацій (мм), може бути визначена за формулою:

$$\Delta_T = \alpha dt, \quad (8.43)$$

де  $d$  – діаметр деталі, мм;

$\alpha$  – коефіцієнт лінійного розширення матеріалу заготовки  $1/^\circ\text{C}$ ;

$t$  – температура нагріву заготовки,  $^\circ\text{C}$ .

Застосування звичайного охолодження дозволяє практично усунути нагрівання деталі. У цьому випадку її температурні деформації дуже незначні та їх вплив на точність обробки можна не враховувати.

Визначення похибки внаслідок температурних деформацій заготовки може бути виконано також за формулою:

$$\Delta_T = \frac{c\beta_d R_H \theta F_0^m}{0,5R_H + 1} \left( \frac{1}{S_m} \right)^n \left[ R_H - \left( \frac{R_B}{R_H} \right)^{0,5R_H} R_B \right], \text{ мм}, \quad (8.44)$$

де  $R_B$  і  $R_H$  – внутрішній і зовнішній радіуси оброблюваної заготовки, мм;

$\beta_d$  – коефіцієнт температурного лінійного розширення оброблюваного матеріалу, град;

$F_0$  – критерій Фур'є;

$c, m, n$  – величини, що визначаються за табл. 8.10.

Таблиця 8.10 – Значення коефіцієнтів у формулі (8.44)

Позначення коефіцієнта	Інтервали зміни $l / S_m$ и $F_0$	Значення коефіцієнта
$n$	$l / S_m \leq 1$	0,58
	$l / S_m > 1$	0,132
$m$	$F_0 \leq 0,1$	0,7
	$F_0 > 0,1$	0,27
$c$	$F_0 \leq 0,1$	$10 \cdot 10^3$
	$F_0 > 0,1$	$3,8 \cdot 10^3$

Швидкість руху умовного кільцевого джерела тепла визначається за формулою:

$$S_m = \frac{Sv}{2\pi R_H k_{\text{сож}}}, \text{ м/с}. \quad (8.45)$$

Визначення довжини умовного кільцевого джерела тепла  $I$  виконуються за такими формулами:

$$\text{при } \begin{cases} S \leq 2r \sin \varphi_1; \\ r \left( 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{S}{2r} \right)^2} \right) \leq t \leq r(1 - \cos \varphi); \end{cases} \quad l = \frac{S}{2} + t \sqrt{\frac{2r}{t} - 1}; \quad (8.46)$$

$$\text{при } S \leq 2r \sin \varphi_1 \text{ и } t \leq r(1 - \cos \varphi) \quad l = \frac{S}{2} - \frac{(r-t) \cos \varphi - r}{\sin \varphi}; \quad (8.47)$$

$$\text{при } \begin{cases} S \leq 2r \sin \varphi_1; \\ r(1 - \cos \varphi_1) + S \sin \varphi_1 \left( \cos \varphi_1 - \sin \varphi_1 \sqrt{\frac{2r}{S \sin \varphi_1} - 1} \right) \leq t \leq r(1 - \cos \varphi); \end{cases} \quad (8.48)$$

$$l = r \sin \varphi_1 + S \cos^2 \varphi_1 - S \sin \varphi_1 \cos \varphi_1 \left( \sqrt{\frac{2r}{S \sin \varphi_1} - 1} \right) + t \sqrt{\frac{2r}{t} - 1}; \quad (8.49)$$

$$\text{при } \begin{cases} t > r(1 - \cos \varphi); \\ \frac{r}{\sin \varphi} [1 - \cos(\varphi + \varphi_1)] \geq S > 2r \sin \varphi_1; \end{cases} \quad (8.50)$$

$$l = r \sin \varphi_1 + S \cos^2 \varphi_1 - S \sin \varphi_1 \cos \varphi_1 \left( \sqrt{\frac{2r}{S \sin \varphi_1} - 1} \right) - \frac{(r-t) \cos \varphi - r}{\sin \varphi_1}. \quad (8.51)$$

Визначення критерію Фур'є виконуються за формулою:

$$F_0 = \frac{19al}{R_H^2 S_m}, \quad (8.52)$$

де  $a$  – температуропровідність матеріалу оброблюваної заготовки,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$S_m$  ( $\text{м}/\text{с}$ );  $l$  і  $R_H$  ( $\text{мм}$ ).

### 8.6.6 Вплив на точність обробки розмірного зносу різця

В процесі обробки спостерігається прогресуючий знос різального інструмента внаслідок тертя його контактних поверхонь об стружку й оброблювану поверхню. Наслідком цього є віддалення ріжучої кромки різця на величину  $U$  від оброблюваної поверхні

(рис. 8.21). Знос, спричинений тертям, протікає безперервно в процесі обробки. Його величину в деякому наближенні можна вважати прямопропорційною часу  $T$  або шляху  $L$ , пройденому ріжучим інструментом у матеріалі заготовки:

$$U = bL, \tag{8.53}$$

або

$$U = aT, \tag{8.54}$$

де  $a$  та  $b$  – постійні для заданих умов обробки;

$T$  – час обробки, хв;

$L$  – шлях, пройдений інструментом у матеріалі заготовки.

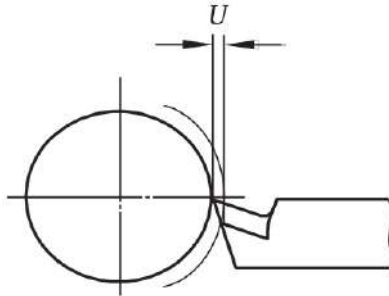


Рисунок 8.21 – Схема впливу зносу різця на точність обробки

Найбільш зручно виражати розмірне зношування у функції шляху, пройденого інструментом у матеріалі заготовки. При точінні:

$$L = \frac{\pi dl}{1000S}, \text{ м}, \tag{8.55}$$

де  $d$  і  $l$  – діаметр і довжина поверхні, що обточується, мм;

$S$  – подача, мм/об.

Вивчення розмірного зносу показало, що його процес не підпорядковується строго лінійному закону. Перший період роботи ріжучого інструменту супроводжується підвищеним розмірним зношуванням (ділянка I на рис. 8.22). Час роботи інструменту на цій ділянці недовгий (кілька хвилин), а шлях різання не перевищує 1 000 м.

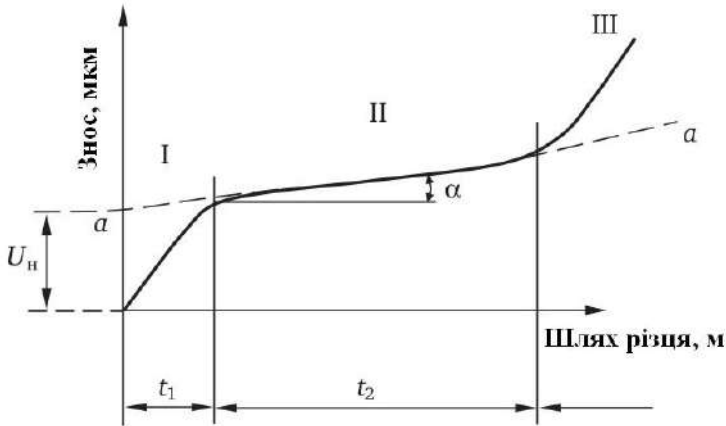


Рисунок 8.22 – Закономірність зносу різального інструменту

Другий період II характеризується нормальним зносом. Шлях різання на ділянці II досягає 30 000 м. Ця ділянка прямолінійна і лінія зносу проходить під кутом  $\alpha$  до осі абсцис.

Третя ділянка III пов'язана зі швидким зносом інструменту. На цій ділянці відбувається руйнування різця.

Інтенсивність зносу різця на ділянці II можна характеризувати тангенсом кута нахилу цієї ділянки до осі абсцис, і її прийнято називати відносним зносом:

$$U_0 = \operatorname{tg} \alpha = \frac{U_2}{l_2}, \quad (8.56)$$

де  $U_2$  – розмірний знос різця, отриманий за час другого періоду роботи інструменту;

$l_2$  – шлях різання, що відповідає тому ж періоду роботи інструменту.

### 8.6.7 Вплив на точність обробки внутрішніх напруг у заготовках

Неточність обробки можлива також через деформації, що виникають під впливом внутрішніх напруг у матеріалі заготовки, які виходять в результаті безперервного охолодження окремих частин заготовок, виготовлених литтям, куванням, штампуванням, а також

при зварюванні, термічній обробці, при обробці матеріалів різанням.

Внутрішня напруга проявляється в особливо значних розмірах у великих виливках складної конфігурації. При обробці матеріалів різанням, коли знімається поверхневий шар заготовки (особливо литий), в них відбувається перерозподіл внутрішньої напруги, і деталь деформується. Тому чернові операції відокремлюють від чистових, які виправляють форму деталі і надають їй остаточні розміри.

Для зменшення внутрішніх напруг великі виливки піддають «старінню» – штучному або природному.

### **8.6.8 Жорсткість технологічної системи та її вплив на точність обробки**

При обробці деталей на металорізальних верстатах сили різання, закріплення та інші впливають на деталі верстата, оброблювану заготовку і ріжучий інструмент, внаслідок чого відбувається їх деформація, зміна величини стикових зазорів, зміна положення ріжучої кромки щодо поверхні, яка обробляється.

Внаслідок цього змінюються розміри деталі, що обробляється, з'являються відхилення від правильної геометричної форми. З цього випливає, що жорсткість пружної системи «Верстат – Пристосування – Інструмент – Заготовка» (ВППЗ) істотно впливає на точність обробки деталей на металорізальних верстатах.

Під жорсткістю пружної системи розуміють її здатність чинити опір дії сил, що прагнуть її деформувати. Велика жорсткість системи одна із основних умов досягнення високої точності. З жорсткістю системи пов'язане явище вібрацій. Системи, що мають велику жорсткість, можуть працювати з вищими режимами різання без появи вібрацій, що забезпечує їх більш високу продуктивність.

Жорсткість пружної системи ВППЗ виражається відношенням радіальної складової сили різання  $P_y$  спрямованої по нормалі до оброблюваної поверхні, до зміщення ріжучої кромки інструменту, встановленого на розмір щодо заготовки, відрахованого в тому ж напрямку:

$$j = \frac{P_y}{y}, \text{ Н/мм}, \quad (8.57)$$

де  $j$  – жорсткість системи, Н/мм;

$P_y$  – радіальна складова сили різання, Н;  
 $y$  – зміщення ріжучої кромки інструмента, мм.

Величина, протилежна жорсткості, називається **податливістю пружної системи**:

$$W = \frac{1000}{j}, \text{ мкм/Н.} \quad (8.58)$$

Крім жорсткості системи розрізняють жорсткість верстата, жорсткість заготовки, жорсткість пристосування, жорсткість інструмента. При визначенні жорсткості верстата – заготовку, інструмент та пристосування розглядають абсолютно жорсткими.

Крім жорсткості верстата в цілому, можна розглядати і жорсткість окремих його вузлів, наприклад супорту  $j_{\text{суп}}$ , передньої  $j_{\text{п.б}}$  і задньої  $j_{\text{з.б}}$  бабки.

Визначаючи жорсткість, ми задаємося напрямом переміщення, але не обмежуємося розглядом впливу лише однієї складової сили різання  $P_y$ . Вводячи в розрахунок  $P_y$ , у той самий час враховуємо одночасну дію двох інших складових  $P_z$  і  $P_x$ . Переміщення  $y$  в напрямку  $P_y$  відраховується за дії всіх трьох складових сили різання.

Розглядаючи жорсткість супорта, можна помітити, що під дією сили  $P_z$  вершина різця переміщається від токаря і одночасно вниз (рис. 8.23).

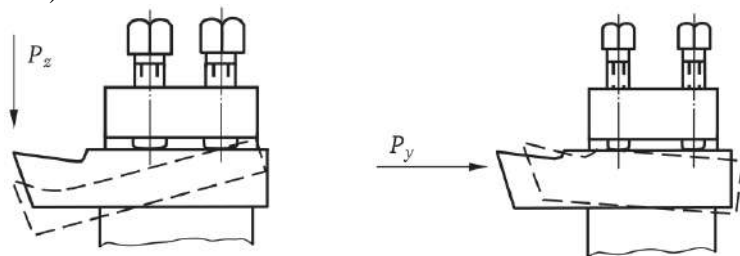


Рисунок 8.23 – Зміни положення різця під дією сили різання

При докладанні сили  $P_y$  вершина різця відходить від заготовки, що обробляється. Вплив сили  $P_y$  на точність зазвичай переважає. Дійсно, якщо при переміщенні різця від сили  $P_z$  на величину  $z$  діаметр оброблюваної деталі збільшується  $\Delta z$ , порівняно малу по відношенню

до  $z$  (рис. 8.24, а), то переміщення різця від сили  $P_y$  на величину  $y$  викликає на цю ж величину збільшення діаметра оброблюваної деталі (рис. 8.24, б). Однак сумарне переміщення вершини різця при одночасній дії сил  $P_y$  і  $P_z$  очевидно вийде меншим, ніж при дії тільки сили  $P_y$ . Тому жорсткість супорта при одночасній дії  $P_y$  та  $P_z$  значно вища, ніж при дії тільки сили  $P_y$ . На величину сумарного переміщення різця впливає також сила  $P_x$ .

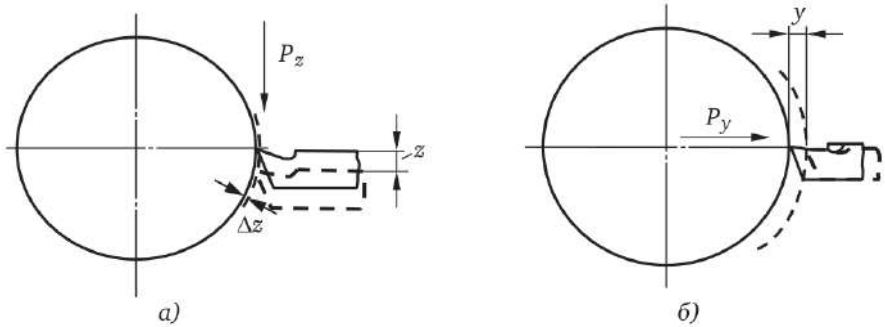


Рисунок 8.24 – Схема переміщень різця відносно деталі під дією сили різання

Існує **два методи визначення жорсткості верстатів:**

- статичний;
- виробничий (динамічний).

При **статичному методі** визначення жорсткості металорізальних верстатів виявляється жорсткість при непрацюючому верстаті. За допомогою спеціального пристосування верстат навантажують силами, які відповідають тим, що виникають при роботі верстата, і заміряють деформації. За отриманими даними визначають значення жорсткості.

**Цей метод визначення жорсткості має низку недоліків:**

- щоб ним скористатися, необхідно знати заздалегідь співвідношення сил різання  $P_y, P_z, P_x$ ;
- необхідно мати спеціальні пристосування, що дозволяють здійснити навантаження, що відповідає експлуатаційному;
- не враховуються динамічні чинники, які проявляються при працюючому верстаті.

**Однак цей метод має й великі переваги:**

- визначення жорсткості можна проводити в процесі виготовлення верстата;
- можна визначити жорсткість окремих вузлів і, таким чином, зрозуміти, які з них слабкі.

Сутність **виробничого методу** полягає в наступному. Беруть дуже жорстку заготовку, таку, щоб її деформаціями можна було знехтувати порівняно з деталями верстата (рис. 8.25), і обробляють за однакових умов дві короткі ділянки заготовки, одну з глибиною різання  $t_1$ , іншу –  $t_2$ .

Внаслідок відмінності у значеннях віджимань на обробленій поверхні вийде уступ, який вимірюють. Віджимання в точці, що відповідає більшій глибині різання, дорівнює  $y_1 = P_{y1}/j_c$ , а в точці, що відповідає меншій глибині різання,  $y_2 = P_{y2}/j_c$ .

Жорсткість системи вважаємо однаковою в обох випадках і рівною жорсткості верстата внаслідок великої жорсткості заготовки.

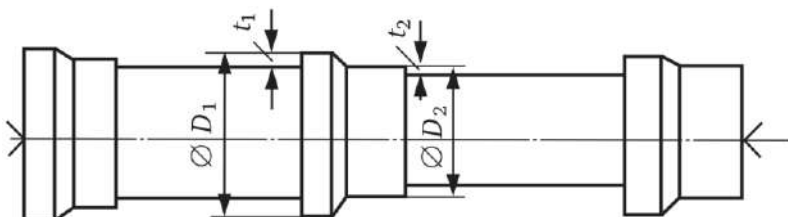


Рисунок 8.25 – Заготовка для визначення жорсткості верстата виробничим методом

Висота уступу  $\Delta_{\text{дет}}$  дорівнює величині віджиму  $y$ :

$$\Delta_{\text{дет}} = y = (y_1 - y_2) = \frac{1}{j_c} (P_{y_1} - P_{y_2}). \quad (8.59)$$

З теорії різання матеріалів відомо, що:

$$P_z = C_p t S^{0,75}. \quad (8.60)$$

Вводячи співвідношення  $\lambda = P_y/P_z$  і використовуючи рівняння (8.60), отримаємо:

$$P_y = \lambda C_p t S^{0,75}. \quad (8.61)$$

Підставляючи рівняння (8.61) в рівняння (8.59), отримаємо:

$$\begin{aligned}\Delta_{\text{дет}} &= \frac{1}{j_c} (\lambda C_P t_1 S^{0,75} - \lambda C_P t_2 S^{0,75}) = \\ &= \frac{1}{j_c} \lambda C_P t_1 S^{0,75} (t_1 - t_2) = \frac{\lambda C_P}{j_0} S^{0,75} \Delta_{\text{заг}},\end{aligned}\tag{8.62}$$

де  $\Delta_{\text{заг}}$  дорівнює подвоєній висоті сходинок на заготовці.

Звідси значення жорсткості верстата:

$$j_c = \lambda C_P t_1 S^{0,75} \frac{\Delta_{\text{заг}}}{\Delta_{\text{дет}}}.\tag{8.63}$$

Відношення  $D_{\text{заг}}/D_{\text{дет}}$ , показує, у скільки разів у результаті обробки зменшилася неточність заготовки, називається уточненням  $\varepsilon$ . За незмінних режимів різання і геометрії інструменту, а також матеріалу заготовки і різця, значення уточнення повністю характеризує жорсткість верстата.

Визначивши тим чи іншим способом жорсткості окремих ланок системи  $j_1, j_2, j_3, \dots$ , можна знайти сумарну жорсткість  $j$  всієї системи ВПЗ. Очевидно, що деформації цих ланок  $y_1, y_2, y_3, \dots$ , приведені до точки і напрямку, прийнятим при визначенні деформації всієї системи, дадуть у сумі деформацію всієї системи  $y$ :

$$y = y_1 + y_2 + y_3 \dots.\tag{8.64}$$

Згідно з визначеннями жорсткості, маємо:

$$y = \frac{P_y}{j}; \quad y_1 = \frac{P_y}{j_1}; \quad y_2 = \frac{P_y}{j_2}; \quad y_3 = \frac{P_y}{j_3} \dots,\tag{8.65}$$

$$\frac{P_y}{j} = \frac{P_y}{j_1} + \frac{P_y}{j_2} + \frac{P_y}{j_3} \dots.\tag{8.66}$$

Скорочуючи останній вираз на  $P_y$ , отримаємо:

$$\frac{1}{j} = \frac{1}{j_1} + \frac{1}{j_2} + \frac{1}{j_3} \dots.\tag{8.67}$$

Таке підсумовування становить незручності. Відомо, що  $1000/j = W$ , мкм/Н. Тому можна записати:

$$W = W_1 + W_2 + W_3 \dots,\tag{8.68}$$

де  $W$  – податливість технологічної системи;

$W_1 \dots W_3$  – податливість окремих елементів системи.

## 8.6.9 Визначення сумарної похибки механічної обробки

Сумарна похибка механічної обробки  $\Delta$  є наслідком низки розглянутих раніше технологічних факторів, причому деякі з них можуть бути об'єднані в однотипні групи. Вона може бути визначена у загальному вигляді за формулою:

$$\Delta = \Delta_y + \Sigma\Delta_{ст} + \Delta_n + \Delta_{изн} + \epsilon_y + \Sigma\Delta T, \quad (8.69)$$

де  $\Delta_y$  – похибка відтискання в результаті нестабільності сили різання (жорсткість технологічної системи ВППЗ);

$\Sigma\Delta_{ст}$  – сума похибок верстата;

$\Delta_n$  – похибка налаштування верстата;

$\Delta_{изн}$  – похибка, обумовлена зносом інструменту;

$\epsilon_y$  – похибка установки деталі на верстаті або в пристрої;

$\Sigma\Delta T$  – алгебраїчна сума розмірних відхилень внаслідок температурних деформацій елементів технологічної системи.

Розглянутий метод визначення похибки називається розрахунковим методом. Існує також статистичний метод розрахунку похибки при механічній обробці.

## 8.7 Статистичні методи дослідження якості виробів

Для дослідження похибок, що виникають при виготовленні заготовок, обробці різанням, контролі, збиранні та інших видах обробки, застосовують методи математичної статистики.

Ці методи застосовуються саме для дослідження точності обробки в умовах виробництва великої кількості однакових деталей, на заздалегідь налаштованих верстатах, способом автоматичного отримання розмірів, або збирання великої кількості вузлів і виробів.

Усі похибки під час обробки поділяються на похибки систематичні та випадкові.

**Систематичні похибки** можуть бути постійними чи змінними. Якщо, наприклад, свердло повинно мати  $\varnothing 20$  мм, а має  $\varnothing 20,1$  мм, всі отвори будуть виготовлені з похибкою 0,1 мм. Ця похибка є систематичною, тому що виходить у всіх деталей і є постійною – 0,1 мм.

Внаслідок зносу діаметр свердла зменшується і діаметр отвору,

що обробляється, буде зменшуватися в міру зносу свердла. Ця похибка також є системною (у всіх деталей), але змінною, оскільки для кожної деталі вона різна.

Систематичними похибками є також похибки, що виникають внаслідок неточності верстата, інструменту, пристосування, деформації деталі, верстата та інструменту під час обробки від чинних сил або нагрівання тощо.

**Випадкові похибки** викликаються випадковими причинами чи дією багатьох чинників, вплив яких на процес обробки має випадковий характер. Наприклад, випадкові похибки виникають внаслідок неоднорідності та неоднакової твердості оброблюваного матеріалу, коливання величини припуску і т.п. Внаслідок випадкових похибок розміри деталей у партії виходять різними, виникає розсіювання розмірів деталей у партії.

Випадкові похибки розсіюють розміри деталей у партії за певною закономірністю. Для виявлення цієї закономірності користуються методами математичної статистики.

Вимірявши всі деталі партії, розбивають їх у групи з однаковими розмірами (у межах певного інтервалу). Результати зображують графічно (рис. 8.26). По осі ординат відкладають число деталей з однаковими розмірами, а по осі абсцис їхні розміри.

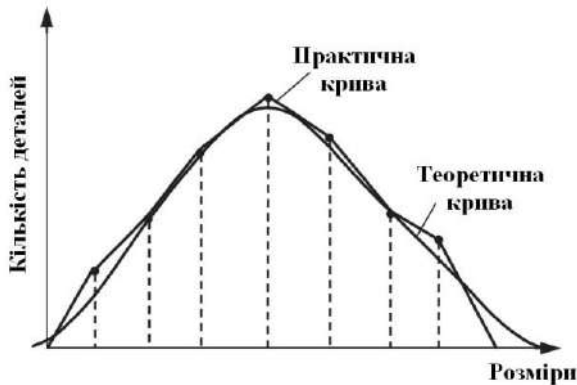


Рисунок 8.26 – Криві розподілу деталей у партії

Замість абсолютної кількості деталей у кожному інтервалі по осі ординат іноді відкладають відношення цього числа до загального числа деталей у партії. Це відношення називається відносною

частотою або частістю. Після з'єднання точок одержують практичну криву розподілу (ламана лінія). При великій кількості вимірів ця ламана лінія наближається до теоретичної кривої (плавна крива).

Порівнянням практичної кривої розподілу розмірів з теоретичними кривими можна виявити закономірність розподілу розмірів деталей у партії. В абсолютній більшості випадків розподіл розмірів деталей у партії близький до закону нормального розподілу.

Різниця між найбільшим і найменшим розмірами, отриманими при вимірі, визначає величину розсіювання розмірів деталей у партії. Величина розсіювання має бути не більше допуску на обробку. Якщо вона виходить за межі допуску, тобто похибки розмірів деталей більше допустимих, то виходить брак.

Систематичні постійні похибки форму кривої розсіювання не змінюють, але положення кривої зміщується у бік осі абсцис. Так, якщо побудувати криву розсіювання розмірів, отриманих при обробці партії деталей при одному налаштуванні верстата, і криву розсіювання розмірів, отриманих при обробці іншої партії деталей на тому ж верстаті, але вже при другому налаштуванні верстата, то отримаємо дві однакові криві, зміщені одна щодо іншої по осі абсцис на величину  $\Delta L$  – похибка налаштування верстата (рис. 8.28).

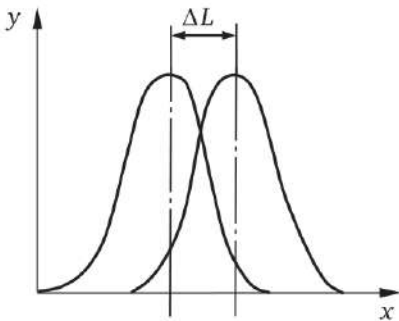


Рисунок 8.27 – Вплив систематичних постійних похибок на характер їхнього розподілу

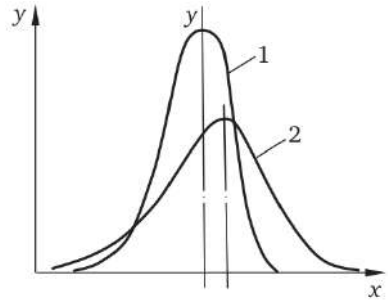


Рисунок 8.28 – Вплив систематичних змінних похибок на форму кривих розподілу

Якщо побудувати криву розподілу розмірів, отриманих при обробці однієї частини великої партії деталей, коли знос інструменту ще малий (крива 1, рис. 8.28), і другу криву розсіювання розмірів для

всієї партії деталей (крива 2), включаючи першу її частину, оброблених при постійному налаштуванні, то побачимо, що форми кривих різні. Це пояснюється тим, що поля розсіювання розмірів вийшли різними внаслідок різної величини розмірного зносу ріжучого інструменту, тобто систематичні змінні похибки впливають на форму кривої і крива може вийде з плоскою вершиною (рис. 8.29).

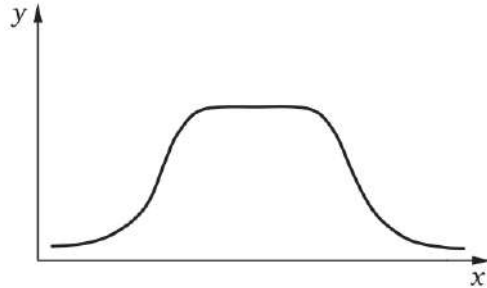


Рисунок 8.29 – Характер впливу систематичних змінних похибок на форму кривої розсіювання

Як зазначалося вище, розподіл розмірів деталей у партії при механічній обробці близький до закону нормального розподілу, який графічно зображується кривою Гауса:

$$y = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}, \tag{8.70}$$

де  $\pi = 3,14$ ;

$y$  – частота появи похибки;

$e$  – основа натуральних логарифмів;

$x$  – відхилення дійсних розмірів від середніх,

$$x = L_i - L_{cp}, \tag{8.71}$$

де  $L_i$  – дійсні розміри;

$L_{cp}$  – середній розмір деталей у партії;

$\sigma$  – середньоквадратичне відхилення розмірів деталей у партії.

Положення кривої розподілу деталей у партії визначається двома величинами:  $L_{cp}$  – середній розмір деталей у партії, та  $\sigma$  – середньоквадратичне відхилення розмірів:

$$L_{\text{cp}} = \frac{L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + \dots + L_n}{n} = \frac{\sum_i^n L_i}{n}, \quad (8.72)$$

$$L_{\text{cp}} = \frac{m_1 L_1 + m_2 L_2 + \dots + m_K L_K}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=K} L_i m_i, \quad (8.73)$$

або

де  $m_1, m_2, \dots, m_K$  – число деталей в кожній групі;

$L_1, L_2, \dots, L_K$  – розміри окремих груп деталей, що відповідають кожному інтервалу;

$n$  – загальна кількість виміряних деталей у партії;

$K$  – число груп, що відповідає числу інтервалів.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_i^n (L_i - L_{\text{cp}})^2}{n}}, \quad (8.74)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{m_1 x_1^2 + m_2 x_2^2 + \dots + m_K x_K^2}{n}} = \frac{\sum_{i=1}^{i=K} x_i^2 m_i}{n}, \quad (8.75)$$

або

де  $x_1 = L_1 - L_{\text{cp}}$ ;

$x_2 = L_2 - L_{\text{cp}}, \dots, x_K = L_K - L_{\text{cp}}$  – відхилення дійсних розмірів від середнього арифметичного в кожній групі деталей.

Чим більше  $\sigma$ , тим більше поле розсіювання, чим менше  $\sigma$  – тим менше розсіювання і вища точність (рис. 8.30). Якщо прийняти поле розсіювання  $6\sigma$ , то межах кривої буде 99,73 % деталей.

Користуючись кривою розподілу, можна знайти ймовірну кількість придатних деталей, розмір яких встановлено певний допуск.

Припустимо, що поле допуску  $T$  встановлено розмірами  $x_1$  та  $x_2$  від центру групування  $a$ . Число деталей, що входять до поля допуску, визначається відношенням суми площ  $F_1 + F_2$  до загальної площі  $F$ , окресленої кривою (рис. 8.31).

Зі зменшенням поля допуску відношення площ та ймовірна кількість придатних деталей зменшується. При значному розширенні поля допуску відношення площ наближається до одиниці і всі деталі стають практично придатними.

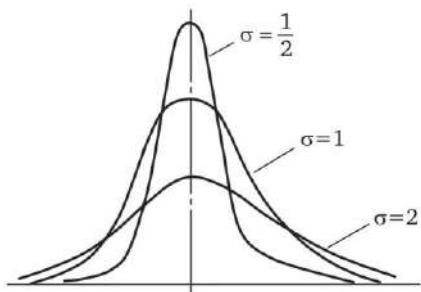


Рисунок 8.30 – Форма кривої розподілу за різних значень середньо-квадратичного відхилення розмірів деталей у партії

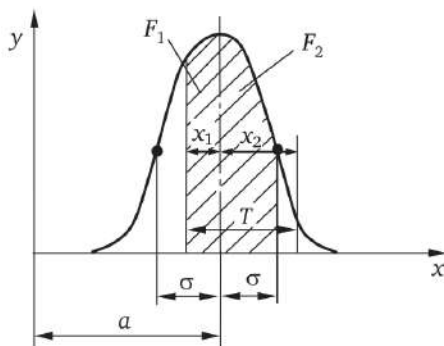


Рисунок 8.31 – Взаємозв'язок поля допуску на розмір із площею, окресленою кривою розподілу розмірів

Математично, площа однієї гілки кривої описується рівнянням:

$$F = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx = \Phi(Z). \quad (8.76)$$

Значення інтеграла наведено у таблицях, що наводяться у довідниках. При  $Z = \pm 3$  функція, тобто площа кривої розподілу розмірів охоплює 99,73 % деталей і тільки 0,23 % деталей йдуть у брак.

Поле допуску має дорівнювати (рис. 8.32):

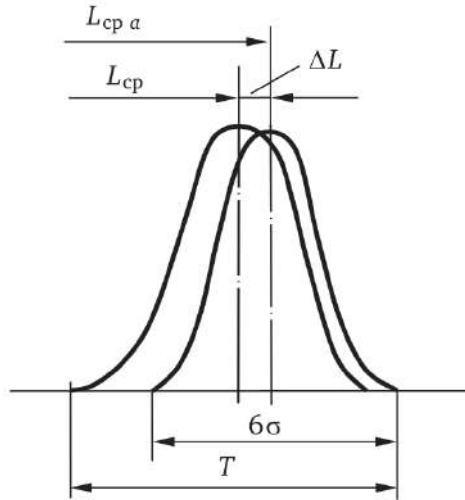
$$T = \geq 6\sigma + \Delta L, \quad (8.77)$$

де  $\Delta L$  – систематична похибка обробки.

Крім закону Гауса існують інші закони розподілу. Якщо на виконуваний розмір впливає систематична рівномірно зростаюча похибка (похибка, обумовлена зносом різця, що протікає за законом прямої), то розподіл відбувається за законом рівної ймовірності.

Похибка  $\Delta_{\text{изн}}$  збільшується залежно від кількості оброблених деталей, а крива розподілу має вигляд прямокутника (рис. 8.33, а і б). Якщо на виконуваний розмір впливає похибка, що закономірно змінюється, зростає спочатку уповільнено, а потім прискорено, то

розподіл відбувається за законом трикутника (закон Сімпсона) – рис. 8.34, а і б.



$L_{cp a}$  – середньоарифметичний розмір деталей у партії;  
 $L_{cp}$  – середній розмір, що проходить через середину поля допуску

Рисунок 8.32 – Зіставлення поля допуску на розмір деталі та поля розсіювання розмірів

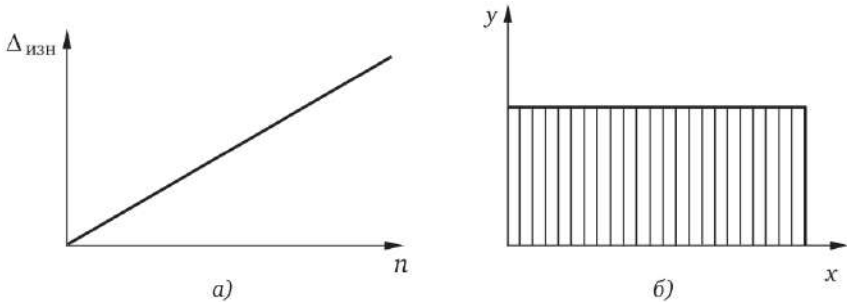


Рисунок 8.33 – Зміна розмірів за законом рівної ймовірності

Такий розподіл має місце при спільній дії розмірного зносу різального інструменту з сильно вираженою фазою початкового зносу і збільшенням сили різання в кінці стійкості інструменту в результаті

його затуплення. Існують інші закони, які доцільно застосовувати для дослідження тих чи інших складових сумарної похибки обробки.

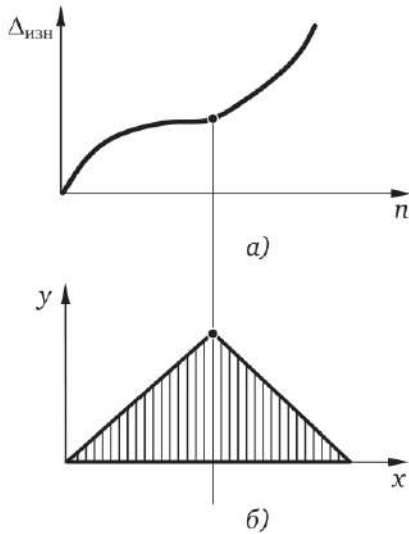


Рисунок 8.34 – Розподіл похибок за законом Сімпсона

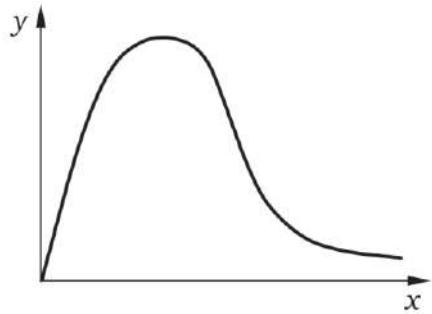


Рисунок 8.35 – Крива похибок форми виробів (закон Релея)

Статичні методи дослідження можуть застосовуватися також для дослідження похибок взаємного розташування поверхонь і похибок форми поверхонь оброблених деталей, похибок вимірювання маси виробів та ін. Ці похибки є істотно позитивними величинами – вони змінюються від нуля до певного значення.

Крива таких похибок має вигляд, представлений на рис. 8.35. Вона має несиметричну форму, оскільки деталей з негативним ексцентриситетом немає, більшість деталей має середній ексцентриситет, деталей з великим ексцентриситетом мало. Цей закон розподілу називається законом Релея, з якого випливає розподіл значень непаралельності та неперпендикулярності двох поверхонь, неперпендикулярності осі деталі до її торцевої поверхні та ін.

Статистичний метод дослідження з використанням кривих розподілу універсальний, оскільки може застосовуватися для вивчення різних методів обробки, збирання, отримання заготовок та інших. Його можна застосовувати і для перевірки результатів,

отриманих аналітичними розрахунками. До недоліків цього методу відноситься те, що він не розкриває сутності фізичних явищ і факторів, що впливають на точність обробки, не виявляє конкретних можливостей підвищення точності обробки та збирання.

Метод фіксує результати вже виконаної роботи. Якщо в умовах обробки відбулися зміни, то отримане значення  $\sigma$  може характеризувати точність обробки. У цьому випадку значення  $\sigma$  треба знову визначати.

Метод кривих розподілу враховує послідовності виготовлення деталей, тобто не досліджує технологічний процес у часі. Для дослідження технологічного процесу у часі використовують метод точкових та точнісних діаграм. У цьому методі дослідження графічно зображується зміна розмірів оброблюваних деталей партії у послідовності їх обробки. По осі абсцис відкладають номери деталей, що послідовно обробляються, а по осі ординат – розміри, отримані в результаті обробки (рис. 8.36).

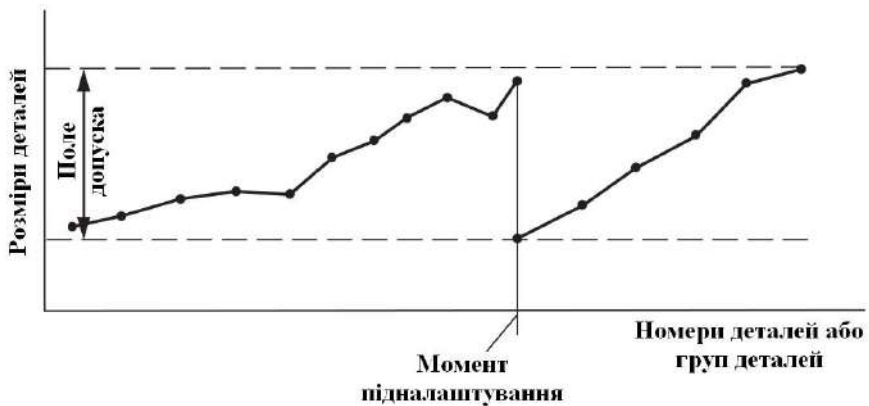


Рисунок 8.36 – Тенденція зміни виконуваних розмірів з плином часу

За цією діаграмою простежується тенденція зміни розмірів, що виконуються з плином часу, спостерігається періодичність зміни розмірів у результаті зносу ріжучого інструменту та підналаштувань верстата. Довжину точкової діаграми можна скоротити, якщо по горизонтальній осі відкладати номери груп заготовок, а по

вертикальній осі – середні арифметичні значення розмірів заготовки.

Точкові діаграми широко використовуються у зв'язку із застосуванням у промисловості статистичного методу контролю продукції. Суть цього контролю в наступному. В процесі виготовлення деталей періодично проводиться вимірювання групи деталей (до групи включають до 10 деталей) і середньоарифметичний розмір наноситься на спеціальну контрольну діаграму (рис. 8.37).

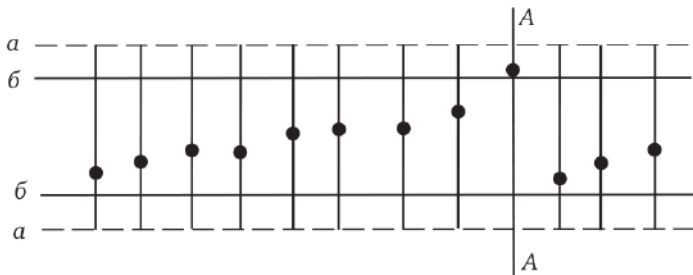


Рисунок 8.37 – Приклад побудови точкової діаграми

На цій діаграмі передбачені паралельні прямі ( $a$ ), що визначають поле допуску, та прямі ( $б$ ), що визначають поле розсіювання середніх групових значень розміру та звані **контрольними прямими**. Коли процес обробки відбувається нормально, точки не виходять за межі контрольних прямих.

Коли спостерігається вихід за межі ліній  $б$  – потрібне підналаштування верстата. При статистичному контролі значно скорочується кількість контролерів, оскільки вибірковій перевірці піддається лише 5... 10 % продукції.

Більш повну інформацію про перебіг технологічного процесу дають точнісні діаграми. У цьому випадку для кожної групи послідовно оброблених деталей знаходять середнє її арифметичне  $X_{cp}$  і середньоквадратичне відхилення  $\sigma$ , а також граничні верхні  $\epsilon_b$  і нижнє  $\epsilon_n$  відхилення від середнього арифметичного.

У точнісній діаграмі по осі абсцис відкладаються номери послідовно взятих груп деталей, а по осі ординат – обчислені значення  $X_{cp}$  і  $\epsilon_b$ ,  $\epsilon_n$  (рис. 8.38). Поле розсіювання  $W$  розмірів в межах однієї групи деталей значно менше поля розсіювання  $W_1$  всієї сукупності

деталей. Якщо в межах однієї групи, розсіювання підпорядковується закону нормального розподілу, то для всієї сукупності деталей воно може характеризуватися плоско-вершинною кривою.

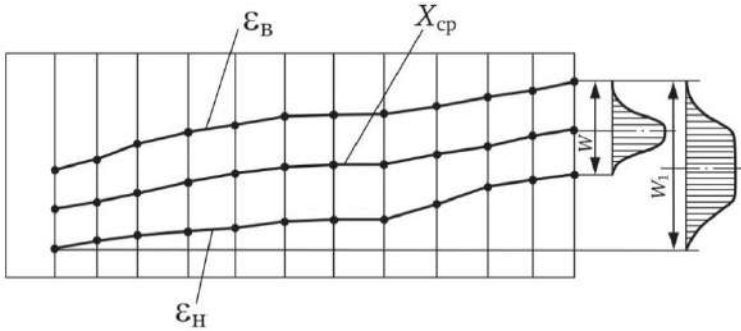


Рисунок 8.38 – Приклад побудови точностної діаграми

Недоліком цього методу дослідження є те, що за наявності декількох систематичних похибок, що закономірно змінюються, вони не розділяються, а їхній сумарний вплив оцінюється комплексно. Крім того, для дослідження необхідна велика кількість спостережень.

Точнісні діаграми дозволяють оцінити технологічні процеси в часі їх протікання за стійкістю та стабільністю. Стійкість характеризує у часі сталість величини середньоарифметичного відхилення  $X_{cp}$ , а стабільність – сталість поля розсіювання  $W$ .

### Питання для самоперевірки

1. Що таке розмірний ланцюг?
2. Назвіть два види технологічних розмірних ланцюгів.
3. Що визначає ланка розмірного ланцюга?
4. Яку ланку називають вихідною?
5. Яка ланка називається замикаючою?
6. Збільшення якої ланки веде до зростання вихідної або замикаючої ланки?
7. Що треба враховувати при визначенні похибки замикаючої ланки розмірного ланцюга?

8. Чому дорівнює поле розсіювання замикаючої ланки розмірного ланцюга?
9. Назвіть методи досягнення точності замикаючої ланки розмірного ланцюга.
10. За дотримання яких умов можливе використання методу повної взаємозамінності?
11. В чому полягає сутність методу часткової взаємозамінності?
12. Поясніть сутність методу групової взаємозамінності.
13. Як забезпечується взаємозамінність деталей у межах групи?
14. В чому полягає сутність методу пригонки?
15. Як розрахувати «величину компенсації» розмірного ланцюга?
16. Поясніть сутність методу регулювання.
17. Для чого потрібні припуски на обробку деталей машин?
18. Що називається припуском на обробку?
19. Які є види припусків на обробку?
20. Що таке операційний припуск?
21. Що таке загальний припуск?
22. Як визначити номінальний (розрахунковий) операційний припуск?
23. Які фактори впливають на величину припуску?
24. Які є методи визначення припусків на обробку?
25. Що таке довжинний операційний розмір?
26. Назвіть основні причини виникнення похибок при механічній обробці.

## **ТЕМА 9. ВИБІР ТА РОЗРАХУНОК РЕЖИМІВ РІЗАННЯ. ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТОЧНОСТІ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ**

Обробка металів різанням є технологічною операцією (або комплексом операцій) над заготовкою з метою отримання деталі необхідних конфігурації, розмірів і параметрів, за рахунок взаємодії ріжучого інструменту із заготовкою, при якій відділяється шар матеріалу у вигляді стружки, або металевого пилу. Обробка різанням виконується на заготовках із чорних і кольорових металів, що мають певні фізико-механічні властивості. Для обробки заготовки застосовують різні види різання. Вибір конкретного виду залежить від властивостей заготовки, конфігурації майбутньої деталі і типу операції, яку необхідно виконати.

### **9.1 Загальні вимоги, яким має задовольняти режим різання**

Вибір та розрахунок режиму різання для кожної операції (глибини різання, подачі, швидкості різання та числа проходів) для конкретних умов обробки, заданих вимог до точності та шорсткості обробленої поверхні деталі є дуже важливою складовою роботи з проектування технологічного процесу.

Оптимальний режим різання повинен мати найвигіднішу комбінацію цих величин. Він повинен забезпечувати:

- найменшу собівартість обробки деталі;
- найбільшу продуктивність на даній операції;
- якість обробленої поверхні відповідно до вимог креслення;
- точність розмірів оброблених поверхонь відповідно до вимог креслення деталі.

При розгляді впливу жорсткості технологічної системи на точність обробки було встановлено, що кількість проходів та величина подачі помітно впливають на величину похибки розміру та форми деталі. Швидкість різання, у разі, наприклад, обробки неврівноважених деталей, також може істотно впливати на точність.

Залежно від умов виробництва, режими різання доводиться розраховувати окремо так, щоб задовольняти одній з цих вимог, якщо

вона домінує над іншими або декількома. Слід зазначити, що режим різання завжди визначається з урахуванням стійкості ріжучого інструменту.

## **9.2 Призначення періоду стійкості ріжучого інструменту**

*Період стійкості інструментів* – це час різання новим або відновленим різальним інструментом (лезом) від початку різання до відмови. Значення періоду стійкості лезового інструмента залежать від ряду факторів: умов виробництва, типу обладнання, конструкції інструменту, інструментального матеріалу.

Чим вища серійність виробництва, тим менший період стійкості інструменту слід приймати; чим вища вартість станкомінути використовуваного обладнання, тим менший період стійкості інструменту слід приймати. Чим складніший і дорожчий інструмент у виготовленні та налагодженні, тим більший період стійкості інструменту слід приймати; чим більший час, що витрачається на зміну або відновлення інструменту, тим більший період стійкості слід приймати; чим вища вартість матеріалу інструменту, тим більший період стійкості слід приймати.

Період стійкості абразивного інструменту не є обмежуючим фактором, і тому режими абразивного різання приймаються виходячи з вимог щодо точності та якості обробленої поверхні.

Середні значення періодів стійкості лезових інструментів представлені у довідкових таблицях в спеціальній літературі.

В якості прикладу можна відзначити що період стійкості різця при точінні матеріалів різних типів знаходиться в межах від 30 до 90 хв.; а стійкість свердла залежно від його діаметра та при просвердлюванні різних типів сталі становить від 5 до 170 хв.; а стійкість фрез знаходиться в межах від 40 до 200 хв.

## **9.3 Теоретичні положення щодо призначення режимів різання**

Існує кілька методів призначення режиму різання: табличний, аналітичний, графоаналітичний, машинний з використанням комп'ютерів та спеціальних програм розрахунку.

**При табличному методі** зазвичай використовують нормативи режимів різання. Для вибору режиму різання по табличному методу необхідно знати:

- фізико–механічні характеристики оброблюваного матеріалу;
- припуск на обробку, матеріал та геометрію різальної частини інструменту;
- розміри різального інструмента.

Порядок вибору режиму обробки є наступним.

1. Виходячи із заданого припуску на обробку, призначають глибину різання. Якщо припуск великий, призначають декілька проходів та відповідні глибини різання для кожного проходу.

2. Вибирають технологічно допустиму подачу за такими обмеженнями:

$S_{\text{шер}}$  – за параметрами шорсткості оброблюваної поверхні деталі, які вимагає креслення;

$S_{\text{жест}}$  – за параметрами жорсткості оброблюваної деталі, які вимагає креслення, що особливо важливо при обробці деталей типу «вал» з відношенням довжини валу до діаметра більше 10;

$S_{\text{пр.р}}$  – за міцністю різального інструмента.

Найменша з трьох подач  $S_{\text{шер}}$ ,  $S_{\text{жест}}$ ,  $S_{\text{пр.р}}$  є технологічно допустимою  $S_{\text{м}}$ . Дане значення подачі уточнюють за параметрами верстату, і отже остаточно визначається значення подачі  $S$ .

3. За таблицями нормативів, залежно від знайденого значення  $S$  та призначеної глибини різання  $t$ , вибирають швидкість різання  $v$  та частоту обертання заготовки або інструменту  $n$ .

4. За знайденими значеннями  $n$  і  $S$  знаходять ефективну потужність, що витрачається на різання  $P_{\text{эф}}$ , за якою визначають потужність верстата:

$$P_{\text{м}} = P_{\text{эф}} / \eta_{\text{ст}}, \quad (9.1)$$

де  $P_{\text{м}}$  – потужність електродвигуна верстата;

$\eta_{\text{ст}}$  – ККД механізму головного приводу верстата (наводиться в паспорті металорізального верстата); орієнтовно можна використовувати  $\eta_{\text{ст}} \approx 0,7 \dots 0,9$ .

Табличний метод рекомендується використовувати у виробничих умовах за відсутності обчислювальної техніки, при проектуванні нових технологічних процесів, якщо до готової

продукції не пред'являються високі експлуатаційні вимоги.

**При аналітичному методі** послідовність вибору режиму різання аналогічна табличному, проте необхідно відзначити наступні особливості.

1. Розраховують подачу  $S_{\text{шер}}$ , що забезпечує задану шорсткість обробленої деталі:

$$S_{\text{шер}} \leq \frac{k_0 Ra^{k_1} v^{k_2} r^{k_3} HB^{k_4}}{t^{k_5} \varphi^{k_6} \varphi_1^{k_7}}, \quad (9.2)$$

де  $k_0, k_1, \dots, k_7$  – коефіцієнти, що характеризують оброблюваний та інструментальний матеріали (наведені в довідниках для різних марок оброблюваних та інструментальних матеріалів);

$Ra$  – середньоарифметичне відхилення профілю шорсткості;

$v$  – швидкість різання;

$t$  – глибина різання;

$\varphi$  і  $\varphi_1$  – головний та допоміжний кути в плані, відповідно;

$r$  – радіус при вершині різця в плані;

$HB$  – твердість оброблюваного матеріалу (твердість по Брінеллю позначається « $HB$ » (Hardness Brinell) при застосуванні сталеві кульки як індентора).

2. Розраховують подачу, що допускається міцністю ріжучого інструменту:

$$S_{\text{пр.р}} \leq x_{P_z} \sqrt{\frac{B^2 H [\sigma_{\text{и}}]}{6 c_{P_z} l t^{y_{P_z}}}}, \quad (9.3)$$

де  $l$  – виліт різця (може бути розрахований як  $l = (1 \dots 1,5) \cdot H$ );

$B$  і  $H$  – ширина і висота державки різця відповідно;

$[\sigma_{\text{и}}]$  – допустима напруга на вигин матеріалу державки різця;

$c_{P_z}$ ,  $y_{P_z}$  – величини, що залежать від властивостей оброблюваного матеріалу ( $\sigma_{\text{в}}$ ,  $HB$ ), виду оброблюваного матеріалу (сталь, чавун, бронза тощо), геометрії ріжучого інструменту ( $\gamma$ ,  $\varphi$  тощо), виду охолодження.

Стандартні різці мають такі розміри ( $B \times H$ ) державки, мм:

з прямокутним перетином:

10x16; 12x20; 16x25; 20x30; 25x30; 25x40; 30x45; 40x60;

з квадратним перетином:

6x6; 10x10; 12x12; 16x16; 20x20; 25x25; 30x30; 40x40.

3. Розраховують подачу, що допускається жорсткістю заготовки:

$$S_{\text{жест}} \leq x_{p_z} \sqrt{\frac{\varepsilon J E f'}{1,1 c_{p_z} l^3 t^{y_{p_z}}}}, \quad (9.4)$$

де  $f'$  – допустимий прогин заготовки при обробці, мм;

$E$  – модуль пружності матеріалу оброблюваної заготовки;

$J$  – момент інерції поперечного перерізу заготовки (для круглих суцільних деталей:

$$J = 0,05d^4, \quad (9.5)$$

де  $d$  – діаметр заготовки;

$l$  – відстань між точками закріплення заготовки або виліт деталі при кріпленні її тільки патроні;

$\varepsilon$  – коефіцієнт жорсткості, що залежить від способу закріплення заготовки на верстаті.

При обробці на токарних верстатах зустрічається три випадки закріплення заготовки (рис. 9.1), яким відповідають різні значення  $\varepsilon$ .

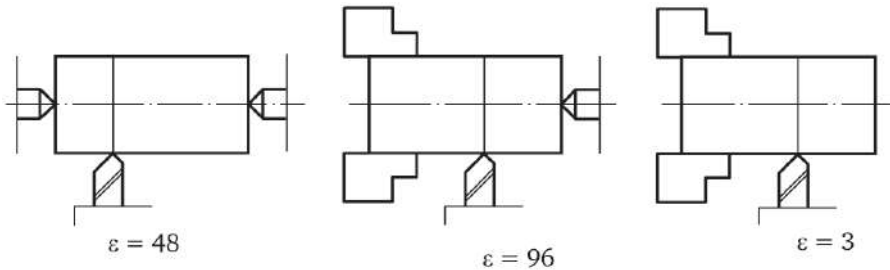


Рисунок 9.1 – Схеми закріплення заготовки

Допустима величина прогину може бути наступною: при чорновому точенні  $f' = 0,2 \dots 0,4$  мм; при полувисловому точенні  $f' = 0,1$  мм; при чистовій обробці  $f' = 0,2TD$ , де  $TD$  – допуск на розмір поверхні, що обробляється.

4. Швидкість різання визначається за формулами, що наводяться

в нормативах режимів різання. Так, наприклад, під час точіння деталей із теплостійких, корозійностійких і жароміцних сталей і сплавів різцями з пластинами зі сплавів ВК6М, ВК8, ВК8М швидкість різання, м/хв:

$$v = \frac{c'_v}{T^{0,25} S^{0,15} t^{0,15}} \quad \text{при подачі на оборот } S > 0,2 \text{ мм} \quad (9.6)$$

$$v = \frac{c''_v}{T^{0,25} S^{0,15} t^{0,15}} \quad \text{при подачі на оборот } S \leq 0,2 \text{ мм} \quad (9.7)$$

де  $T$ -період стійкості ріжучого інструменту в хв;  
 $c'_v, c''_v$  – показники ступенів, що визначаються для конкретних умов різання.

Метод отримання вищевказаних емпіричних рівнянь Тейлора є однофакторним почерговим експериментом, який не дозволяє врахувати взаємовплив аналізованих змінних параметрів один на одного. Ступінні коефіцієнти в рівняннях Тейлора – не константи, а змінні параметри, що функціонально залежать від умов обробки (режиму різання, геометрії інструменту, діаметра обробки, марки використовуваної охолоджуючої рідини).

При різних поєднаннях подач, глибини та швидкості різання зміна значень степеневих коефіцієнтів у рівняннях Тейлора досягає в деяких випадках більше 5 разів. Отже, достовірність зазначених вище емпіричних рівнянь невелика при реальному діапазоні зміни технологічних умов обробки. Крім того, вибір періоду стійкості інструменту в рівняннях Тейлора слабо аргументований техніко-економічними міркуваннями.

Отримання зазначених вище емпіричних рівнянь довготривале і трудомістке, пов'язане з непродуктивною витратою оброблюваних та інструментальних матеріалів, нераціональним використанням виробничих площ, металорізального обладнання та трудових ресурсів, що стримує терміни освоєння нової продукції.

5. При аналітичному способі розрахунку режиму обробки, вибір верстата проводиться за потужністю, яка витрачається на процес різання, з подальшою перевіркою міцності механізму поздовжньої подачі. Даний метод розрахунку режиму різання може бути

використаний, якщо немає обмежень у виборі моделі верстата та його характеристик, а самі аналітичні залежності щодо визначення подачі та швидкості різання мають достатню точність розрахунку. На практиці отримано велику кількість таких залежностей, проте всі вони мають індивідуальний характер і справедливі тільки для конкретних поєднань оброблюваних та інструментальних матеріалів.

На підставі вищевикладеного можна зробити такий висновок: нормативи режимів різання повинні бути науково обґрунтовані, базуватися на аналізі фізико-механічних та теплофізичних явищ, що супроводжують процес різання, враховувати взаємовплив змінних технологічних факторів на цей процес, забезпечувати оптимізацію процесу різання.

При *графоаналітичному методі* використовується наступний порядок розрахунку режиму різання.

1. Виходячи з припуску на обробку, намічають кількість проходів і глибину різання.

2. Вибирають марку інструментального матеріалу, розміри різця та його геометрію.

3. Розрахунковим шляхом за формулами (9.2)÷(9.4) визначаються лімітуючі подачі, і найменшу з них приймають за  $S_T$  (технологічну).

4. Накреслюють графік «лінія верстата – лінія різця» (рис. 9.2), де по осях абсцис і ординат відкладають відповідно частоту обертання деталі  $n$  і подачу  $S$ .

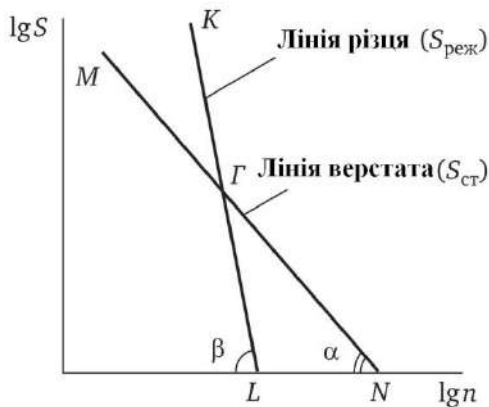


Рисунок 9.2 – Графік «лінія верстата – лінія різця»

Значення подач отримують шляхом розв'язання таких рівнянь:

$$S_{\text{ст}} = \frac{A'}{1} \cdot n^{x_{pz}} \quad (9.8)$$

$$S_{\text{реж}} = \frac{B'}{1} \cdot n^p \quad (9.9)$$

$$A' = f(P_{\text{дв}}, \eta_{\text{ст}}, D, t, \dots) \quad (9.10)$$

$$B' = f(D, t, \dots) \quad (9.11)$$

де  $x_{pz}$ ,  $p$  – коефіцієнти, що визначаються експериментально;

$S_{\text{ст}}$  – подача за паспортом верстата;

$S_{\text{реж}}$  – подача режиму різання;

$P_{\text{дв}}$  – потужність двигуна верстата;

$D$  – максимальний діаметр заготовки, що обробляється на верстаті.

Режим різання, що відповідає точці перетину прямих  $MN$  і  $KL$ , забезпечує одночасне доцільне використання верстата та різця, тому вважається найбільш ефективним: на ділянці  $GL$  режими різання забезпечують повне використання різальної здатності різця, на ділянці  $GM$  – повне використання потужності верстата.

Подача, що відповідає точці  $L$ , називається ефективною і призначається з умови  $S_{\text{эф}} < S_{\text{т}}$ ; з цієї подачі визначається швидкість різання  $v$ . Якщо вийде, що  $S_{\text{эф}} > S_{\text{т}}$ , то для вибору режиму різання необхідно вибрати інший станок, що має меншу потужність двигуна, або інший інструмент, що має більш високу ріжучу здатність.

Графоаналітичний метод вибору режиму різання вимагає досить трудомістких обчислень для побудови «лінії верстата» і «лінії різця», тому його використання у виробничих умовах утруднено.

Сутність *машинного методу з використанням комп'ютерів та спеціальних програм розрахунку* полягає у використанні теоретичних залежностей щодо визначення параметрів процесу різання, режиму обробки, параметрів якості поверхневого шару та точності обробки та обчислення економічно обґрунтованого режиму обробки на комп'ютері.

У виробничих умовах іноді необхідно забезпечити, поряд із заданою точністю обробки, комплекс параметрів, що характеризує поверхневий шар (параметри шорсткості оброблюваної поверхні, величину і ступінь наклепу, величину і знак залишкових напруг), з метою забезпечення тих чи інших експлуатаційних показників.

У такому разі обсяг необхідних обчислень значно зростає, оскільки виникає необхідність використання великої кількості довідкових даних для врахування фізико-механічних характеристик оброблюваних матеріалів, значень коефіцієнтів теплопровідності інструментальних матеріалів за оптимальної температура різання, тож у цьому разі оптимальним рішенням залишається саме використання машинного методу для вибору режиму різання.

#### **9.4 Загальні положення щодо оптимізації режиму різання**

Оптимізація технологічних умов обробки деталей включає розв'язання різноманітних технологічних, економічних, конструкторських та організаційних завдань. Як критерії оптимізації зазвичай приймають:

- критерій мінімальної технологічної собівартості виконання операції;
- критерій максимальної продуктивності, що забезпечує найменші витрати часу на обробку;
- критерій точності обробки та параметрів якості поверхневого шару.

Режими різання, що забезпечують мінімальну собівартість, та режими, що відповідають максимальній продуктивності, різняться в основному швидкістю різання та стійкістю інструменту. Швидкість різання  $v_{м.п}$  за критерієм максимальної продуктивності більша, а стійкість інструменту менше, що забезпечує більшу продуктивність, але й вищі витрати на інструмент.

Швидкість різання  $v_3$ , що забезпечує мінімальну собівартість обробки, вище швидкості різання, що забезпечує мінімальний знос інструменту, або оптимальної швидкості  $v_0$  за критерієм точності обробки та параметрів якості поверхневого шару. У загальному випадку справедлива нерівність  $v_0 < v_3 < v_{м.п}$  (рис. 9.3)

$$v_0 = \frac{K^2 \lambda_g (cp)_g a_1 b_1^2 E^{0,2}}{4 \sin^{0,1} \alpha} \left( \frac{\theta_0}{P_{z \min}} \right)^2 (1+L)^2, \quad (9.12)$$

де  $K$  – коефіцієнт, що залежить від співвідношення швидкості різання і температуропровідності оброблюваного матеріалу;

$E = \rho_1/a_1$  – безрозмірний комплекс, що характеризує відношення радіуса округлення ріжучої кромки інструменту  $\rho_1$  і товщини зрізу  $a_1$ ;

$\theta_0$  – оптимальна температура в зоні різання, що забезпечує мінімум зносу ріжучого інструменту;

$P_{z \min}$  – сила різання при оптимальній температурі різання;

$$L = \sqrt{1 + \frac{2,65 \lambda_p \beta \varepsilon \left( \frac{a_1}{b_1} \right)^{0,3} P_{z \min}}{K^2 a_1 b_1 \lambda_g (cp)_g E^{0,25} \sin^{0,065} \alpha \theta_0}}. \quad (9.13)$$

Однак для умов гнучких автоматизованих виробництв іноді важливіше отримати менший зношення інструменту і похибка обробки при незначному збільшенні собівартості обробки на даній операції. Це дозволить уникнути введення додаткових операцій і зменшити загальну собівартість виготовлення деталі.

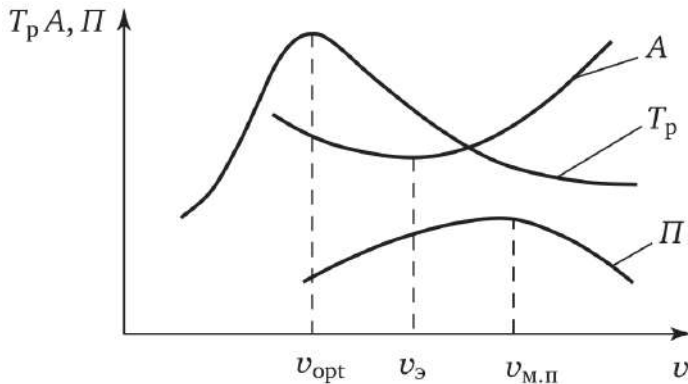


Рисунок 9.3 – Вплив швидкості різання  $v$  на розмірну стійкість інструменту  $T_p$ , продуктивність  $\Pi$  та собівартість обробки  $A$

### 9.4.1 Вибір економічного режиму різання

Вибір глибини різання, подачі та числа проходів визначається міркуваннями, викладеними вище. Якщо є глибина різання  $t$  та подача  $S$ , необхідно визначити швидкість різання  $v$ .

**Економічною швидкістю різання** називається швидкість різання, за якої вартість операції буде найменшою. При цьому маються на увазі такі складові технологічної собівартості, як витрати, пов'язані з витратою ріжучого інструменту та заробітною платою робочих верстатників. Стійкість інструменту, відповідна економічна швидкість різання, називається **економічною стійкістю**.

Швидкість різання  $v$ , глибина різання  $t$ , подача  $S$  і стійкість інструменту  $T$  зв'язані наступною емпіричною формулою:

$$v = \frac{C_v}{T^m t^x S^y}, \quad \text{або} \quad v = \frac{C_1 C_2 C_3 C_4 C_5}{T^m t^x S^y}, \quad (9.14)$$

де  $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5$  – коефіцієнти, що враховують вплив матеріалу інструменту, геометричних параметрів інструменту, оброблюваного матеріалу, змашувально-охолоджуючої рідини, вібрацій технологічної системи ВПЗ відповідно;

$T$  – стійкість інструменту між переточками в хвилину;

$m$  – показник ступеня стійкості ріжучого інструменту.

Для більшості різальних інструментів значення ступеня стійкості знаходяться в межах  $m = 0,1 \div 0,3$ ;  $x$  і  $y$  – показники у глибини різання і подачі, визначаються дослідним шляхом.

Завдання визначення економічної швидкості різання зводиться до визначення такої стійкості різального інструменту, за якої собівартість обробки деталі на цій операції, з урахуванням витрат на інструмент, була б найменшою. Методики визначення економічної стійкості інструменту наведені в роботах В.А. Кривоухова, В.М. Кована, Г.І. Темчина, А.М. Макарова, С.С. Силіна та ін.

### 9.4.2 Вибір режиму різання найбільшої продуктивності

У деяких випадках як виняток застосовується режим різання найбільшої продуктивності, наприклад з метою підвищення

продуктивності верстата, що є вузьким місцем у потоковій лінії, для усунення вузького місця у виробництві. При цьому неминуха дещо підвищена витрата ріжучого інструменту.

**Швидкістю найбільшої продуктивності** називається швидкість різання, що відповідає стійкості найбільшої продуктивності.

Для визначення стійкості найбільшої продуктивності потрібно скласти вираз продуктивності в одиницю часу і знайти значення стійкості інструменту, при якому цей вираз матиме максимальне значення. Так як продуктивність в одиницю часу є величиною зворотної штучному часу, то замість відшукування максимуму величини продуктивності достатньо знайти мінімум штучного часу  $t_{ш}$ :

$$t_{ш} = t_{м} + t_{в} + t_{об} + t_{п}, \quad (9.15)$$

де  $t_{м}$  – машинний час (час обробки);

$t_{в}$  – допоміжний час;

$t_{об}$  – час обслуговування верстата;

$t_{п}$  – час перерв.

Приймаючи  $t_{об} = t_{см}t_{м} / T$  і відкидаючи складові  $t_{в}$  і  $t_{п}$  як незалежні від  $T$ , отримаємо:

$$t_{ш} = t_{м} + t_{см} \frac{t_{м}}{T}, \quad (9.16)$$

де  $t_{см}$  – час зміни інструменту, що затупився.

Машинний час залежить від довжини оброблюваної поверхні, швидкості різання та подачі:

$$t_{м} = \frac{L}{nS} = \frac{L\pi d}{1000vS} = \frac{L\pi dT^{m-1}t^x S^y}{1000SC_v} = \alpha T^m, \quad (9.17)$$

де, як було зазначено вище, для прийнятих умов обробки

$$\alpha = \frac{L\pi dT^{m-1}t^x S^y}{1000SC_v} = \text{const}. \quad (9.18)$$

Підставляючи значення  $t_{м}$  у формулу штучного часу, отримаємо:

$$t_{\text{ш}} = \alpha T^m + t_{\text{см}} \frac{\alpha T^m}{T}; \quad t_{\text{ш}} = \alpha T^m + t_{\text{см}} \alpha T^{m-1}. \quad (9.19)$$

Таким чином, штучний час обробки виражений як функція стійкості інструменту  $t_{\text{ш}} = f(T)$ . Стійкість найбільшої продуктивності буде при найменшому значенні  $t_{\text{ш}}$ , отже треба знайти екстремум функції. Продиференціювавши функцію по  $T$  і прирівнявши першу до нуля, будемо мати:

$$\frac{dt_{\text{ш}}}{dT} = \alpha m T^{m-1} + \alpha(m-1)t_{\text{см}} T^{m-2} = 0. \quad (9.20)$$

Вирішуючи останнє рівняння щодо  $T$  після розподілу його на  $\alpha m T^{m-1}$ , отримаємо:

$$1 + \frac{m-1}{m} t_{\text{см}} T^{-1} = 0; \quad \frac{m-1}{m} t_{\text{см}} \frac{1}{T} = -1, \quad (9.21)$$

або

$$\frac{1-m}{m} t_{\text{см}} \frac{1}{T} = 1. \quad (9.22)$$

Остаточню:

$$T_{\text{н.п}} = t_{\text{см}} \frac{1-m}{m}. \quad (9.23)$$

Так як

$$\frac{d^2 t_{\text{ш}}}{dT^2} > 0, \quad (9.24)$$

при знайденому значенні  $T_{\text{н.п}}$  (у цьому неважко переконатися за формулою (9.23), то знайдене значення стійкості дійсно є стійкістю найбільшої продуктивності.

Порівнюючи

$$T_{\text{эк}} = \frac{B}{K_0} \frac{1-m}{m}; \quad T_{\text{н.п}} = t_{\text{см}} \frac{1-m}{m},$$

бачимо, що  $T_{\text{эк}} > T_{\text{н.п}}$  оскільки

$$B = t_{\text{см}} K_0 + t_{\text{зат}} K'_0 + \frac{C_{\text{ин}}}{P}; \quad \frac{B}{K_0} = t_{\text{см}} + t_{\text{зат}} \frac{K'_0}{K_0} + \frac{C_{\text{ин}}}{PK_0}.$$

Звідси видно, що  $B/K_0 > t_{cm}$ , отже,  $T_{эк} > T_{н.п}$  і економічна швидкість різання завжди менше швидкості найбільшої продуктивності.

Швидкість різання, що забезпечує максимальну продуктивність, може бути визначена за формулою:

$$v_{\max} = \left( \frac{\Delta_{\text{изн}}}{(1+x)y_1 c_1 t_{cm} \left( \frac{\tau_p}{\sigma_{и}} \right)^{x_1} \left[ \frac{c \left( \frac{a_1}{a_g} \right)^{1+x} D^z}{\Gamma^y (1 - \sin \gamma)^{0,73}} \right]^{y_1} \left( \frac{\rho_1}{a_1} \right)^{z_1}} \right)^{\frac{1}{(1+x)y_1 + 1}} \quad (9.25)$$

При масовому виробництві розрахунок режиму різання необхідно робити ретельно, так як неточності та втрати продуктивності на одній деталі на весь випуск (програмне завдання) дають значну втрату.

При серійному виробництві слід обмежитися менш детальними розрахунками. Можна при цьому користуватися укрупненими нормативами, наведеними у довідниках.

У одиничному виробництві зазвичай режими різання під час обробки деталей на верстаті встановлює висококваліфікований верстатник самостійно. При обробці великих деталей відповідального призначення (важке машинобудування) при великій трудомісткості механічної обробки режим різання може бути розрахований. І тут витрати часу, пов'язані з розрахунком режиму різання, виправдовуються.

## 9.5 Вибір та розрахунок режиму різання при багатоінструментній обробці

Розрахунок режиму різання при обробці на багатоінструментних верстатах складніший, ніж при одноінструментних. Однак все більш широкі масштаби застосування таких верстатів (токарні багаторізові напівавтомати, токарні одношпindelні і багатошпindelні автомати, багатошпindelні свердлильні і фрезерні верстати, агрегатні, токарні вертикальні багатопозиційні напівавтомати, верстати з ЧПУ та ін.) викликають необхідність проведення продуктивності та, отже,

розрахунків режиму різання.

Робота виконується у два етапи. *Перший етап:* проектування налагодження, розробка операційного технологічного ескізу або декількох технологічних ескізів по кожній позиції окремо, розподіл ріжучого інструменту за місцями його кріплення, по супортах, по шпинделях і розбивка припусків між інструментами.

*Другий етап:* вибір та розрахунок режиму різання для кожного інструменту, що задовольняє технологічним (точність, обробка та шорсткість поверхні) та економічним вимогам (собівартість, продуктивність) та коригування налагодження з метою забезпечення рівності машинного часу кожного з інструментів.

В цьому навчальному курсі саме для чіткого розуміння єдності технічних та економічних позицій, бо технологія машинобудування – це наука про процеси виготовлення деталей і складання з них машин і механізмів із мінімальними витратами праці як живої, так і уречевленої – наведені лише основні теоретичні положення, якими керуються при розрахунках режимів різання багатоприінструментних налаштувань.

А в повному обсязі послідовність, методика розрахунків та всі необхідні для цих розрахунків довідкові дані приводяться в спеціалізованій літературі.

## **9.6 Забезпечення точності механічної обробки**

Завдання управління точністю обробки та зниження похибок вирішується кількома шляхами:

- виконуються точніші розрахунки та здійснюється початкове налаштування обладнання для того, щоб забезпечити необхідний період роботи без підналаштування;
- розраховуються режими, обробка на яких забезпечує отримання необхідної точності;
- управління процесом обробки та своєчасне підстроювання обладнання.

### **9.6.1 Методи налаштування верстатів**

Застосовуються такі методи налаштування верстатів:

- статичне налаштування;

- налаштування пробних заготовок за допомогою робочого калібру;
- налаштування пробних заготовок за допомогою універсального вимірювального інструменту.

**Статичне налаштування** полягає в установці ріжучих інструментів за калібрами та еталонами на нерухомому верстаті. Інструмент підводиться до зіткнення з поверхнею калібру, що встановлюється на місці оброблюваної деталі, і закріплюється.

При статичному налаштуванні у зв'язку з деформаціями пружної технологічної системи від дії сил різання, а також температурних деформацій технологічної системи, розмір оброблюваного виробу може відрізнятись від необхідного. З цією метою настановні калібри або еталонні деталі виготовляються з поправкою  $\Delta_{\text{попр}}$ . У цьому випадку розрахунковий розмір  $L_{\text{н}}^{\text{факт}}$  установочного калібру визначається за формулою:

$$L_{\text{н}}^{\text{расч}} = L_{\text{н}}^{\text{факт}} \pm \Delta_{\text{попр}}, \quad (9.26)$$

де  $L_{\text{н}}^{\text{факт}}$  – розмір, який має бути фактично отриманий після обробки.

$$L_{\text{н}}^{\text{факт}} = \frac{L_{\text{min}} + L_{\text{max}}}{2}, \quad (9.27)$$

де  $L_{\text{min}}$  і  $L_{\text{max}}$  – найменший і найбільший граничні розміри деталі за кресленням.

У формулі (9.26) знак « $\leftrightarrow$ » застосовується для валів і знак « $\leftarrow$ » для отворів.

Такий метод налаштування не забезпечує точність вище 8÷9-го квалітетів. Тому в процесі обробки проводиться додаткове підналаштування. Однак значне скорочення часу на налаштування визначає широке застосування цього методу у великосерійному та масовому виробництві. Часто налаштування інструментальних блоків здійснюється поза верстатом і блоки монтуються на верстаті з встановленими інструментами.

**Налаштування за пробними заготовками за допомогою робочого калібру** (рис. 9.4) в даний час широко поширене, проте цей метод не забезпечує достатню точність і немає твердої впевненості у

виключенні можливості появи браку, оскільки невідоме поле розсіювання розмірів.

При перевірці одного–двох розмірів деталі будуть придатними, а наступні деталі у зв'язку з розсіюванням розмірів деталей у партії можуть бути бракованими, тому що визначити поле розсіювання за однією–двома деталями неможливо.

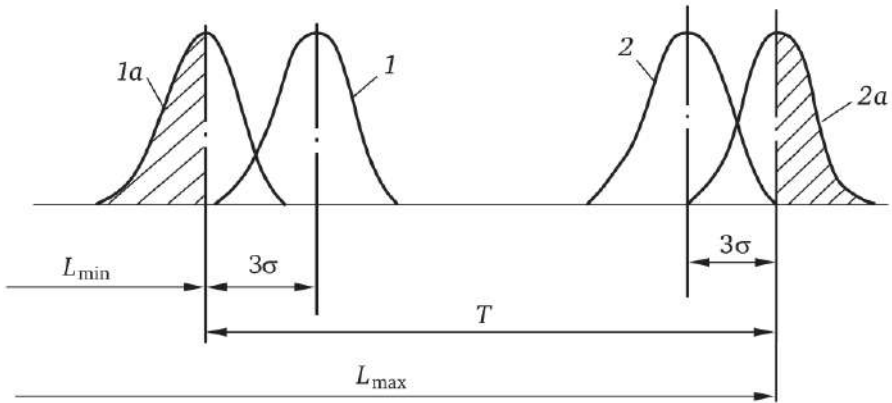


Рисунок 9.4 – Схема до налаштування за пробними проходами

При правильному налаштуванні всі розміри повинні входити в поле допуску  $T$  і розсіювання розмірів повинно бути в межах кривих розсіювання  $1$  і  $2$  (рис. 9.4), але при налаштуванні по одній–двох деталях розміри можуть виявитися належними кривим  $1(a)$  і  $2(a)$ , і в процесі обробки з'являтиметься брак.

У зв'язку з цим раціональнішим є метод налаштування верстатів за допомогою універсальних вимірювальних засобів по звуженим допускам.

**Налаштування по пробним заготовкам за допомогою універсального мірного інструменту** полягає в тому, що встановлення різальних інструментів проводиться на певний настроювальний розмір  $L_n$ , а правильність налаштування перевіряється обробкою деякої кількості деталей  $m$ .

Налаштування проводиться таким чином, щоб настроювальний допуск був менше фактичного допуску на деталь. Це робиться для того, щоб врахувати систематичні змінні похибки, які також спричиняють розсіювання розмірів деталей у партії (рис. 9.5).

Допуск на налаштування визначається за формулою:

$$T_H = T - 6\sigma \left( 1 + \frac{1}{\sqrt{m}} \right) - b. \quad (9.28)$$

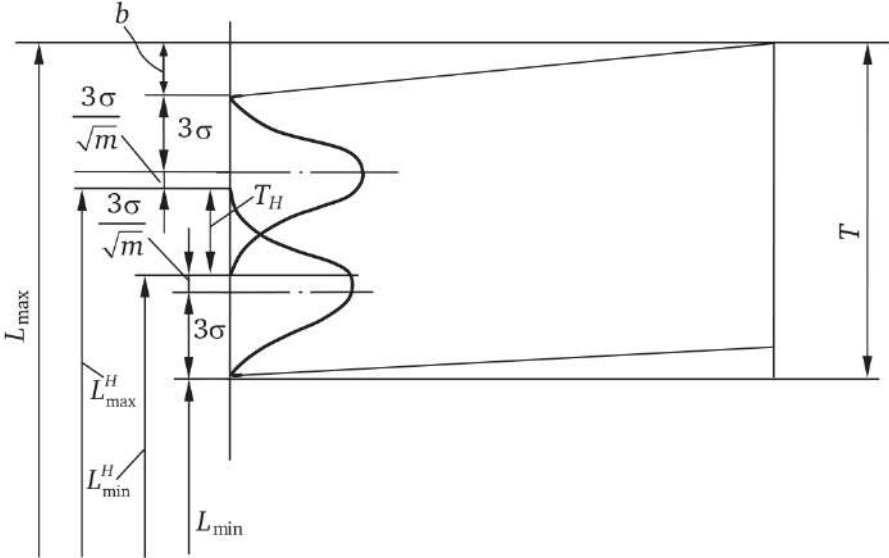


Рисунок 9.5 – Схема до налаштування пробних заготовок за допомогою універсального вимірювального інструменту

Мінімальний розмір при налаштуванні:

$$L_{\min}^H = L_{\min} + 3\sigma \left( 1 + \frac{1}{\sqrt{m}} \right), \quad (9.29)$$

де  $L_{\min}$  – мінімальний розмір деталі;

$\sigma$  – середньоквадратичне відхилення розмірів деталей у партії.

Максимальний розмір при налаштуванні:

$$L_{\max}^H = L_{\max} - b - 3\sigma \left( 1 + \frac{1}{\sqrt{m}} \right), \quad (9.30)$$

де  $b$  – систематична змінна, яка може бути визначена за відповідними формулами заздалегідь.

## 9.7 Розрахунок режимів різання, які забезпечують потрібну якість обробки

Режими різання, що забезпечують задані параметри поверхневого шару та точності обробки, визначаються на основі функціональної залежності:

$$(t, S, v) = f(\sigma_{\text{ост}}, Rz, h_c, \beta_g, T_p, \sigma_T, E_g, \tau_p, \lambda_g, \lambda_p, \alpha, \gamma, \varphi, \varphi_1, r, \rho_1, \Delta_{\text{изн}}, j_{\text{сист}}, B_1, H_1, H, L_p), \quad (9.31)$$

де  $t$  – глибина різання;  $S$  – подача;  $v$  – швидкість різання;  $\sigma_{\text{ост}}$  – величина залишкових напруг в поверхневому шарі оброблюваної деталі;  $Rz$  – висота нерівностей на оброблюваній поверхні;  $h_c$  – глибина наклепу в поверхневому шарі обробленої поверхні;  $T_p$  – поле допуску на розмір, який забезпечується в процесі обробки;  $\beta_g$  – коефіцієнт температурного розширення матеріалу деталі;  $\sigma_T$  і  $E_g$  – межа плинності і модуль пружності матеріалу оброблюваної заготовки відповідно;  $\lambda_g$  і  $\lambda_p$  – коефіцієнти теплопровідності матеріалів заготовки та різальної частини інструменту відповідно;  $\alpha$  і  $\gamma$  – задній та передній кути різця відповідно;  $\varphi$  і  $\varphi_1$  – головний і допоміжний кути різця в плані;  $r$  – радіус при вершині різця в плані;  $\rho_1$  – радіус округлення різальної кромки різця;  $\Delta_{\text{изн}}$  – величина радіального зносу різця;  $j_{\text{сист}}$  – жорсткість технологічної системи ВПЗ;  $B_1$  і  $H_1$  – висота і ширина державки різця;  $L_p$  – виліт державки різця;  $H$  – розмір оброблюваної деталі.

Зниження або підвищення швидкості різання в порівнянні з оптимальною призводить до збільшення інтенсивності зносу і зниження розмірної стійкості інструменту, що впливає на параметри якості поверхневого шару і точність обробки. Однак у деяких випадках, а саме в умовах гнучких автоматизованих виробництв та «безлюдних виробництв», економічно вигідно працювати на швидкостях  $v$ , які забезпечують мінімальну собівартість обробки, хоча при цьому знижується розмірна стійкість інструменту.

Таким чином, оптимізацію за критерієм точності обробки та параметрами якості поверхневого шару необхідно застосовувати при проектуванні нових технологічних процесів у дійсному виробництві, як засіб технічно обґрунтованого призначення режимів різання.

Необхідність швидкого освоєння виробництва нових виробів вимагає розробки теоретичних методів визначення технологічних умов обробки, що дозволяють на стадії проектування технологічного процесу виготовлення закладати рішення, що забезпечують при мінімальних витратах задані вимоги до поверхневого шару, так як поверхневий шар деталі в умовах експлуатації піддається найбільш сильному механічному, тепловому, магнітоелектричному, світловому та іншим впливам. Втрата деталлю свого службового призначення та її руйнація в більшості випадків починається з поверхневого шару.

Завданням технолога є забезпечення комплексу показників якості поверхневого шару і точності розмірів обробленої деталі ( $Ra_0$  – задане середнє арифметичне відхилення профілю шорсткості поверхні,  $\sigma_{\text{ост.о}}$  – задане значення залишкових напруг в поверхневому шарі,  $h_{\text{co}}$  – задана глибини наклепу в поверхневому шарі бробленої поверхні,  $\Delta_{\Sigma_0}$  – задана величина похибки обробки).

Експлуатаційні властивості деталі визначаються більшою чи меншою мірою кожним із цих показників. У загальному випадку, відхилення від оптимальної величини будь-якого з цих показників якості (у бік збільшення або зменшення дійсної величини показника) – спричиняє погіршення експлуатаційних властивостей деталі.

Оскільки ці показники мають різні одиниці вимірювання, то необхідно використовувати їх відносну, а не абсолютну зміну від оптимальної величини. В якості цільової функції оптимізації застосовується функція виду:

$$f(Ra_0, \sigma_{\text{ост.о}}, h_{\text{co}}, \Delta_{\Sigma_0}) = c_1 \left( \frac{Ra - Ra_0}{Ra_0} \right)^2 + c_2 \left( \frac{\sigma_{\text{ост}} - \sigma_{\text{ост.о}}}{\sigma_{\text{ост.о}}} \right)^2 + c_3 \left( \frac{h_c - h_{\text{co}}}{h_{\text{co}}} \right)^2 + c_4 \left( \frac{\Delta_{\Sigma} - \Delta_{\Sigma_0}}{\Delta_{\Sigma_0}} \right)^2, \quad (9.32)$$

або під час використання позначень типу  $q_1=Ra$ ,  $q_2=\sigma_{\text{ост}}$ ,  $q_3=h_c$ ,  $q_4=\Delta T_{\Sigma}$ , функція загального виду:

$$f(Q) = \sum_{i=1}^k c_i \left( \frac{q_i - q_{i0}}{q_{i0}} \right)^2, \quad (9.33)$$

де  $c_i$  – відповідні вагові коефіцієнти, що дозволяють встановити внесок того чи іншого показника якості поверхневого шару деталі у її

загальну надійність;

$R_a$ ,  $\sigma_{\text{ост}}$ ,  $h_c$  – поточні значення висоти нерівностей, залишкових напруг і глибини наклепу;

$k$  – число показників якості;

$Q$  – комплекс показників якості.

У разі, коли при вирішенні оптимізаційної задачі вдається забезпечити точний збіг заданих параметрів якості та точності з розрахунковими, величина цільової функції дорівнюватиме нулю, тобто  $f(Q) = 0$ . В іншому випадку, коли хоча б один з розрахункових параметрів відрізнятиметься від заданого, цільова функція буде позитивною,  $f(Q) > 0$ . Тому цільова функція у процесі оптимізації має бути зведена до мінімуму.

Крім того, на процес різання накладається низка обмежень, зумовлених технологією, фізикою та механікою процесу різання. Їх кількість та вид визначаються у кожному конкретному випадку окремо; вони можуть мати і просту, і складну форму залежностей. Найчастіше використовуються обмеження такого виду:

- подачі;
- за швидкістю різання;
- за стійкістю інструменту.

Крім перерахованих, на процес оптимізаційного пошуку можуть у кожному конкретному випадку накладатися обмеження, пов'язані з фізикою та технологією процесу, як правило, мають складний, яскраво виражений нелінійний характер (наприклад, обмеження потужності приводів, обмеження міцності різального інструменту, обмеження за температурою в зоні обробки, по силі різання тощо).

Для вирішення поставленої задачі використовується **алгоритм оптимізаційного пошуку**, побудований на базі методів нежорсткого допуску, штрафних функцій і деформованого багатогранника, який є базовим елементом системи розрахунку режиму обробки, що забезпечує задані показники точності обробки і якості поверхневого шару деталей. Блок–схему роботи системи розрахунку режиму різання з використанням оптимізаційного алгоритму нежорсткого допуску представлено на рис. 9.6.

У ряді випадків при проведенні оптимізаційного пошуку з метою отримання розрахункових величин режиму обробки (поєднання швидкості різання  $v$ , подачі  $S$  і глибини різання  $t$  або поєднання

швидкості  $v$  і подачі  $S$ ) не вдається забезпечити необхідний комплекс показників якості поверхневого шару та точність обробки деталі, тобто один або кілька показників, що входять до цільової функції оптимізації.

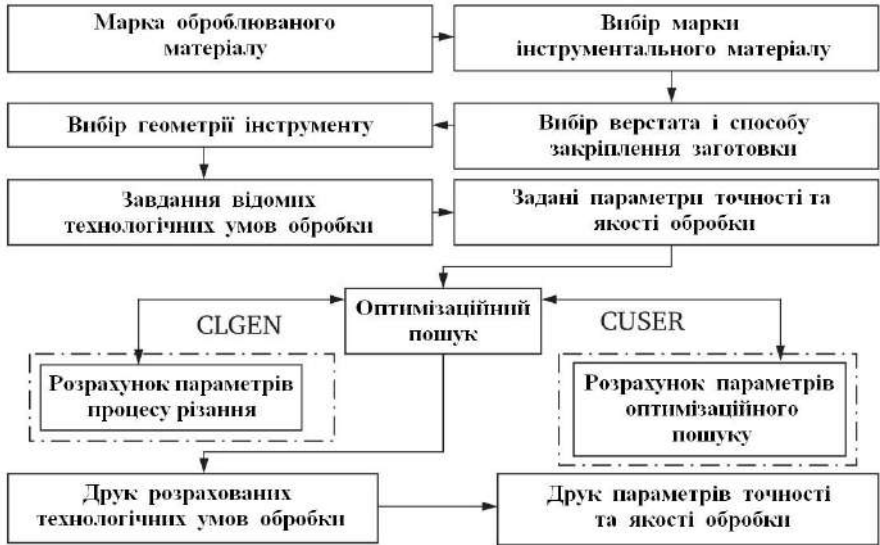


Рисунок 9.6 – Блок-схема системи розрахунку технологічних умов обробки

Навіть за кращого розв'язання задачі оптимізації мають значні відхилення від своїх оптимальних значень. Така ситуація часто виникає при числі показників, що входять в цільову функцію параметрів точності та якості поверхневого шару, що перевищує кількість змінних процесу оптимізаційного пошуку змінних технологічних параметрів обробки.

Аналіз проблеми призначення режиму різання, що забезпечує комплекс оптимальних параметрів якості та задану точність обробки, та результати численних практичних розрахунків дозволили зробити висновок про необхідність використання у ряді випадків більшої кількості змінних оптимізаційного пошуку з метою підвищення ефективності розрахунків та загальної надійності результатів обчислень.

У той же час використання великої кількості змінних при проведенні оптимізаційного пошуку, особливо при використанні складних обмежень, що розраховуються при кожній зміні змінних процесу, таких як обмеження за температурою в зоні різання, сил різання і т.п., призводить до різкого збільшення часу вирішення задачі оптимізації.

Все це вимагає застосування більш гнучкого підходу до вирішення задачі призначення режиму обробки, що забезпечує задані параметри якості поверхневого шару та точності обробки.

Тому з метою подолання цієї проблеми пропонується наступний **алгоритм багаторівневої системи оптимізації**.

На першому етапі розрахунку режиму змінних процесу використовуються величини швидкості різання  $v$ , подачі  $S$  і (за бажанням технолога) глибини різання  $t$ . Якщо в процесі оптимізації одержувані при розрахованих величинах  $S$ ,  $v$ ,  $t$  показники якості поверхневого шару та точності обробки задовольняють їх заданим оптимальним величинам, результати розрахунку вважаються остаточними і процес закінчується.

В іншому випадку, до числа змінних включається одна або більше додаткових величин, що впливають на процес різання, наприклад геометричні параметри інструменту ( $r$ ,  $\phi$ ,  $\phi_1$ ,  $\alpha$ ,  $\gamma$  тощо), а в якості вихідної точки для розрахунку використовуються результати попереднього рівня, і проводиться нова оптимізація.

Число рівнів оптимізації і число змінних процесу оптимізації на кожному рівні визначається технологом заздалегідь і задається в спеціальній підпрограмі опису вихідних даних. Використання багаторівневого алгоритму в системі забезпечує наближення одержуваних показників точності та якості обробки до заданих величин.

## 9.8 Управління процесом обробки

Управління процесом обробки можливе двома принципово відмінними методами:

- підналаштування;
- адаптивне керування процесом обробки.

Сутність **підналаштування** полягає в тому, що через певний проміжок часу відновлюється взаємне розташування інструменту та

оброблюваної заготовки, порушене в процесі обробки партії заготовок. При обробці деталей для компенсації впливу зносу інструменту внаслідок його затуплення та збільшення пружних відтискань у технологічній системі виробляють переміщення різця на величину, рівну величині зміщення від початкового настроювального розміру. Внаслідок такого підналаштування небезпека появи браку усувається. Підналаштування може здійснюватися вручну робітником-настроювачем при періодичному контролі розмірів деталей. Це вимагає зупинки верстата та припинення обробки на період підналаштування.

З метою підвищення продуктивності застосовується автоматизація процесу контролю вимірювань і самого процесу підналаштування. Для цих цілей можуть застосовуватися пристрої, що працюють за принципом відліку машинного часу (шляху різання), або пристрої, що працюють за принципом регулярних вимірювань істинних розмірів деталей, що обробляються.

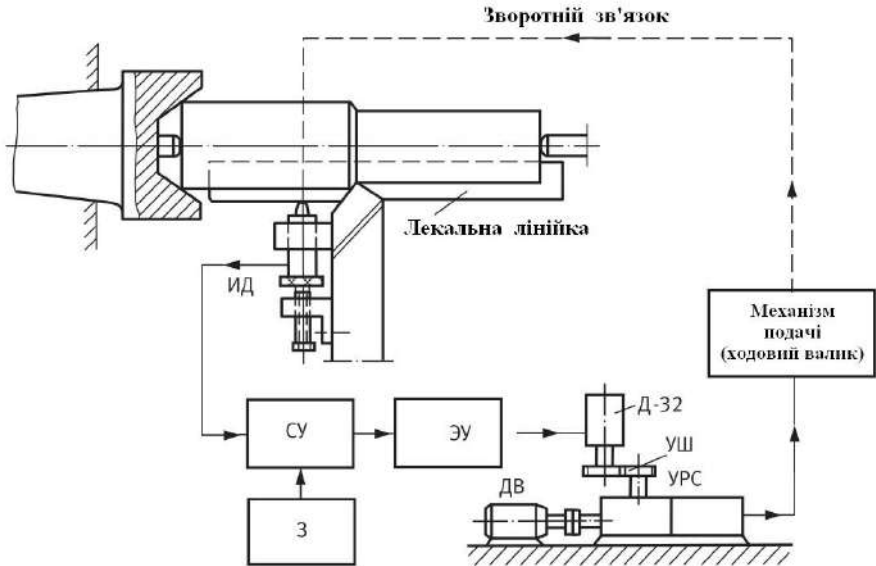
Перший спосіб можна використовувати при дуже високій однорідності властивостей матеріалу заготовок і якості ріжучого інструменту, так як ці властивості істотно позначаються на розсіянні розмірів деталей в партії.

Другий спосіб має більш високу точність, але більш складні конструкції автопідналагоджувачів. Такі автопідналагоджувачі широко застосовуються в умовах великосерійного та масового виробництва.

**Метод адаптивного управління** точністю обробки заснований на принципі компенсації пружних відтискань у технологічній системі, викликаних коливаннями припуску та твердості заготовки, пружними переміщеннями елементів системи у протилежному напрямку.

Широко застосовується в адаптивних системах принцип зміни подачі з метою збереження постійного значення сили різання. Приклад блок-схеми системи автоматичного управління пружними переміщеннями супорта токарного верстата наведений на рис. 9.7.

На жаль, таке управління процесом обробки не завжди задовольняє умовам виробництва, особливо при обробці дисків, коли зміна подачі буде приводити до зміни параметрів шорсткості та інших параметрів якості поверхневого шару. Тому в даний час розроблені адаптивні системи, що працюють за принципом підтримки сталості температури в зоні різання.



ИД – індуктивний датчик, що фіксує переміщення супорта;  
 СУ – порівнюючий пристрій; З – задавальний шпиндель;  
 ЗУ – підсилювач сигналу розсогласованості; Д – електродвигун;  
 УШ – керуючий шпиндель; ДВ – двигун подачі; УРС – універсальний  
 гідравлічний регулятор швидкості подачі

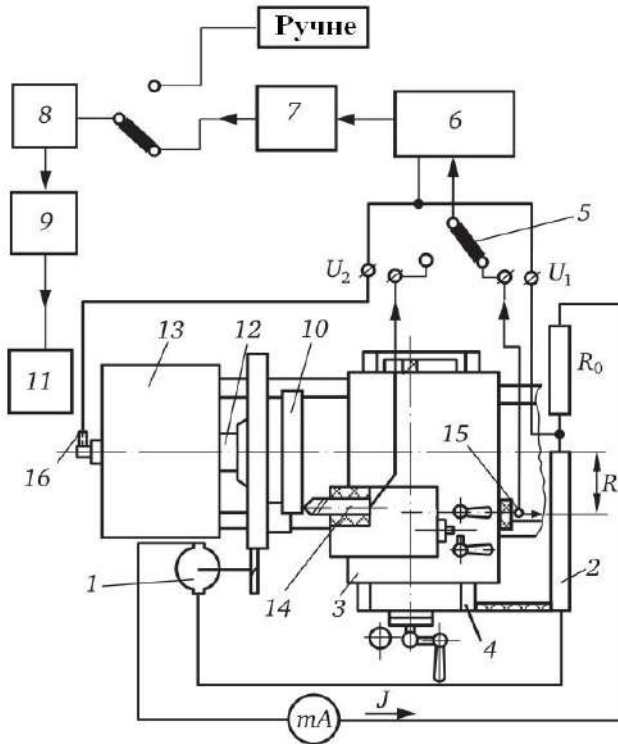
Рисунок 9.7 – Блок-схема САУ пружними переміщеннями супорта

Загальна схема керування токарним верстатом з автоматичною системою керування режимом різання і підтриманням постійної температури у зоні різання при обробці дисків, запропонована В.В. Трусовим, наведена на рис. 9.8.

Відомі також системи управління з підтримкою у процесі обробки певного співвідношення температури та сили різання із забезпеченням сталості енергетичного критерію процесу різання А.

На першому етапі розрахунку режиму змінних процесу використовуються величини швидкості різання  $v$ , подачі  $S$  і (за бажанням технолога) глибини різання  $t$ . Якщо в процесі оптимізації одержувані при розрахованих величинах  $S$ ,  $v$ ,  $t$  показники якості поверхневого шару та точності обробки задовольняють їх заданим оптимальним величинам, результати розрахунку вважаються

остаточними і процес закінчується. Інакше до числа змінних включається одна або більше додаткових величин, що впливають на процес різання, наприклад, геометричні параметри різальної частини інструменту ( $r$ ,  $\varphi$ ,  $\varphi_1$ ,  $\alpha$ ,  $\gamma$  тощо), а в якості вихідної точки для розрахунку використовуються результати попереднього рівня, і проводиться нова оптимізація.



- 1 - тахогенератор; 2 - рейковий реостат; 3 - поперечний супорт;
- 4 - поздовжній супорт; 5 - перемикач системи роботи верстата;
- 6 - електронний автоматичний потенціометр; 7 - регулятор режиму різання;
- 8 - виконавчий механізм переміщень супорта; 9 - регульовальний орган переміщень супорта;
- 10 - оброблювана заготовка; 11 - гідропривод;
- 12 - шпиндель верстата; 13 - коробки швидкостей і передачі; 14 - різець;
- 15 - рухомий контакт шляхового реостата; 16 - струмознімач

Рисунок 9.8 – Загальна схема верстата з універсальною системою автоматичного регулювання режиму різання

Число рівнів оптимізації і число змінних процесу оптимізації на кожному рівні визначається технологом заздалегідь і задається в спеціальній підпрограмі опису вихідних даних. Використання багаторівневого алгоритму в системі забезпечує наближення одержуваних показників точності та якості обробки до заданих величин. Оптимальне управління процесом механообробки передбачає вирішення двоетапної задачі:

- завдання зовнішньої оптимізації – призначення технологічних умов обробки, що забезпечують отримання деталей заданої точності з необхідними параметрами якості поверхневого шару при стаціонарному перебігу процесу різання;
- завдання внутрішньої оптимізації – автоматизоване управління процесом обробки, що дозволяє компенсувати нестабільність процесу, викликану зносом ріжучого інструменту, коливаннями припуску заготовки та іншими факторами.

Встановлено, що комплексу показників якості поверхневого шару відповідає певна величина енергетичного критерію процесу різання:

$$A = a_1 b_1 (c_p)_g \theta / P_z, \quad (9.34)$$

де  $a_1$  і  $b_1$  – товщина та ширина зрізу;

$(c_p)_g$  – питома об'ємна теплоємність оброблюваного матеріалу;

$\theta$  – температура в зоні різання;

$P_z$  – сила різання.

Це положення може бути використане як основа алгоритму роботи автоматизованої системи управління процесом різання, що забезпечує отримання деталі заданої точності з показниками якості поверхневого шару.

Після введення в керуючу ЕОМ геометрії деталі та різального інструменту, марок оброблюваного та інструментального матеріалів, параметрів верстатного обладнання та пристроїв, інших відомих технологічних умов обробки, а також після завдання необхідних показників точності обробки та якості поверхневого шару деталі, система розрахунку режимів різання визначає оптимальні умови обробки. Для одержаних умов обробки визначається оптимальне

значення енергетичного критерію та межі його можливого відхилення, що залежать від величин допустимих відхилень параметрів якості.

Визначається режим обробки, який задається верстату, і починається виконання програми розмірної обробки деталі:

- ЕОМ за допомогою електронно–вимірювального пристрою контролює безперервні виміри температури в зоні різання і сили різання, за величинами яких визначається поточне значення критерію;
- при виході поточного значення критерію за область допустимих значень проводиться розрахунок необхідних для його коригування величин швидкості різання і подачі. На основі результатів розрахунків визначаються керуючі впливи на режим обробки;
- керуючі впливи передаються з ЕОМ через блок зв'язку верстату, що дозволяє коригувати режим обробки для підтримки необхідної величини критерію процесу різання;
- під час управління процесом обробки ведеться протокол, у якому зберігаються поточні величини вимірюваних параметрів процесу різання, відповідне значення критерію А та виконання коригування режиму обробки;
- керування процесом різання виконується тільки під час робочого ходу ріжучого інструменту і закінчується при закінченні програми розмірної обробки деталі.

Другий етап оптимізації операцій обробки деталей – етап внутрішньої оптимізації – передбачає отримання необхідних експлуатаційних показників через контроль розрахункових показників точності та якості оброблюваних поверхонь на стадії виконання операції за рахунок використання системи управління процесом обробки, що дозволяє враховувати вплив обумовувальних впливів та виконувати регулювання процесу різання.

Задачу управління процесом обробки необхідно розглядати як задачу управління його вимірюваними вихідними параметрами таким чином, щоб досягти сталості обраного значення критерію, що оцінює перебіг процесу різання, і забезпечити тим самим отримання заданих експлуатаційних характеристик через контроль точності та якості поверхневого шару оброблюваних деталей.

Принципова схема функціонування адаптивної системи управління процесами обробки представлена на рис. 9.9.

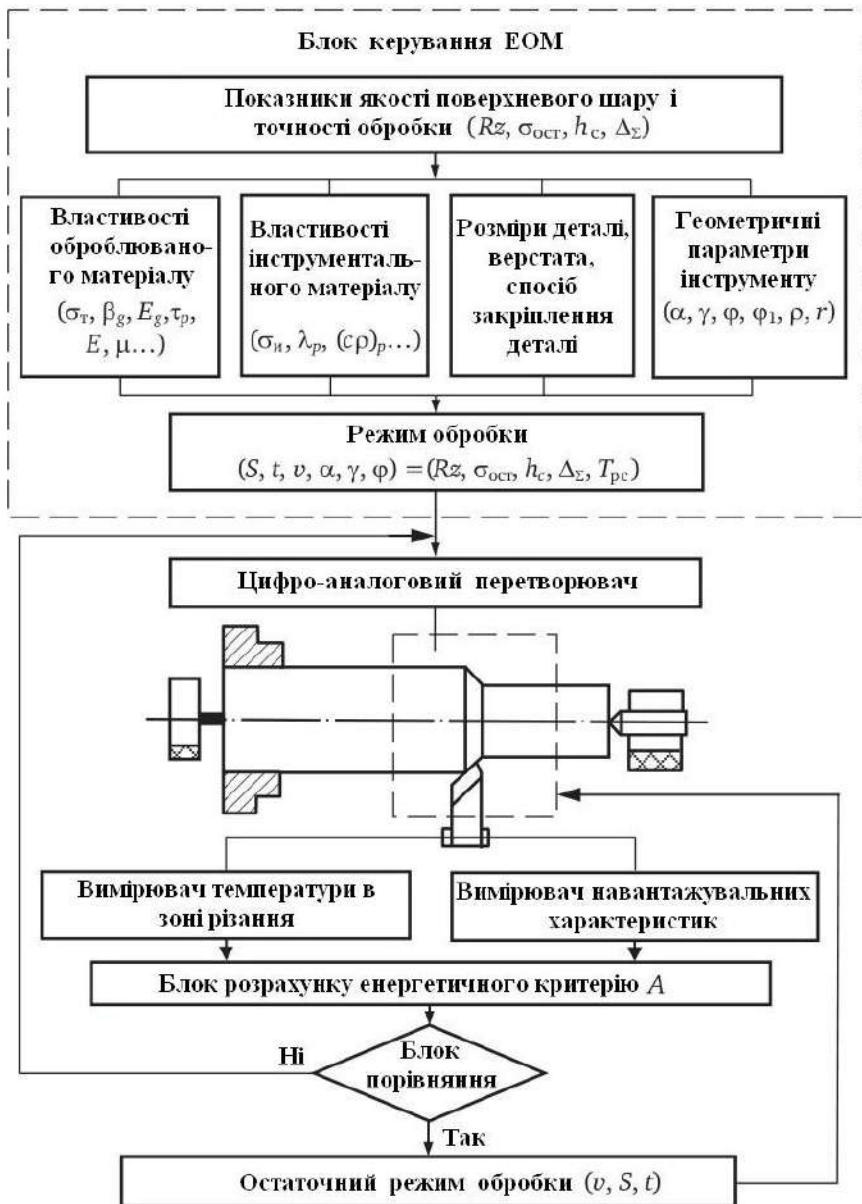


Рисунок 9.9 – Автоматизоване керування процесом обробки

Основними елементами такої адаптивної системи є:

1. Токарний верстат з числовим програмним управлінням (ЧПУ), на якому проводиться розмірна обробка деталей за заданою програмою.

2. Зовнішня ЕОМ, яка керує перебігом процесу обробки за заданим критерієм. Для цієї мети має бути розроблено відповідне програмне забезпечення, що реалізує алгоритми розрахунку управляючих впливів на верстат з ЧПУ. Крім того, зовнішня керуюча ЕОМ містить програмне забезпечення системи розрахунку режиму різання за заданими параметрами точності та якості обробки, яке використовується для визначення вихідних параметрів обробки деталі.

3. Вимірювачі параметрів процесу різання, які включають датчики та пристрої вимірювання, що виконують необхідні перетворення сигналів і передачу їх у керуючу ЕОМ. Інформація, що отримується від вимірювачів параметрів процесу, є вхідною для системи управління процесом.

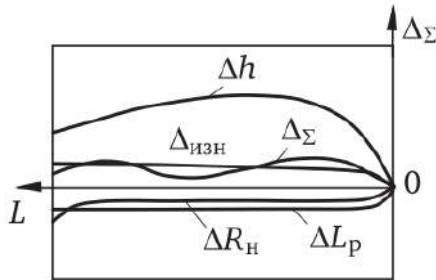
4. Пристрої управління параметрами обробки, які включають пристрої формування управляючих впливів і виконавчі механізми, через які ці впливи реалізуються на верстаті з ЧПУ.

Загальна схема функціонування розробленої системи адаптивного управління процесом обробки здійснюється наступним чином:

- за допомогою підсистеми розрахунку режиму обробки за заданим експлуатаційним показником (наприклад, межа витривалості) визначаються вихідні технологічні умови: режим різання (подача, глибина і швидкість різання) та геометричні параметри інструменту; розглядаються відповідні їм параметри якості поверхневого шару та точність обробки;
- розраховується оптимальне значення критерію процесу різання, що відповідає розрахунковим режимам обробки, і його допустиме відхилення.

Похибка форми поверхонь деталей машин і механізмів знижує якість продукції, що виготовляється, її експлуатаційні властивості. У зв'язку з цим виникає необхідність проведення подальших досліджень, спрямованих на вирішення проблеми підвищення як точності розмірів, так і точності форми поверхонь деталей.

Отже з використанням рівняння балансу похибок при токарній обробці використовується автоматизована система управління процесом обробки, яка дозволяє забезпечити при здійсненні аналізованого процесу точіння задану розмірну точність продукції, що виготовляється (у межах обумовленого допуску з урахуванням накладених техніко–технологічних обмежень) і мінімізувати похибку форми в поздовжньому перерізі заготовки в процесі її обробки на токарних верстатах із ЧПУ завдяки науково обґрунтованій, динамічній зміні режиму різання як на окремих ділянках заготовки, так і безперервно вздовж оброблюваної поверхні цієї заготовки (рис. 9.10).



$\Delta h$  – похибка, що зумовлюється недостатньою жорсткістю системи ВПЗ;  $\Delta_{изн}$  – похибка, що визначається зносом ріжучого інструменту;  $\Delta R_n$  – похибка, що визначається тепловими деформаціями заготовки;  $\Delta L_p$  — похибка, що визначається тепловими деформаціями ріжучого інструменту

Рисунок 9.10 – Схема утворення сумарної похибки форми обробленої деталі під впливом різних технологічних факторів

Отриманий після обробки на фіксованих (розрахованих системою) режимах різання профіль заготовки відповідає закону зміни температурно–силового впливу на цю заготовку в процесі її обробки (рис. 9.11).

Запропонована автоматизована система, враховуючи технологічні умови здійснення процесу різання, визначає такий закон зміни температурно–силового впливу на заготовку, при якому сумарна похибка її обробки буде мінімальною і однаковою в будь–якому перерізі. Потім система шляхом перебору подач інструменту  $S_i$  і

відповідних цим подачам оптимальних за розмірною стійкістю інструменту швидкостей різання  $v_{0i}$  знаходить такі режимні умови токарної обробки в базових точках заготовки, які забезпечують необхідний температурно-силовий вплив на заготовку, виходячи з умови підвищення точності її обробки



Рисунок 9.11 – Схематичне зображення конфігурації заготовки після токарної обробки на фіксованих режимах різання

Результатом роботи автоматизованої системи є закономірність зміни подачі різального інструменту і частоти обертання шпинделя в залежності від довжини переміщення різального інструменту вздовж оброблюваної поверхні заготовки (рис. 9.12).

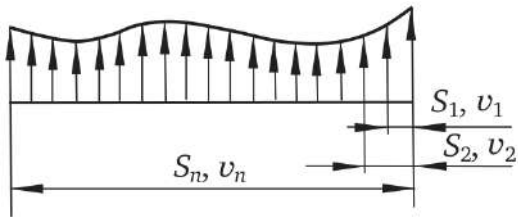


Рисунок 9.12 – Закономірність зміни температурно-силового впливу на заготовку

Визначені за допомогою автоматизованої системи режимні умови токарної обробки можна реалізувати на верстатах з ЧПУ, оснащених приводами безступінчастого регулювання частоти обертання шпинделя і швидкості поздовжнього переміщення супорта.

На виробництві використовують системи ЧПУ двох типів. До

першого типу належать системи, у яких режими різання задаються безпосередньо перед здійсненням робочого кадру. Тому щоб реалізувати розраховані системою закони зміни режимних умов процесу різання, необхідно розбити аналізовану ділянку заготовки на кілька частин і зробити їх покадрову обробку.

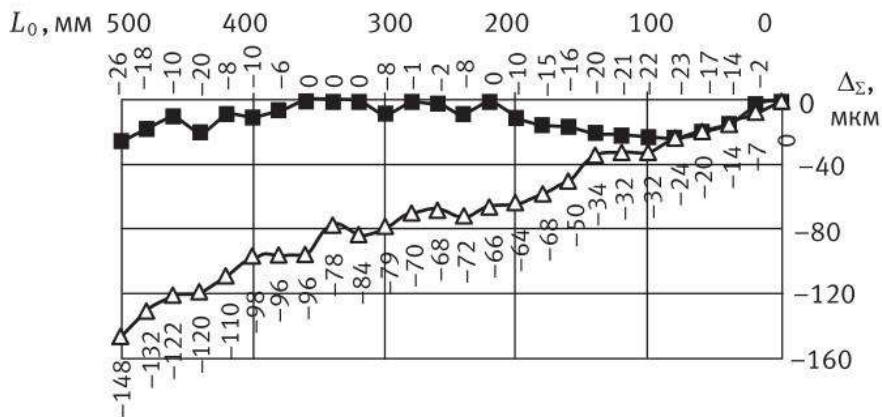
До другого типу належать системи ЧПУ, які мають можливість програмувати технологічні умови обробки за допомогою змінних параметрів. Ці системи дозволяють змінювати режими різання безпосередньо в процесі відпрацювання кадру керуючої програми, по заданій функції. Використання цих систем дозволяє отримати більш високу точність обробки ніж системи першого типу.

В якості прикладу на рис. 9.13 наведено результати зіставлення сумарної похибки обробки, отриманої на фіксованих і динамічно змінюваних режимах різання вздовж оброблюваної поверхні заготовки, за допомогою математичної моделі сумарної похибки обробки на токарному верстаті з ЧПУ та автоматизованої системи на її базі. Ці випробування проводилися на верстатах: 16А20Ф3С43 із системою ЧПУ МС 2109; 1П420ПФ40 із системою ЧПУ 4СК (8600MS); 16Б16Т1С1 система ЧПУ НЦ31-02; SPT32NC система ЧПУ NC660. Як оброблювані заготовки використовувалися деталі типу «Вал» і «Втулка» з високими вимогами, що пред'являються до точності їх форми та розмірів. Заміри здійснювалися як без використання охолоджуючих рідин, так і з їх застосуванням.

Вимірювання похибки форми вздовж оброблюваної заготовки здійснювалося безпосередньо на верстаті після процесу обробки вимірювачем малих переміщень «Мікрон-02» (похибка вимірювання +0,2 мкм) та скобою важільною СРП ТУ 2-044-366-92 з ціною ділення 1 мкм.

Умови обробки: токарний верстат 16А20Ф3С43; закріплення заготовки в патроні з підтиском центром задньої бабки, матеріал заготовки сталь 13Х12НВМФА(ЭИ961), геометричні параметри заготовки:  $L_0 = 500$  мм,  $d_0 = 52$  мм; інструмент-прохідний різець Т15К6, геометричні параметри інструменту:  $\alpha = 10^\circ$ ,  $\gamma = 10^\circ$ ,  $\varphi = 45^\circ$ ,  $\varphi_1 = 15^\circ$ ,  $r_1 = 30$  мкм,  $r = 1$  мм.

Аналіз рис. 9.13 свідчить, що шляхом динамічно змінюваних режимів різання вздовж оброблюваної поверхні заготовки можна значно підвищити точність її розмірів і форми в поздовжньому перерізі.



$L_0$ , мм	$S$ , мм/об	$n$ , об/ХВ	$v$ , м/с
0...100	0,08	711	1,79
100...200	0,09	660	1,66
200...300	0,1	615	1,55
300...350	0,11	592	1,49
350...400	0,12	562	1,41
400...450	0,13	513	1,29
450...520	0,14	446	1,12

Рисунок 9.13 – Зіставлення сумарної похибки обробки  $\Delta_\Sigma$  отриманої на фіксованих ( $\Delta$ ) і динамічно змінюваних ( $\blacksquare$ ) режимах різання ( $v$  і  $S$ ), уздовж оброблюваної заготовки. Глибина різання  $t = 1$  мм

В результаті динамічно змінюваних режимних умов процесу різання відбувається автоматичне відокремлення стружки через певний проміжок часу, забезпечується стійке і стабільне стружколомання, тим самим вирішується ще одна актуальна проблема автоматизованого виробництва – відведення стружки із зони різання.

## Питання для самоперевірки

1. Що повинен забезпечити оптимальний режим різання?
2. Що таке період стійкості інструментів?
3. Як обирають режими різання абразивного інструменту?
4. Як визначити величину подачі, що допускається жорсткістю заготовки?
5. В чому полягає сутність графоаналітичного методу вибору режиму різання?
6. Як змінюється коефіцієнт жорсткості від способу закріплення заготовки на верстаті?
7. Розкажіть послідовність вибору режиму різання при табличному методі.
8. Що розуміють під оптимізацією технологічних умов обробки деталей?
9. Що таке економічна швидкість різання?
10. Як вибрати економічний режим різання?
11. Що таке швидкість найбільшої продуктивності різання?
12. Як при багатоінструментній обробці здійснюється вибір та розрахунок режиму різання?
13. За рахунок чого забезпечується точність механічної обробки?
14. Які є методи налаштування верстатів?
15. Чому метод налаштування за пробними заготовками за допомогою робочого калібру не забезпечує достатню точність?
16. В чому полягає метод налаштування по пробним заготовкам за допомогою універсального мірного інструменту?
17. До чого призводить зниження або підвищення швидкості різання в порівнянні з оптимальною швидкістю?
18. На чому заснований алгоритм оптимізаційного пошуку?
19. Якими двома принципово відмінними методами можливе управління процесом обробки?
20. На чому заснований метод адаптивного управління точністю обробки?

## ТЕМА 10. КОНСТРУКЦІЯ І ПРИНЦИПИ РОБОТИ СУЧАСНОГО ВЕРСТАТА З ЧПУ

### 10.1 Основи числового програмного управління

На сьогоднішній день практично кожне підприємство, що займається механічною обробкою, має у своєму розпорядженні верстати з числовим програмним управлінням (ЧПУ). Верстати з ЧПУ виконують ті ж функції, що й звичайні верстати з ручним управлінням, проте переміщення виконавчих органів цих верстатів керуються електронікою. У чому ж основна перевага верстатів з ЧПУ і чому все більше заводів воліє вкладати гроші саме в сучасне обладнання з автоматичним управлінням, а не купувати відносно дешеві універсальні верстати?



Рисунок 10.1 – Універсальний свердильно-фрезерний верстат



Рисунок 10.2 – Фрезерний верстат з ЧПУ фірми HYUNDAI WIA

Першим очевидним плюсом від використання верстатів з ЧПУ є більш **високий рівень автоматизації виробництва**. Випадки втручання оператора верстата у процес виготовлення деталі зведені до мінімуму. Верстати з ЧПУ можуть працювати практично автономно,

день за днем, тиждень за тижнем, випускаючи продукцію з незмінно високою якістю. При цьому головною турботою верстатника-оператора є в основному підготовчо-заклучні операції: встановлення та зняття деталі, налагодження інструменту тощо. В результаті один працівник може обслуговувати одночасно кілька верстатів.



Рисунок 10.3 – Стілка ЧПУ Heidenhain TNC

Другою перевагою є **виробнича гнучкість**. Це означає, що для обробки різних деталей потрібно лише замінити програму. А вже перевірена та відпрацьована програма може бути використана у будь-який момент та будь-яку кількість разів.

Третім плюсом є **висока точність та повторюваність обробки**. За однією і тією ж програмою ви зможете виготовити з необхідною якістю тисячі практично ідентичних деталей.

Ну і, нарешті, числове програмне управління дозволяє *обробляти такі деталі, які неможливо виготовити на звичайному устаткуванні*. Це деталі зі складною просторовою формою, наприклад штампи та прес-форми.

Варто зазначити, що сама методика роботи за програмою дозволяє більш точно *прогнозувати час обробки* деякої партії деталей і більш повно *завантажувати обладнання*.

Верстати з ЧПУ коштують досить дорого і вимагають більших витрат на встановлення та обслуговування, ніж звичайні верстати. Проте їхня висока продуктивність легко може перекрити всі витрати при грамотному використанні та відповідних обсягах виробництва.

**Числове програмне управління (ЧПУ)** - це автоматичне керування верстатом за допомогою комп'ютера (який знаходиться всередині верстата) та програми обробки (керівної програми). До винаходу ЧПУ керування верстатом здійснювалося вручну або механічно.

Осьовими переміщеннями верстата з ЧПУ керує комп'ютер, який читає програму управління (УП) і видає команди відповідним двигунам. Двигуни змушують переміщатися виконавчі органи верстата – робочий стіл чи колону зі шпинделем. В результаті проводиться механічне оброблення деталі.

Датчики, встановлені на направляючих, надсилають інформацію про фактичну позицію виконавчого органу назад у комп'ютер. Це називається *зворотним зв'язком*. Як тільки комп'ютер дізнається про те, що виконавчий орган верстата знаходиться у потрібній позиції, він виконує наступне переміщення. Такий процес триває, доки читання керуючої програми не дійде до кінця.

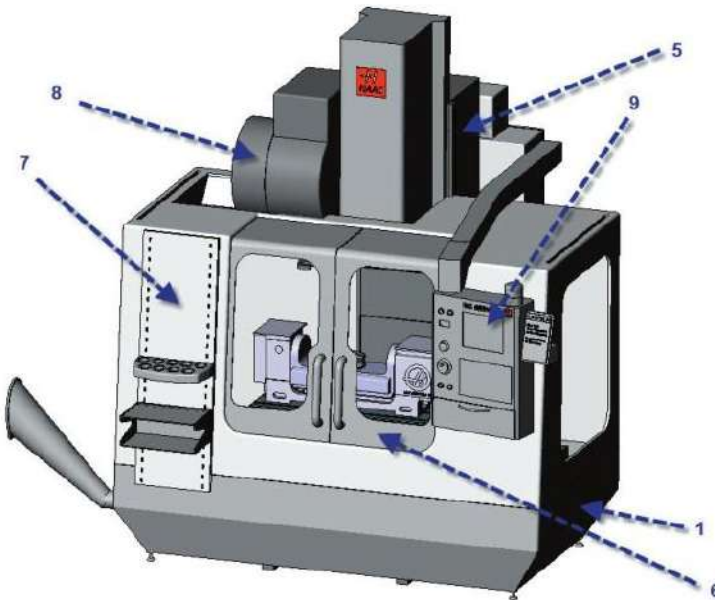
За своєю конструкцією та зовнішнім виглядом верстати з ЧПУ схожі на звичайні універсальні верстати. Єдина зовнішня відмінність цих двох типів верстатів полягає у наявності у верстата з ЧПУ пристрою числового програмного управління (УЧПУ), яке часто називають *стійкою ЧПУ*.

### **10.1.1 Особливості устрою та конструкції фрезерного верстата з ЧПУ**

Фрезерні верстати з ЧПУ можна класифікувати за різними ознаками: за положенням шпинделя (вертикальні або горизонтальні),

за кількістю керованих осей або ступенів свободи (2, 3, 4 або 5 осей), за точністю позиціонування та повторюваності обробки, за кількістю використовуваного інструменту (одне- та багатоінструментальні) і т.д.

Розглянемо конструкцію вертикально-фрезерного верстата із ЧПУ (рис. 10.4÷10.5). Станина (1) призначена для кріплення всіх вузлів та механізмів верстата. Робочий стіл (2) може переміщатися в поздовжньому (ліворуч/праворуч) та поперечному (вперед/назад) напрямках по напрямних (3). Пульт управління, або стійка ЧПУ (9), закріплений на кронштейні та може бути переміщений у зручне для оператора положення.



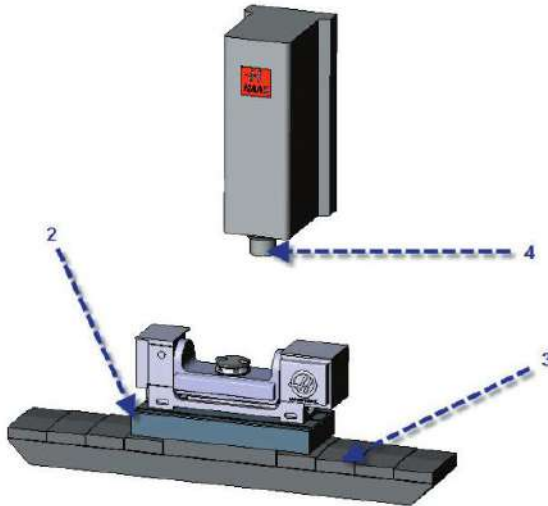
1 - станина, 5 - колона, 6 - дверцята, 7 - захисні кожухи,  
8 - магазин інструментів (барабанного типу), 9 - пульт управління

Рисунок 10.4 – Корпус вертикально-фрезерного верстата з ЧПУ

На робочому столі закріплюють заготовки і різні технологічні пристосування. Для цього на столі є спеціальні Т-подібні пази. Шпиндель (4) призначений для затиску ріжучого інструменту та надання йому обертання. Шпиндель закріплений на колоні (5), яка

може переміщатися у вертикальному напрямку (вгору/вниз). Від точності обертання шпинделя, його жорсткості та вібростійкості значною мірою залежать точність та якість обробки. Таким чином, верстат, що розглядається, є триосьовим.

Захисні кожухи (7) необхідні для забезпечення безпеки. Вони захищають оператора верстата від стружки, що летить, і змащувально-охолоджуючої рідини (МОР), яка подається в зону обробки під тиском. Дверцята (6) забезпечують доступ до робочої зони верстата. У магазині інструментів барабанного типу (8) знаходиться набір різальних інструментів. При цьому взяття необхідного інструменту та фіксація його в шпинделі забезпечуються пристроєм автоматичної зміни інструменту та проводяться за певною командою керуючої програми.



2 - робочий стіл, 3 - напрямні, 4 - шпиндель

Рисунок 10.5 – Конструктивні елементи верстата

### 10.1.2 Функціональні складові (підсистеми) ЧПУ

Для того щоб зробити зі звичайного верстата з ручним керуванням верстат з ЧПУ, необхідно впровадити певні компоненти у його конструкцію. Недостатньо просто підключити верстат до

комп'ютера, щоб він працював за програмою - необхідно модернізувати механічну та електронну «начинку» верстата.

Розглянемо як влаштовано систему ЧПУ (СЧПУ) на більшості сучасних верстатів. Умовно СЧПУ можна поділити на три підсистеми:

- підсистему управління;
- підсистему приводів;
- підсистему зворотного зв'язку.

Далі в цьому розділі ми докладніше зупинимося на кожній із даних підсистем.

### **Підсистема управління.**

Центральною частиною всієї СЧПУ є підсистема управління. З одного боку, вона читає керуючу програму і віддає команди різним агрегатам верстата на виконання тих чи інших операцій. З іншого боку – взаємодіє з людиною, дозволяючи оператору верстата контролювати процес обробки.

Серцем підсистеми управління є контролер (процесор), який зазвичай розташований в корпусі стійки ЧПУ. Сама стійка має набір кнопок і екран (все разом називається інтерфейсом користувача) для введення і виведення необхідної інформації.

*Системи управління* можуть бути як *закритими*, так і *відкритими*, ПК-сумісними. Закриті системи управління мають власні алгоритми та цикли роботи, власну логіку. Виробники таких систем зазвичай не поширюють інформацію про їх архітектуру.

Швидше за все, ви не зможете самостійно оновити програмне забезпечення та редагувати налаштування такої системи. Система закритого типу має важливу перевагу – вони, як правило, мають високу надійність, тому що всі компоненти системи пройшли тестування на сумісність.

Останнім часом стало з'являтися все більше відкритих, ПК-сумісних систем управління. Їх апаратна начинка практично така ж, як і у вашого догашнього персонального комп'ютера. Перевага такого методу – у доступності та дешевизні електронних компонентів, більшість з яких можна придбати у звичайному комп'ютерному магазині, та у можливості оновлення внутрішнього програмного забезпечення.

Найсучасніші СЧПУ можуть бути оснащені САМ-системою, що дозволяє автоматизувати процес написання УП прямо на верстаті. Найбільш яскравий приклад - системи ЧПУ серії MAPPS IV

японських верстатів Mori Seiki містять вбудоване програмне забезпечення ESPRIT від компанії DP Technology (США) і дозволяють оператору не тільки створити УП будь-якої складності, але й провести її всебічну перевірку.



Рисунок 10.6 – Стійка MAPPS IV з CAM-системою ESPRIT

### 10.1.3 Підсистема приводів

Підсистема приводів включає різні двигуни і гвинтові передачі для остаточного виконання команд підсистеми управління – для реалізації переміщення виконавчих органів верстата.

#### **Високоточні ходові гвинти.**

Важливими компонентами підсистеми приводів є високоточні гвинти. Ви, вже знаєте, що на верстаті з ручним керуванням робітник, обертаючи ручку, з'єднану з ходовим гвинтом, переміщає робочий стіл. На дні стола укріплена гайка таким чином, що при повороті гвинта відбувається лінійне переміщення стола.

Удосконалений ходовий гвинт верстата з ЧПУ дозволяє виконувати переміщення виконавчого органу з мінімальним тертям і практично без люфтів. Усунення люфту дуже важливе з двох причин. По-перше, це необхідно для забезпечення надточного позиціонування.

По-друге, лише за дотримання цієї умови можливе нормальне попутне фрезерування.

### Двигуни.

Другою складовою підсистеми є двигун (а точніше – кілька двигунів). Обертання валу двигуна призводить до повороту високоточного ходового гвинта і лінійного переміщення робочого столу або колони. У конструкції верстатів використовуються крокові електродвигуни та серводвигуни.

**Кроковий електродвигун** - це електромеханічний пристрій, що перетворює електричний сигнал управління у дискретне механічне переміщення. Існує кілька основних видів крокових двигунів, що відрізняються конструктивним виконанням:

- крокові двигуни зі змінним магнітним опором;
- крокові двигуни з постійним магнітним опором;
- гібридні двигуни.

Принцип роботи у всіх цих двигунів (рис. 10.7÷10.8) приблизно однаковий і простий.

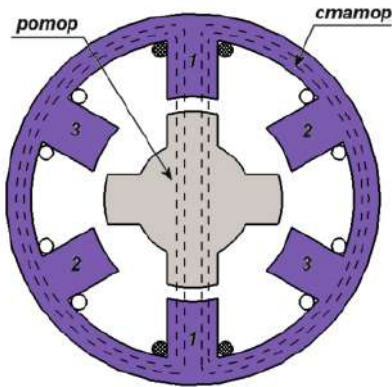


Рисунок 10.7 – Устрій крокового двигуна зі змінним магнітним опором

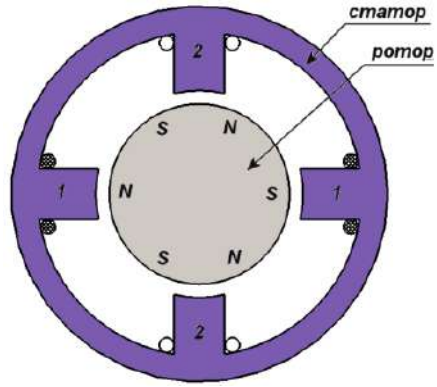


Рисунок 10.8 – Устрій крокового двигуна з постійними магнітами

Кроковий **двигун зі змінним магнітним опором** має кілька полюсів на статорі та ротор із магнітно-м'якого матеріалу (реактивний ротор). На рис. 10.7 показаний двигун, що має шість полюсів на статорі, ротор з чотирма зубами та три незалежні обмотки, кожна з

яких припадає на протилежні полюси статора.

При подачі електричного струму в одну з обмоток ротор прагне зайняти положення, при якому виниклий магнітний потік буде замкнутий. Тобто зуби ротора будуть знаходитись прямо навпроти тих полюсів статора, на обмотки якого подано струм. Якщо вимкнути струм у цій обмотці та подати його в наступну обмотку, то ротор повернеться, щоб у черговий раз замкнути магнітний потік своїми зубами. Для безперервного обертання ротора необхідно поперемінно подавати електричний струм на 1, 2 і 3 обмотки, при цьому крок обертання для представленого двигуна складе  $30^\circ$ .

Кроковий *двигун з постійними магнітами* складається зі статора з обмотками та ротора з постійними магнітами. На рис. 10.8 показаний двигун, що має дві пари полюсів статора та три пари полюсів ротора. При подачі електричного струму в одну з обмоток ротор займе положення, при якому різнойменні полюси статора і ротора перебуватимуть навпроти один одного. Для безперервного обертання ротора необхідно поперемінно подавати електричний струм на 1 і 2 обмотки, при цьому крок обертання складе  $30^\circ$ .

Більшість сучасних крокових електродвигунів є гібридними, тобто поєднують переваги двигунів зі змінним магнітним полем і двигунів з постійними магнітами, мають набагато більше полюсів статора та зубів ротора, що забезпечує менший крок обертання.

Коли підсистема управління посилає до крокового двигуна електричний імпульс, відбувається поворот на певний кут, який залежить від конструкції двигуна (наприклад,  $0,7^\circ$ ).

Якщо ходовий гвинт має крок 1 мм, один імпульс змусить виконавчий орган верстата лінійно переміститися на  $0,7/360 \times 1 = 0,0019$  мм. Ця величина називається *роздільною здатністю системи*, або *ціною імпульсу*. Не можна перемістити виконавчий орган на величину меншу, ніж дозвіл системи. Таким чином, ви бачите, що існує прямий взаємозв'язок між двигуном, ходовим гвинтом та точністю переміщень верстата.

Простота конструкції та легкість управління зробили крокові електродвигуни дуже популярними. Основним мінусом двигунів цього типу є їх товчкова або дискретна робота, яка може призвести до погіршення якості чистової обробки поверхонь та ефекту «сходів» при виконанні обробки по похилій прямій або дузі. Однак крокові двигуни можуть працювати без використання дорогого та складного

зворотного зв'язку. Це дозволяє створювати недорогі, хоч і не високоточні верстати.

Найсучасніші верстати з ЧПУ не оснащуються кроковими двигунами. На зміну їм прийшли серводвигуни, які мають складнішу конструкцію. Серводвигуни, на відміну від крокових двигунів, працюють гладко, мають кращі характеристики, але ними важче управляти.

Для роботи із серводвигуном необхідна наявність спеціальних контролерів та пристроїв зворотного зв'язку, що, безсумнівно, призводить до збільшення вартості верстата.

### 10.1.4 Підсистема зворотного зв'язку

Підсистема зворотного зв'язку головним чином покликана забезпечувати підсистему управління інформацією реальної позиції виконавчого органу верстата і про швидкість двигунів. Підсистема зворотного зв'язку може бути відкритого чи замкнутого типу.

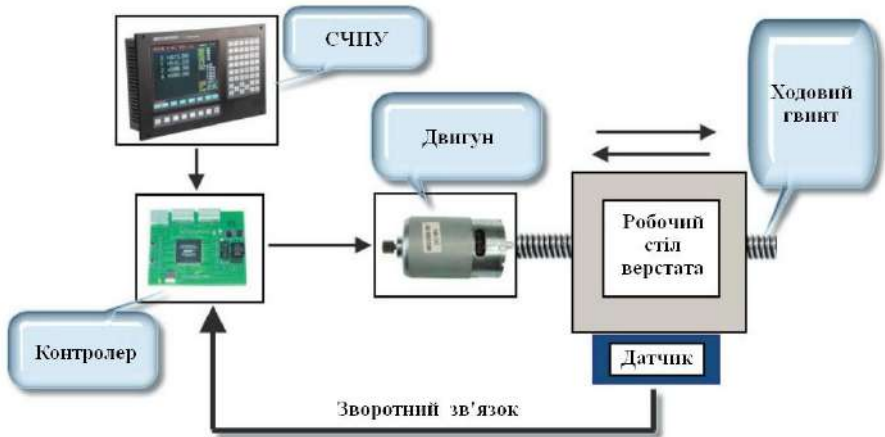


Рисунок 10.9 – Схема зворотного зв'язку на верстаті з ЧПУ

*Системи відкритого типу* реєструють наявність або відсутність сигналу підсистеми управління. На жаль, вони не можуть дати інформацію про реальну позицію виконавчого органу та швидкість двигунів, тому в сучасних верстатах з ЧПУ практично не

використовуються.

**Системи замкнутого типу** використовують зовнішні датчики для перевірки необхідних параметрів.

**Датчики, що використовуються для визначення положення.**

Як правило, в верстатах з ЧПУ для визначення положення і стану виконавчих органів використовуються два типи датчиків: лінійні датчики положення і обертові датчики положення.

**Обертовий датчик положення** (рис. 10.10) кріпиться на валу двигуна і дозволяє визначати його кутове положення. Цей датчик складається з джерела світла, оптичного датчика (приймача) та диска з маленькими радіальними прорізами (растрами). Растровий диск укріплений на валу, джерело світла та оптичний датчик знаходяться з різних боків від диска.

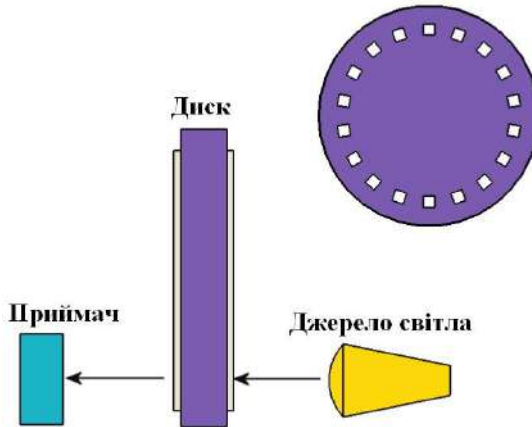


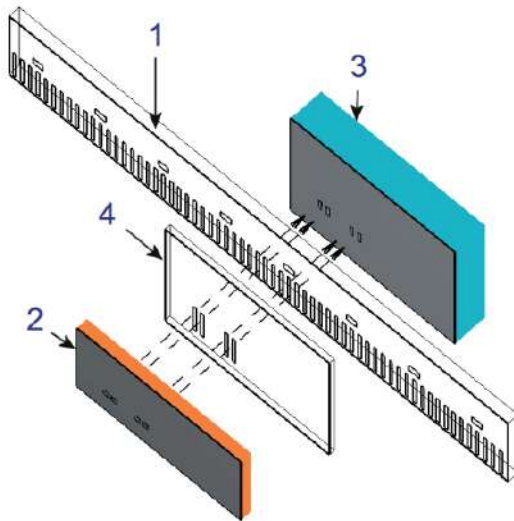
Рисунок 10.10 – Обертовий датчик положення

Коли диск обертається, промені проходять крізь його прорізи і падають на оптичний датчик. Оптичний датчик працює як перемикач, який вмикається або вимикається при попаданні на нього світлових променів. Це дає можливість визначити відносне або абсолютне положення та напрямок обертання двигуна. Отримана інформація надсилається в підсистему управління.

Всі датчики, що обертаються, мають один істотний недолік. Так як вони встановлюються безпосередньо на валу двигуна, то не можуть виміряти напрямне лінійне положення виконавчого органу верстата.

Вони дають розраховане положення, засноване на даних про крок ходового гвинта, і в високоточних верстатах для визначення лінійного положення не застосовуються. Їх можна використовувати в конструкції шпинделя для визначення кількості обертів при обертанні та для знаходження його кутового положення.

**Лінійні датчики положення** використовуються практично у всіх сучасних верстатах з ЧПУ для точного визначення абсолютної або відносної позиції виконавчих органів. Датчики містять два взаємопов'язані вузли – растрову шкалу і зчитувальну головку (рис. 10.11).



1 - растрова шкала, 2 - освітлювачі,  
3 - фотоприймачі, 4- індикаторна пластина  
Рисунок 10.11 – Лінійний датчик положення

Растрова шкала (1), розташована вздовж напрямних, є лінійкою з маленькими прямокутними прорізами (растрами). Зчитуюча головка, що переміщається разом з виконавчим органом верстата, складається з освітлювачів (2), фотоприймачів (3) та індикаторної пластини (4). Причому освітлювачі та індикаторна пластина знаходяться з одного боку від растрової шкали, а фотоприймачі – з іншого.

На індикаторній пластині також є дві растрових ділянки зі змішаним кроком для формування двох сигналів. Коли зчитуюча головка переміщається вздовж растрової шкали, то світлові сигнали від освітлювачів проходять через індикаторну пластину, потім через шкалу і реєструються фотоприймачами. Отримані сигнали дають можливість визначити величину та напрямок переміщення. На растровій шкалі може бути додаткова доріжка референтних міток для початку власного відліку.

Системі ЧПУ також необхідна інформація про швидкість, прискорення та уповільнення виконавчого органу верстата. Розрахунок величини прискорення та уповільнення необхідний для точного позиціонування. Справа в тому, що коли робочий стіл верстата переміщається в необхідну позицію, він заздалегідь уповільнює швидкість переміщення, щоб «не промахнутися» повз необхідну координату.

#### **Датчики стану виконавчих органів.**

Крім перелічених вище датчиків, звичайно ж, використовуються й інші датчики. Температурні датчики (термопари) застосовують для визначення температури виконавчих органів, розрахунку температурного лінійного розширення компонентів верстата і контролю над температурою масла і повітря. Інфрачервоні датчики використовуються у верстатних системах автоматичного виміру.

### **10.1.5 Функціонування системи ЧПУ**

Отже ми розглянули окремо роботу трьох підсистем, що складають основу СЧПУ. Тепер поговоримо про функціонування всієї системи загалом.

Програміст створює управляючу програму, в якій міститься закодована інформація про траєкторію та швидкість переміщення виконавчих органів верстата, частоти обертання шпинделя та інші дані, необхідні для виконання обробки. Підсистема управління читає цю програму, розшифровує її і створює профіль переміщення.

Профіль переміщення можна представити у вигляді графіка, який показує, в якій точці повинен бути виконавчий орган верстата через певні проміжки часу. Відповідно до профілю переміщення підсистема управління посилає на відповідний двигун строго певну кількість електричних імпульсів.

Двигун обертає ходовий гвинт і виконавчий орган верстата переміщується у вказану позицію (координату). Датчики зворотного зв'язку надсилають у підсистему управління інформацію про дійсну досягнуту позицію виконавчого органу. Відбувається порівняння фактичної та необхідної (теоретичної) позицій.

Якщо між ними є різниця (помилка переміщення), підсистема управління посилає скориговане на величину помилки число електричних імпульсів на двигун. Цей процес повторюється знову і знову, поки виконавчий орган верстата не досягне необхідної позиції з певною (дуже високою) точністю. Взагалі, деяка помилка переміщення буде присутня завжди. Головне, щоб вона була настільки маленькою, щоб нею можна було знехтувати.

Ми розглянули найпростіший варіант - переміщення від однієї вісі. Давайте ускладнимо завдання. Нехай потрібно перемістити робочий стіл прямолінійно, але не паралельно жодній з осей верстата (рис. 10.12).

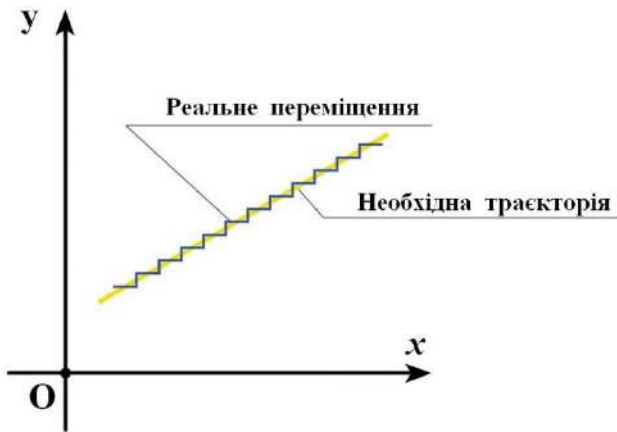


Рисунок 10.12 – Під час переміщення з точки 1 у точку 2 система ЧПУ будує безліч опорних точок і переміщує виконавчий орган «ступінчасто», поперемінно вмикаючи подачу то по одній осі, то по іншій

Для того, щоб виконати таке переміщення, система ЧПУ змушена будувати між точками 1 і 2 безліч опорних точок і рухати робочий стіл по цих точках «ступінчасто», поперемінно включаючи

подачу по одній осі, то по іншій.

При цьому потрібно підтримувати таке співвідношення швидкостей руху по осях, щоб траєкторія переміщення відповідала заданій траєкторії. Роботу з розрахунку цих проміжних опорних точок виконує спеціальний пристрій - інтерполятор, який входить до складу підсистеми управління.

**Інтерполятор** безперервно, відповідно до заданих переміщень, підтримує функціональний зв'язок між опорними точками і оцінює відхилення від заданої траєкторії, прагнучи звести їх до мінімуму.

Ці «сходи» мають деяке відхилення від заданої траєкторії переміщення. Величина відхилення отриманої «ступінчастої» траєкторії дорівнюватиме, або буде кратна, величині імпульсу (роздільній здатності) системи ЧПУ або імпульсу, сформованого датчиком зворотного зв'язку.

Так як у сучасних верстатах роздільна здатність системи ЧПУ наближається до 0,001 мм (1 мкм), то отримуване переміщення, можна розглядати як гладке.

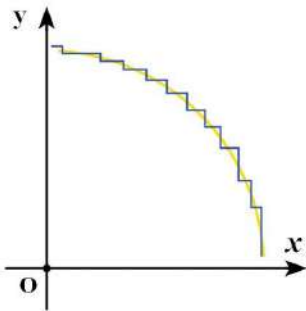


Рисунок 10.13 – Схема кругової інтерполяції

Розглянута інтерполяція називається **лінійною**. Якщо ж необхідно виконати переміщення по дузі, то інтерполяція буде **круговою** (рис. 10.13).

У разі переміщення дугою виконується так звана лінійна апроксимація дуги, тобто заміна дуги маленькими прямолінійними відрізками.

Тому виконавчий орган верстата також рухатиметься «ступінчастою» траєкторією, яка візуально здаватиметься абсолютно гладкою.

### 10.1.6 Мови для програмування обробки

З моменту появи перших верстатів з ЧПУ, до впровадження нових обробних центрів, з'явилися різні мови для програмування обробки. Сьогодні програмування в G-і M-кодах є найбільш популярним. Мова G- та M-кодів ґрунтується на положеннях Міжнародної організації зі стандартизації (ISO) та Альянсу галузей електронної промисловості (EIA – англ. Electronic Industries Alliance).

Офіційно ця мова вважається стандартом для американських та європейських виробників обладнання з ЧПУ, та іноді її називають «ISO 7 біт». Однак виробники систем ЧПУ хоч і дотримуються цих стандартів для опису основних функцій, але допускають вільності та відступи від правил, коли мова заходить про якісь спеціальні можливості своїх систем.

Системи ЧПУ Fanuc (Японія) були одними з перших, адаптованих під роботу з G- та M-кодами ISO, використовуючи цей стандарт найбільш повно. В даний час стійки Fanuc є дуже популярними і найбільш поширеними як за кордоном, так і в Україні.

Тому надалі основою для опису програмування в G- та M-кодах буде саме стиль СЧПУ Fanuc. Стійки ЧПУ інших відомих виробників, наприклад Heidenhain і Sinumerik (Siemens), також мають можливості по роботі з G-і M-кодами, проте деякі коди все ж таки можуть відрізнятися. Немає необхідності знати всі коди всіх систем ЧПУ.

Достатньо знати набір основних G- і M-кодів, а про різницю в програмуванні специфічних функцій можна дізнатися з документації до конкретної системи. Освоївши стиль програмування Fanuc, швидше за все, ви зможете працювати на будь-якому іншому устаткуванні.

Деякі виробники систем ЧПУ пропонують діалогову мову програмування. Ця мова спрощує спілкування з системою, особливо нових операторів, оскільки основою їй служать англійські речення, скорочення, питання та графічні елементи, які вводяться оператором верстата в інтерактивному режимі.

## **10.2 Основи програмування обробки**

### **10.2.1 Прямокутна система координат**

Перш ніж приступити до створення першої управляючої програми, ви повинні згадати, що таке прямокутна система координат. Адже саме прямокутна система координат (рис. 10.14) є математичною базою програмування обробки.

Понад 300 років тому французький математик Декарт вигадав систему, яка дозволяє людині описати положення будь-якої точки у просторі. У найпростішому випадку прямокутна система координат являє собою дві лінії, що перетинаються під прямим кутом. Ці лінії називаються осями, а точка їх перетину є початком координат.

Осі позначаються літерами X і Y. Координатна система з двома осями X і Y дозволяє описати положення точки на площині. Відстань від початку координат до точки A вздовж осі X є «x» координатою цієї точки. Відстань від початку координат до точки A вздовж осі Y є «y» координатою цієї точки.

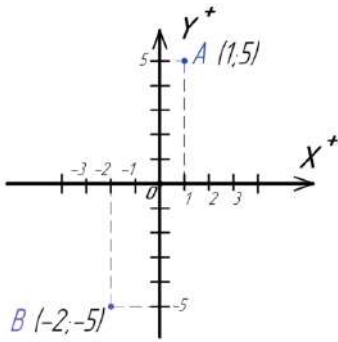


Рисунок 10.14 – Прямокутна система координат на площині

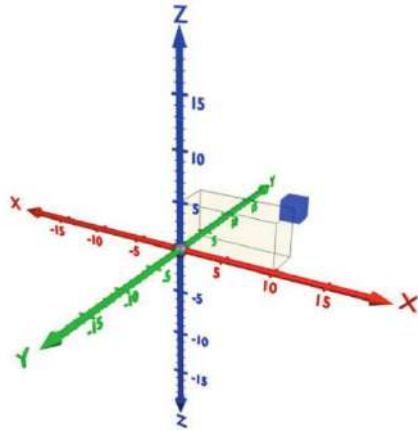


Рисунок 10.15 – Прямокутна просторова система координат

Координати точки прийнято вказувати у дужках. Спочатку пишеться координата по осі X, а потім по осі Y. Таким чином, на рис. 10.14 знаходиться точка A(1; 5). У кожній осі є позитивний та негативний напрямки. Коли координата має негативне значення, це означає, що точка лежить або лівіше початку координат, або нижче.

Наприклад, точка має такі координати:  $x = -2$ ,  $y = -5$ . Якщо точка лежить на осі, то одна з її координат обов'язково дорівнює нулю.

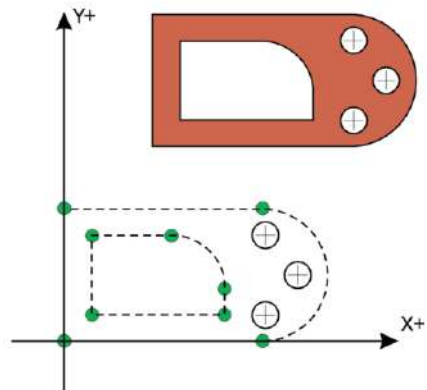


Рисунок 10.16 – Будь-яку деталь можна представити у вигляді сукупності геометричних елементів.

Для створення програми обробки необхідно визначити координати всіх опорних точок

Перетин трьох взаємно перпендикулярних площин утворює тривимірну систему координат, яка використовується для опису положення точки в просторі. До двох осей  $X$  і  $Y$  додається третя вісь  $Z$ . Координати точки також вказуються в дужках і йдуть в алфавітному порядку ( $x$ ;  $y$ ;  $z$ ).

### 10.2.2 Написання простої управляючої програми

Деталі, що обробляються на верстаті з ЧПУ, можна розглядати як геометричні об'єкти. Під час обробки інструмент, що обертається, і заготовка переміщаються один відносно одного по деякій траєкторії. УП описує рух певної точки інструменту – його центру.

Траєкторію інструменту представляють такою, що складається з окремих ділянок, які переходять одна в одну. Цими ділянками можуть бути прямі лінії, дуги кіл, криві другого або вищих порядків.

Точки перетину цих ділянок називаються *опорними*, або *вузловими точками*. Як правило, в УП містяться координати саме опорних точок. Спробуємо написати невелику програму обробки паза, представленого на рис. 10.17÷10.18.

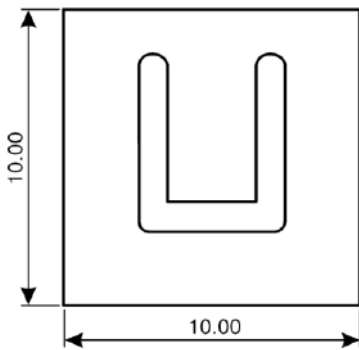


Рисунок 10.17 – Необхідно створити програму для обробки паза. Глибина паза дорівнює 1 мм

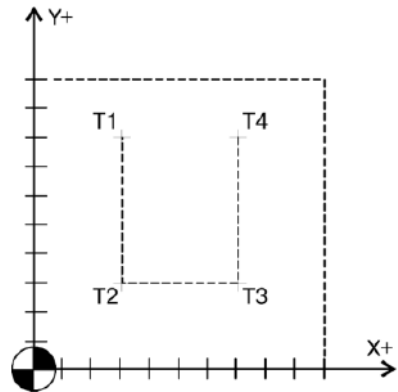


Рисунок 10.18 – Помістимо деталь у прямокутну систему координат і знайдемо координати чотирьох опорних точок

Знаючи координати опорних точок, зробити це нескладно. Ми не будемо докладно розглядати код усієї УП, а звернемо особливу

увагу на написання рядків (кадрів УП), які безпосередньо відповідають за переміщення через опорні точки паза.

Для обробки паза спочатку потрібно перемістити фрезу в точку T1 та опустити її на відповідну глибину. Далі необхідно перемістити фрезу послідовно через усі опорні точки та вивести інструмент вгору з матеріалу заготовки. Знайдемо координати всіх опорних точок паза, та для зручності помістимо їх у табл. 10.1.

Таблиця 10.1 – Координати опорних точок паза

Точка	Координата по осі X	Координата по осі Y
T1	3	8
T2	3	3
T3	7	3
T4	7	8

Підведемо різальний інструмент до першої опорної точки:

N50 G00 X3 Y8

Наступні два кадри змушують інструмент опуститись на необхідну глибину в матеріал заготовки.

N60 G00 Z0.5

N70 G01 Z-1 F25

Як тільки інструмент опиниться на потрібній глибині (1 мм), можна переміщати його через усі опорні точки для обробки паза:

N80 G01 X3 Y3

N90 G01 X7 Y3

N100 G01 X7 Y8

Тепер слід вивести інструмент із матеріалу заготовки – підняти на невелику висоту:

N110 G01 Z5

Зберемо всі кадри разом, додамо кілька допоміжних команд та отримаємо остаточний варіант програми:

Кадри УП	Опис кадру
%	Символ початку програми
O0001 (PAZ)	Номер програми (0001) та її назва (PAZ)
N10 G21 G40 G49 G54 G80 G90	Рядок безпеки
N20 M06 T01 (FREZA D1)	Виклик інструменту №1
N30 G43 H01	Компенсація довжини інструменту № 1
N40 M03 S1000	Увімкнення обертів шпинделя (1000 об/хв)

N50 G00 X3 Y8	Прискорене переміщення в опорну точку T1
N60 G00 Z0.5	Прискорене переміщення інструменту в Z0.5
N70 G01 Z-1 F25	Переміщення на глибину 1 мм на подачі 25 мм/хв
N80 G01 X3 Y3	Переміщення інструменту в точку T2 (25 мм/хв)
N90 G01 X7 Y3	Переміщення інструменту в точку T3 (25 мм/хв)
N100 G01 X7 Y8	Переміщення інструменту в точку T4 (25 мм/хв)
N110 G01 Z5	Підйом інструменту вгору в Z5 (25 мм/хв)
N120 M05	Вимкнення обертів шпинделя
N130 M30	Завершення програми
%	Символ кінця програми

### 10.2.3 Створення УП на персональному комп'ютері

Існують два способи для запису (набору) управляючих програм:

- за допомогою стійки ЧПУ верстата (цехове програмування);
- використовуючи персональний комп'ютер із подальшою передачею у стійку ЧПУ.

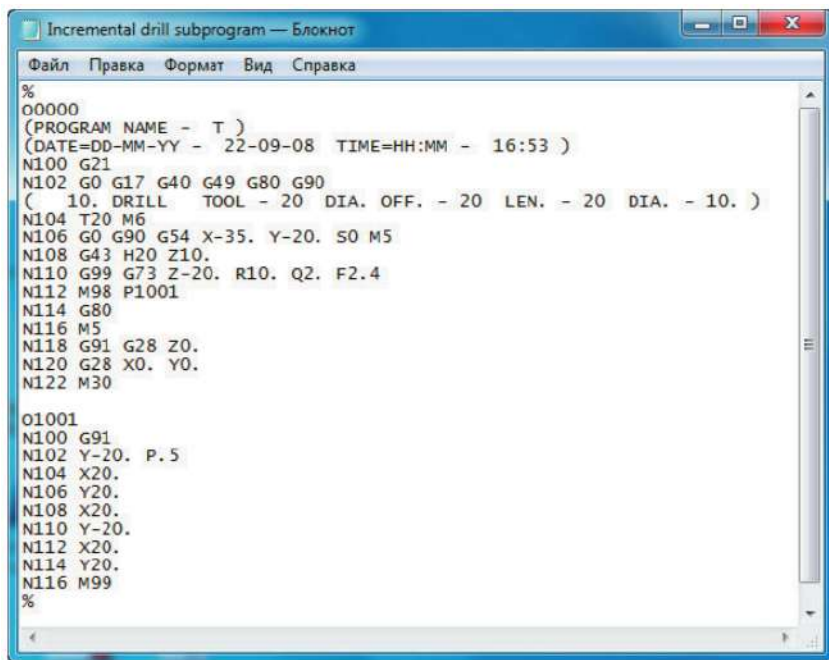


Рисунок 10.19 – Записати УП можна у звичайному текстовому редакторі. Наприклад, у «Блокноті» операційної системи Windows

**Цехове програмування** нині вважається малоефективним і використовується дуже рідко. По-перше, клавіші стійки ЧПУ менш зручні ніж клавіатура ПК. По-друге, програмне забезпечення СЧПУ надає менші можливості щодо редагування програм. По-третє, ручне введення УП в пам'ять СЧПУ фізично заважає оператору запустити процес обробки деталей на цьому верстаті. Виняток становлять, мабуть, лише стійки із вбудованою САМ-системою.

**Набір тексту програми обробки на комп'ютері** з подальшою передачею в СЧПУ верстата є набагато ефективнішим способом роботи. Код УП можна набирати в будь-якому текстовому редакторі і зберігати у відповідному форматі. Наприклад, використовувати всім відомий Блокнот зі стандартного набору операційної системи Windows.

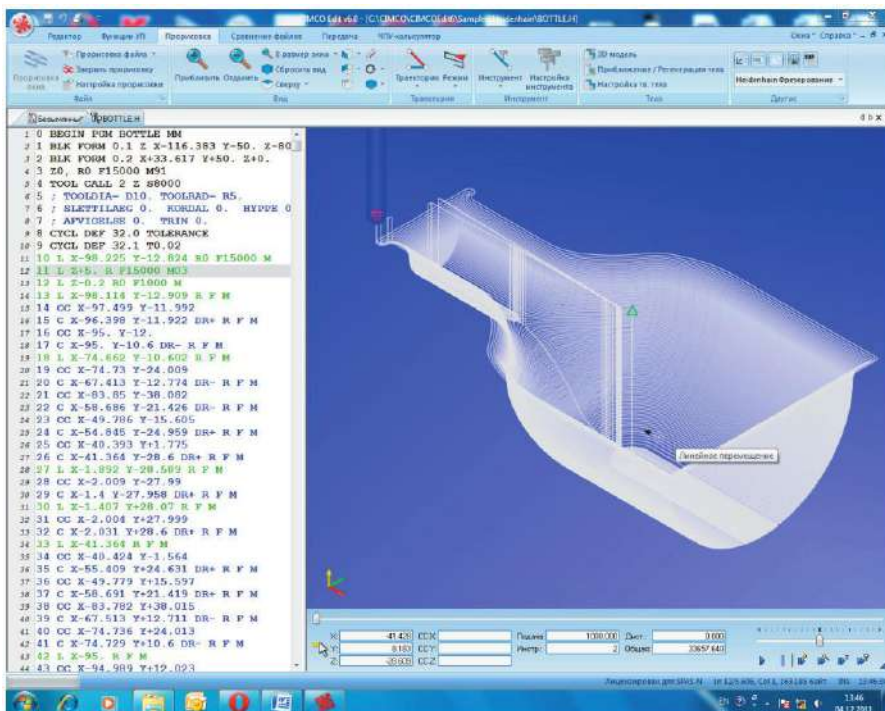


Рисунок 10.20 – Промальовування траєкторії в редакторі Simco Edit

Існує безліч різних текстових редакторів, які були спеціально

створені для роботи з кодами УП. Ці редактори (назвемо їх редакторами УП) надають широкі можливості написання та редагування верстатного коду. Наприклад, вони дозволяють додавати або видаляти пробіли, автоматично нумерувати рядки та переміщувати курсор до коду зміни інструмента. Ці функції не потрібні звичайному текстовому редактору, але дуже корисні під час створення та налагодження програм. Найбільш просунуті редактори УП мають інструменти для графічної перевірки коду та трансляції його на верстат.

Варто зауважити, що деякі текстові редактори зберігають файли в спеціальному форматі, який містить інформацію про розмір шрифту, поля, колір та ін. Код УП не містить таких даних, а складається виключно з «чистого» тексту у форматі Американського стандартного коду для обміну інформацією ASCII (англ. American Standard Code for Information Interchange). Стандарт ASCII є відкритим і може читати будь-який текстовий редактор. Файли такого формату, швидше за все, матимуть розширення ".txt".

Верстати з ЧПУ працюють у форматі G- та M-кодів відповідно до стандартів EIA/ISO. Код цього стандарту аналогічний ASCII, але є низка невеликих відмінностей. Формат ASCII використовує коди закінчення рядка та перекладу каретки в кінці кожного рядка.

У текстовому редакторі для переходу на новий рядок ви просто натискаєте клавішу Enter, але не бачите коду, який переводить вас на новий рядок, хоча насправді він є. Система ЧПУ вимагає, щоб наприкінці кожного кадру УП стояв знак кінця кадру, наприклад (;) чи (\*). Тому якщо ви пишете програму на комп'ютері, вона виглядає так:

```
N50 G00 X230
```

```
N60 G01 Y300
```

```
N70 G01 Z100
```

А якщо та ж програма вводиться прямо зі стійки ЧПУ, то вона, можливо, виглядатиме таким чином (доведеться додати символ кінця кадру в кожен рядок УП):

```
N50 G00 X230;
```

```
N60 G01 Y300;
```

```
N70 G01 Z100;
```

Якщо ви створюєте програму на комп'ютері і потім передаєте її на верстат, знак кінця кадру поміщається в кінець кожного кадру УП при передачі в більшості випадків автоматично.

**Помилка в програмі обробки** може спричинити масу проблем. У кращому випадку помилка обернеться зламанним інструментом або «запоротою» деталлю, а в гіршому – може призвести до пошкодження верстата або травмування оператора.

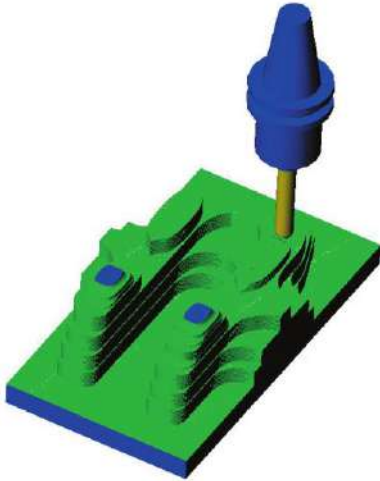


Рисунок 10.21 – Твердотільна верифікація – це зручний і наочний спосіб перевірки управляючої програми

Досвідчений програміст знає, що дешевше та простіше перевірити програму заздалегідь на комп'ютері, ніж помилитися під час обробки на верстаті.

Основний метод перевірки УП на комп'ютері полягає у графічній симуляції обробки. Така симуляція може виглядати як промальовування траєкторії центру інструменту або як повна імітація механічної обробки на верстаті з демонстрацією процесу видалення матеріалу.

У першому випадку програміст може виявити помилку в УП просто спостерігаючи за траєкторією переміщення центру інструменту на моніторі комп'ютера.

Така симуляція називається бекплогом (Backplot). Бекплот дозволяє легко побачити помилку, яку важко розпізнати при простому перегляді коду УП. Порівняйте два варіанти однієї й тієї програми (табл. 10.2). У другому варіанті у кадрі N90 можна помітити, що десяткова точка стоїть не на своєму місці.

Таблиця 10.2 – В одному з кадрів УП допущено помилку

Правильний варіант	Помилковий варіант
N80 G01 X3. Y3.	N80 G01 X3. Y3.
N90 G01 X7. Y3.	N90 G01 X7. Y.3

Програма обробки може мати досить великий обсяг і таку маленьку помилку розпізнати в коді буде вкрай важко. Проте бекплот

вмиль покаже, що траєкторія переміщення інструменту якісно не відповідає тому, що було задумано програмістом.

**Твердотільна верифікація** (від англ. verification – перевірка) є потужним інструментом перевірки УП на комп'ютері. На відміну від бекплоту, програми твердотільної верифікації демонструють процес видалення матеріалу заготовки і дозволяють побачити повний результат роботи УП – модель готової деталі.

На отриману «віртуальну» деталь можна подивитися з різних сторін і зрозуміти, чи всі елементи виконані правильно, чи немає зрізів та зіткнень інструменту із заготовкою.

Бекплот зазвичай використовують у процесі написання та налагодження програми, а твердотільна верифікація – лише на заключному етапі перевірки.

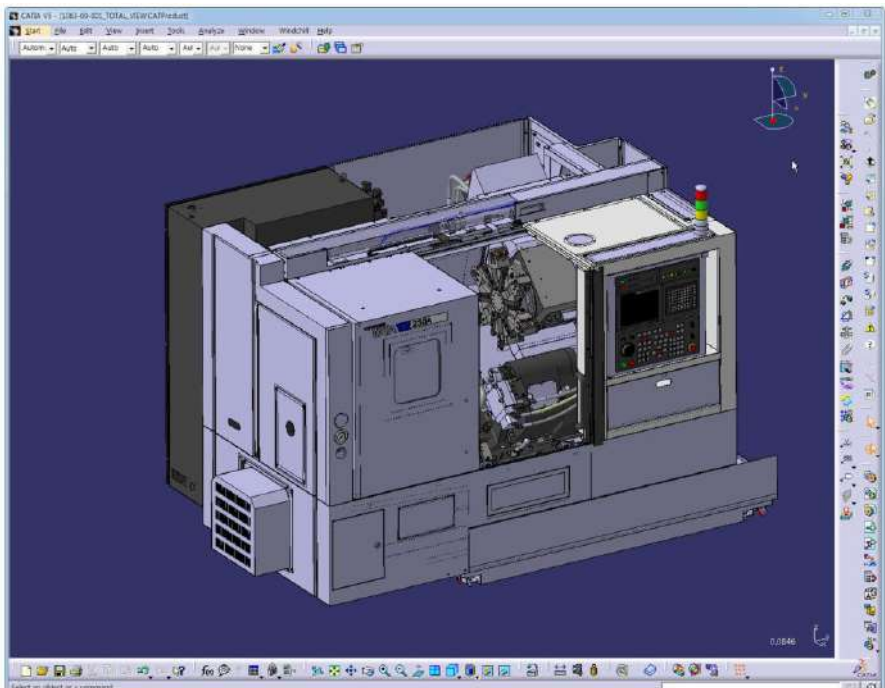


Рисунок 10.22 – Твердотільна верифікація з перевіркою зіткнень вузлів верстата називається симуляцією обробки

## 10.2.4 Передача управляючої програми на верстат

Після того як ви створили та перевірили програму обробки за допомогою ПК, її необхідно передати на верстат. Для передачі УП із комп'ютера до СЧПУ верстата використовується спеціальне комунікаційне програмне забезпечення.

У більшості випадків зв'язок здійснюється відповідно до стандарту RS-232. У цьому СОМ-порт комп'ютера з'єднується кабелем зі спеціальним роз'ємом на корпусі верстата чи панелі УЧПУ. Для передачі даних необхідно, щоб УЧПУ верстата та комунікаційна програма були синхронізовані. Це досягається відповідним налаштуванням параметрів СЧПУ та комунікаційної програми.

Як правило комунікаційна програма та кабель поставляються разом із верстатом, а інформацію про налаштування параметрів СЧПУ для зв'язку верстата та комп'ютера можна отримати з «рідної» документації. Варто враховувати, що при передачі даних відповідно до RS-232 бажано, щоб довжина кабелю не перевищувала 15 метрів.

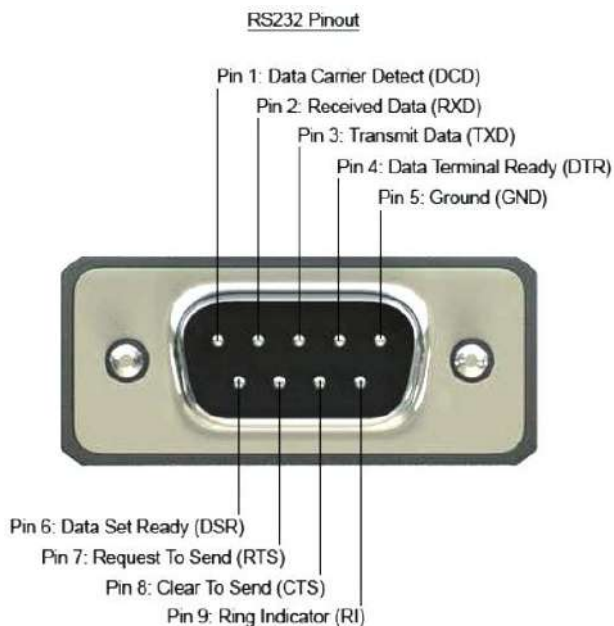


Рисунок 10.23 – Варіант роз'єму RS-232

Для передачі УП розмір яких перевищує розмір вільної пам'яті СЧПУ, використовується режим DNC. Режим DNC, або режим прямого числового управління, дозволяє виконувати програму обробки прямо з комп'ютера, не записуючи її в пам'ять СЧПУ, тобто УП зчитується з комп'ютера в буфер пам'яті – кадр за кадром (точніше, порціями).

Як тільки система визначає, що один кадр виконаний, вона його видаляє та завантажує наступний, і так далі – до кінця програми. Для роботи в режимі прямого числового управління необхідно, щоб СЧПУ верстата була відповідним чином підготовлена виробником, а на персональному комп'ютері була комунікаційна програма з підтримкою DNC-режиму.

Деякі верстати обладнані власними дисководами, що дозволяє передавати УП та інші дані в СЧПУ за допомогою традиційних програмних носіїв - дискет і флеш-карт.

«Просунуті» стійки ЧПУ підтримують роботу в локальній мережі, що дозволяє передавати дані швидше і зручніше, а деякі з них дозволяють виходити в Інтернет і забезпечують можливість дистанційного моніторингу системи та вирішення проблем безпосередньо виробником верстата в режимі реального часу.

### **10.2.5 Перевірка управляючої програми на верстаті**

**Загальні відомості.** Після того як ви написали УП, перевірили її на комп'ютері та передали в пам'ять СЧПУ, необхідно провести тест програми обробки прямо на верстаті. Справа в тому, що не всі помилки, які містяться в програмі, можуть бути розпізнані інструментами верифікації на комп'ютері.

Ви можете легко побачити, що фреза йде не в ту координату, але можете не помітити, що немає команди на включення обертання шпинделя або на подачу змащувальної рідини (MOP).

Але навіть якщо в коді УП немає жодної помилки, оператор верстата може випадково внести до коректора СЧПУ невірні значення довжини та радіусу інструментів або помилитися у «прив'язці» до деталі, що неминуче призведе до браку.

Для того щоб унеможливити будь-яку помилку, перед виготовленням реальної деталі прямо на верстаті роблять пробний прогін, або тестову обробку. У табл. 10.3 наведено типові помилки

програміста або оператора верстата з ЧПУ та їх можливі наслідки.

### Тестові режими верстата з ЧПУ.

Більшість сучасних верстатів з ЧПУ мають тестові режими для додаткової перевірки УП. Основною тестовою функцією є *відпрацювання УП на хлостих ходах* (Dry run). При запуску УП в цьому режимі верстат блокує переміщення виконавчих органів по осі Z, осях X і Y або по всіх осях одночасно.

Таблиця 10.3 – Можливі помилки програміста та оператора

Помилка	Наслідки
Не включена подача МОР при обробці, коли це необхідно	Зіпсований інструмент Погіршення якості поверхні
Неправильні режими різання	Зіпсований інструмент Заготовка зсувається у пристосуванні
В інструментальному магазині верстата знаходиться неправильний інструмент	Деталь з невірними розмірами (брак)
Не ввімкнені оберти шпинделя при обробці	Зіпсований інструмент / Зіпсована заготовка
Неправильний порядок виконання операцій. Наприклад, спочатку нарізання різьби, потім свердління (має бути навпаки)	Зламаний інструмент / Зіпсована заготовка
У коректорах стоять неправильні значення	Зіпсований і інструмент або заготовка / Деталь з неправильними розмірами (брак)
Траскторія переміщення інструменту перетинається з пристосуванням	Зламаний інструмент / Зіпсоване пристосування
При обробці кількох кишень інструмент після обробки першого з них не було повернено в безпечну позицію над деталлю для переміщення до наступної кишені	Зіпсована деталь / Зламаний інструмент
Оператор верстата неправильно «прив'язався» до оброблюваної деталі (неправильно встановлена робоча система координат)	Деталь з невірними розмірами (брак) / Зіпсований інструмент / Зіпсована заготовка

Наприклад, якщо ваш верстат блокує вісь Z, будуть здійснюватися переміщення по осях X і Y, при цьому шпиндель буде обертатися як завжди. Це дозволить вам спокійно подивитись, як працює вся УП, без побоювання «врізатися» у матеріал заготовки.

Взагалі, поведінка верстата в цьому режимі може бути різною,

тому перед роботою в режимі відпрацювання УП на холостих ходах уважно прочитайте інструкцію оператора верстата.

**Режим покадрового відпрацювання** (Single block) призначений для виконання програми обробки по окремих кадрах. СЧПУ зупиняє роботу наприкінці кожного кадру та очікує, коли оператор натисне клавішу «Старт циклу» для виконання наступного кадру.



Рисунок 10.24 – Дуже часто перед справжньою обробкою деталі «піднімають» нульову точку по осі Z та УП «проганяють повітрям»

Користуючись цим режимом, легко побачити, чи інструмент прийшов у правильну позицію або в програмі є помилка. Зазвичай режим покадрового відпрацювання УП застосовується разом із режимом відпрацювання УП на холостих ходах чи «піднятої» нульової точці деталі. Може здатися, що перераховані тестові режими верстата з ЧПУ трохи застаріли в епоху сучасних комп'ютерів та потужних програм верифікації.

З одного боку це так. Але, з іншого боку, ці режими дозволяють новому оператору простіше та спокійніше вчитися програмуванню обробки та реальній роботі на верстаті.

Застосовуються й інші методи цехової перевірки УП. Контролювати правильність переміщень у програмі обробки оператору допомагає екранний режим, який називається **Distance to GO** (Відстань, що залишилася). Багато СЧПУ мають функцію відображення відстані переміщення по кожній з осей, що залишилася.

Перейшовши в цей режим, оператор бачить, скільки міліметрів (дюймів) залишилося переміститися інструменту в поточному кадрі УП. Наприклад, ви знаєте, що фрези необхідно пройти до торкання з поверхнею заготовки по осі Z 50 мм, а в рядку Z екранного режиму **Distance to GO** позначено 100 мм.

Це означає, що фреза пройде зайвих 50 мм і вріжеться в матеріал заготовки. Таким чином, інформація про відстань

переміщення дозволяє оператору порівнювати фактичну і задану відстані переміщення візуально і дає можливість уникнути серйозної помилки. Найчастіше для перевірки УП застосовуються методи, що не використовують в тестовому режимі верстата з ЧПУ. Наприклад, після встановлення робочої системи координат («прив'язування» до деталі) можна підняти нульову точку на безпечну висоту над поверхнею заготовки.

Ця висота має бути трохи більшою, ніж найглибше переміщення інструменту в даній УП. Таким чином, виконання даної програми обробки нічим не відрізнятиметься від заданого, за винятком того, що інструмент «різатиме повітря».

Мабуть, реалістичним способом перевірки УП є справжня обробка «несправжнього» матеріалу. Обробивши заготовки із спеціального воску чи пластику, ви зрозумієте, що насправді робить ваша програма. При цьому можна використовувати дуже високі режими різання і не боятися зламати інструмент або зіпсувати заготовку дорогого металу.

Вибір того чи іншого способу перевірки УП на верстаті залежить від багатьох факторів. Для початківця програміста рекомендується виконувати повну перевірку Професіонал може обмежитися частковою перевіркою або взагалі проводити тести УП тільки на персональному комп'ютері, використовуючи інструменти бекплоту і твердотільної верифікації. При написанні програми та подальшій роботі на верстаті з ЧПУ головне бути уважним і не поспішати, а у разі сумнівів краще звернутися до документації верстата або за порадою до фахівця.

### **Послідовність повної перевірки УП.**

1. Виконайте графічну перевірку коду програми на комп'ютері методами бекплоту та твердотільної верифікації,

2. Здійсніть додаткові перевірки програми та налаштування верстата, а саме переконайтеся що:

- усі прискорені переміщення виконуються над поверхнею заготовки на безпечній відстані;
- в УП номери інструментів та номери коректорів збігаються;
- інструмент, встановлений в інструментальному магазині верстата, відповідає інструменту, описаному в УП;
- інструмент надійно закріплений у патроні;
- у стійці ЧПУ знаходяться правильні значення компенсації

- довжини та радіусу інструментів;
- призначено правильні режими різання;
- шпindelь обертається у правильному напрямку;
- в УП є команда на включення МОР при необхідності ;
- операції обробки виконуються у правильному порядку;
- чернові операції проводяться перед чистовими операціями ;
- заготовка надійно закріплена у пристосуванні;
- інструмент переміщається від одного оброблюваного елемента деталі до іншого на безпечному рівні по осі Z.

3. Виконайте графічну перевірку програми на стійці ЧПК, якщо це можливо.

4. Відпрацюйте УП на холостих ходах:

- увімкніть режим покадрового відпрацювання УП;
- зменшіть швидкість робочої подачі;
- перемістіть нульову точку деталі на безпечну відстань над поверхнею заготовки та проженіть програму «по повітрю».

5. Поверніть нульову точку з безпечного положення в нормальне положення, скасуйте режим покадрового відпрацювання УП та виконайте обробку деталі зі зменшеними робочими режимами.

6. Перевірте розмір деталі. При необхідності проведіть коригування значень довжини та радіусу інструментів або самої програми.

### **Техніка безпеки при експлуатації верстатів з ЧПУ**

Верстат із ЧПУ - це складний агрегат, що складається з різних механічних вузлів, електричних та електронних компонентів. Для забезпечення безпеки уважно ознайомтеся із загальними правилами експлуатації верстатів з ЧПУ.

1. До експлуатації та ремонту верстата допускається лише персонал, ознайомлений з відповідною документацією верстата та СЧПУ.
2. Завжди необхідно користуватися захисними окулярами та спеціальним взуттям. За потреби використовуйте рукавички, пилозахисну маску та засоби захисту слуху.
3. Під час роботи на верстаті не рекомендується носити кільця, годинники, різні прикраси та краватки. Довге волосся має бути зібране і прикрите робочим головним убором.
4. Експлуатація верстата дозволяється лише в тому випадку, якщо ви переконалися, що регулярно проводилося

- обслуговування верстата і що він знаходиться у відмінному технічному стані.
5. Переконатися, що верстат заземлений належним чином.
  6. Не приступати до роботи на верстаті, якщо від нього виходить незвичайне або занадто сильне тепло, шум, спостерігається виділення диму або вібрація. При цьому необхідно терміново звернутися до виробників верстата або до сервісної служби.
  7. Доступ до електричних компонентів верстата дозволяється лише спеціально навченому персоналу.
  8. Не можна застосовувати як очищувачі та МОР отруту й займисті речовини.
  9. Не відкривайте захисні дверцята та кожуха, доки будь-який з пристроїв верстата перебуває в русі.
  10. Зона навколо верстата повинна бути сухою і добре освітленою.
  11. Перед закріпленням інструмента необхідно переконаватися, що всі поверхні пристрою кріплення інструменту чисті.
  12. Не застосовувати у верстаті зношені, ламкі та дефектні інструменти.
  13. Не перевищувати номінальну потужність верстата.
  14. Не залишати інструмент і деталі в місцях, в яких вони могли б стикатися з рухомими частинами верстата.
  15. Регулярно перевіряти рівень мастила та охолоджуючого засобу.
  16. Під час обробки не робити налагодження інструменту або кріплення деталей.
  17. Підтримувати досить безпечну відстань до всіх точок «затискання» (місць вигину шлангів і проводів) і уникати небезпечних ситуацій.
  18. Обов'язково знати розташування клавіш аварійної зупинки верстата.
  19. Не залишати верстат без нагляду під час його роботи.
  20. При контакті з оброблюваними деталями звертати увагу на наявність гострих країв.
  21. Не видаляйте стружку голими руками. Використовувати для цього гачок або інший пристрій, переконавшись у повній зупинці частин верстата. Не очищати верстат за допомогою

- повітряного шлангу.
22. Не намагатися зупинити або загальмувати переміщення виконавчих органів верстата голими руками або за допомогою пристроїв.
  23. Не застосовувати для кріплення інструменту та заготовки дефектні чи брудні патрони, тримачі та пристрої.
  24. Забороняється робити будь-які конструктивні зміни верстата без погодження з виробником верстата або сервісною службою.
  25. Не допускати, щоб під час роботи за верстатом вас відволікали інші люди.
  26. У жодному разі не здійснювати на верстаті операцій, яких ви не розумієте. У разі сумнівів – обов'язково проконсультуватися з фахівцем.
  27. Ніколи не працювати всередині верстата, якщо хтось працює зі стійкою ЧПУ. Перейти в режим редагування Edit для запобігання випадковому переміщенню виконавчих органів верстата.
  28. Приділяти особливу увагу переміщенням на прискореній подачі. Дотримуватись безпечної відстані над поверхнею заготовки для таких переміщень.
  29. Перед початком обробки перевіряти УП усіма доступними способами.

### **10.3 Верстатна система координат**

#### **10.3.1 Нульова точка верстата та напрями переміщень**

Система координат верстата з ЧПУ є головною розрахунковою системою, що визначає переміщення виконавчих органів. Осі координат розташовують паралельно напрямним верстата, що дає змогу при створенні УП легко задавати напрямки і відстані переміщень.

**Права система координат** є стандартною для всіх верстатів з ЧПУ. У цій системі позитивні напрямки координатних осей визначаються за правилом «правої руки». Якщо великий палець вказує позитивний напрямок осі X, вказівний - осі Y, то середній вкаже на позитивний напрямок осі Z.

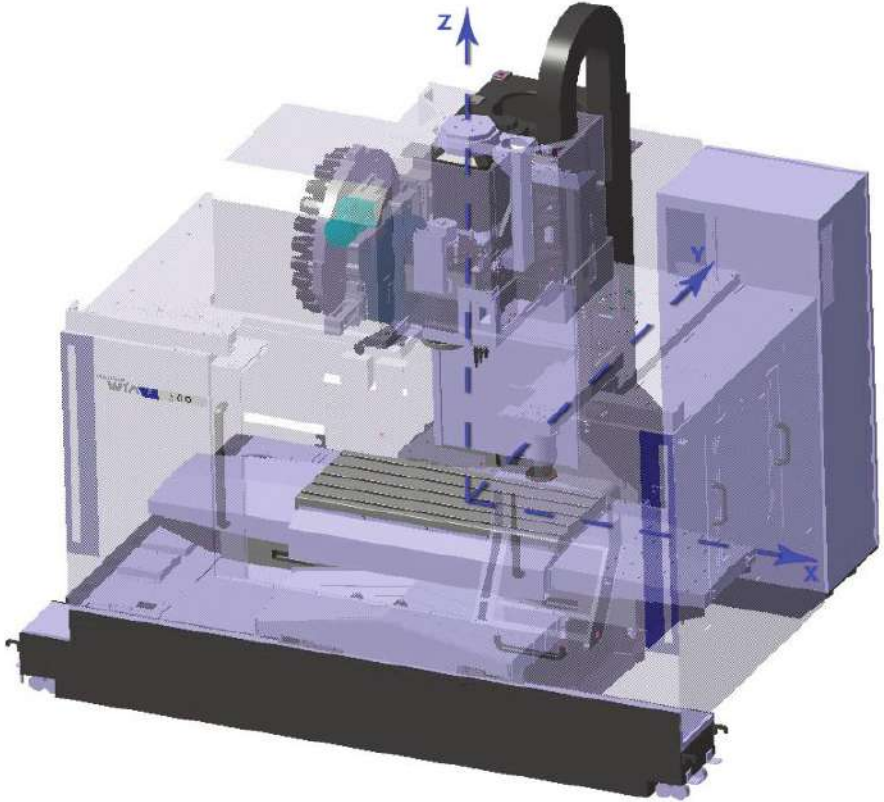


Рисунок 10.25 – Осі координатної системи розташовані паралельно напрямним

За позитивний напрямок осі  $Z$  приймають вертикальний напрямок виведення інструменту (наприклад, свердла) із заготовки. Тобто *вісь  $Z$  завжди пов'язана зі шпинделем верстата*. Як правило, за  $X$  приймають вісь, вздовж якої можливе найбільше переміщення виконавчого органу верстата.

При цьому вісь  $X$  перпендикулярна до осі  $Z$  і паралельна площині робочого столу. Якщо ви визначили на верстаті напрями осей  $X$  та  $Z$ , то за правилом «правої руки» ви однозначно зможете сказати, куди «дивитися» вісь  $Y$ . Осі  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  вказують позитивні напрямки переміщень інструменту щодо нерухомих частин верстата.

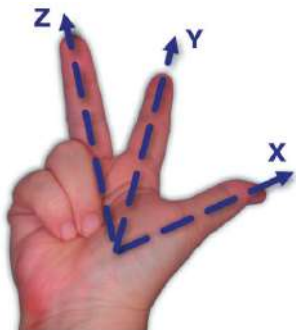


Рисунок 10.26 – Скористайтеся правилом «правої руки» для визначення позитивних напрямків осей координатної системи верстата

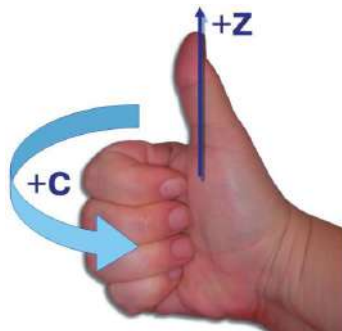


Рисунок 10.27 – Якщо розташувати великий палець правої руки в позитивному напрямку осі, то решта зігнутих пальців позначають позитивний напрямок обертання навколо цієї осі

Під час створення УП програміст завжди виходить із правила, що саме інструмент переміщається щодо нерухомої заготовки. Справа в тому, що одні верстати з ЧПУ дійсно переміщують колону, шпиндель і, відповідно, обертовий інструмент щодо нерухомої заготовки, а інші верстати, навпаки, переміщують робочий стіл із заготовкою щодо інструменту, який обертається.

Отримуємо протилежні напрямки переміщень. Якби не було цього правила, то програміст змушений був би думати: а що, власне, переміщається й у який бік. А так все просто – система ЧПУ сама визначить, в якому напрямку потрібно перемістити той чи інший вузол верстата.

Крім лінійних переміщень конструкція деяких верстатів дозволяє здійснювати кругові переміщення. Під круговим переміщенням мається на увазі, наприклад, поворот осі шпинделя фрезерного верстата. Однак саме робоче обертання шпинделя не входить до цього поняття.

Кругові переміщення інструменту позначають латинськими літерами А (навколо осі X), В (навколо осі Y) і С (навколо осі Z). Позитивні напрямки обертань навколо осей визначаються дуже просто. Якщо розташувати великий палець у напрямку осі, інші зігнуті пальці покажуть позитивний напрямок обертання.

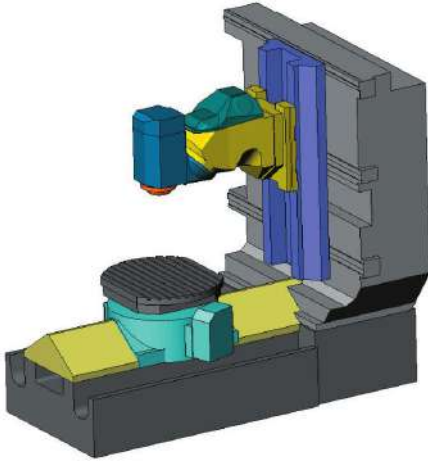


Рисунок 10.28 – Головка цього верстата здатна повертатися навколо своєї осі

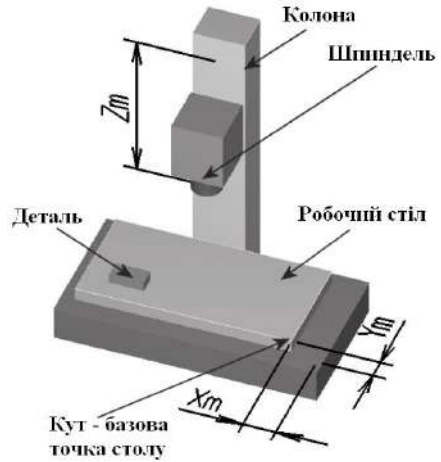


Рисунок 10.29 – Відстані  $X_m$ ,  $Y_m$  і  $Z_m$  від нульової точки верстата до базових точок виконавчих органів визначають машинні позиції

Положення виконавчих органів характеризують їх базові точки, що вибираються з урахуванням конструкції верстата. Наприклад, базовою точкою для шпинделя фрезерного верстата з ЧПУ є точка перетину його торця з власною віссю обертання.

Для робочого столу – точка перетину його діагоналей або один із кутів. Положення базової точки щодо початку координат верстата з ЧПУ (нульової точки верстата) називається **позицією виконавчого органу** в системі координат верстата або **машинною позицією** (від англ. machine - верстат).

При роботі верстата в будь-який момент часу ви можете побачити на екрані стійки ЧПУ поточну машинну позицію (наприклад, робочого столу) по осі щодо «нуля верстата». У документації верстата межі можливих переміщень робочих органів, зазвичай, вказують межами зміщень базових точок.

Ці дані є дуже важливою характеристикою верстата, оскільки вони визначають максимально можливі габарити заготовки, що обробляється. Нульова точка верстата – це фізична позиція, встановлена виробником верстата за допомогою кінцевих вимикачів або датчиків. Після включення верстата необхідно перемістити

виконавчі органи у його нульову точку, щоб СЧПУ змогла визначити чи «обнулити» їх машинну позицію, чи, іншими словами, потрібно синхронізувати СЧПУ і верстат.

Справа в тому, що в момент включення верстата СЧПУ ще не знає реального положення виконавчих органів, і якщо не виконати повернення в нуль, то верстат просто відмовиться працювати. Коли виконавчий орган приходить у нульову точку верстата, відбувається замикання контактів спеціального датчика чи кінцевого вимикача, СЧПУ отримує електричний сигнал і машинна позиція обнуляється.

Процедура повернення в нуль верстата є стандартною і для її здійснення будь-який верстат має спеціальний режим та відповідні клавіші на панелі ЧПУ.

### 10.3.2 Нульова точка програми обробки та робоча система координат

Щоб обробити заготовку на верстаті, необхідно відповідним чином встановити систему координат. Електронна природа СЧПУ дозволяє нам легко поміщати систему координат у будь-яку позицію верстата, просто натискаючи певні кнопки на панелі УЧПУ.

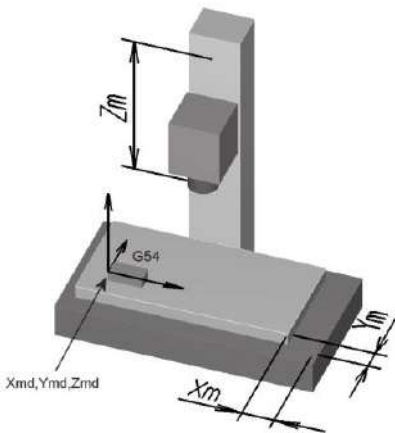


Рисунок 10.30 – Завдання оператора – визначити координати  $X_{md}$ ,  $Y_{md}$ ,  $Z_{md}$

При написанні УП програміст «не забиває» собі голову питанням про те, в якому саме місці робочого столу буде встановлена заготовка. Він знає, що перед виконанням обробки оператор верстата прив'яже до закріпленої на столі заготовки систему координат, в якій створена програма. Інакше кажучи - встановить робочу систему координат чи нульову точку програми (деталі). Зазвичай робочу систему координат по осях  $X$  і  $Y$  встановлюють в один з кутів або центр деталі, а за нуль по осі  $Z$  приймають верхню поверхню деталі.

Це полегшує програмісту виконання розрахунків, а оператору простіше «прив'язуватися» та контролювати під час роботи переміщення інструменту.

Завдання оператора – визначити координати  $X_{md}$ ,  $Y_{md}$ ,  $Z_{md}$  одного з кутів деталі в системі координат верстата та занести їх у реєстри робочих зсувів, наприклад, у G54. Після цього система ЧПУ приймає цей кут за нульову точку розрахунку всіх переміщень за програмою. На відміну від фізичного нуля верстата, нульова точка програми (деталі) є логічною.

Припустимо, потрібно обробити деяку деталь. Програміст вирішив, що нульовою точкою програми по осях  $X$  і  $Y$  буде нижній лівий кут деталі, а осі  $Z$  - верхня площина деталі. Після цього розрахував координати опорних точок, написав програму обробки та повідомив оператора верстата про розташування нульової точки програми. Оператор верстата повинен встановити нульову точку робочої системи координат (нуль програми чи деталі) у визначений програмістом кут деталі.

Для цього потрібно знайти координати цього кута в системі координат верстата (машинні координати) та «пояснити» СЧПУ, що саме ця точка є вихідною для розрахунків усіх переміщень. Тобто можна сказати, що робоча система координат знаходиться усередині системи координат верстата та залежить від неї.

Для знаходження машинної позиції елемента деталі або «прив'язки» використовуються різні методи, про які ви дізнаєтесь трохи згодом.

Після того, як оператор визначив усі координати ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) необхідного кута деталі в системі координат верстата, йому необхідно ввести значення цих координат у реєстри робочих зсувів пам'яті СЧПУ. Під робочим зсувом розуміється відстань від нуля верстата до нуля деталі вздовж певної осі.

Оператор вводить ці координати у пам'ять системи, використовуючи цифрові клавіші стійки ЧПУ. Таким чином, обробка ведеться в новій робочій системі, координати якої відрізняються від відповідних машинних координат величини робочих зсувів. Зверніть увагу на те, що, на відміну від фізичного нуля верстата, нульова точка програми (деталі) є логічною.

Сучасні СЧПУ дозволяють запам'ятовувати безліч зміщень. Завдяки кільком робочим системам координат програміст може

використовувати одну і ту ж УП для обробки кількох закріплених на робочому столі деталей. При цьому немає необхідності виконувати програмування кожної деталі окремо. Натомість СЧПУ просто зміщує робочу координатну систему (нульову точку програми) до наступної деталі, що підлягає обробці.

Для встановлення різних робочих систем координат використовуються відповідні G-коди. У більшості випадків G54 означає першу робочу систему координат, G55 - другу, G56 - третю і т.д. У програмі обробки ви можете побачити, наприклад, такий кадр:

```
N20 G21 G54 G90
```

Кадр N20 активує першу робочу систему координат G54.

**Призначення нульової точки програми** – це важливий крок при створенні управляючої програми. Нульова точка програми встановлюється для реалізації необхідної послідовності та повторюваності обробки. Створення будь-якої УП можна умовно розбити на два етапи.

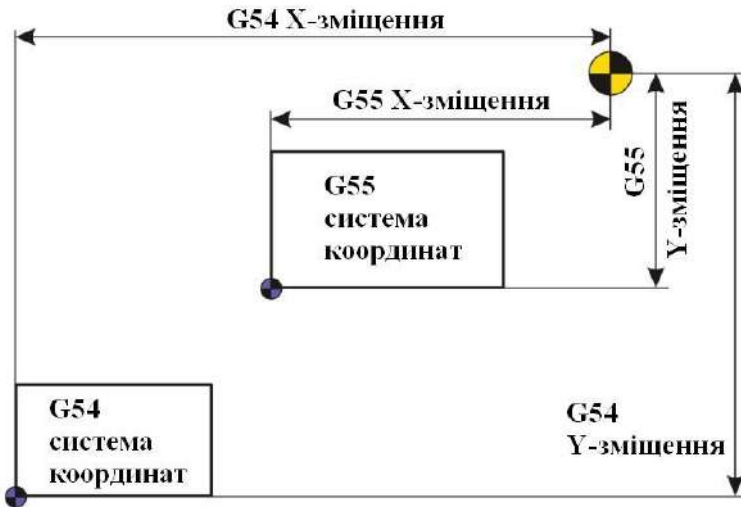


Рисунок 10.31 –Багато верстатів з ЧПУ дозволяють встановлювати кілька робочих систем координат

На першому етапі технолог-програміст аналізує інформацію, отриману з конструкторської (креслення, ескізи) та технологічної документації (маршрутні картки, операційні картки), та, враховуючи

конструкційні та технічні можливості верстата з ЧПУ, остаточно визначає технологічні операції та маршрут обробки, призначає різальний та допоміжний інструменти (рис. 10.32), виявляє комплекти конструкторських та технологічних баз.



Рисунок 10.32 – Магазин інструментів барабанного типу верстата з ЧПУ

І тільки на другому етапі проводяться остаточний розрахунок траєкторії інструменту по опорних точках і створення УП. Виходячи з цього, при призначенні нульової точки програми використовують кілька правил.

Перше, але не основне правило – зручність програмування. Наприклад, якщо розташувати деталь у першому квадранті прямокутної системи координат, то це трохи спростить процес розрахунку траєкторії через те, що всі опорні точки цієї деталі будуть описуватися позитивними координатами.

Друге правило, важливіше – нульова точка програми має збігатися з конструкторською базою. Це означає, що якщо на кресленні розміри стоять від лівого верхнього кута деталі, то точніше, якщо саме в цьому кутку і буде нуль деталі. А якщо розміри

вказуються від центрального отвору, то нулем деталі слід призначити: центр цього отвору.

Якщо заготовка встановлюється в лещата, то ви повинні враховуватися кілька моментів. У лещат є рухлива і нерухома губки. Припустимо, ви встановили нульову точку на поверхні (грані), що примикає до рухомої губки лещат (рис. 10.33, б).

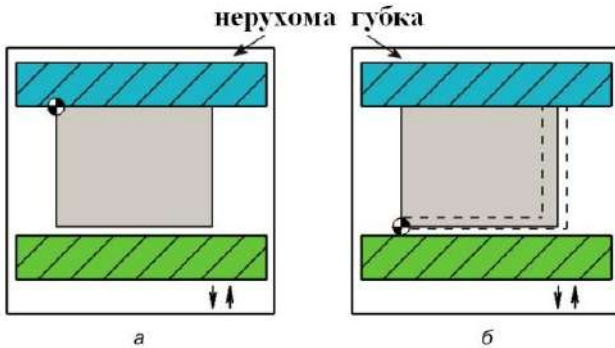


Рисунок 10.33 – Варіанти розташування нульової точки у лещатах

Розміри заготовок можуть трохи відрізнятися, і, відповідно, оператор верстата для отримання правильних розмірів повинен щоразу «переприв'язуватися», тобто заново знаходити координати нульової точки. Якщо ж нульова точка встановлена на поверхні, що примикає до нерухомої губки лещат (рис. 10.33, а), то координати існуючої точки не зміняться за будь-яких відхилень розмірів заготовки.

Найчастіше нульова точка встановлюється щодо вже підготовлених поверхонь. Добре, коли на верстат з ЧПУ приходить заготовка з обробленим зовнішнім контуром. Це дозволяє точно та надійно її закріпити та гарантувати сталість координат нульової точки. Найчастіше для обробки деталі потрібно кілька установ.

Наприклад, спочатку потрібно фрезерувати паз з одного боку деталі, а потім після переустановки – з іншого боку. У цьому випадку необхідно переконатися, що базування здійснюється по одній і тій самій поверхні, інакше існує ймовірність, що ви «промахнетесь» і не забезпечите необхідних розмірів та точності.

Нульова точка вибирається та встановлюється щодо певного

конструктивного елемента деталі. Як правило, цим елементом є один із кутів деталі (заготовки) або центр отвору. Будьте уважні при обробці деталі з декількома установами і завжди відстежуйте розташування базових поверхонь і нульової точки.

### 10.3.3 Компенсація довжини інструменту

При виконанні УП базова позиція шпинделя (точка перетину торця та осі обертання) визначається запрограмованими координатами. Проблема полягає в тому, що в базовій позиції шпинделя обробка різанням не здійснюється.

Обробка виробляється кромкою ріжучого інструменту, яка знаходиться на деякій відстані від базової точки шпинделя. Для того, щоб у запрограмовану координату приходила саме ріжуча кромка, а не шпindel, необхідно «пояснити» СЧПУ, на яку величину по осі Z потрібно змістити цю базову точку.

Перед початком обробки оператор повинен виміряти довжину кожного з інструментів, що використовуються в програмі, і ввести числові значення довжин у відповідні регістри компенсації довжини інструменту (або таблицю інструментів).

Зсув базової точки шпинделя на величину довжини інструмента називається **компенсацією довжини інструменту**. Компенсація довжини інструменту більшості сучасних верстатів активується командою G43, а скасовується з допомогою G49 чи H00.

При створенні УП програміст не вказує напряму значення довжини інструменту (він ще не знає точної довжини), а використовує посилання на відповідний регістр компенсації інструменту в пам'яті СЧПУ. Наприклад, наступний рядок програми активує компенсацію довжини інструмента № 2:

```
N025 G43 H02 Z50.
```

При цьому H вказує на відповідний регістр компенсації довжини. H02 – на регістр інструменту № 2, H03 – на регістр інструменту № 3 і т.д.

Взагалі, компенсація довжини інструменту сильно «спрощує життя» програмісту – йому не потрібно думати про точну довжину інструментів – і це дає можливість оператору верстата, «граючи» значенням у регістрі компенсації довжини, домагатися необхідних розмірів деталі по осі Z.

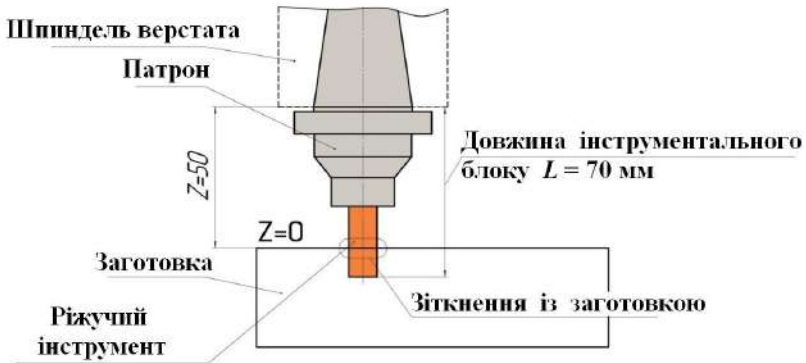


Рисунок 10.34 – Якщо необхідно перемістити інструмент завдовжки 70 мм у Z50, а компенсація довжини інструмента не проведена, то відбудеться небезпечне зіткнення з деталлю



Рисунок 10.35 – Якщо потрібно перемістити інструмент у Z50 і в програмі є код компенсації довжини інструменту, то ріжуча кромка фрези не дійде до поверхні деталі рівно 50 мм

### 10.3.4 Абсолютні та відносні координати

Всі наведені раніше програмні приклади та пояснення ґрунтувалися на програмуванні в абсолютних координатах. При

абсолютному способі програмування координати точок відраховуються від постійного початку координат.

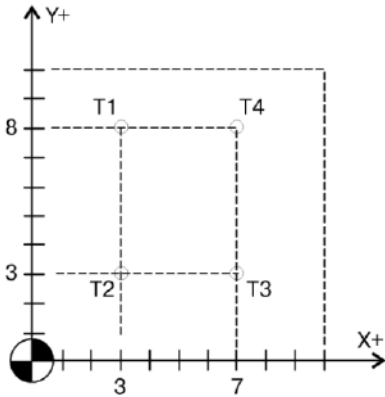


Рисунок 10.36 – За абсолютного способу програмування (G90) координати точок відраховуються від одного «нерухомого» нуля

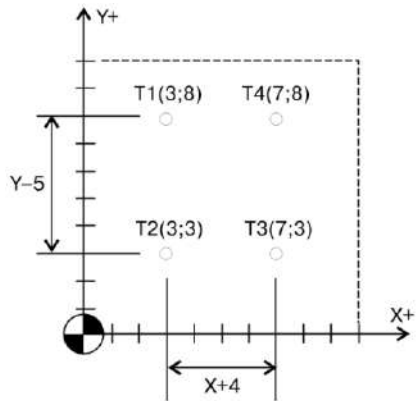


Рисунок 10.37 – Відносний спосіб програмування (G91). Координати точки T2 відлічуються від точки T1, точки T3 – від T2, точки T4 – від T3

При відносному (інкрементальному) способі відліку за нульове положення щоразу приймається положення виконавчого органу, яке він займав перед початком переміщення до наступної опорної точки. Згадаймо найпершу УП для обробки паза. Погляньте на рис. 10.35, та рис. 10.36 та порівняйте значення координат у табл. 10.4.

Таблиця 10.4 – Опорні точки паза при абсолютному та відносному програмуванні

Точка	Абсолютні координати		Відносні координати	
	Координата по осі X	Координата по осі Y	Координата по осі X	Координата по осі Y
T1	3	8	3	8
T2	3	3	0	-5
T3	7	3	4	0
T4	7	8	0	5

З цих прикладів видно, як зміняться координати опорних точок паза та програма обробки при відносному способі програмування.

<b>Абсолютне програмування</b>	<b>Відносне програмування</b>
%	%
O0001 (PAZ ABS)	O0001 (PAZ INCR)
N10 G21 G40 G49 G54 G80 G90	N10 G21 G40 G49 G54 G80 G91
N20 M06 T01 (FREZA D1)	N20 M06 T01 (FREZADI)
N30 G43 H01	N30 G43 H01
N40 M03 S1000	N40 M03 S1000
N50 G00 X3 Y8	N50 G00 X3 Y8
N60 G00 Z0.5	N60 G00 Z0.5
N70 G01 Z1 F25	N70 G01 Z1 F25
N80 G01X3 Y3	N80 G01 X0 Y-5
N90 G01 X7 Y3	N90 G01 X4 Y0
N100 G01 X7 Y8	N100 G01X0Y5
N110 G01 Z0.5	N110 G01 Z0.5
N120 G91 G28 X0 Y0 Z0	N120 G91 G28 X0 Y0 Z0
N130 M05	N130 M05
N140 M30	N140 M30
%	%

Програмування у відносних координатах було обов'язковою умовою при роботі на багатьох верстатах із ЧПУ старих моделей. Сучасні системи ЧПУ дозволяють вільно працювати як з абсолютними, так і з відносними координатами.

Для перемикання з одного режиму роботи в інший використовуються команди G90 (абсолютне програмування) та G91 (відносне програмування). У разі появи однієї координатної помилки за відносного способу програмування всі наступні переміщення будуть неправильними.

### **10.3.5 Коментарі в УП та карта наладки**

Якщо ви працюєте постійно, щодня створюєте хоча б по одній програмі для верстата з ЧПУ, то через деякий час виявите, що у вашому комп'ютері накопичилося багато робочих файлів. Практично неможливо запам'ятати всі технологічні подробиці та нюанси роботи з тією чи іншою програмою.

Оператор верстата обов'язково повинен уявляти, що робить конкретна УП, і мати певну інформацію для налаштування верстата на роботу. Наприклад, де знаходиться нульова точка програми, які різальні інструменти використовуються.

В даний час ця інформація зберігається в основному двома

способами: за допомогою коментарів у програмі та карти налагодження.

**Коментарі** – це звичайні речення, в яких програміст доводить до оператора верстата певну технологічну інформацію. Як правило, у коментарях містяться такі дані:

- дата та час створення УП;
- номер креслення;
- матеріал заготовки;
- дані про робочу систему координат;
- розміри інструменту;
- назви технологічних операцій.

Для того, щоб ввести коментарі в УП, необхідно використовувати спеціальні символи (знаки) програмування. В якості символів для більшості СЧПУ застосовуються круглі дужки або крапка з комою. Перед символами коментарів не прийнято ставити номер кадрів, якщо коментарі займають кадр повністю.

(TOOL #3)

або

; TOOL #3

У систем ЧПУ можуть існувати різні обмеження на роботу з коментарями. Наприклад, деякі стійки дозволяють вводити коментарі довжиною до 32 символів. Слід також пам'ятати, що існують верстати, які мають повнорозмірну клавіатуру, яка дозволяє вводити коментарі прямо зі стійки ЧПУ, та верстати з обмеженою клавіатурою, СЧПУ яких не дозволяє вводити та редагувати коментарі.

Більшість СЧПУ працюють з латинськими літерами, тому якщо ви писатимете коментарі українською (за допомогою ПК), то можливо, що на верстаті вони будуть нечитабельними. При роботі на верстатах з ЧПУ можуть використовуватися такі види документації: операційна картка, картка операційних ескізів, картка наладки верстата, картка наладки інструменту, розрахунково-технологічна картка.

В даний час багато підприємств використовують формальний підхід до застосування подібної стандартизованої документації, використовують карту наладки довільної форми. Виходячи з цього, можна сказати, що карта наладки – це документ, який містить всю необхідну технологічну інформацію для налаштування верстата на певну роботу, включаючи ескіз деталі та пристосування, опис

ріжучого інструменту, положення нульової точки програми, режимів та часу обробки.

### Приклад УП із коментарями

```
%  
00045 (SKOBA)  
(MATERIAL – ALUMINUM MM – 2024) (DATE–NOV–2023–04)  
(TIME – 16:43)  
(T2 | FREZA | H2 | D2 | D20.0000mm || CONTOUR...)  
(T4 | SVERLO | H4 | D4 | D10.0000mm || PECK DRILL.)  
N100 G00 G17 G21 G40 G49 G80 G90  
N102 (FREZEROVANIE)  
N104 T2  
N106 M06(FREZA20)  
N108 (MAX | Z100.)  
N110 (MIN | Z–3.)  
N112 G00 G90 G54 X–76.761 Y–42.321 S2000 M03  
N114 G43 H2 Z100.  
N116 Z10.  
N118 G01 Z–3. F250.  
N120 Y55.302  
N122 X81.529  
N124 Y–42.321  
N126 X–76.761  
N128 Z7.  
N130 G00 Z100.  
N136 M01  
N138 (SVERLENIE)  
N140 T4  
N142 M06 (SVERLO 10)  
N144 (MAX | Z100.)  
N146 (MIN I Z–5.)  
N148 G00 G90 G54 X–63.052 Y44.772 S1200 M03  
N150 G43 H4 Z100.  
N152 G98 G83 Z–5. R10. Q2. F45.  
N154 X–40.798 Y53.25  
N156 X8.213 Y47.421  
N158 X52.19 Y49.806  
N160 G80  
N162 M05  
N168 G90  
N170 M30  
%
```

Така карта наладки допомагає згадати про те, як потрібно обробляти ту чи іншу деталь через деякий час, коли програміст та

оператор верстата з ЧПУ встигли забути технологічні особливості виготовлення деталі. Слід зазначити, що коментарі в УП та карта наладки не замінюють одна одну, а використовуються спільно.

Карту наладки можна створити за допомогою звичайного аркуша паперу та олівця. Спробуйте схематично зобразити деталь, нульову точку та елементи кріплення. Не забудьте записати порядок операцій та дані різального інструменту. Багато CAD/CAM–систем автоматично генерують карту наладки та інструментальну карту, в якій містяться докладні відомості про застосовуваний в даній УП ріжучий інструмент.

## **10.4 CAD/CAM**

### **10.4.1 Методи програмування**

Існують три методи програмування обробки для верстатів з ЧПУ:

- ручне програмування;
- програмування на пульті ЧПУ;
- програмування за допомогою CAD/CAM–системи.

Ви вже напевно, помітили, що ручне програмування є досить стомлюючим заняттям. Проте всі технологи–програмісти повинні мати гарне уявлення про техніку ручного програмування незалежно від того, як насправді вони працюють.

Це як початкові класи у школі, навчання у яких дає основу наступної освіти. У нашій країні існує чимало підприємств, у яких використовується метод ручного програмування. Справді, якщо завод має кілька верстатів з ЧПУ, а деталі, що виготовляються, прості, то грамотний програміст здатний досить успішно працювати і без засобів автоматизації власної праці.

Метод програмування на пульті ЧПУ набув особливої популярності лише останніми роками. Це пов'язано з технічним розвитком систем ЧПУ, поліпшенням їхнього інтерфейсу та можливостей. У цьому випадку програми створюються та вводяться прямо на стійці ЧПУ з використанням клавіатури та дисплея. Сучасні системи ЧПУ справді дозволяють працювати дуже ефективно.

Наприклад, оператор верстата може зробити верифікацію УП або вибрати необхідний постійний цикл за допомогою спеціальних

піктограм та вставити його в код УП. Деякі системи ЧПУ пропонують діалогову мову програмування, яка значно спрощує процес створення УП, робить «спілкування» з ЧПУ зручним для оператора.

Третій метод – програмування за допомогою CAD/CAM–системи – дозволяє «підняти» процес написання програм обробки на більш високий рівень. Працюючи з CAD/CAM–системою, технолог–програміст позбавляє себе трудомістких математичних розрахунків і отримує інструменти, що значно підвищують швидкість написання УП.

#### **10.4.2 Що таке CAD та CAM?**

Сьогодні для досягнення успіху на ринку промислове підприємство змушене працювати над скороченням терміну випуску продукції, зниженням її собівартості та підвищення якості. Стрімкий розвиток комп'ютерних та інформаційних технологій призвело до появи CAD/CAM/CAE–систем, які є найпродуктивнішими інструментами для вирішення цих завдань.

Під CAD–системами (Computer Aided Design – комп'ютерна підтримка проектування) розуміють програмне забезпечення, яке автоматизує працю інженера–конструктора та дозволяє вирішувати завдання проектування виробів та оформлення технічної документації за допомогою персонального комп'ютера.

CAM–системи (Computer Aided Manufacturing – комп'ютерна підтримка виготовлення) автоматизують розрахунки траєкторій переміщення інструменту для обробки на верстатах з ЧПУ і забезпечують видачу управляючих програм за допомогою комп'ютера.

CAE–системи (Computer Aided Engineering – комп'ютерна підтримка інженерних розрахунків) призначені для вирішення різних інженерних завдань, наприклад для розрахунків конструктивної міцності, аналізу теплових процесів, розрахунків гідравлічних систем та механізмів.

Розвиток CAD/CAM/CAE–систем триває вже кілька десятиліть. За цей час стався певний поділ, чи, точніше, «ранжування» систем на рівні. З'явилися системи верхнього, середнього та нижнього рівнів.

Системи верхнього рівня мають величезний набір функцій і можливостей, але з ними важче працювати. Системи нижнього рівня мають досить обмежені функції, але дуже прості у вивченні.

Системи середнього рівня – це «золота середина». Вони забезпечують користувача достатніми для вирішення більшості завдань інструментами, при цьому не складні для вивчення та роботи.

### 10.4.3 Загальна схема роботи з CAD/CAM-системою

Етап 1. У CAD-системі створюється електронне креслення або 3D-модель деталі.

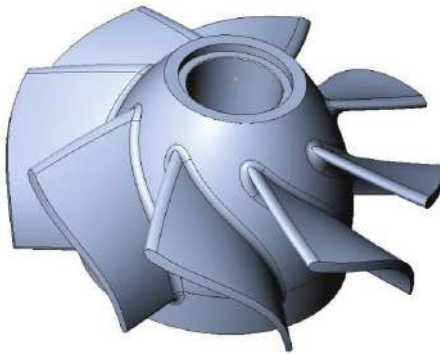


Рисунок 10.38 – Тривимірна модель деталі

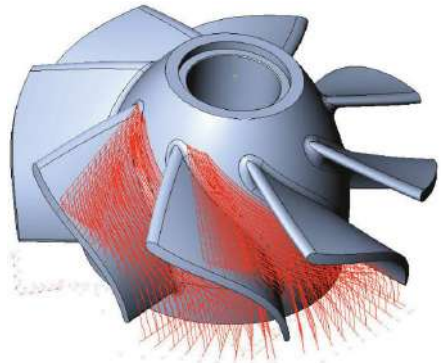


Рисунок 10.39 – CAM-система розрахувала траєкторію

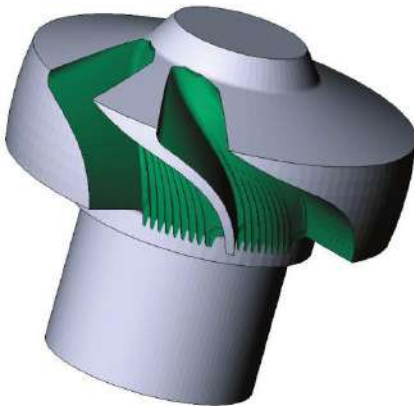


Рисунок 10.40 – Результат верифікації траєкторії

Етап 2. Електронне креслення або 3D-модель деталі імпортується до CAM-системи.

Технолог-програміст визначає поверхні та геометричні елементи, які необхідно обробити, вибирає стратегію обробки, ріжучий інструмент та призначає режими різання.

Система здійснює розрахунки траєкторій переміщення інструменту.

Етап 3. У CAM-системі проводиться верифікація створених траєкторій.



з'єднання геометричних елементів відбувається створення «електронного креслення». Для повноцінної роботи з плоскою графікою в САМ-системі потрібна додаткова інформація про глибину геометрії.

**Каркасна модель** представляє геометрію деталі у тривимірному просторі, описуючи положення її контурів та граней. Каркасна модель, на відміну від плоского електронного креслення, надає САМ-системі часткову інформацію про глибину геометрії.

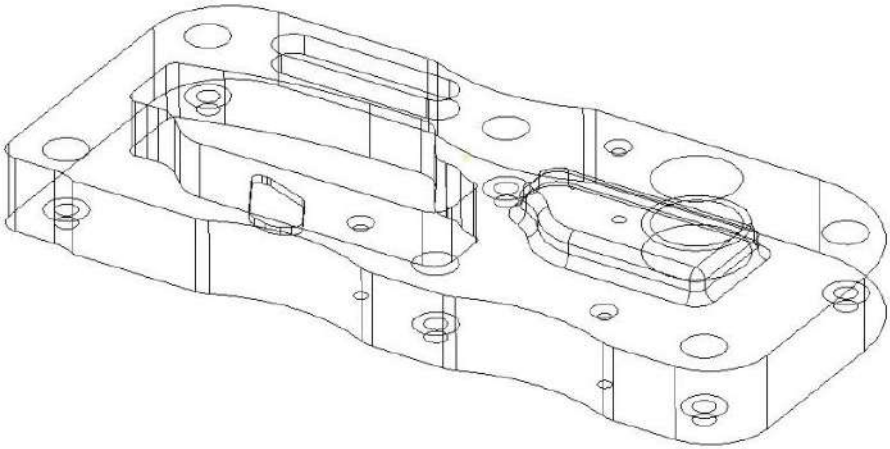


Рисунок 10.42 – Каркасна модель

З розвитком автомобільної та авіаційної промисловості та необхідністю аналітичного опису деталей складної форми на ПК, сформувалися основні передумови переходу від плоского до об'ємного моделювання. Об'ємна, або 3D-модель, призначена для однозначного визначення геометрії всієї деталі.

Системи об'ємного моделювання базуються на методах побудови поверхонь і твердотільних моделей на основі плоских та неплоских ескізів. Ескіз, у свою чергу, складається з простих геометричних елементів – ліній, дуг та кривих. Інженер–конструктор приймає в якості ескізів перерізу, види та осьові лінії деталей.

**Поверхнева модель** дуже схожа на каркасну. Уявіть, що між гранями каркасної моделі натягнута тонка тканина. Це і буде поверхневою моделлю. Таким чином, будь–який виріб може бути

представлений у вигляді набору обмежуючих поверхонь. В даний час поверхневі моделі широко використовуються для роботи з САМ-системами, особливо коли йдеться про інструментальне виробництво.

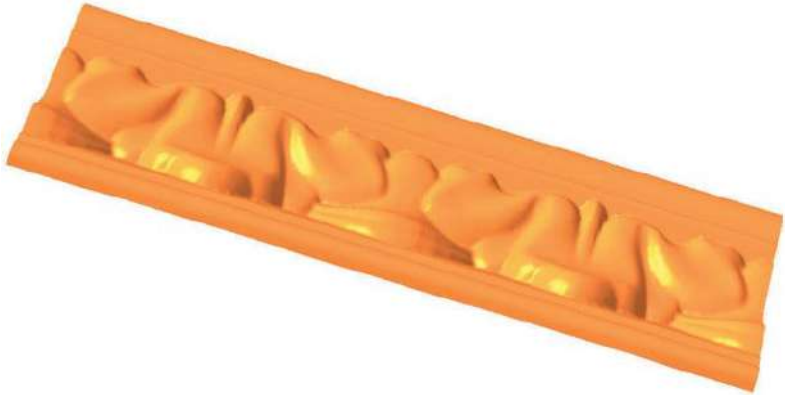


Рисунок 10.43 – Поверхнева модель

При *твердотільному способі моделювання* основними інструментами є тіла, створені з урахуванням ескізів. Для побудови твердого тіла використовуються такі операції, як видавлювання, вирізання та обертання ескізу.

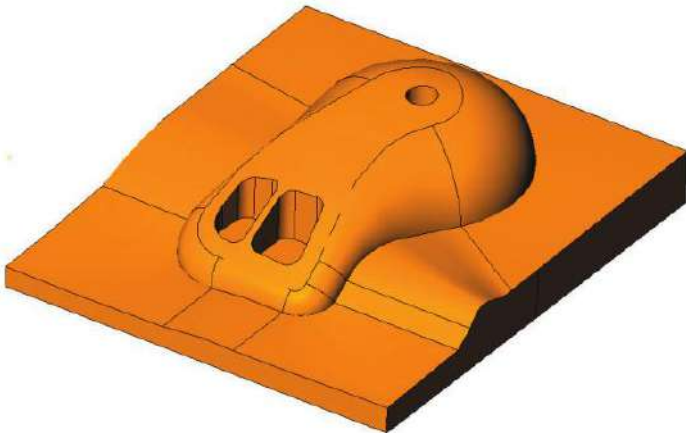


Рисунок 10.44 – Твердотільна модель

Бульови операції дозволяють складати, віднімати та поєднувати

різні тверді тіла для створення 3D-моделі деталі. На відміну від поверхневих моделей, твердотільна модель не порожня всередині. Вона має деяку математичну щільність і масу. На сьогоднішній день твердотільні моделі – це найпопулярніша основа для розрахунку траєкторій у САМ–системі.

Однією з головних переваг цього є так звана параметризація. **Параметризація** означає, що в будь-який момент ви можете змінити розміри і характеристики твердого тіла, просто змінивши числові значення відповідних параметрів.

Сучасна САМ–система повинна мати інструменти для створення як поверхневих, так і твердотільних моделей.

#### **10.4.5 Рівні САМ–системи**

САМ–система призначена для автоматичного створення управляючих програм, на основі геометричної інформації, підготовленої в САМ–системі. Головні переваги, які отримує технолог при взаємодії із системою, полягають у наочності роботи, зручності вибору геометрії, високій швидкості розрахунків, можливості перевірки та редагування створених траєкторій.

Різні САМ–системи можуть відрізнятися одна від одної областю застосування та можливостями. Наприклад, існують системи для токарної, фрезерної, електроерозійної обробки, деревообробки та гравіювання. Незважаючи на те, що більшість сучасних САМ–систем вміють створювати УП для будь-якого типу виробництва, такий поділ по сферах застосування залишається актуальним.

Якщо підприємству потрібна фрезерна обробка, воно купує модуль фрезерування. Якщо ж потрібна тільки токарна обробка, достатньо придбати токарний модуль цієї ж системи. Модульність побудови САМ–систем є частиною маркетингової політики розробників і дозволяє підприємству–користувачу заощаджувати значні кошти на придбанні лише необхідних конструкторсько–технологічних можливостей.

У свою чергу, модулі системи відрізняються певним рівнем можливостей. Зазвичай для фрезерної обробки розробники вводять такі рівні:

- **2.5–осьова обробка.** На цьому рівні система дозволяє розраховувати траєкторії для простого двокоординатного

- фрезерування та обробки отворів;
- **триосьова обробка з позиціонуванням 4-ої осі.** На цьому рівні ви зможете працювати із 3D-моделями. Система здатна генерувати УП для об'ємної обробки;
- **багатоосьова обробка.** У цьому випадку система призначена для роботи з найсучаснішим обладнанням та здатна створювати УП для 5-осьового фрезерування найскладніших деталей.

Чим вище рівень модуля, тим більше можливості він має. Очевидно, що для розробки алгоритмів 5-координатної обробки потрібні більші інвестиції (як фінансові, так і інтелектуальні), ніж для розробки алгоритмів 3-координатної обробки. Отже, і вартість модулів буде різною. Якщо у вашого підприємства немає обладнання для 5-координатної обробки, то немає сенсу купувати найдорожчий модуль.

#### 10.4.6 Геометрія та траєкторія

Перш ніж розпочати роботу з CAD/CAM-системою, ви повинні зрозуміти, що геометрія деталі, виготовленої на верстаті з ЧПУ, може відрізнятись від справжньої геометрії CAD-моделі. Безперечно, що 3D-модель служить базою для розрахунку траєкторій, але готова деталь є результатом роботи CAM-системи та верстата з ЧПУ, які по своєму інтерпретують вихідну геометричну інформацію.

Візьмемо еліпс, який може бути створений у будь-якій CAD-системі дуже просто – достатньо пари кліків мишкою. Однак верстат з ЧПУ не здатний безпосередньо описати еліпс, адже він вміє переміщати інструмент лише прямою або дугою.

CAM-система знає це і вирішує проблему за допомогою апроксимації еліпса прямими лініями з певною точністю. В результаті траєкторію еліпса можна отримати і на верстаті з ЧПУ, але вже за допомогою лінійної інтерполяції.

Програміст сам встановлює обмежувальну зону для апроксимації, тобто визначає, з якою точністю потрібно «наблизитися» до вихідної геометрії. Чим вище задана точність, тим більше буде вироблено окремих сегментів і тим більший розмір матиме програма обробки. Особливо яскраво цей ефект проявляється під час обробки 3D-моделей.

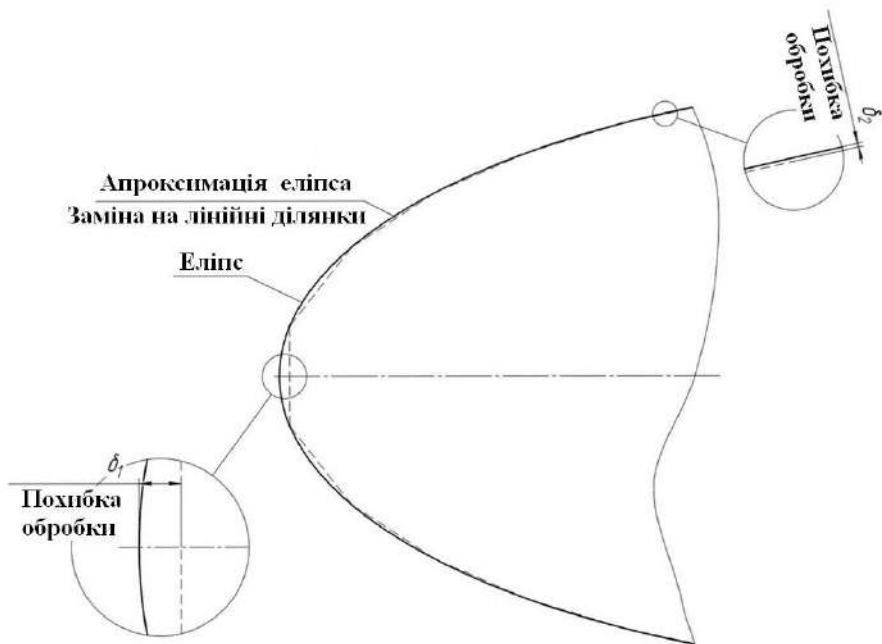


Рисунок 10.45 – Лінійна апроксимація еліпса в САМ–системі виконується із заданою точністю

### 10.4.7 Алгоритм роботи у САМ–системі

Незважаючи на те, що сьогодні існує не один десяток САМ–систем і всі вони відрізняються інтерфейсом і можливостями, порядок роботи з ними приблизно однаковий.

#### **Вибір геометрії.**

Найпершою дією технолога–програміста є вибір геометричних елементів, що підлягають обробці. Такі геометричні елементи називаються робітниками, або оброблюваними. Це можуть бути точки, лінії, поверхні, грані та ребра 3D–моделей.

Сучасні САМ–системи дозволяють контролювати переміщення інструменту не тільки щодо робочих елементів, а й щодо інших геометричних елементів. Можна вибрати контрольовані елементи, яких інструмент не повинен торкатися за жодних умов.

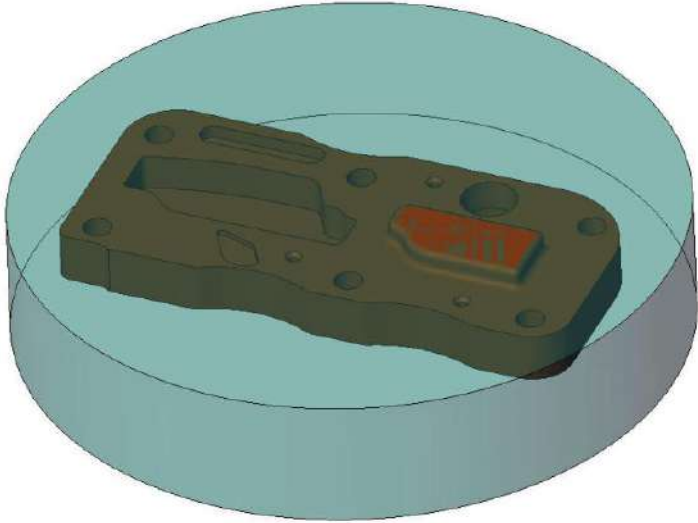


Рисунок 10.46 – Циліндрична заготовка

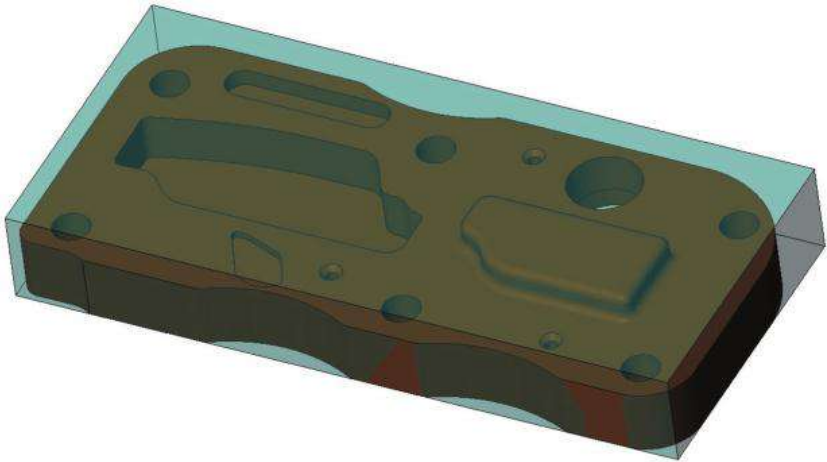


Рисунок 10.47 – Заготовка у вигляді паралелепіпеда

Деякі САМ–системи вимагають визначення геометрії заготовки на початковому етапі проектування обробки. Це означає, що система «бачить» заготовку та розраховує траєкторії, виходячи з дійсного припуску. Заготовка може бути визначена декількома способами:

- у вигляді циліндра;
- у вигляді паралелепіпеда (куба);
- довільної форми.

Для побудови заготовок складних форм, що імітують виливки та поковки, САМ-система може створювати моделі заготовок, зміщуючи зовнішні межі 3D-моделі деталі на вказану відстань. Більшість сучасних САД/САМ-систем дозволяють імпортувати 3D-модель заготовки, яка була створена в іншій або цій же системі

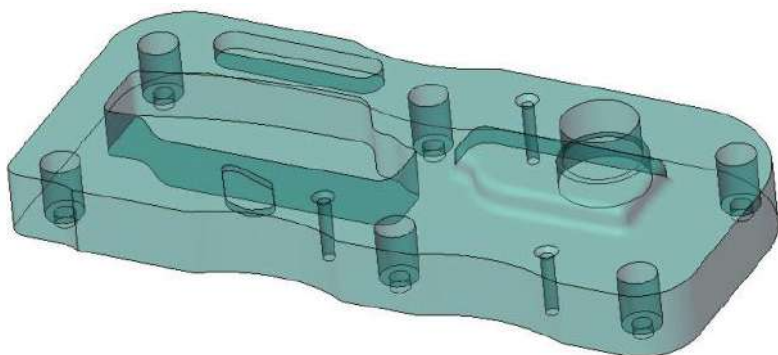


Рисунок 10.48 – Зміщення зовнішніх меж 3D-моделі деталі на вказану відстань

Існують системи, які **не вимагають визначення геометрії заготовки на цьому етапі**. Заготовка призначається і використовується тільки на етапі верифікації і не бере участь у розрахунку траєкторій. Таке рішення є недостатньо ефективним, тому що при розрахунках система завжди виходить із заготовки правильної форми – паралелепіпеда або циліндра. Якщо ж насправді заготовка має неправильну форму, то система може сформувати досить багато холостих ходів інструмента.

Вибираючи геометричні елементи, що підлягають обробці, технолог-програміст повинен враховувати положення деталі та заготовки щодо нульової точки. Тут є два шляхи. По-перше, можна змістити 3D-модель деталі щодо нульової точки таким чином, щоб вибраний елемент збігся з нею.

По-друге, можна зміщувати нульову точку щодо моделі, «прив'язуючи» її до певного геометричного елемента. Однак це не

означає, що початковий вибір нульової точки є остаточним. Система дозволяє змінювати будь-які параметри, у тому числі і положення нульової точки деталі, будь-якої миті і на будь-якому етапі проектування обробки.

#### **10.4.8 Вибір стратегії та інструменту, призначення параметрів обробки**

На другому етапі роботи з САМ-системою технолог-програміст вибирає стратегію та параметри обробки, призначає інструмент та режими різання. Сучасна система зазвичай має солідний набір стратегій і дозволяє виконати обробку однієї і тієї ж деталі різними способами.

Умовно всі стратегії можна розділити на чернові та чистові, стратегії плоскої та об'ємної обробки. Розглянемо стратегії, характерні більшості сучасних САМ-систем.

##### **Плоска обробка.**

Стратегії плоскої обробки застосовуються під час роботи з 2D-геометрією. У цьому випадку не потрібно великої різноманітності – вся обробка зводиться до фрезерування контуру або площини, вибірки кишені та обробки отворів (рис. 10.49–10.52).

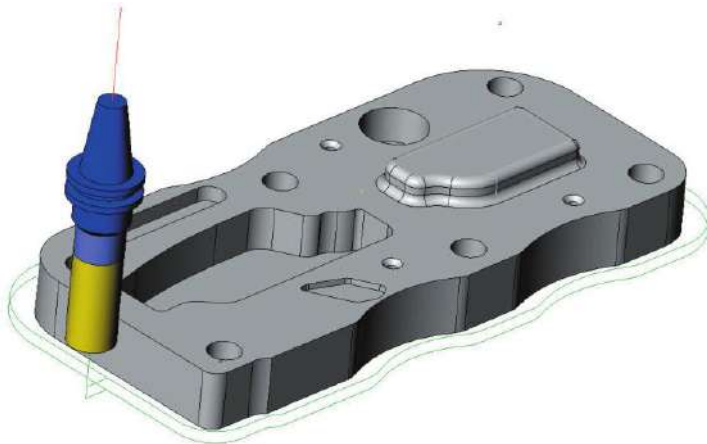


Рисунок 10.49 – Для чорнового фрезерування вказуються кількість проходів і крок між ними (перекриття)

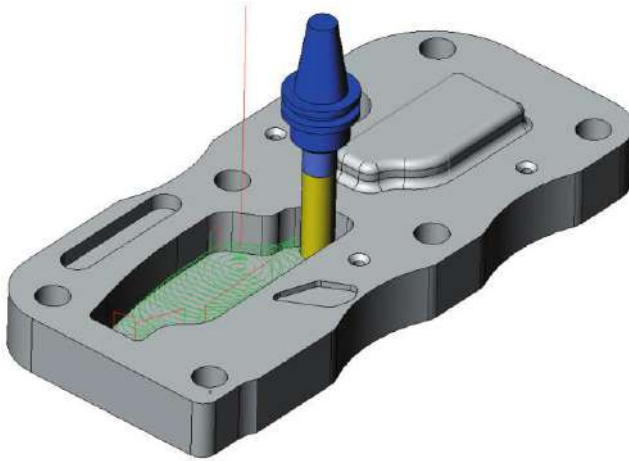


Рисунок 10.50 – Обробка кишені (Pocket): вибірка замкнутих областей; основними параметрами є крок між проходами фрези і тип траєкторії (паралельна, спіральна, зигзаги тощо)



Рисунок 10.51 – Обробка торця (Face): основними параметрами для цієї стратегії є крок між проходами фрези і кут обробки

### **Об'ємна обробка.**

Стратегії об'ємної обробки призначені для роботи з 3D-моделями. Ці стратегії відрізняються великою різноманітністю, проте вони умовно можуть бути розділені на чернові і чистові.

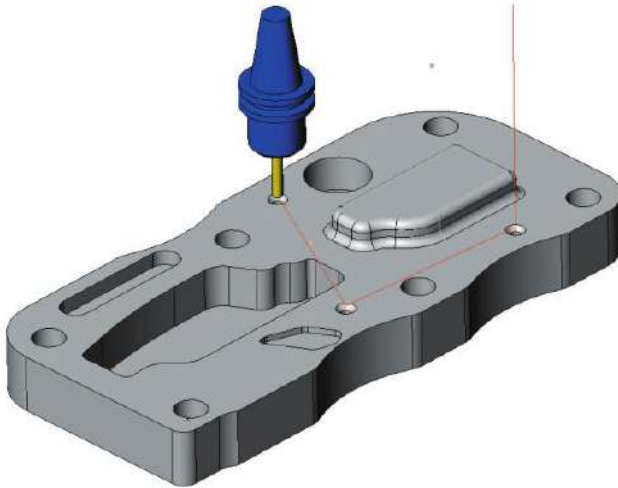


Рисунок 10.52 – Обробка отворів: свердління (Drill), нарізання різьби (Threading), розточування (Boring); основні параметри – тип операції та глибина обробки

**Стратегії об'ємної чорнової обробки** призначені для швидкої пошарової вибірки великого об'єму матеріалу та підготовки деталі до подальшої чистової обробки. **Стратегії об'ємної чистової обробки** застосовуються для остаточного фрезерування поверхонь з необхідною якістю.

Найчастіше це при об'ємному чистовому фрезеруванні управління переміщенням ріжучого інструменту здійснюється одночасно мінімум за трьома координатами. Як правило, при об'ємній обробці використовують сферичні фрези. У цьому випадку розрахувати переміщення інструменту самостійно, без використання CAD/CAM-системи надзвичайно важко.

В якості прикладу, далі ми розглянемо деякі стратегії об'ємної обробки більш докладно.

**Обробка кишень** – стратегія, призначена для ефективного видалення матеріалу із закритих або відкритих кишень. Існує безліч схем кишенькової обробки: зигзаг, в одному напрямку, паралельна та кругова спіраль. Сучасна CAD/CAM-система вибирає оптимальну схему фрезерування, забезпечуючи максимальну продуктивність та

мінімальну кількість холостих ходів. Як правило, ця стратегія полягає в послідовній пошаровій вибірці матеріалу та виконанні заключного чистового обходу контуру на остаточній глибині. При зигзагоподібній схемі обробки кишені відбувається зміна виду фрезерування – із зустрічного на попутне чи навпаки.

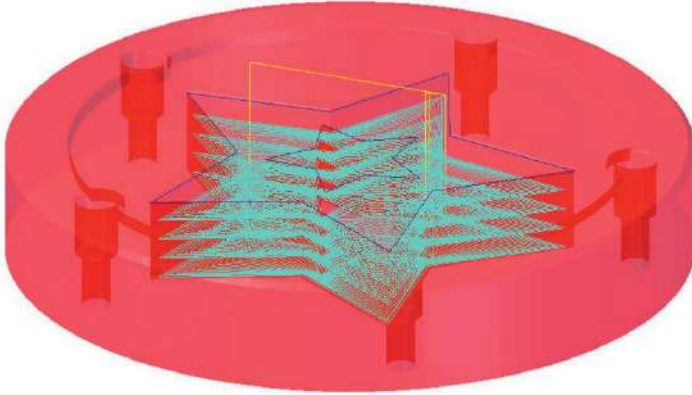


Рисунок 10.53 – Пошарова обробка кишені

**Стратегія радіальної обробки** зазвичай застосовується для чорнкової або чистової обробки деталей круглої форми. Переміщення інструменту у цій стратегії здійснюється від центру деталі до її зовнішніх кордонів (або навпаки) з поступовою зміною кута в площині обробки.

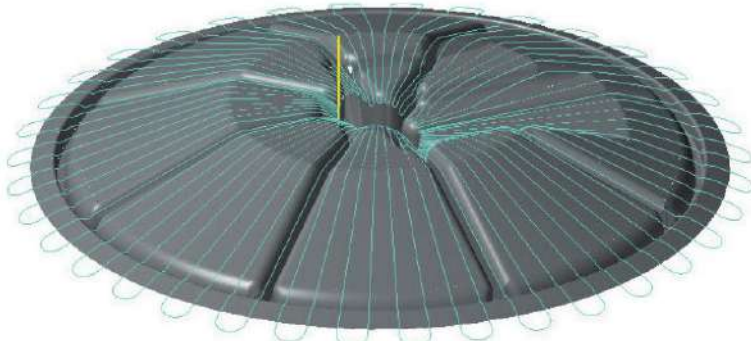


Рисунок 10.54 – Радіальна обробка

За допомогою **чорнової вертикальної вибірки** можна швидко обробити деталь, використовуючи рухи, аналогічні свердлінню. Виробництва, що використовують таку стратегію, купляють спеціальні плунжерні фрези, що дозволяють швидко вибрати матеріал і мають підведення охолоджувальної рідини через вісь інструменту. Стратегія чорнової вертикальної вибірки відмінно підходить для обробки глибоких западин та кишень.

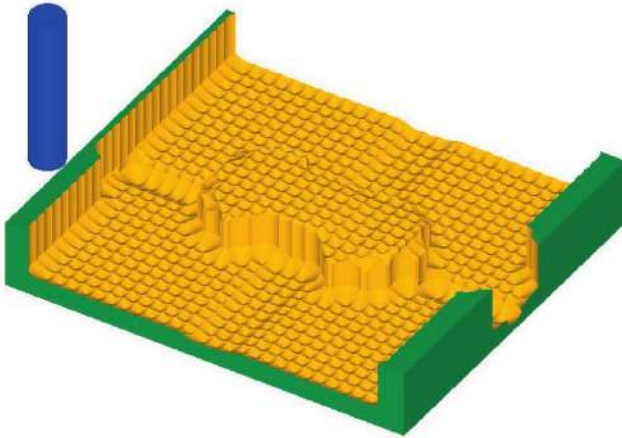


Рисунок 10.55 – Результат застосування стратегії чорнової вертикальної вибірки

**Стратегія фрезерування залишків (дообробка)** дозволяє автоматично видалити матеріал, що залишився від попередньої операції. Для збільшення продуктивності обробки прийнято вибирати матеріал спочатку інструментом великого діаметра, а вже потім проводити фрезерування у важкодоступних місцях меншим діаметром. Система, аналізуючи обсяг знятого і матеріалу, що залишився, автоматично генерує траєкторію для вибірки матеріалу, який не був видалений в попередній операції обробки.

**Стратегія контурної обробки** використовується для чорнової чи чистової контурної обробки деталей довільної форми. Суть стратегії полягає у видаленні припуску за рахунок проходів фрези контурами, створеними шляхом «зміщення» меж поточного шару Z.

**Стратегію обробки поточковими лініями** застосовують для чистової обробки будь-яких поверхонь. Система створює траєкторії з

урахуванням форми та напрямки поверхонь.

**Стратегія проєкційної обробки** дозволяє накласти на будь-яку ділянку оброблюваної поверхні своєрідний шаблон траєкторії руху інструменту або спроектувати плоску траєкторію на 3D-модель.

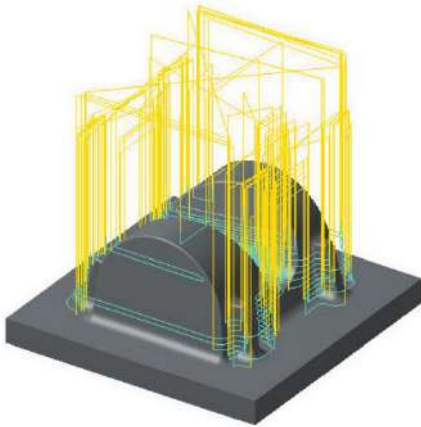


Рисунок 10.56 – Стратегія дообробки меншим інструментом



Рисунок 10.57 – Об'ємна контурна обробка

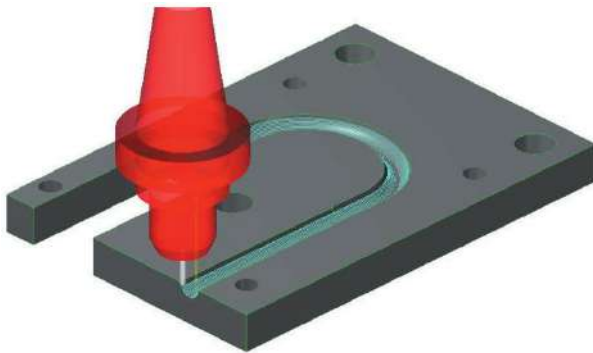


Рисунок 10.58 – Обробка по поточкових лініях, схема – зигзаг

Після вибору стратегії та визначення основних параметрів обробки необхідно призначити різальний інструмент або вибрати його з бібліотеки інструментів. На цьому етапі визначаються режими різання: швидкість робочої подачі, обороти шпинделя – і програмується включення чи вимкнення MOP. Результатом другого

етапу є сформована траєкторія. У дереві операцій САМ–системи має з'явитися нова технологічна операція.

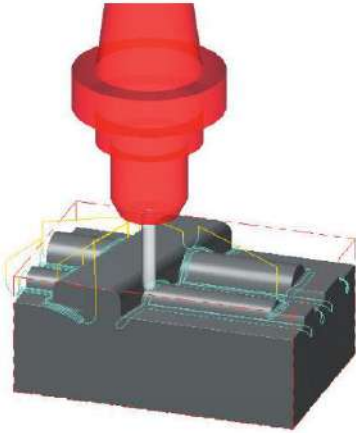


Рисунок 10.59 – Олівцева обробка



Рисунок 10.60 – Проектування траєкторії на поверхню

#### 10.4.9 Бекплот та верифікація

Нині будь-яка САМ–система має функції перевірки правильності створених траєкторій. Функція бекплота (Backplot) дозволяє програмісту відстежувати переміщення ріжучого інструменту. При цьому він може спостерігати за траєкторією центру інструменту та самим інструментом прямо на 3D–моделі. Як правило, бекплот використовується для попередньої перевірки розрахованих траєкторій та налаштування технологічних параметрів операції. Остаточна перевірка зазвичай здійснюється за допомогою верифікації.

Інструменти верифікації надають програмісту чудові можливості для наочної перевірки траєкторії руху інструменту, для оцінки якості та загальної технології виготовлення деталі.

Основний зміст верифікації полягає у демонстрації процесу видалення матеріалу заготовки та можливості подивитися на остаточний результат роботи УП – модель виготовленої деталі.

Отриману «віртуальну» деталь можна розглянути з різних боків. Можна побачити, чи всі елементи виконані правильно, і навіть розглянути гребінці на матеріалі, що залишилися від інструмента.

Верифікація може бути твердотільною або растровою. У разі твердотільної верифікації система працює з тривимірною моделлю заготовки та дозволяє реалізувати безліч корисних функцій.

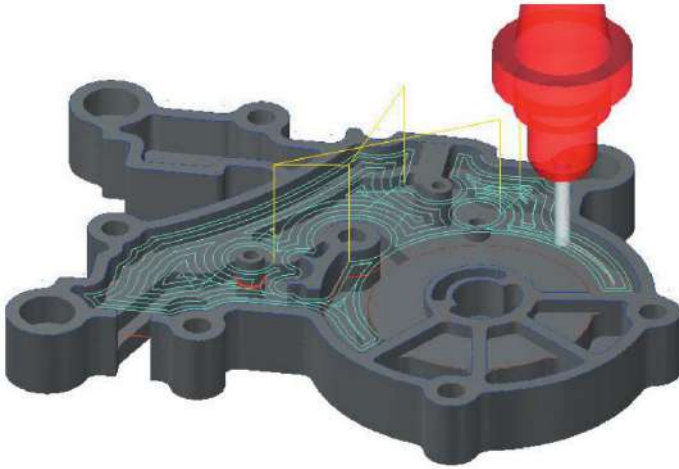


Рисунок 10.61 – У режимі «Backplot» можна спостерігати за траєкторією переміщення центру інструменту

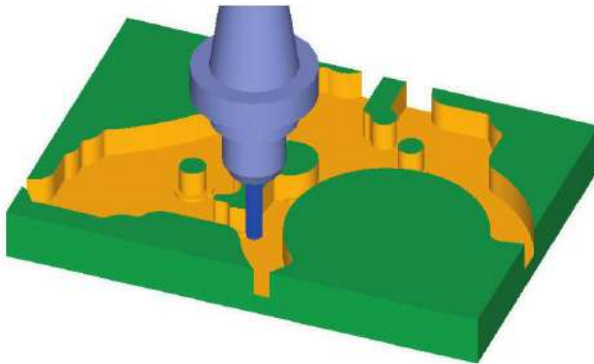


Рисунок 10.62 – Процес верифікації

Наприклад, виміряти оброблену деталь чи експортувати її у CAD-систему для подальшої роботи. Растрова верифікація лише імітує роботу з тривимірною моделлю і зараз застосовується досить рідко.

Врахуйте, що на цьому етапі ми ще не маємо готової УП, тобто самого коду. Код програми обробки з'явиться пізніше після постпроцесування. Але що ми тоді перевіряємо?

Результатом попереднього етапу є сформована траєкторія переміщення інструменту для певної операції. Інформацію про цю траєкторію, всі координати та інструмент система записує в спеціальний проміжний файл. Цей файл не схожий на звичайну програму обробки, тобто в ньому немає звичних G- та M-кодів. На даний момент саме цей файл є об'єктом для верифікації та бекплоту.

## 10.5 Постпроцесування

Постпроцесор – програма, яка перетворює файл траєкторії руху інструменту та технологічних команд (проміжний файл), сформований CAD/CAM-системою, у файл УП відповідно до вимог конкретного комплексу верстат – СЧПУ. У низці вітчизняних систем постпроцесори називаються паспортами.

Для того щоб абстрагуватися від великої різноманітності верстатів, систем ЧПУ та мов програмування обробки, CAM-система генерує проміжний файл, що містить інформацію про траєкторію, кут повороту інструменту (у разі багатокоординатної обробки) та узагальнені команди управління верстатом. Зазвичай цей проміжний файл називається файлом CL (Cutter Location) або CLDATA-файлом.

Далі в роботу вступає постпроцесор. Він перетворює цей проміжний файл на програму обробки у суворій відповідності до формату програмування конкретного верстата з ЧПУ.

Така технологія дозволяє програмісту під час проектування обробки в CAD/CAM-системі не замислюватися про те, на який верстат потрапить УП і який буде її формат. Йому необхідно лише вибрати постпроцесор, який відповідає певному верстату з ЧПУ, і той вже візьме на себе всю роботу зі створення програми обробки певного формату.

Звідки взялася ідея постпроцесування і чому досі в цій галузі існують проблеми? За ідеєю, розробники верстатів та систем ЧПУ повинні дотримуватись стандартів Асоціації електронної промисловості (EIA) та Міжнародної організації стандартизації (ISO). Тобто однакові G-коди на різних верстатах з ЧПУ повинні виконувати одну й ту саму функцію. В принципі ці стандарти дотримуються, але

тільки для основних команд верстата, наприклад для включення МОР, лінійної та кругової інтерполяції.

Якщо ж справа доходить до інших команд, постійних циклів та спеціальних функцій, то прихильність до певного стандарту практично відсутня.

Це призводить до неможливості правильного виконання одної і тієї ж УП на різних верстатах з ЧПУ. До цієї проблеми додається інша – постійні «перегони» виробників обладнання з ЧПУ. В умовах жорсткої конкуренції верстатобудівні компанії створюють все складніші верстати, а розробники систем ЧПУ вигадують нові цикли та функції. В результаті серйозні відмінності у форматі УП можуть бути помічені навіть у верстатів однієї фірми, але різних моделей.



Рисунок 10.63 – Схема створення УП для конкретного комплексу «Верстат – система ЧПУ»

Коли з'явилися перші САМ–системи, то для роботи з конкретним верстатом з ЧПУ розроблявся *індивідуальний постпроцесор*, який являв собою виконуваний файл.

Індивідуальний постпроцесор міг бути створений лише досвідченим програмістом (саме програмістом, а не технологом–програмістом) шляхом тривалого спілкування з верстатником для з'ясування всіх нюансів роботи з певним верстатом.

Після цього проходили випробування та доведення індивідуального постпроцесора «до розуму». У результаті постпроцесор виконував свої функції, але процес його створення був дуже довгим, проблемним та дорогим. Зміни у такому постпроцесорі міг зробити лише сам автор-розробник.

У 70÷80-х роках ХХ століття спостерігався значний підйом автоматизованого машинобудування. Як гриби після дощу почали з'являтися нові верстати із різними системами ЧПУ. Виник величезний попит на технологічне програмне забезпечення та CAD/CAM-системи.

Програмісти просто не встигали розробляти нові індивідуальні постпроцесори, що підштовхнуло їх до автоматизації власної праці. З'явилася ідея створення узагальнених постпроцесорів для різних верстатів із однаковою системою ЧПУ. У цьому був сенс – при роботі з системою ЧПУ однієї фірми, навіть на різних верстатах, відмінності в УП будуть мінімальними, отже, і зміни, які потрібно внести у виконуваний файл, теж будуть незначними.

**Класичний постпроцесор**, що знаходиться на службі сучасної CAD/CAM-системи, складається з кількох файлів. По-перше, це виконуваний файл – програма. Виконуваний файл займається перетворенням даних проміжного файлу CL в кадрі УП.

Перетворення здійснюється за деякими правилами, відмінними для різних верстатів і систем ЧПУ. Ці правила, чи алгоритми перетворення, перебувають у другому файлі – текстовому.

Текстовий файл написаний на спеціальній макромові, яка може бути змінена у разі потреби самим технологом-програмістом у будь-якому текстовому редакторі. Вносити будь-які зміни до виконуваного файлу не потрібно.

Як правило, з CAD/CAM-системою поставляється набір таких текстових файлів, які описують правила для перетворення проміжних файлів у програму обробки кількох десятків різних верстатів і систем ЧПУ. У даному випадку постпроцесором можна сміливо називати саме текстовий файл.

Виконуваний файл є модулем САМ-системи і працює непомітно для користувача. У деяких САМ-системах є і третій файл, необхідний для постпроцесування. Цей файл також текстовий. Він призначений для введення додаткових умов та передачі спеціальної інформації до управляючої програми.

На жаль, розробники CAD/CAM-систем не дотримуються єдиного стандарту формування проміжних CL-файлів. В результаті текстовий файл з описом алгоритмів перетворення (постпроцесор) однієї САМ-системи буде абсолютно непотрібним для використання всередині іншої САМ-системи. Для розробки навіть такого текстового

постпроцесора «з нуля» необхідні глибокі знання самої системи та принципів перетворення вихідних даних. Тому користувачеві надають набір базових постпроцесорів з редагованими змінними. Працюючи з цими змінними, користувач може самостійно налаштувати постпроцесор для наявного верстата.

Сьогодні найбільш ефективним і простим вирішенням проблем постпроцесування на підприємстві є використання універсального постпроцесора (генератора).

**Універсальні постпроцесори** дозволяють працювати з багатьма відомими CAD/CAM–системами та одночасно не залежати від них. Справа в тому, що, на відміну від класичних постпроцесорів, які працюють із проміжним файлом лише «рідної» системи, універсальні постпроцесори здатні «переробляти» CL–файли різних CAM–систем.

Додайте сюди просунутий інтуїтивно–зрозумілий графічний інтерфейс, що дозволяє будувати наочну кінематичну схему верстата та задавати типові параметри системи ЧПУ, і ви отримаєте потужний та універсальний засіб для вирішення проблем сумісності будь–якого обладнання з будь–якою CAD/CAM–системою.

Як оцінити результати роботи постпроцесора? Дуже просто. Якщо отримана програма не вимагає ручного виправлення та доведення, значить постпроцесор працює правильно. Це основний принцип.

Хороший постпроцесор здатний сформувавти УП з урахуванням максимальних можливостей верстата з ЧПУ та CAD/CAM–системи та має грамотно працювати з постійними циклами. Наприклад, якщо система ЧПУ верстата підтримує гвинтову інтерполяцію, то бажано, щоб постпроцесор не замінював її безліччю лінійних переміщень. Природно, що програма обробки не повинна містити зайвих кодів і координат.

### **10.5.1 Передача УП на верстат з ЧПУ**

Отже, програма обробки готова. Після постпроцесування CAD/CAM–система відкриває файл УП у спеціальному редакторі або в стандартному «Блокноті» операційної системи Windows. Багато систем поставляються зі спеціальними редакторами УП, які є простим та зручним інструментом для редагування та передачі програм на верстат.

В більшості випадків зв'язок здійснюється відповідно до стандарту RS-232. При цьому СОМ-порт персонального комп'ютера з'єднується кабелем зі спеціальним роз'ємом на корпусі верстата або панелі ЧПУ. Для передачі даних необхідно, щоб ЧПУ верстата та комунікаційна програма були синхронізовані.

Це досягається відповідним настроюванням параметрів СЧПУ та комунікаційної програми. Наприклад, якщо значення для стопових бітів (stop bits) системи ЧПУ верстата дорівнює двом, то таке значення має знаходитися і у відповідному параметрі комунікаційної програми.

Після встановлення основних параметрів, УП можна передавати на верстат: треба переключити систему ЧПУ верстата в режим прийому/передачі даних, натиснути на панелі ЧПУ клавішу «Прийом даних», а в програмі комунікацій вибрати пункт меню «Передати».

Для передачі з верстата на ПК необхідно діяти навпаки. Спочатку перемикаємо ЧПУ верстата в режим прийому/передачі даних, потім у комунікаційній програмі вибираємо пункт меню «Прийняти» та натискаємо клавішу на панелі ЧПУ верстата «Надіслати дані». Отже уважно читайте документацію до верстата – в ній ви обов'язково знайдете інформацію про параметри, що настроюються для прийому і передачі даних, а також послідовність дій при роботі із зовнішніми пристроями зберігання інформації.

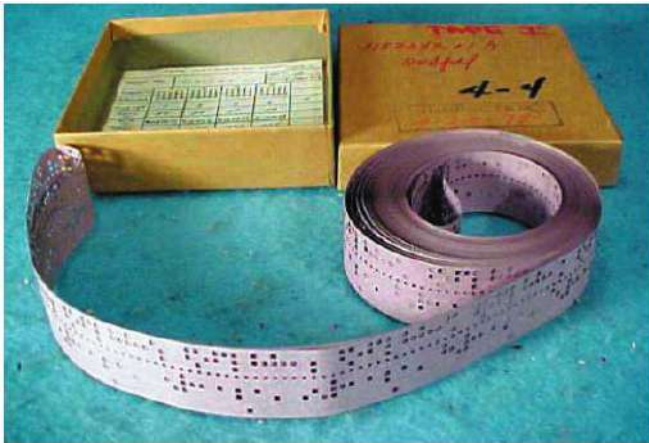


Рисунок 10.64 – Досі є такі заводи на яких програми завантажують у верстат із ЧПУ за допомогою перфострічки

Для передачі УП розмір яких перевищує розмір вільної пам'яті СЧПУ, використовується режим DNC. У цьому режимі програма обробки не записується у пам'ять системи ЧПУ, а виконується безпосередньо з комп'ютера. Система ЧПУ має (чи створює у пам'яті) спеціальний програмний буфер, у який надходить частина програми.

Як тільки цей буфер заповнюється, система надсилає сигнал на комп'ютер, щоб той припинив передавати дані. В цей час ЧПУ верстата виконує кадри УП, що знаходяться у буфері. Коли буфер звільняється, система ЧПУ надсилає новий сигнал на ПК, який дозволяє подальшу передачу даних.

Цей процес триває до виконання УП. Для роботи в режимі DNC необхідно, щоб ЧПУ верстата було відповідним чином підготовлено виробником, а на персональному комп'ютері знаходилася комунікаційна програма з підтримкою цього режиму.

Найбільш просунуті системи дають можливість передавати дані локальною мережею, а не через RS-232. У цьому випадку користувач прямо з ПК може «бачити» вміст пам'яті верстата. А прийом та передача даних здійснюються звичним для Windows способом – перетягуванням файлів з однієї папки до іншої, що дуже зручно. Деякі верстати з ЧПУ мають вбудований дисковод або вміють читати інформацію з флеш-карт.

### **10.5.2 Асоціативність**

Асоціативність CAD/CAM-системи полягає у її здатності пов'язати геометрію з траєкторією обробки, інструментом, матеріалом, параметрами та сформувати завершену операцію.

Якщо якась частина операції змінюється, інші її частини залишаються недоторканими і можуть бути використані для подальших розрахунків і створення оновленої операції.

Асоціативність надає технологу-програмісту небувалі можливості з налагодження технології обробки та захищає його від виснажливого виправлення своїх помилок.

Змінюючи параметри операції, можна стежити, як змінюються траєкторія та машинний час обробки, і в результаті вибрати найкращий варіант. Зазвичай, така асоціативність діє лише в межах однієї CAD/CAM-системи.

### 10.5.3 П'ятикоординатне фрезерування та 3D-корекція

Останнім часом спостерігається значний інтерес до багатоосової обробки. Це викликано, з одного боку, підвищенням попиту виготовлення деталей складної форми, з іншого – зниженням вартості 5-координатних верстатів з ЧПУ і розвитком математичного апарату CAD/CAM-систем.

Традиційною сферою застосування цієї технології є авіаційна промисловість, де 5-координатні обробні центри служать для механічної обробки турбінних лопаток, лопатей та інших деталей складної форми. Поступово ця прогресивна технологія впроваджується у звичайне виробництво виготовлення інструменту і прес-форм.

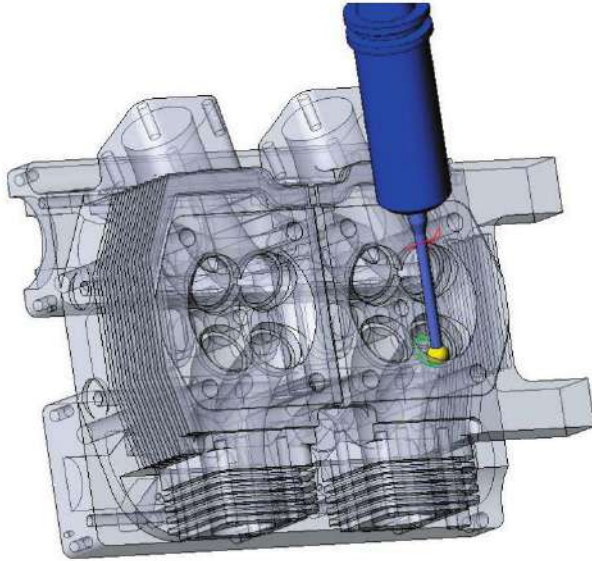


Рисунок 10.65 – Для розрахунку траєкторій 5-координатної обробки використовують САМ-системи. У цьому прикладі проводиться обробка каналу двигуна в системі ESPRIT

При 5-координатному фрезеруванні інструмент може обробляти поверхню деталі торцевою або бічною частиною. При такій обробці зазвичай використовують кінцеві сферичні фрези, тому в першому

випадку контакт інструменту з поверхнею, що обробляється, буде точковим, а в другому – лінійним.

Існують два види 5–координатної обробки: одночасна (безперервна) та обробка з індексуванням. У першому випадку в кожному кадрі УП дійсно знаходяться п'ять адрес осевого переміщення, наприклад: X, Y, Z, A, B.

У другому випадку не можна говорити про одночасне переміщення по всіх п'яти осях – у кожному кадрі зазвичай містяться лише три координати. Інші адреси стоять окремо і використовуються як допоміжні – для повороту інструменту або деталі у певне положення та подальшої 3–координатної обробки.

Управляючі програми для багатоосевої обробки створюються виключно за допомогою CAD/CAM–систем. Найчастіше технолог–програмісту доводиться будувати додаткові напрямні поверхні та обмежувати кут нахилу ріжучого інструменту. Для отримання коректної програми потрібно ретельне налаштування постпроцесора, створення якого може коштувати підприємству досить дорого.

Термін 3D–корекція часто використовується, коли мова заходить про технологію об'ємної обробки. При звичайному плоскому фрезеруванні існує можливість виконати корекцію на радіус інструменту зліва або праворуч від запрограмованого контуру за допомогою кодів G41 та G42. А як вчинити у разі об'ємної поверхневої обробки, наприклад, при виготовленні матриць і пуансонів? Коли проводиться обробка плоского контуру, коригуюче зміщення вказується праворуч або ліворуч, тобто по нормалі до оброблюваної поверхні в точці контакту з інструментом. При використанні 3D–корекції ситуація аналогічна, просто необхідно знати вектор орієнтації інструменту і вектор нормалі поверхні в точці контакту з інструментом.

З огляду на взаємне положення цих векторів і коригувального значення, система ЧПУ розраховує просторове зміщення різального інструменту зі збереженням його орієнтації і заданої точки контакту.

Якщо система ЧПУ на вашому верстаті підтримує 3D–корекцію інструменту, то оператор може впливати на розміри деталей зі складною геометрією, змінюючи значення радіусу інструменту як «в плюс», так і «в мінус». Однак у цьому випадку CAM–система та СЧПУ верстата, швидше за все, не зможуть контролювати можливі зіткнення та помилки позиціонування.

### 10.5.4 Високошвидкісна обробка (ВШО)

Теорія використання високих режимів різання під час механічної обробки металів виникла досить давно. Однак тільки зараз, з появою найсучасніших верстатів з ЧПУ, частота обертання шпинделя у яких досягає 60 000 об/хв, а швидкість робочої подачі перевищує за 5 000 мм/хв, з галузі наукових припущень ми переходимо до реального виробництва.

Експериментально встановлено, що при збільшенні швидкості різання температура в зоні різання поступово зростає та досягає деякого максимального значення. При подальшому збільшенні швидкості різання відбувається деяке падіння температури і крутий момент, необхідний для виконання різання, теж знижується.

Це означає, що існує деяка область надвисоких швидкостей обробки, в якій процес різання відбувається спокійно і ріжучий інструмент не піддається катастрофічним навантаженням. В даний час для кожного оброблюваного матеріалу та інструменту ця область визначається лише дослідним шляхом.

Робота в умовах ВШО має ряд нюансів і пред'являє особливі вимоги до обладнання, інструменту та керуючої програми. При роботі в такому режимі, по-перше, верстат повинен мати частоту обертання шпинделя не менше 15 000 об/хв і подачу не менше 2 500 мм/хв, по-друге, він повинен встигати за програмою, тобто швидко прискорювати та уповільнювати робочу подачу. Бажано, щоб верстат мав високу жорсткість і мав ефективні засоби для видалення стружки.

Ріжучий інструмент є головним «обмежувачем» швидкості обробки. Як правило, ріжуча частина інструменту для ВШО має спеціальне зносостійке покриття. Приділіть особливу увагу патрону, оскільки найменша похибка установки викликає биття особливо небезпечно на таких швидкостях обертання шпинделя. Виліт інструменту має бути мінімальним.

Тепер поговоримо про особливості програмування. У разі ВШО глибина та крок обробки набагато менші, ніж при звичайному фрезеруванні. Траєкторія переміщення має бути плавною, без різких змін напрямку та швидкості подачі. Часто лінійні переміщення замінюють на петлеподібні, використовують трохохідальну траєкторію. Врізання інструменту в метал повинно проходити спіралью або під невеликим кутом, але ніяк не вертикально. Звичайно все це робиться

для підтримки постійних умов різання, зменшення навантаження на інструмент і виключення його поломки.

Так як УП для ВШО містить дуже багато переміщень, її розмір може перевищувати розмір звичайної програми обробки в десятки або сотні разів. Система ЧПУ верстата повинна встигати відпрацьовувати кадри та мати досить великий програмний буфер для підготовки до подальших переміщень.

Якщо система не має значного об'єму пам'яті для зберігання програм, не обійтися без DNC-режиму. При цьому пред'являються особливі вимоги щодо швидкості та надійності до персонального комп'ютера, комунікаційного програмного забезпечення та лінії зв'язку.

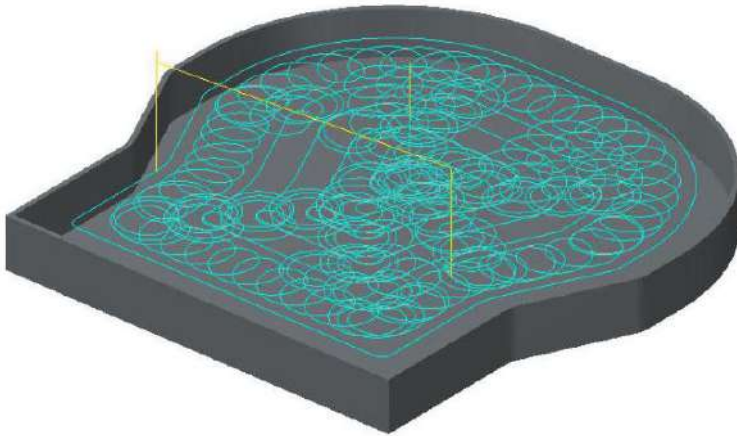


Рисунок 10.66 – Трохоїдальна траєкторія складається з безлічі «петельок»

Не варто захоплюватися методом ВШО для обробки всієї деталі. У більшості випадків чорнову обробку можна виконати на звичайних режимах грубим інструментом. Серйозна САМ-система обов'язково повинна мати інструменти дообробки, засоби визначення надлишків матеріалу та можливість порівняти результати обробки з вихідною моделлю. Використовуючи різні програмні фільтри та оптимізатори, які проводять аналіз переміщень в УП, можна значно скоротити розмір програми, зробити її найбільш придатною для методу ВШО.

Переваги від використання ВШО – менший крок і глибина

фрезерування у поєднанні з великими значеннями робочої подачі та обертів шпинделя при чистовій обробці суттєво підвищують якість поверхні та значно скорочують машинний час. Це дозволяє уникнути ручної доводки, наприклад при виготовленні прес–форм. При ВШО можна використовувати інструмент меншого розміру та фрезерувати такі дрібні деталі та гострі кути, які в іншому випадку довелося б отримувати електроерозійною обробкою.

Що стосується чорнової обробки, то позитивний ефект від ВШО не такий очевидний і проявляється лише при обробці деталей невеликого розміру або високої твердості та при достатньому завантаженні верстата.

### **10.5.5 Вимоги до сучасної САМ–системи**

Сьогодні на ринку CAD/CAM представлений не один десяток систем, що відрізняються можливостями, інтерфейсом та вартістю. Як зробити правильний вибір та придбати систему, яка б повністю влаштувала технолога та дозволяла максимально автоматизувати процес створення УП? Є ряд параметрів, за якими можна скласти початкове враження про САМ–систему.

Перше, що впадає у вічі при знайомстві з системою, – її інтерфейс, тобто сукупність меню, піктограм і вікон. Головна вимога до інтерфейсу – зручність. Переважна більшість сучасних САМ–систем має звичний Windows–інтерфейс, що дозволяє сформувати зручну для користувача атмосферу. Що ж до наочності та графічного оформлення – то це справа смаку. Зверніть увагу на мову інтерфейсу. Якщо ви не володієте іноземною мовою, краще, щоб всі меню були представлені тоді хоча б російською мовою.

САМ–система не повинна обмежувати технолога вибором лише стандартного інструменту. Функція підтримки оригінального (користувацького) інструменту дозволить вам спроектувати інструмент будь–якої форми прямо в системі і правильно розрахувати траєкторію його переміщення. Повірте, рано чи пізно ця функція обов'язково знадобиться.

Навряд чи вам сподобається, якщо ви виявите «зарізи» на деталі після чорнової чи чистової обробки. Хороша САМ–система зобов'язана мати механізм, що забезпечує запобігання зарізів і зіткнень інструменту з заготовкою та елементами кріплення.

Якщо траєкторії переміщення інструмента розраховуються з урахуванням заданої заготовки довільної форми, це говорить про високу ефективність створених системою операцій. Інакше кажучи – система має «бачити» заготовку. Перевага цієї функції проявляється при роботі з заготовками у вигляді виливків та штампувань. Коли система не має цієї функції, вона здійснює розрахунок траєкторій на основі циліндра або паралелепіпеда. Отримана траєкторія виявиться неоптимальною, в ній може бути досить велика кількість холостих переміщень.

Здатність системи «пам'ятати», скільки матеріалу було знято в попередніх операціях, говорить про «інтелектуальний» потенціал системи. Функція дообробки дозволяє автоматично знаходити недопрацьовані області та гарантує отримання максимально ефективних траєкторій.

До верифікатора САМ–системи потрібно поставитися дуже уважно. По–перше, система повинна забезпечувати можливість імпорту тривимірної моделі заготовки із САД–модуля та верифікацію цієї моделі. По–друге, верифікатор повинен вміти обертати заготовку, динамічно масштабувати та переміщати по екрану. По–третє, при верифікації система повинна відзначати кольором місця зарізів та зіткнень інструменту із заготовкою.

Верифікатори більшості сучасних САД/САМ–систем мають кілька режимів роботи та безліч корисних налаштувань. Режим верифікатора Turbo використовується для роботи зі складними заготовками і великими траєкторіями, якщо очікуваний час процесу верифікації занадто великий. При роботі в режимі Turbo верифікатор здійснює розрахунки та показує лише кінцевий результат – модель обробленої деталі.

Графічна якість процесу верифікації залежить від продуктивності комп'ютера і зажадав від відповідних налаштувань верифікатора. Як правило, між якістю та швидкістю існує пряма залежність – чим вища якість верифікації, тим повільніше вона проводиться.

Зазвичай верифікатори дозволяють здійснювати візуальну перевірку 3–осьової обробки. Верифікація багатоосьової обробки може бути опцією. Отже, якщо ви збираєтеся працювати з чотирма або п'ятьма координатами в УП, то краще перевірте можливості верифікатора заздалегідь.

Найбільш просунуті верифікатори дозволяють інтенсивно працювати з 3D–моделлю заготовки. За наявності такого верифікатора ви зможете експортувати модель обробленої деталі до іншої CAD–системи, перевірити її геометричні розміри або зробити перетин. Додатковою перевагою є здатність здійснювати перевірку як проміжного CL–файла, а й коду управляючої програми.

Часто виникають ситуації, коли технологу–програмісту доводиться працювати з неякісною 3D–моделлю деталі. Наприклад, модель може потрапити в САМ–модуль «дірявою», тобто має поверхневі нестиківки або зниклі геометричні елементи. Деякі САМ–системи здатні «заплющити очі» на це, інші просто не зможуть працювати з такими моделями і вимагатимуть їх виправлення.

Якщо ви створюєте геометрію деталі в САД–системі, яка не є рідною для САМ–системи, то вам не обійтися без допомоги конверторів (трансляторів). Конвертори призначені для перетворення графічних файлів одного формату на графічні файли іншого (необхідного) формату. Про формат ви можете судити з розширення файлів. Наприклад, .DWG, .DXF, .IGS, .STL, .SAT. При знайомстві з САМ–системою перевірте наявність конверторів і перевірте якість конвертації файлів.

## **10.6 Управління верстатом з ЧПУ**

### **10.6.1 Органи управління**

Більшість органів управління сучасного верстата з ЧПУ зосереджено на передній панелі стійки ЧПУ. До органів управління відносяться різні перемикачі та клавіші, а також дисплей, що дозволяє оператору спілкуватися із верстатом.

Як правило, системи ЧПУ мають монохромний або кольоровий електронно–променевий дисплей, хоча найсучасніші верстати можуть бути оснащені рідкокристалічним дисплеєм.

Будь–яка стійка ЧПУ має клавіатуру: або повнорозмірну, аналогічну клавіатурі звичайного персонального комп'ютера або обмежену, яка дозволяє вводити лише основні символи та знаки програмування.

Всі клавіші, перемикачі та ручки верстата можна умовно розділити на кілька функціональних груп.

### ***Клавіші для введення різних символів, літер та цифр.***

За допомогою клавіатури УЧПУ оператор верстата може скласти програму обробки прямо на екрані, вводячи коди G, різні слова даних і спеціальні символи програмування (наприклад, знак кінця кадру). У випадку обмеженої клавіатури, одна клавіша може відповідати за кілька символів (адрес).

### ***Клавіші редагування та курсору.***

Клавіші редагування дозволяють оператору верстата змінювати вміст програми, що управляє. Курсорні кнопки призначені для навігації за програмою.

### ***Програмні або екранні клавіші.***

Програмні клавіші використовуються для виконання різних функцій залежно від програмного забезпечення системи ЧПК та поточного екранного режиму. Зазвичай, ці клавіші розташовані прямо під дисплеєм, а їх поточні функції відображаються в нижній частині дисплея.

### ***Клавіші та перемикачі режимів роботи верстата.***

Верстат із ЧПУ має кілька режимів роботи. Для переходу з одного режиму до іншого зазвичай використовується спеціальний перемикач.

### ***Кнопки прямого керування осьовими рухами.***

За допомогою цих кнопок оператор може переміщати виконавчі органи верстата в осьових напрямках робочої подачі або прискореної подачі.

### ***Рукоятки керування швидкістю подачі та обертання шпинделя.***

Багато верстатів мають засоби для прямого (без програмування G- та M-кодів) увімкнення/вимкнення шпинделя та управління швидкістю його обертання. Система ЧПУ надає оператору верстата можливість коригування запрограмованої швидкості подачі та частоти обертання шпинделя у певних діапазонах.

### ***Клавіші та перемикачі для роботи зі спеціальними функціями верстата.***

За включення та вимикання освітлення робочої зони верстата, управління системою видалення стружки та інші допоміжні дії відповідають клавіші та перемикачі для роботи зі спеціальними функціями.

### ***Клавiшi циклу програмування.***

За пуск управляючої програми відповідає кнопка «Старт циклу», а за її зупинку – кнопки «Зупинка подачі» або «Сброс». До цієї групи належать клавiшi для активації функцій вибіркової зупинки M01, пропуску кадру /, покадрового виконання програми, пробного прогону та блокування осьових переміщень.

### ***Іншi органи управління.***

Частина органів управління може бути розташована не на самому пульті УЧПУ. Наприклад, вимикач електроживлення часто розташований на тильній стороні корпусу верстата, а клавiшi керування інструментальним магазином прямо поруч з віконцем для завантаження інструментів. Велика червона кнопка «Екстрена зупинка» знаходиться на найвиднішому та найдоступнішому місці.

Практично всі верстати з ЧПУ мають маховики, які дають можливість оператору переміщувати виконавчі органи вручну. Як правило, цими маховиками оператор користується для виконання точних операцій, таких як пошук нульової точки або вимірювання довжини інструменту. Окрім різних органів управління, верстат із ЧПУ має набір індикаторів. Ці індикатори (світлодіоди або лампочки) можуть показувати, прийшли або не прийшли виконавчі органи верстата в нульову точку, чи включена подача MOP, і сигналізують про аварійну ситуацію.



Рисунок 10.67 – Кнопка для екстреної зупинки верстата

## **10.6.2 Основні режими роботи**

***Режим автоматичного керування.*** Цей режим є основним для верстата із ЧПУ. Саме в цьому режимі здійснюється обробка деталі за

програмою. Для запуску УП виконання необхідно спочатку вибрати активну програму і потім натиснути кнопку «Старт циклу».

У режимі автоматичного управління оператор може впливати на запрограмовану швидкість подачі і частоту обертання шпинделя. Рукоятка корекції прискореного ходу дозволяє змінювати швидкість холостих переміщень виконавчих органів верстата в діапазоні від 0 до 150 %.

**Режим редагування.** У цьому режимі оператор верстата може вводити нову або редагувати існуючу програму обробки вручну, використовуючи клавіатуру ЧПУ.

Можливості редагування УП у різних стійок ЧПУ можуть значно відрізнитися. Найпростіші системи дозволяють вставляти, видаляти та копіювати слова даних. Найсучасніші ЧПУ мають функції пошуку та заміни даних (аналогічно текстовим редакторам на ПК), копіювання, видалення та перенесення певного програмного діапазону, здатні редагувати УП у фоновому режимі.

**Функція фонового редагування** даних дозволяє оператору верстата створювати або редагувати одну програму при одночасному виконанні іншої програми. Для фонового редагування систему керування необхідно переключити на автоматичний режим.

Зазвичай у режимі редагування здійснюється введення/виведення УП з персонального комп'ютера чи іншого зовнішнього пристрою. Тут можна перевірити розмір вільної пам'яті ЧПУ і кількість зареєстрованих програм.

**Режим ручного введення даних MDI.** Режим ручного введення даних MDI дозволяє оператору ввести та виконати один або кілька кадрів, незаписаних у пам'яті ЧПУ. Зазвичай цей режим використовується для введення окремих G- і M-кодів, наприклад зміни інструмента або включення обертів шпинделя. Введені команди і слова даних після виконання або скидання видаляються.

**Поштовховий режим.** Поштовховий (старт-стопний) режим забезпечує ручне переміщення виконавчих органів верстата при натисканні на відповідні кнопки на панелі ЧПУ.

**Режим керування ручним генератором імпульсів чи маховиками.** У цьому режимі здійснюється переміщення виконавчих органів верстата за допомогою ручного генератора імпульсів, який схожий на пульт дистанційного управління або за допомогою спеціальних маховиків на панелі ЧПУ. Оператор верстата може

задавати крок та напрямок переміщення за допомогою спеціальних перемикачів.

**Режим повернення до нульової точки.** Повернення виконавчих органів до нульової точки є стандартною процедурою при включенні верстата. У цьому випадку відбувається синхронізація верстата та системи керування.

**Режим прямого числового керування DNC.** Режим DNC дозволяє виконувати програму обробки безпосередньо з комп'ютера або іншого зовнішнього пристрою, не записуючи її у пам'ять системи. Зазвичай в цьому режимі виконуються УП великого розміру, які не можуть поміститися в пам'яті ЧПУ.

**Режим редагування параметрів.** У цьому режимі редагують параметри системи ЧПУ. Налаштування користувача відповідають за налаштування поточної дати і часу, роботу в різних режимах та ін. Системні параметри впливають на функціонування верстата в цілому. Не рекомендується самостійно змінювати значення системних параметрів. Іноді вхід до області параметрів заблокований і для редагування потрібно ввести спеціальний код, встановлений виробником верстата.

**Тестові режими.** Будь-який верстат з ЧПУ має певну кількість тестових функцій. До них, наприклад, відносяться пробний прогін та покадрове відпрацювання УП. Деякі системи ЧПУ дозволяють здійснювати графічну перевірку траєкторії.

### 10.6.3 Індикація системи координат

Під час виконання обробки за програмою або ручного переміщення виконавчих органів верстата є можливість спостерігати за їх поточним положенням у різних координатних системах:

ABSOLUTE	Абсолютне положення в робочій системі координат (G54–G59)
MACHINE	Поточне положення щодо нуля верстата
DISTANCE	Залишкова відстань переміщення в кадрі
TO GO	

По координатах реєстрів ABSOLUTE і MACHINE можна судити про правильність переміщення по програмі. Координати

регістра MACHINE зазвичай використовуються оператором верстата для знаходження нуля деталі і встановлення робочої системи координат.

#### **10.6.4 Встановлення робочої системи координат**

Існують кілька методів «прив'язки» координатної системи до деталі. При *класичному методі* оператор верстата використовує плоскопаралельні кінцеві міри, калібри або індикатор (центрошукач).

*Метод контакту* заснований на дотику різальним інструментом оброблюваної деталі (заготовки).

*Автоматичний метод* передбачає використання спеціального щупа та інфрачервоних датчиків, які встановлюються як опція на сучасні обробні центри.

Класичний метод є універсальним і може використовуватися на будь-якому верстаті з ЧПУ, тому саме його ми розглянемо докладніше. Так як «прив'язка» здійснюється в ручному режимі, то її точність невисока – близько 0.02 мм. Метод досить простий і полягає в торканні шпинделем або калібром плоскопаралельної кінцевої міри, притиснутої до поверхні деталі. Після нескладних обчислень поточні машинні координати вручну заносяться в реєстри робочих зміщень (G54-G59). Знаходження нульової точки складається з двох етапів: перший - по осі Z, другий - по осях X і Y.

#### **10.6.5 Алгоритм знаходження нульової точки деталі по осі Z**

1. Підготувати і тримати поблизу плоскопаралельну кінцеву міру товщиною не більше 25 мм.

2. Підвести торець шпинделя в поштовховому режимі до поверхні деталі по осі Z на відстань не більше 50 мм.

3. За допомогою маховика або ручного генератора імпульсів підвести торець шпинделя ще ближче до деталі, так щоб ця відстань стала меншою за товщину плоскопаралельної кінцевої міри.

4. Покласти плоскопаралельну кінцеву міру на поверхню деталі поряд зі шпинделем.

5. Поступово переміщати шпиндель у позитивному напрямку по осі Z (вгору), безперервно контролювати зазор між шпинделем та

деталлю.

6. Як тільки плоскопаралельна кінцева міра увійде між шпинделем і деталлю, зупинити рух шпинделя. Шпиндель встановлений правильно, якщо при зміщенні плоскопаралельної кінцевої міри відчувається невеликий опір.

7. Оскільки базовою позицією для шпинделя є точка перетину його торця та осі обертання, необхідно врахувати товщину плоскопаралельної кінцевої міри.

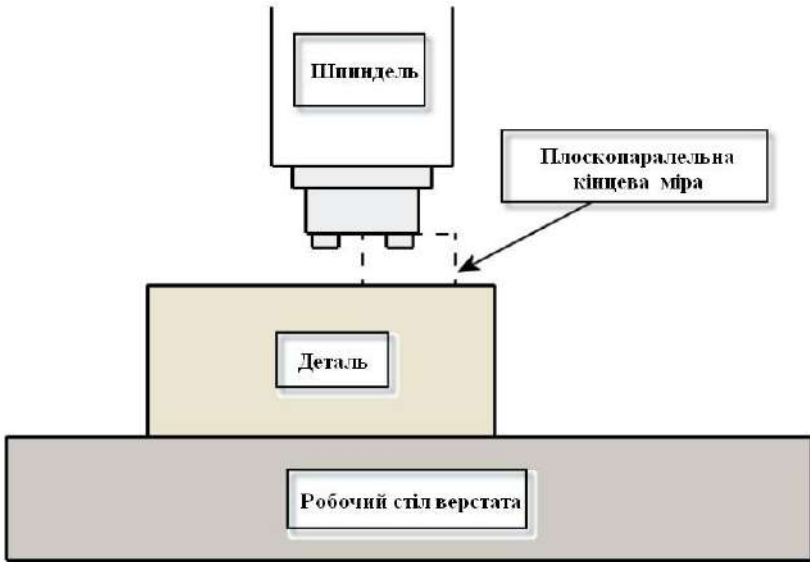


Рисунок 10.68 – Встановлення робочої системи координат по Z

Приклад:

Машинна координата  $Z = -400$ .

Товщина плоскопаралельної кінцевої міри = 25 мм.

У реєстр робочого зміщення  $Z$  заносимо  $= -400 - 25 = -425$  мм.

8. Ввести в реєстр робочого зміщення  $Z$  значення, розраховане в п. 7.

### 10.6.6 Алгоритм знаходження нульової точки деталі по осях X і Y

1. Вставити в шпindel циліндричний калібр з відомим діаметром, наприклад 20 мм.
2. У режимі поштовху підвести калібр до поверхні деталі по осі X на відстань не більше 25 мм.
3. Прикласти до поверхні деталі по осі X плоскопаралельну кінцеву міру.

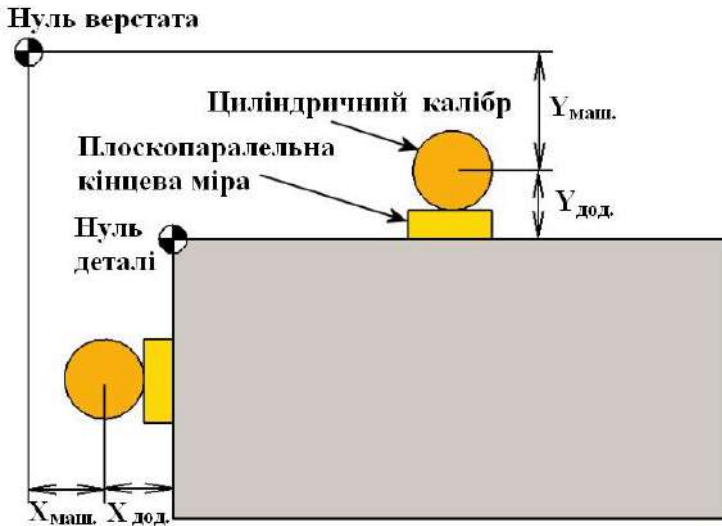


Рисунок 10.69 – Установа робочої системи координат по X і Y

4. За допомогою маховика поступово переміщати шпindel з калібром до деталі вздовж осі X до торкання з плоскопаралельною кінцевою мірою. Шпindel встановлений правильно, якщо при зміщенні плоскопаралельної кінцевої міри відчувається невеликий опір.
5. Відмітити машинну позицію шпинделя, враховуючи радіус циліндричного калібру та товщину плоскопаралельної кінцевої міри, обчислити значення для введення в реєстр робочого зміщення по осі X.

6. Ввести в реєстр робочого зміщення  $X$  значення, розраховане в п. 7.

7. У режимі поштовху підвести калібр до поверхні деталі по осі  $Y$  на відстань не більше 25 мм.

8. Прикласти до поверхні деталі по осі  $Y$  плоскопаралельну кінцеву міру.

9. За допомогою маховика поступово переміщати шпindel ь з калібром до деталі вздовж осі  $Y$  до торкання з плоскопаралельною кінцевою мірою. Шпindel ь встановлений правильно, якщо при зміщенні плоскопаралельної кінцевої міри відчувається невеликий опір.

10. Відзначити машинну позицію шпindel ья, враховуючи радіус циліндричного калібру і товщину плоскопаралельної кінцевої міри, обчислити значення для введення в реєстр робочого зміщення по осі  $Y$ .

11. Ввести в реєстр робочого зміщення  $Y$  значення, розраховане в п. 10.

### 10.6.7 Алгоритм знаходження нульової точки в центрі отвору

1. Встановити в шпindel ь стрілочний індикатор (центрошукач).

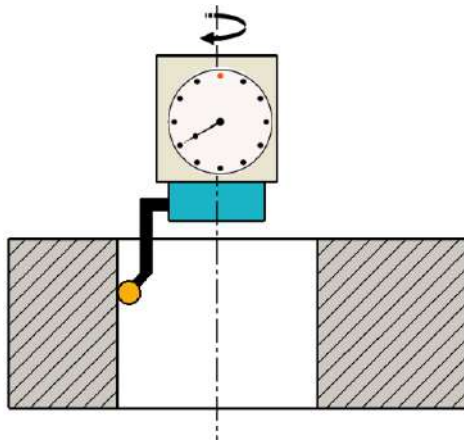


Рисунок 10.70 – Встановлення робочої системи координат у центрі отвору

2. У поштовховому режимі підвести індикатор якомога ближче до центру отвору над деталлю.
3. За допомогою маховика обережно вставити щуп індикатора в отвір.
4. Притулити щуп до стінки отвору.
5. Використовуючи обертальний рух, юстувати положення осей X і Y шпинделя до тих пір, поки дисбаланс, що показується індикатором, не виявиться в допустимих межах.
6. Записати машинні координати по X і Y у відповідні регістри робочих зсувів.

### 10.6.8 Вимірювання інструменту та деталі

Як ви вже знаєте, для того, щоб ріжучий інструмент приходив у правильну позицію, необхідно виконати компенсацію його довжини, тобто зміщення базової точки шпинделя на величину записану в регістрі довжини цього інструменту.



Рисунок 10.71 – Датчик Renishaw TS-27  
для вимірювання довжини та радіусу інструменту

У деяких випадках слід зробити корекцію на радіус інструменту. Перед початком обробки оператор верстата повинен виміряти

довжину та радіус кожного інструменту, що використовується в УП, та записати числові значення у відповідні реєстри системи ЧПУ.



Рисунок 10.72 – Пристрій для вимірювання інструменту поза верстатом

Існують кілька методів для вимірювання довжини та радіуса ріжучого інструменту: метод торкання заготовки, вимірювання поза станком за допомогою спеціального вимірювального пристрою та автоматичне вимірювання на верстаті.

Переваги автоматичного вимірювання – висока точність та швидкість. В даний час багато обробних центрів оснащуються спеціальним датчиком торкання. Зазвичай він розташований у кутку робочого столу та не заважає обробці. Вимірювання геометричних характеристик інструменту проводиться автоматично за спеціальною програмою, закладеною в СЧПУ.

Потрібний інструмент встановлюється в шпиндель і за командою оператора автоматично підводиться до датчика. Спочатку інструмент підводиться до датчика торкання зверху. Оскільки система знає координати датчика і базової точки шпинделя, то в момент торкання вона здійснює обчислення абсолютної довжини інструмента.

Потім інструмент торкається датчика збоку і система визначає його радіус. Перед початком циклу автоматичного вимірювання оператор повинен внести в реєстри системи приблизні значення довжини і радіуса інструменту (можна заміряти звичайною лінійкою), щоб уникнути зіткнення з датчиком. Після виміру отримані дані відразу потрапляють у відповідні реєстри СЧПУ.

Аналогічні системи існують і в безконтактному варіанті, при цьому вимірювання інструменту здійснюється за допомогою лазера.

На деяких підприємствах для вимірювання інструментів використовують спеціальний електронно–механічний пристрій. Інструмент встановлюють у гніздо, аналогічне конусу шпинделя

верстата, і підводять вимірювальний щуп до ріжучої кромки. На невеликому дисплеї відображаються довжина та радіус. Оператор верстата повинен самостійно занести отримані значення у відповідні реєстри системи.



Рисунок 10.73 – Вимірювальний щуп торкається поверхні деталі

Для автоматичного встановлення робочої системи координат та вимірювання розмірів деталей на верстаті з ЧПУ встановлюється спеціальна система, що складається з вимірювального щупа, який кріпиться у шпинделі аналогічно інструменту та інфрачервоним датчикам, що «висять» на корпусі всередині робочої зони.

Оператор верстата може підвести щуп до деталі, за певною командою він торкнеться поверхні та визначить її координати. Можна, наприклад, автоматично виміряти діаметр обробленого отвору та знайти його центр. Інфрачервоні датчики працюють як приймач – вони отримують сигнал від щупа в момент його торкання поверхні деталі і передають його в систему управління.

## **10.7 Корисні програми**

### **10.7.1 Моніторинг ЧПУ**

Сьогодні більшість машинобудівних компаній мають сучасний

верстатний парк, чи то невеликий цех, що складається з декількох верстатів з числовим програмним управлінням (ЧПУ), або велике виробництво, оснащене сотнею обробних центрів. Природно, що інвестуючи у виробництво, адміністрація будь-якого підприємства сподівається отримати максимум якісної продукції в якомога стисліші терміни, щоб швидше «відбити» вкладені кошти.



Рисунок 10.74 – Електронний блок моніторингу на верстаті з ЧПУ

Цього можна досягти лише за умови чіткої організації технологічного циклу, безперебійної роботи цехових служб та обладнання. Донедавна завдання контролю над верстатами з ЧПУ та над виробничим персоналом вирішувалося досить примітивно.

Майстри дільниць самі писали звіти про плани та завантаження верстатів, ставили «вісімки» в табельний лист, зазвичай особливо не переймаючись точністю отриманої інформації, або, навпаки, озвучували «правильні» цифри, вигідні їм самим.

І досі на деяких заводах можна побачити прикріплені до стійки ЧПУ паперові листочки з розкресленими таблицями, куди оператори під кінець зміни ставлять галочки, звітуючи про виконану роботу. Природно, що при такому підході й мови не може бути про достовірність інформації, яку отримує адміністрація підприємства.

Програмно–апаратний комплекс «Моніторинг ЧПУ» – це нове покоління вже відомої системи «Foreman MDC», що дозволяє керівництву підприємства отримувати у вигляді наочних графіків та звітів точні дані про завантаження та причини простою обладнання, а цеховим службам – оперативну інформацію про аварійні та позаштатні ситуації з виробництва.

Технологам і нормувальникам істотно допоможуть відомості про фактичний час обробки деталей і режими різання, що автоматично зберігаються в базі даних. Вся отримана інформація зберігається на сервері і може бути використана у системі документообігу підприємства.

**Можливості.** Комплекс моніторингу однаково добре працює як із сучасними верстатами з ЧПУ, так і з обладнанням минулих поколінь, включаючи універсальні верстати. Забезпечується цілодобовий моніторинг із такими можливостями:

- дистанційний контроль роботи верстатів у режимі реального часу на ПК;
- автоматичне обчислення коефіцієнта завантаження одного верстата чи групи верстатів;
- виявлення причин і тривалості простою виробничого обладнання;
- генерація табличних, текстових та графічних звітів для адміністрації підприємства;
- визначення фактичного машинного та допоміжного часу обробки деталей;
- автоматичне сповіщення про аварійні та позаштатні ситуації по електронній пошті;
- інтелектуальний фото– та відеозапис виробничого процесу;
- авторизація операторів та документації;
- архів управляючих програм з функцією редагування та приймання/передачі на верстати;
- можливість оцінки виробничої діяльності за критерієм план–факт.

#### **Контроль у режимі реального часу.**

Встановивши на персональний комп'ютер програму «Моніторинг онлайн», ви отримуєте можливість безпосередньо зі свого робочого місця в режимі реального часу контролювати події, що відбуваються з цеховим обладнанням.



Рисунок 10.75 – Приклад звіту про завантаження обладнання та причини простою

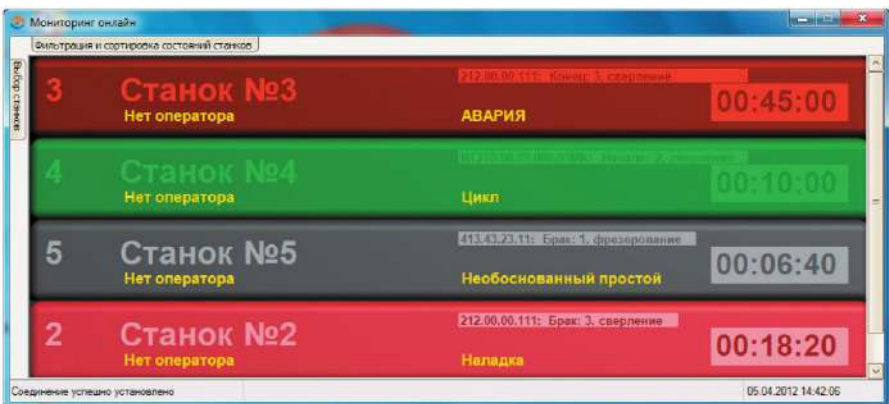


Рисунок 10.76 – Вікно програми «Моніторинг онлайн»

Відпадає стомлива необхідність щоранку робити обхід всього верстатного парку: досить просто клацнути кнопкою миші – і вся інформація про роботу верстатів та операторів у наочному вигляді відображається на моніторі.

Можливий і віддалений моніторинг: щоб у будь-якій точці планети отримувати оперативну інформацію про стан виробництва достатньо мати лише підключення до мережі Інтернет.



Рисунок 10.77 – Діаграма Ганта подій з конкретним верстатом

### Формування звітів та графіків.

Програма «Генератор звітів» дозволяє адміністрації підприємства правильно оцінювати різні техніко-економічні параметри виробництва та здійснює випуск звітної документації. Робота з програмою дуже проста і складається з трьох етапів:

- вибір об'єктів – слід вказати назви верстатів або прізвища операторів для формування звіту або графіка;

- вибір часового інтервалу – потрібно за допомогою вбудованого календаря задати дату/час початку та кінця звітного періоду;
- вибір типу звіту – для формування звіту на основі інформації, що зберігається в базі даних на сервері, достатньо двічі клацнути клавішею миші по ярлику.

№ станка	Наименование станка	Начало аварии	Конец аварии	Длительность	Оператор	Список событий	Состояние	Наименование события
		06.09 08:43:01	06.09 09:06:21	0:23:20				Нет работы
		06.09 11:01:21	06.09 11:09:41	0:08:20	Нет оператора		стоп	Контроль детали
		06.09 11:09:41	06.09 11:14:41	0:05:00	Пущин С.А.			
		06.09 11:14:41	06.09 11:18:01	0:03:20	Нет оператора			
		06.09 12:39:41	06.09 12:43:01	0:03:20	Краснов Г.А.		старт	
		06.09 13:13:01	06.09 13:26:21	0:13:20				
		06.09 13:26:21	06.09 13:26:21	0:00:00	Нет оператора		стоп	Нет работы
		06.09 13:26:21	06.09 13:28:01	0:01:40	Пущин С.А.			
		06.09 13:28:01	06.09 13:29:41	0:01:40	Нет оператора			
		06.09 16:26:21	06.09 16:28:01	0:01:40	Нет оператора			
		06.09 16:28:01	06.09 16:33:01	0:05:00	Пущин С.А.		старт	
		06.09 19:01:21	06.09 19:09:41	0:08:20	Нет оператора			
		06.09 19:36:21	06.09 19:39:41	0:03:20	Пущин С.А.			
		06.09 23:14:41	06.09 23:14:41	0:00:00	Нет оператора		стоп	Контроль детали
		06.09 23:14:41	06.09 23:14:41	0:00:00	Краснов Г.А.			
		07.09 00:51:21	07.09 00:54:41	0:03:20	Савостиков А.Б.		старт	
1	RayFeng RF-C25	07.09 02:56:21	07.09 02:56:21	0:00:00		нет		
		07.09 03:04:41	07.09 03:04:41	0:00:00				Нет материала
		07.09 03:24:41	07.09 03:24:41	0:00:00	Нет оператора			
		07.09 03:28:01	07.09 03:28:01	0:00:00	Пущин С.А.		стоп	Наладка
		07.09 03:29:41	07.09 03:29:41	0:00:00	Нет оператора			
		07.09 04:53:01	07.09 04:53:01	0:00:00	Пущин С.А.			Техническое обслужи...
		07.09 08:51:21	07.09 08:56:21	0:05:00	Нет оператора			
		07.09 08:56:21	07.09 08:58:01	0:01:40	Краснов Г.А.			
		07.09 12:21:21	07.09 12:43:01	0:21:40	Пущин С.А.		старт	
		07.09 12:43:01	07.09 12:48:01	0:05:00	Нет оператора			
		07.09 13:14:41	07.09 13:14:41	0:00:00	Савостиков А.Б.			
		07.09 13:18:01	07.09 13:18:01	0:00:00			стоп	Техническое обслужи...
		07.09 13:26:21	07.09 13:29:41	0:03:20	Нет оператора			
		07.09 14:19:41	07.09 14:26:21	0:06:40	Краснов Г.А.			
		07.09 14:26:21	07.09 14:33:01	0:06:40	Нет оператора			
		07.09 14:33:01	07.09 14:44:41	0:11:40	Краснов Г.А.		старт	
		07.09 14:44:41	07.09 14:49:41	0:05:00	Нет оператора			
		07.09 14:49:41	07.09 14:51:21	0:01:40	Краснов Г.А.			

Рисунок 10.78 – Звіт про аварійні ситуації з обладнанням

У стандартне постачання комплексу входять кілька базових звітів: «Ефективність використання обладнання», «Обґрунтований простій», «Робота поза графіком», «Необґрунтований простій», «Всі події верстата», «Звіт з аварій», «Ефективність роботи операторів».

Сформовані звіти, що містять барвисті 3D-діаграми та табличні дані, можуть бути збережені у різних форматах або роздруковані на принтері. Зручний механізм плагінів дозволяє замовляти розробнику будь-які необхідні саме вашому виробництву типи звітів та швидко додавати їх до системи.

### **Прискорення роботи цехових служб.**

Однак сказане аж ніяк не означає, що комплекс призначений виключно для моніторингу обладнання та персонального контролю над операторами. Функція автоматичного оповіщення дозволяє суттєво прискорити роботу деяких цехових служб та оперативно впливати на проблеми, що виникають. Наприклад, якщо на верстаті станеться аварія, система автоматично надішле текстове повідомлення на персональний комп'ютер головного інженера або механіка.

Якщо закінчилися заготовки, то оператор може натиснути кнопку «Немає матеріалу» на блоці моніторингу – тим самим він відішле електронне повідомлення до цехової служби, що відповідає за постачання верстата заготовками.

Якщо ж технолог–програміст забуде про необхідність створення та передачі на верстат управляючої програми, оператор може нагадати йому про це, натиснувши кнопку «Немає програми». Таким чином, комплекс гарантує оперативність вирішення проблем, що дозволять швидко відновити виробничий цикл і не зірвати терміни поставки продукції.

### **Впровадження для підприємства.**

Сучасна архітектура комплексу «Моніторинг ЧПУ» дозволяє швидко впровадити його на будь–якому підприємстві. При цьому не важливо, яке обладнання ви використовуєте: система дозволить зв'язати в єдиний інформаційний простір як нові імпортні центри обробки, так і застарілі радянські верстати з ЧПУ.

Простота монтажу пояснюється, по–перше, тим, що всі апаратні засоби знаходяться всередині блоку моніторингу, що кріпиться безпосередньо на стійці ЧПУ або поруч із нею. Аналогічні продукти інших фірм встановлюються всередину стійки, що значно ускладнює та подорожчає процес монтажу.

По–друге, підтримка комплексом бездротової передачі дозволяє уникнути необхідності трудомісткої протяжки кабелів по всьому цеху. Важлива перевага – розробкою комплексу займаються вітчизняні інженери, до яких завжди можна звернутися за консультацією, замовити необхідний тип звіту або зв'язати верстатну базу даних із системою документообігу, що діє на підприємстві.

Наразі комплекс запроваджено та успішно працює на провідних вітчизняних підприємствах машинобудування.

## 10.7.2 Редактор УП Cimco Edit 7

Програма Cimco Edit (рис. 10.79) компанії Cimco Integration призначена для редагування, перевірки та передачі УП з комп'ютера на верстат з ЧПУ і назад. Цей простий і надійний редактор УП володіє багатьма корисними інструментами, необхідними технологів-програмісту в його щоденній роботі.

Головне меню програми складається з декількох пунктів: «Редактор» (робота з файлами, редагування), «Функції УП» (спеціалізовані інструменти для редагування УП, статистика УП), «Промальовування» (відображення траєкторії інструменту), «Порівняння файлів» (знаходження відмінностей у двох файлах), «Передача» (надсилання УП на верстат), «ЧПУ-калькулятор» (графічний редактор із можливістю генерації УП).

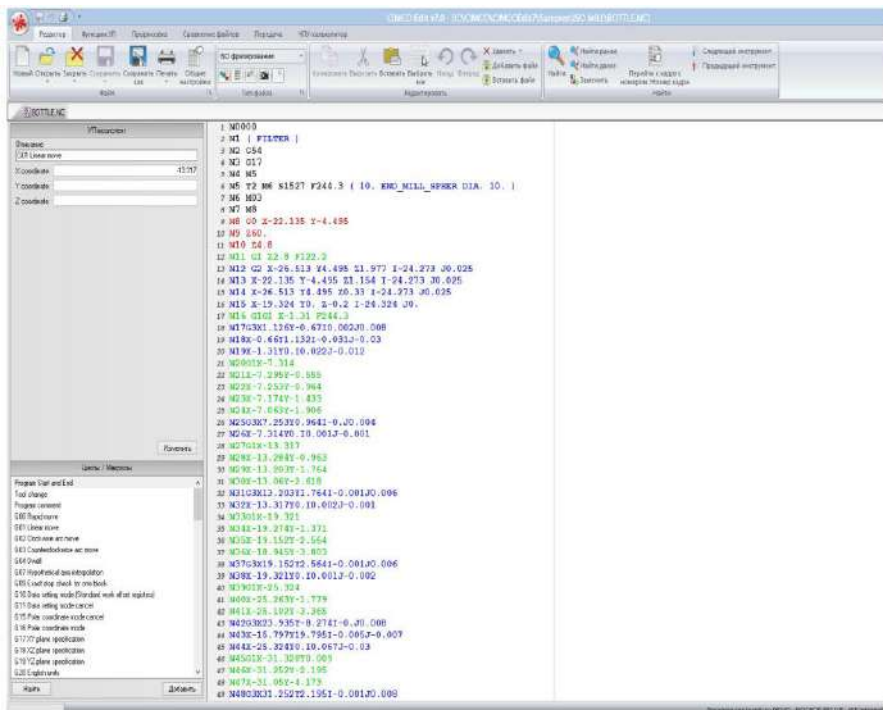


Рисунок 10.79 – Інтерфейс програми Cimco Edit

Можливості редагування Cimco Edit типові для будь-якого текстового редактора: ви можете копіювати, вставляти або видаляти будь-який фрагмент УП. Також є функції пошуку певної інформації у файлі та автоматичної заміни одних даних іншими. Існує можливість виділення/видалення певного діапазону інформації та переходу до потрібного рядка або кадру.

Цікавою є функція «Статистика траєкторії», яка автоматично визначає максимальні та мінімальні координати в УП (рис. 10.80), час обробки та виводить іншу корисну інформацію.

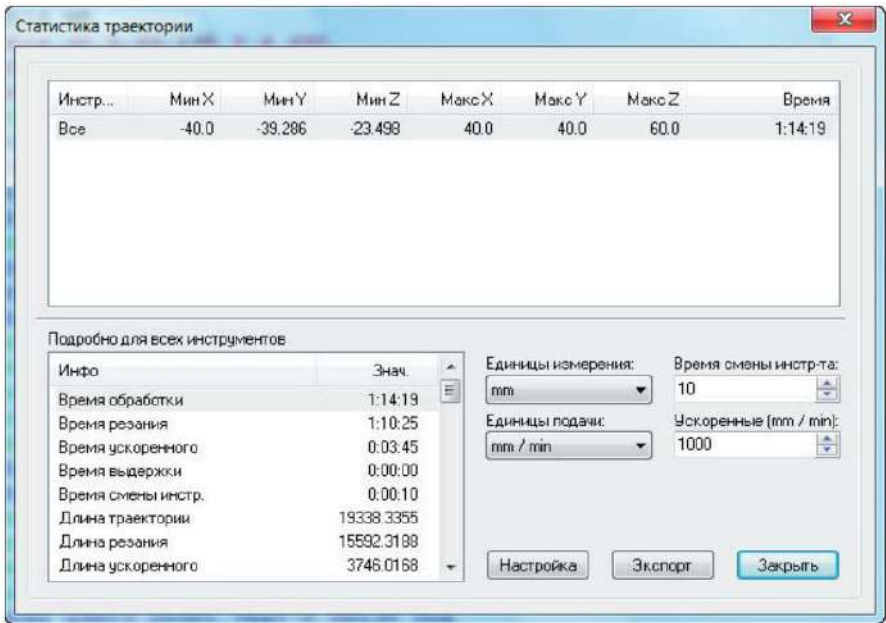


Рисунок 10.80 – Статистика траєкторії

Для передачі даних із персонального комп'ютера на верстат з ЧПУ (і навпаки) скористайтесь пунктом «Передача УП» основного меню. Ви можете використовувати Cimco Edit для зв'язку з різними верстатами, потрібно лише правильно налаштувати параметри приймання/передачі.

Якщо вибрано пункт «DNC Налаштування», з'явиться вікно налаштувань передачі. У верхній частині цього вікна («Верстати») ви

побачите назви верстатів – Machine 1 і Machine 2. Тут ви можете перейменувати існуючі верстати, видалити їх або додати нові.

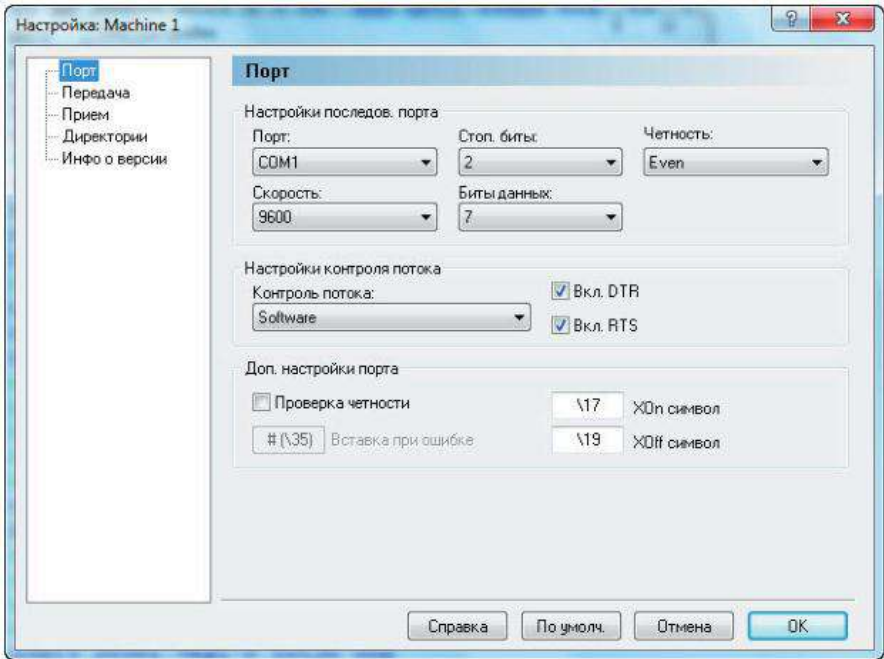


Рисунок 10.81 – Вікно налаштувань прийому/передачі

У нижній частині вікна («Конфігурація») представлена інформація про поточну конфігурацію: протокол передачі даних, порти і тип верстата. Виберіть Machine 1 і натисніть «Настройка».

Відкриється нове вікно для налаштування параметрів прийому/передачі даних вибраного верстата. Закладка «Порт» настроює порт комп'ютера для зв'язку із системою ЧПУ верстата. Якщо ви помилитеся з налаштуванням параметрів у цій закладці, то, швидше за все, передати програму обробки на верстат не вдасться. Закладки «Прийом» і «Передача» призначені для налаштування спеціальних можливостей системи, наприклад для роботи в режимі прямого числового введення DNC.

Для передачі УП на верстат виберіть «Послати» – Cimco Edit почне передавати дані, на екрані з'явиться вікно стану процесу

передачі. За допомогою Cimco можна передавати не тільки програми обробки, але й параметри верстата або дані про інструмент та коректори. Іноді виникає необхідність порівняти два варіанти однієї програми або просто два текстові файли (наприклад, файли параметрів або постпроцесори).

Якщо програми великі, то знайти невелику різницю візуально дуже важко. Редактор Cimco Edit допоможе і в цьому пункт «Порівняння файлів» головного меню призначений для порівняння вмісту текстових файлів. Кнопки «Наступна різниця» та «Попередня відмінність» автоматично переходять до знайдених відмінностей у файлах та виділяють ці місця кольором (рис. 10.81).

Загалом, Cimco Edit має багато корисних можливостей, які можуть бути доповнені й іншими цікавими рішеннями: Cimco DNC–Max, Cimco MDC, Cimco Filter.

Більш детальну інформацію про програмні продукти Cimco можна знайти на сайті <https://www.cimco.com>.

### 10.7.3 Сімейство сучасних САМ–систем «Техтран»

Техтран® – це сімейство сучасних САМ–систем, об'єднаних загальним інтерфейсом і єдиним підходом до вирішення завдань технологічного проектування.

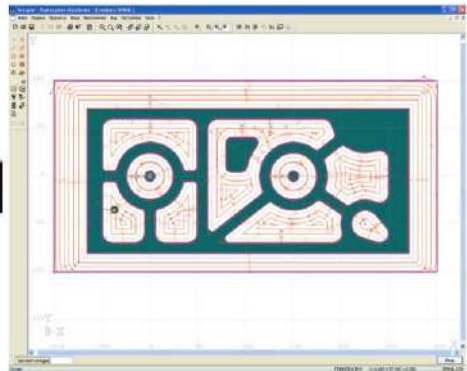


Рисунок 10.82 – Програма 2,5–координатної обробки деталей

Прості універсальні рішення та відкритість даних сприяли тому, що Техтран з успіхом використовується підприємствами різних

галузей вже понад тридцять років. У Техтрані поєднуються різні підходи до вирішення технологічних завдань. Складні механізми формування десятків і сотень команд обробки для цілого технологічного переходу доповнюються набором можливостей для програмування окремих дій. Завдяки цьому Техтран виявляється незамінним у разі виникнення нестандартних ситуацій і роботи з нетрадиційним обладнанням.

### **Фрезерна обробка.**

Програма призначена для проектування УП 2,5–координатної обробки деталей на фрезерних, свердильних, розточувальних верстатах з ЧПУ та обробних центрах:

- одно– та багатопрхідна контурна обробка з використанням корекції на радіус інструменту в ЧПУ;
- вибір суцільного матеріалу із закритих, відкритих та підлогу відкритих областей;
- пошарова обробка;
- контроль зарізування деталі, облік геометрії заготовки та притисків;
- позиційна обробка з використанням вбудованих циклів ЧПУ або формування траєкторії у явному вигляді;
- використання осі обертання;
- формування УП з використанням підпрограм.

### **Токарна обробка.**

Програма призначена для проектування управляючих програм обробки деталей на токарних та карусельних верстатах з ЧПУ та обробних центрах:

- опис інструментів різних типів;
- визначення патрона, деталі, заготовки, задньої бабки, люнету;
- поперехідна обробка (точіння, розточування, відрізка, свердління та ін.);
- коригування заготовки після кожного переміщення інструменту;
- аналіз на відсутність зіткнення інструменту з патроном, деталлю та заготовкою (на прискорених переміщеннях), контроль зарізування деталі;
- режим коригування геометрії деталі;
- використання вбудованих циклів ЧПУ або формування

- траєкторії у явному вигляді;
- використання двох шпинделів та двох револьверних голів.

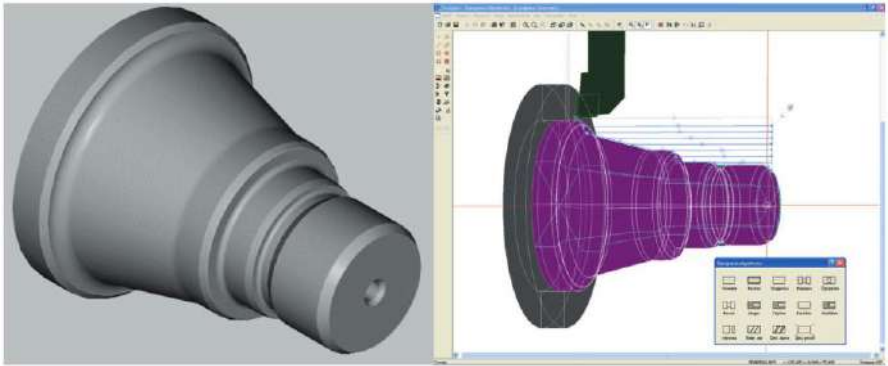


Рисунок 10.83 – Програма проектування управляючих програм обробки деталей на токарних і карусельних верстатах із ЧПУ

### Токарно–фрезерна обробка.

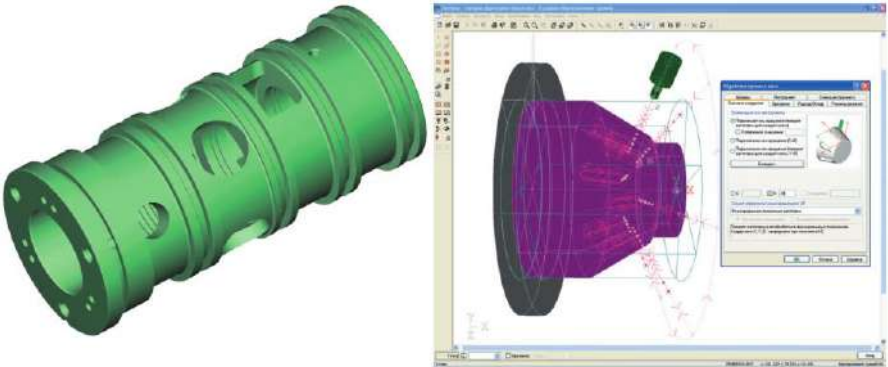


Рисунок 10.84 – Програма для проектування програм обробки деталей на токарно–фрезерних центрах з ЧПУ

Програма призначена для проектування програм обробки деталей на токарно–фрезерних центрах з ЧПУ:

- узгоджене проектування переходів токарної та фрезерної обробки;
- поєднання геометрії токарних та фрезерних елементів;

- фрезерна обробка з використанням осі обертання;
- обробка радіусних та гвинтових пазів за рахунок використання осі обертання;
- завдання способу керування віссю обертання в УП;
- використання циліндричної та полярної інтерполяції в УП;
- визначення точки зміни інструменту;
- безпечне переміщення інструменту між переходами з урахуванням геометрії заготовки та затискного пристрою.

-

### **Багатошпindelъне свердління.**

Програма призначена для проектування програм обробки деталей на багатошпindelъних верстатах з ЧПУ:

- відновлення прямокутної сітки отворів за отворами, розташованими на межі області заповнення;
- аналіз та виправлення неточностей у даних креслення;
- генерація різних варіантів обробки;
- підбір найкращого варіанта обробки за кількома критеріями;
- створення УП для найкращого варіанта.

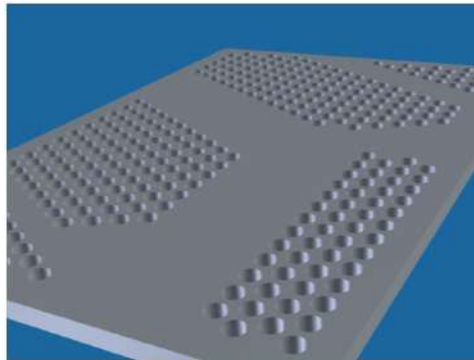


Рисунок 10.85 – Багатошпindelъне свердління

### **Розкрій листового матеріалу.**

Програма призначена для комплексного розв'язання задачі розкрою листового матеріалу. Вона поєднує можливості системи підготовки управляючих програм із функціями організації виробничого процесу:

- фігурний розкрій. Проектування УП для машин термо– та

- гідрорізки;
- прямокутний розкрій. Проектування карт розкрою для гільйотинних ножиць;
- база даних. Взаємодія завдань на розкрій, деталей, листів, розкроїв листів;
- автоматичне розміщення деталей. Автоматично укладає деталі завдання на листи оптимальним чином;
- розміщення деталей. Розміщення деталі на листі явним чином. Динамічний контроль переміщення, переміщення до упору, копіювання впритул, вирівнювання сторін;
- програмування обробки. Будує траєкторію інструменту з підходами та відходами. Обробляє містки та перемички. виконує суміщену обробку пар деталей;
- обробка кромки під зварювання;
- використання ділового відходу;
- документування. Формує наступні вихідні документи: карту розкрою листа, специфікацію розкрою листа, специфікацію завдання розкрою, статистику.

#### **Листове штампування.**

Програма призначена для комплексного вирішення завдання листового штампування:

- база даних завдань на розкрій, деталей, листів, розкроїв листів;
- автоматичне розміщення деталей завдання оптимальним чином;
- розміщення деталей;
- використання як типових інструментів, так і інструментів заданої форми;
- формування та використання готових комплектів інструментів;
- пробивання одиночних отворів;
- вирубування ділянки. Визначення граничних положень за допомогою вирівнювання щодо кінця ділянки чи суміжних ділянок. Розміщення перемичок;
- дроблення – руйнування матеріалу в заданій області;
- автоматичне штампування;
- управління порядком обробки (оптимізація) з урахуванням зони листа, інструменту, деталі.

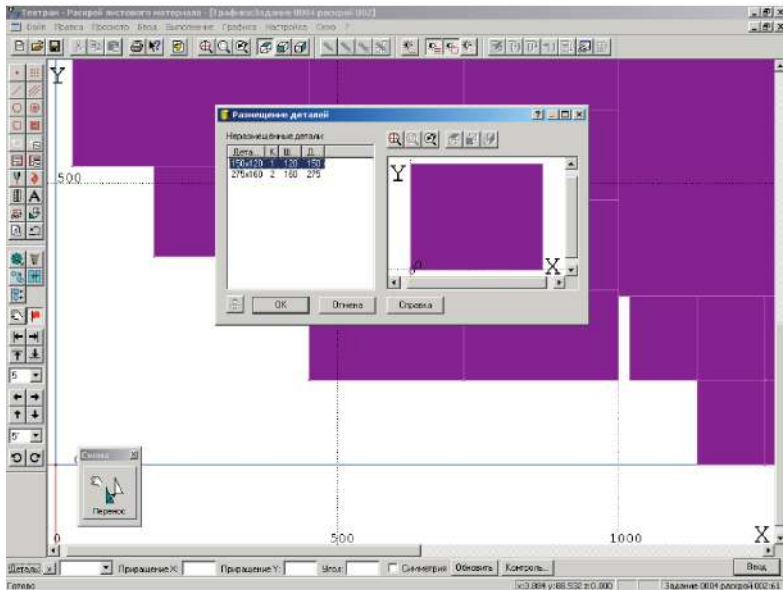
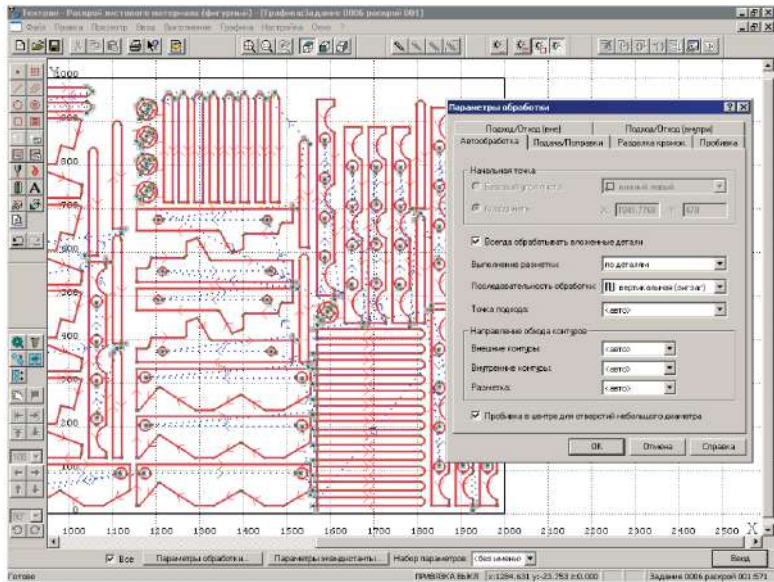


Рисунок 10.86 – Програма для комплексного розв'язання задачі розкрою листового матеріалу

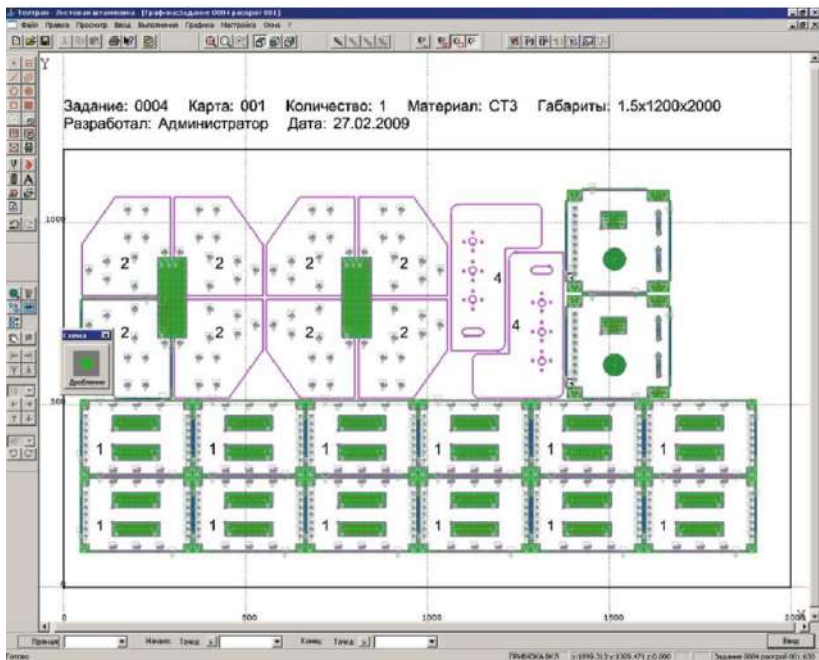
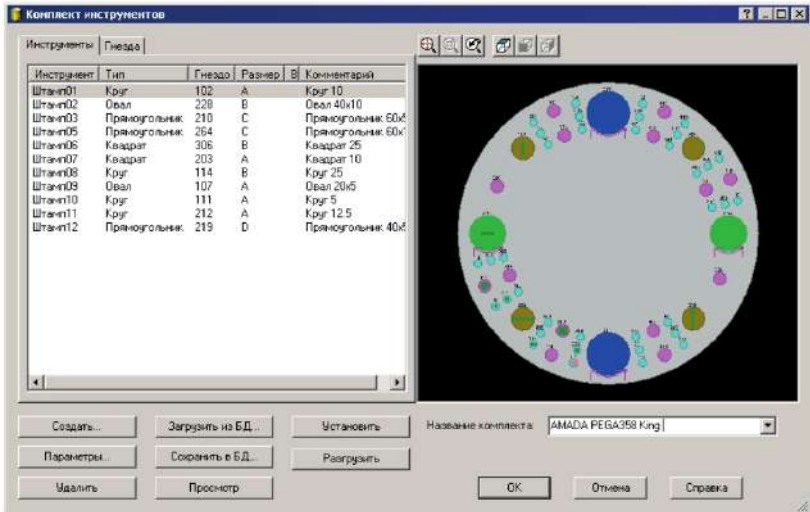


Рисунок 10.87 – Програма для комплексного вирішення завдання листового штампування

### **Електроерозійна обробка.**

Програма призначена для проектування управляючих програм 2-4-координатної обробки деталей на електроерозійних верстатах з ЧПУ:

- програмування обробки деталей з вертикальною або похилою бічною поверхнею;
- побудова бічної поверхні деталі за базовим контуром;
- моделювання обробки з урахуванням параметрів конусності геометричної моделі;
- постійний або змінний кут нахилу дроту;
- довільні контури верхнього та нижнього профілів;
- сполучення контурів: автоматичне або в заданих точках;
- контроль допустимого кута нахилу дроту.

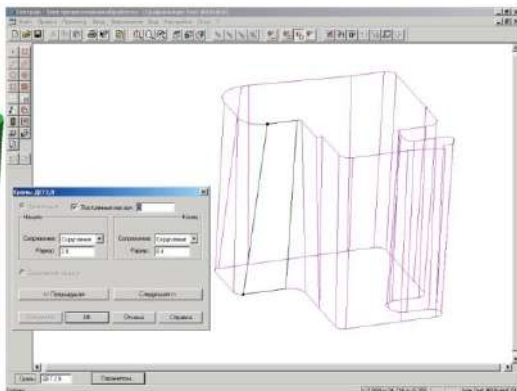


Рисунок 10.88 – Програма для проектування управляючих програм обробки деталей на електроерозійних верстатах з ЧПУ

### **Контроль управляючих програм.**

Програма призначена для відображення, контролю та редагування управляючих програм для верстатів з ЧПУ. Програма може використовуватися у взаємодії з іншими програмами сімейства Тхтран та як незалежний продукт. При цьому не має значення, як було отримано УП: з використанням системи автоматизованого програмування або вручну.

- аналіз УП з урахуванням особливостей конкретної системи

ЧПУ;

- перегляд об'єктів, що використовуються в УП: інструментів, підпрограм, вбудованих циклів, технологічних команд;
- виконання кадрів УП у різних режимах;
- анімація виконання;
- перетворення УП на програму мовою Техтран, можливість використання даних УП у програмах сімейства Техтран.

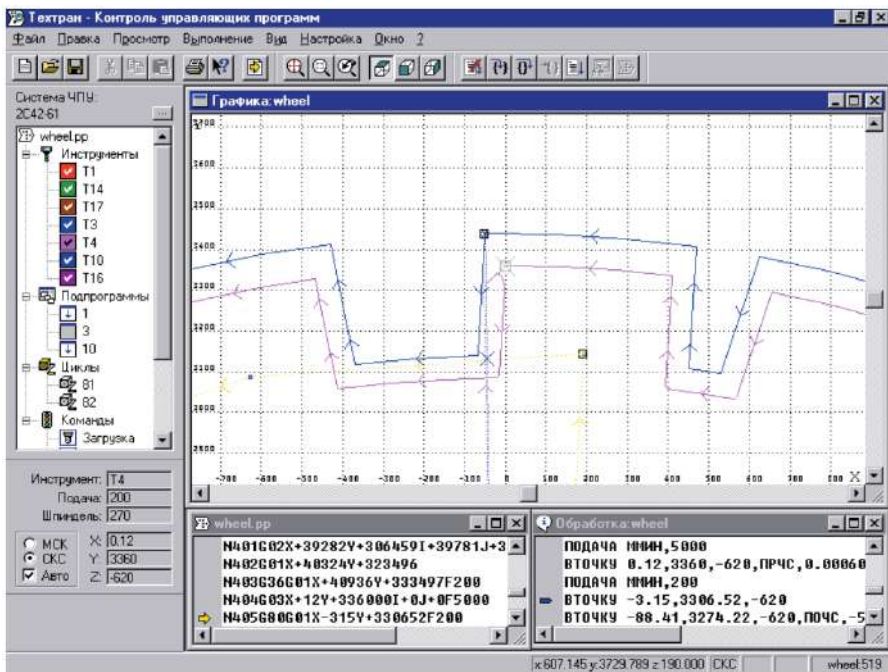


Рисунок 10.89 – Програма для відображення, контролю та редагування управляючих програм для верстатів з ЧПУ

### Питання для самоперевірки

1. В чому полягають переваги верстатів з ЧПУ?
2. Що таке числове програмне управління?
3. Назвіть функціональні складові (підсистеми) ЧПУ.
4. З чого складається підсистема приводів?

5. Які види крокових двигунів використовують на верстатах з ЧПУ?
6. Поясніть принцип роботи підсистеми зворотного зв'язку.
7. Які типи датчиків використовуються для визначення положення і стану виконавчих органів верстатів з ЧПУ?
8. Яке призначення інтерполятора?
9. Які мови використовуються для програмування обробки?
10. До чого може призвести помилка в програмі обробки?
11. Як здійснюється передача управляючої програми на верстат?
12. Як проводиться перевірка управляючої програми на верстаті?
13. Назвіть загальні правила експлуатації верстатів з ЧПУ.
14. Як визначається нульова точка верстата та напрями переміщень?
15. Що називається компенсацією довжини інструменту?
16. Що таке абсолютні та відносні координати?
17. Навіщо в тексті програми верстата залишають коментарі?
18. Які дані містяться у коментарях програми обробки?
19. Які є методи програмування обробки для верстатів з ЧПУ?
20. Які види моделювання ви можете назвати?
21. Що таке бекплот та верифікація?
22. Що таке постпроцесор?
23. Які вимоги висуваються до сучасної САМ–системи?
24. Назвіть органи управління верстатом з ЧПУ.
25. Як здійснюється моніторинг роботи верстатів з ЧПУ?

## ЛІТЕРАТУРА

1. Бучинський М. Я., Горик О. В., Чернявський А. М. Онови творення машин. Харків : Вид-во «НТМТ», 2017. 448 с.
2. Короп І. В., Петренко В. П. Інтелектуальна власність : навч. посіб. / за заг. ред. В. П. Петренка. Івано-Франківськ: Факел, 2008. 208 с.
3. Корець М. Машинознавство. Київ : Знання України, 2001. 448 с.
4. Флора В. Д. Принципи технічної творчості : навч. посіб. Запоріжжя : ЗНТУ, 2005. 398 с.
5. Карпаш О. М., Шейнбаум В. С., Карпаш М. О. Інженерна діяльність в умовах сталого розвитку : навч. посіб. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2014. 285 с.
6. Рудь Ю. С. Основи конструювання машин : підручник. 2-е вид., переробл. Кривий Ріг : Видавець ФОП Чернявський Д.О., 2015. 492 с.
7. ДСТУ 3321-2003. Система конструкторської документації. Терміни та визначення основних понять. Вид. офіц. Київ : Держспоживстандарт України, 2005. 55 с.
8. ДСТУ ГОСТ 2.601:2006 Єдина система конструкторської документації. Експлуатаційні документи. Вид. офіц. Київ : Держспоживстандарт України, 2007. 39 с.
9. Попович В. В. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство : підручник Львів : Світ, 2006. 624 с.
10. Технологія конструкційних матеріалів: підручник. 2-ге вид., перероб. і допов. / за ред. М. А.Сологуба. Київ : Вища шк., 2002. 374 с.
11. Сторож Б. Д., Карпик Р. Т. Технологічні основи машинобудування : навч. посіб. Івано-Франківськ : Факел, 2002. 182 с.
12. Горбатюк Є. О. Технологія машинобудування : навч. посіб. Львів : «Новий світ - 2000». 2009. 358 с.
13. Аверченков В. І. Збірник задач і вправ з технології машинобудування : навч. посіб. Житомир : ЖІТІ, 2001. 314 с.
14. Теоретичні основи технології виробництва деталей та складання машин : лабораторний практикум / О. В. Дерібо, Ж. П. Дусанюк, О. М. Мироненко та ін. Вінниця : ВНТУ, 2006. 119 с.
15. Дерібо О. В. Основи технології машинобудування. Частина 1 : навч. посіб. Вінниця : ВНТУ, 2013. 125 с.
16. Дерібо О. В. Основи технології машинобудування. Частина 2 :

- навч. посіб. Вінниця : ВНТУ, 2015. 116 с.
17. Дерібо О. В. Технологія машинобудування. Курсове проектування : навч. посіб. Вінниця : ВНТУ, 2013. 123 с.
  18. Руденко П. О. Проектування технологічних процесів у машинобудуванні. Київ : Вища школа, 1993. 414 с.
  19. Вибір, проектування і виробництво заготовок деталей машин / Руденко П. О., Харламов Ю. О., Шустик О. Г. Київ : ІСДО, 1993. 304 с.
  20. Теоретичні основи технології виробництва деталей та складання машин / О. В. Дерібо, Ж. П. Дусанюк, О. М. Мироненко та ін. Вінниця : ВНТУ, 2006. 119 с.
  21. Бондаренко С. Г. Основи технології машинобудування : навч. посіб. Львів : Магнолія, 2018. 500 с.
  22. Дерібо О. В. Основи технології машинобудування. Частина 1 : практикум. Вінниця : ВНТУ, 2017. 106 с.
  23. Дерібо О. В. Основи технології машинобудування. Частина 2 : практикум. Вінниця : ВНТУ, 2015. 116 с.
  24. Нормування часу та режимів різання для токарних верстатів з ЧПУ. / В. А. Кирилович, П. П. Мельничук, В. А. Яновський ; під заг. ред. В. А. Кириловича. Житомир : ЖІТІ, 2001. 600 с.
  25. Розмірно-точнісний аналіз конструкцій та технологій / В. Д. Рудь, О. О. Герасимчук, Т. П. Маркова. Луцьк : РВВ ЛДТУ, 2008. 344 с.
  26. Основи технології машинобудування. Самостійна та індивідуальна робота студентів : навч. посіб. / О. В. Дерібо, Ж. П. Дусанюк, С. В. Репінський, С. І. Сухоруков. Вінниця : ВНТУ, 2021. 90 с.
  27. Копей В., Одосій З., Онисько О. Технологія машинобудування : навчальний посібник. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2021. 217 с.
  28. Сторож Б. Д., Мазур М. П., Карпик Р. Т., Каразей В. Д. Технологічні основи машинобудування : навч. посібник. Хмельницький : ТУП, 2003. 153 с.
  29. The CNC Handbook : Digital Manufacturing and Automation from CNC to Industry 4.0 / Hans Bernhard Kief, Helmut A. Roschiwal, Karsten Schwarz. Industrial Press, Inc., 2021. 2156 p.
  30. Rakesh Kumar Phanden, Ravinder Kumar, Pulak Mohan Pandey, Ayon Chakraborty. Advances in Industrial and Production Engineering : Lecture Notes in Mechanical Engineering (ISBN 978-981-99-1328-2). Singapore : Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2023. 418 p.





*Навчальне видання*

**АРТЮХ Олександр Миколайович**

**ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ  
АВТОМОБІЛЕБУДУВАННЯ**

**ЧАСТИНА 2**

*Навчальний посібник*

Комп'ютерний набір: Артюх О. М.

Комп'ютерна верстка: Артюх О. М.

Підписано до друку 14.03.2024. Формат 60×84/16.  
Ум. друк. арк. 15,58. Тираж 100 прим. Зам. № 249.

Національний університет «Запорізька політехніка»  
Україна, 69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64  
Тел.: (061) 769–82–96, 220–12–14

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6952 від 22.10.2019.