

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка»

Кафедра Механіко-машинобудівний факультет
Технологій машинобудування та матеріалознавства
(повна назва)

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
кваліфікаційної роботи ступеню магістра

студента Ступакова Владислава Юрійовича
(ПІБ)

академічної групи 131М-22зн-1
(шифр)

спеціальності 131 Прикладна механіка
(код і назва спеціальності)

за освітньо-професійною програмою Наскрізний інжиніринг машинобудівного виробництва
(офіційна назва)

на тему Оптимізація режимів різання при механічній обробці титанових сплавів
(назва за наказом ректора)

Встановлено, що матеріали даної кваліфікаційної роботи містять чутливу інформацію щодо реальних об'єктів критичної інфраструктури України, національної безпеки і оборони України, зокрема відомості про їх місце розташування, службове призначення, конструкторську і технологічну документацію, описи конструкторських матеріалів та їх властивості, іншудодаткову літературу та посилання. Узв'язку з чим такі матеріали не підлягають відкритому оприлюдненню та мають зберігатися відповідно до встановленого режиму закладом освіти.

Дніпро
2024

ЗАТВЕРДЖЕНО:
завідувач кафедри
Технологій машинобудування та матеріалознавства
(повна назва)

_____ **В.А. Дербаба** _____
(підпис) (прізвище, ініціали)

« _____ » _____ 2024 року

ЗАВДАННЯ
на кваліфікаційну роботу
ступеню магістр
(бакалавр, спеціаліст, магістр)

студенту Ступакову В.Ю. академічної групи 131М-23зн-1
(прізвище та ініціали) (шифр)

спеціальності 131 Прикладна механіка

за освітньо-професійною програмою _____
Наскрізний інжиніринг машинобудівного виробництва
(офіційна назва)

на тему **Оптимізація режимів різання при механічній обробці титанових сплавів**

Конференційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 18.06.2024р.

прийнято до виконання

_____ (підпис студента)

В.Ю. Ступаков
(прізвище, ініціали)

Реферат

Пояснювальна записка: 86 с., 21 рис., 2 табл., додатки на 17 с., 24 джерела.

Тема роботи: Оптимізація режимів різання при механічній обробці титанових сплавів.

Підвищення ефективності виготовлення деталей з титанових сплавів, спрямоване на раціональне використання наявного обладнання та інструменту за рахунок пошуку оптимальних параметрів механічної обробки, є актуальним завданням. Вирішення цього завдання дозволить знизити собівартість, підвищити продуктивність і конкурентоспроможність продукції.

Мета роботи – оптимізація режиму різання механічної обробки, підвищення ефективності виготовлення деталей з титанових сплавів.

Для досягнення поставленої мети в роботі були встановлені та вирішені наступні завдання:

- 1) визначення параметрів механічної обробки титанових сплавів;
- 2) розробка математичної моделі оптимізації режиму різання титанового металу та оптимізація режиму різання;
- 3) визначення впливу параметрів механічної обробки титанових сплавів її ефективність.

Об'єкт дослідження – процес різання при точінні титанових сплавів.

Предмет дослідження – параметри режимів різання при точінні титанових сплавів.

Методика досліджень – методи проведення досліджень базувалися на основах оптимізації процесів різання, теорії різання та різального інструменту.

Результат роботи – створення математичної моделі для визначення оптимальних режимів різання при точінні титанових сплавів та алгоритму оптимізації процесу різання за відповідних обмежень. Встановлення

функціональних зв'язків при механічній обробці деталей із титанових сплавів.

Наукова новизна:

– обґрунтовано, що при збільшенні стійкості інструменту T від 30 до 60 хвилин швидкість різання V та подача S знижуються за лінійною залежністю;

– встановлено, що оптимальна обробка до глибини різання 4 мм відбувається з постійною подачею ($S = 0,6$ мм/об), проте швидкість різання знижується за лінійною залежністю; оптимальна обробка з глибиною різання, яка перевищує 4 мм, виконується з практично постійною швидкістю різання при цьому подовжня подача знижується також за лінійною залежністю.

Практична цінність роботи полягає в забезпеченні найменшої собівартості обробки за допомогою досягнення найбільшої продуктивності за збереження необхідної якості.

В аналітичному розділі розглянуто основні властивості титану та титанових сплавів, приведено відомості щодо застосування в різних галузях промисловості. Проаналізовано переваги та недоліки властивостей матеріалу та їх вплив на механічну обробку різанням.

В спеціальному розділі проведено моделювання процесу механічної обробки деталі «Фланець» з використанням програм SolidWorks та DelCam.

В науково-дослідницькому розділі визначено параметри механічної обробки титанового сплаву, складено математичну модель оптимізації режимів різання титанового сплаву, проведено оптимізацію та визначено оптимальні режими різання титанового сплаву при точінні, проаналізовано вплив параметрів механічної обробки титанового сплаву на її ефективність.

Ключові слова: механічна обробка, моделювання, оптимізація, математична модель, режими різання, титанові сплави.

ЗМІСТ

Вступ	6
1 Аналітичний розділ	7
1.1 Загальні відомості про титан і титанові сплави	7
1.2 Застосування титанових сплавів в галузях промисловості	11
1.3 Переваги та недоліки титанових сплавів	18
1.4 Особливості механічної обробки титанових сплавів	21
1.5 Висновки	27
2 Спеціальний розділ	28
2.1 Аналіз CAD/CAM-систем	28
2.2 Моделювання механічної обробки деталі	33
2.3 Висновки	41
3 Науково-дослідницький розділ	42
3.1 Аналіз робіт з оптимізації процесів різання титанових сплавів	42
3.2 Постановка мети та завдань дослідження	43
3.3 Визначення режимів різання при точінні титанових сплавів	43
3.4 Розробка математичної моделі процесу точіння титанових сплавів	47
3.4.1 Вибір методу математичного програмування процесу точіння титанових сплавів	47
3.4.2 Оптимізація параметрів механічної обробки при точінні титанових сплавів	49
3.5 Визначення впливу параметрів механічної обробки титанових сплавів на її ефективність	60
3.6 Висновки	65
4 Загальні висновки	66
5 Перелік посилань	67
ДОДАТКИ	69

Вступ

Титанові сплави широко застосовуються авіа- та ракетобудуванні. Основні переваги цього матеріалу сплавів у порівнянні з іншими – висока питома міцність та корозійна стійкість. З іншого боку вони мають низьку оброблюваність різанням.

Основна причина поганої оброблюваності титанових сплавів – це наявність великих сил та температур у зоні різання. Обсяг припуску, що знімається, при обробці заготовок може досягати 80-90 % від обсягу заготівлі, що призводить до значних економічних витрат.

Застосування сучасних верстатів з ЧПК та обробних центрів, високопродуктивного різального інструменту дозволяє скоротити терміни виготовлення, але скорочення машинного часу не призводить до значного зниження собівартості продукції.

Підвищення ефективності виготовлення деталей з титанових сплавів спрямоване на раціональне використання сучасного обладнання та інструменту за рахунок пошуку оптимальних параметрів механічної обробки.

Робота пов'язана з науковим напрямом кафедри технологій машинобудування та матеріалознавства та виконана відповідно договору про співпрацю та договором про нерозголошення конфіденційної інформації та комерційної таємниці з ТОВ «ЕЙ БІ ЕМ ТЕХНОЛОДЖИ».

1 Аналітичний розділ

1.1 Загальні відомості про титан і титанові сплави

Титан (Ti - Titanium) – хімічний елемент із порядковим номером 22,

**Конференційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 18.06.2024р.**

порівняно малий, підвищенням температури він зростає. При нагріванні понад 500 °С стає дуже активним елементом. Він або розчиняє майже всі речовини, що стикаються і ним, або утворює з ними хімічні сполуки [1, 2].

В даний час про фазовий склад титанових сплавів судять за умовним коефіцієнтом K_{β} – стабілізації, що є ставленням до вмісту β –стабілізатора в сплаві, що розглядається, до його вмісту в подвійному сплаві критичного складу $C_{кр}$ (тобто до мінімального вмісту β – стабілізуючих елементів у сплаві, який може гартуватися на 100% β –фазу).

Коефіцієнт K_{β} – стабілізації – зручна база для класифікації титанових сплавів. За цієї системи класифікації промислові сплави титану можна умовно поділити на групи:

- 1) технічний титан;
- 2) α –сплави (що не містять β –фази);

листах. Характерна їх особливість – широкий діапазон міцності (залежно від вмісту алюмінію). Ці сплави рекомендовані для різноманітного застосування.

**Конференційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 18.06.2024р.**

марковані, цирконій, нітриди, інтерметаліди (сплави Ti-6Al-4V, застосовували для деталей останніх ступенів парових турбін) [1, 2, 3].

Класифікацію титанових сплавів наведено у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Класифікація промислових титанових сплавів

Тип металу	К	Марка	Середній хімічний склад	
α – сплави	<p>Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 18.06.2024р.</p>			
Псевдо α – сплави				0% V
)% V

Напівфабрикати з титану та титанових сплавів виготовляються у всіляких формах та видах: титанові зливки, титанові сляби, заготовки, титанові листи та титанові плити, титанові стрічки та смуги, титанові прутки (або титанові кола), титанові проволоки.

Області застосування титанових сплавів:

- 1) Авіаційна промисловість
- 2) Автомобілебудування
- 3) Хімічна промисловість
- 4) Кольорова металургія
- 5) Медицина
- 6) Спорт
- 7) Споживча електроніка
- 8) Архітектура
- 9) Ювелірні вироби

Авіаційна промисловість.

Авіаційна промисловість залишається першим та основним споживачем титану. Завдяки застосуванню титанових сплавів у нових транспортних та пасажирських літаках їх використання літакобудівними та моторобудівними підприємствами залишається переважним. В авіаційній промисловості здійснено великий комплекс робіт зі створення оптимальних умов при виробництві деталей та вузлів з титанових сплавів. Найбільш важливим результатом цих досліджень можна вважати освоєння технології виготовлення високо ресурсних силових конструкцій, що забезпечують високу циклічну міцність та тріщиностійкість. Широко впроваджено титанові сплави у виробництво судин високого тиску для авіаційної та космічної техніки.

Вимоги до матеріалів для авіабудування:

- мала вага
- висока питома міцність

- жароміцність
- опір втомним навантаженням
- тріщиностійкість
- корозійна стійкість

Три основні напрями використання титану в авіабудуванні:

1) виготовлення виробів складної просторової форми:

- окантування люків і дверей, де можливе скупчення вологи (використовується висока корозійна стійкість титану);

- обшивки, на які діє струмінь продуктів згорання двигуна, вогнеблокуючі протипожежні перегородки (використовується висока температура плавлення та хімічна інертність титану);

- тонкостінні трубопроводи повітряної системи (використовується мінімальний з усіх металів коефіцієнт термічного розширення титану);

- настил підлоги вантажної кабіни (використовується висока міцність та твердість).

2) для виготовлення відповідальних високонавантажених вузлів та агрегатів

- стійки шасі;
- силові елементи (кронштейни) механізації крила;
- гідроциліндри.

**Конференційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 18.06.2024р.**

можливості для його використання в автомобілебудуванні. При розробці нових конструкцій деталей пріоритетним завданням є зниження маси деталей, що більшою чи меншою мірою впливає на рух самого автомобіля. Частини, що циклічно рухаються, і вузли мають великі потенційні можливості скорочення витрати палива, перш за все за рахунок зменшення їх маси. Надійність деталей з титану була перевірена протягом кількох років на гоночних автомобілях та під час широкого використання в авіакосмічній промисловості. З титану виготовляють клапани двигунів внутрішнього згоряння, пружини та фіксатори клапанів, поршневі пальці, важелі, а також вихлопні системи, диски.

Хімічна промисловість.

Приблизно 30% титану витрачається виготовлення комунікацій з титану, застосовуваних у хімічній промисловості, використовують у хлорному виробництві. Технічний титан йде на виготовлення титанових ємностей, хімічних реакторів, трубопроводів, арматури, насосів та інших виробів, що працюють в агресивних середовищах, наприклад, у хімічному машинобудуванні.

Титан використовується для виготовлення труб для теплообмінної

**Конференційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 18.06.2024р.**

місце серед цивільних галузей промисловості. У гідрометалургії кольорових

металів використовується апаратура з титану. Він служить для покриття виробів із сталі. Використання титану дає у багатьох випадках великий техніко-економічний ефект не тільки завдяки підвищенню терміну служби обладнання, але й можливості інтенсифікації процесів (як, наприклад, гідрометалургії нікелю). Найбільшого поширення титанове обладнання набуло на підприємствах кобальтово-нікелевої та титаново-магнієвої промисловості, а також у виробництві міді, цинку, свинцю, ртуті та інших металів.

При обробці кольорових металів використовують титанові травильні ванни, деталі очисних споруд, установок переробки розчину, ємності, що підвищує термін служби устаткування. Допоміжне обладнання із титану використовують на деяких підприємствах чорної металургії. Завдяки високій корозійній стійкості в сірчистих газах новий конструкційний матеріал забезпечує надійну роботу електрофільтрів, що застосовуються в коксохімічному та феросплавному виробництвах, підвищує довговічність газоочисних споруд доменних, мартенівських, конверторних цехів.

Медицина.

Титан та його сплави в медицині відомі досить давно. Останнім часом інтерес до цієї галузі використання титану значно зріс. Стрімкий розвиток медичної сфери застосування титану значною мірою пояснюється відомим прогресом у сучасній хірургії у сфері протезування суглобів.

Легкий, міцний і повністю біосумісний, титан є одним з небагатьох матеріалів, які за своєю природою відповідають вимогам імплантації в людське тіло. Титан вважається абсолютно неактивним та стійким до корозії внаслідок впливу рідин та тканин організму, а тому повністю біосумісним. Титан використовується у виробництві хірургічного інструменту, внутрішніх та зовнішніх протезів, включаючи такі критичні, як серцевий клапан, імплантатів для зміцнення хребта, штифтів, кісткових пластин, гвинтів, стрижнів та зовнішніх фіксаторів. З титану виготовляють милиці та інвалідні візки.

**Конференційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 18.06.2024р.**

співвідношення ваги та міцності. Використання титану на велосипедах почалося приблизно 25–30 років тому і було першим застосуванням титану у спортивному інвентарі. Інші частини вироблені з титанових сплавів включають гальма, зірочки і пружини сидінь. Використовується титан у виробництві ключок для гольфу.

**Конференційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 18.06.2024р.**

Споживча електроніка.

Ця сфера застосування є досить новим та швидко зростаючим ринком для титану. У багатьох випадках застосування титану в споживчій електроніці викликане не тільки його чудовими властивостями, а й

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 18.06.2024р.

він використовується для зовнішньої обшивки будівель, несучих стін, покрівельних матеріалів, облицювання колон, софітів, карнизів, навісів, внутрішньої обшивки, легких кріпильних пристроїв; і крім того, титан використовується у мистецтві, скульптурі та для виготовлення пам'ятників.

Коли термін служби будь-яких інших архітектурних металів добігає кінця, титан витримує випробування часом. Він стійкий до забруднення міської атмосфери та морського середовища, кислотних дощів, опадів вулканічної золи, промислових викидів та інших вкрай несприятливих атмосферних умов. Титан не піддається атмосферним впливам та не знебарвлюється від ультрафіолетових променів. Також він має відмінну стійкість до корозії, яка може з'явитися в результаті кислотних дощів та дії агресивних газів (газ сірчистої кислоти, газ сірководню тощо), що є плюсом при використанні титану для будівництва у великих містах та промислових областях.

Ювелірні вироби.

Титан застосовують у сувенірах та біжутерії, галантереї, де він успішно змагається з такими дорогоцінними металами, як срібло і навіть золото. Світове споживання титану у виробництві традиційних і так званих натільних ювелірних виробів вимірюється кількома десятками тонн. Все частіше можна зустріти титанові обручки, браслети, ланцюжки, кулони, підвіски, сережки.

Для таких цілей можуть використовуватися титанові сплави марок ВТ6, ВТ6С, але оскільки немає потреби збільшувати міцність металу для виготовлення ювелірних виробів, найбільше підходить чистий титан ВТ1–0 [1, 2, 3].

1.3 Переваги та недоліки титанових сплавів

Переваги застосування титану та титанових сплавів наступні:

1. Корозійна стійкість.

Титан є одним з небагатьох металів із винятково високою корозійною стійкістю. Він стійкий в атмосферному повітрі, морській воді та морській атмосфері, у вологому хлорі, хлорній воді, гарячих та холодних розчинах хлоридів, у різних технологічних розчинах та реагентах, що застосовуються в хімічній, нафтовій, папероробній та інших галузях промисловості, а також у гідрометалургії.

За своєю корозійною стійкістю в морській воді він перевершує всі метали, за винятком шляхетних – золота, платини тощо, більшість видів нержавіючої сталі, нікелеві, мідні та інші сплави. Справа в тому, що реакції титану з багатьма елементами відбуваються лише за високих температур. При нормальних температурах хімічна активність титану надзвичайно мала і він мало вступає у реакції. Пов'язано це з тим, що на свіжій поверхні чистого титану, як тільки вона утворюється, дуже швидко з'являється інертна, що добре зростає з металом. Найтонша, кілька ангстрем ($1\text{Å} = 10^{-10}\text{м}$) плівка

діоксиду титану, що оберігає сплав від подальшого окислення. Якщо навіть цю плівку зняти, то в будь-якому середовищі, що містить кисень або інші сильні окислювачі (наприклад, азотної або хромової кислоти), ця плівка з'являється знову, тобто сплав захищає сам себе від подальшого руйнування.

2. Твердість.

Титан – дуже твердий метал: він у 12 разів твердіший за алюміній, у 4 рази – залізо та міді. За твердістю цей матеріал наближається до деяких термічно оброблених легуваних сталей. Типовий промисловий сплав з межею плинності близько 90 кг/мм^2 може мати твердість до 320 одиниць за Нv.

3. Міцність.

Титанові сплави мають високу міцність по відношенню до інших

**Конференційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 18.06.2024р.**

4. Пластичність.

Висока пластичність титану в порівнянні з іншими металами, що мають ГПУ-решітку (Zn, Mg, Cd), пояснюється великою кількістю систем ковзання та двійника завдяки малому співвідношенню $c/a = 1,587$.

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 18.06.2024р.

при високій температурі.

7. Титан – парамагнітний метал, дуже вигідний для деталей навігаційних приладів. У парамагнітних речовин магнітна сприйнятливість під час нагрівання зазвичай зменшується. Титан становить виняток із цього правила – його сприйнятливість суттєво збільшується з температурою.

Недоліки застосування титану та титанових сплавів:

1. Висока вартість виробництва, титан значно дорожчий заліза, алюмінію, міді, магнію.

2. Активна взаємодія при високих температурах, особливо в рідкому стані, з усіма газами, що становлять атмосферу, внаслідок чого титан та його сплави можна плавити лише у вакуумі або серед інертних газів.

3. Проблеми залучення у виробництво титанових відходів.

4. Погані антифрикційні властивості, зумовлені налипанням титану на багато матеріалів, титан у парі з титаном не може працювати на тертя.

5. Висока схильність титану та багатьох його сплавів до водневої крихкості та сольової корозії.

6. Погана оброблюваність різанням, аналогічна оброблюваності нержавіючих сталей аустенітного класу.

7. Велика хімічна активність, схильність до зростання зерна за високої температури і фазові перетворення при зварювальному циклі викликають труднощі при зварюванні титану.

8. Модулі пружності титану невеликі та виявляють суттєву анізотропію. З підвищенням температури до 350 °С модулі пружності зменшуються майже за лінійним законом. Невелике значення модулів пружності титану – суттєвий недолік, тому у деяких випадках для отримання досить жорстких конструкцій доводиться застосовувати великі перерізи виробів порівняно з тими, що впливають із умов міцності.

1.4 Особливості механічної обробки титанових сплавів

Титан та його сплави погано обробляються різанням, що з рядом фізико-механічних властивостей титану, вони близькі до оброблюваності корозійностійких сталей аустенітного класу. Титанові сплави відрізняються високим ставленням межі плинності до тимчасового опору розриву. Це співвідношення становить для титанових сплавів 0,85-0,95, тоді як для сталей воно дорівнює 0,65-0,75.

У результаті при механічній обробці титанових сплавів виникають великі питомі зусилля, що призводить до високих температур у зоні різання, обумовлених низькою тепло-і температуропровідністю титану та його сплавів, що ускладнює відведення тепла із зони різання. Через сильну адгезію і високі температури титан налипає на ріжучий інструмент, що викликає значні сили тертя. Налипання і приварювання титану на поверхні ріжучого інструменту, що контактує, призводять також до зміни його геометричних параметрів. Відхилення геометричних параметрів різального інструменту від оптимальних їх значень призводить до подальшого підвищення зусиль обробки та температури в зоні різання та зносу інструменту. Температура в зоні різання найбільше підвищується зі збільшенням швидкості різання, меншою мірою зі збільшенням подачі.

Глибина різання порівняно зі швидкістю та подачею має найменший вплив на зміну температури [4].

При високих температурах, що розвиваються в зоні різання, титанова стружка та оброблювана деталь окислюються. Окислення стружки створює проблеми, пов'язані з її очищенням при залученні відходів у плавку та інших способах її утилізації. Окислення поверхні оброблених деталей може призвести до зниження експлуатаційних характеристик.

**Конференційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 18.06.2024р.**

Зазвичай виконується точінням або фрезеруванням, рекомендується попередньо видаляти окалину та кірку спеціальною обробкою. Заготовки (прутки, поковки, штампування) титанових сплавів обдувають піском до видалення окалини, про що свідчить матовий світло-сірий колір їх поверхні (бурі плями і відтінки не допускаються), і травлення при температурі 20-30°C у водному розчині, що містить 16% азотної та 5% фтористо-водневої кислот, а потім промивають у воді.

Тривалість травлення визначається за видом заготовок: поверхня їх повинна мати глясовий металевий блиск. Регулювання процесу травлення за часом досягається зміною вмісту у ванні фтористоводневої кислоти, збільшення якої прискорює травлення. Зазначена обробка поверхні

напівфабрикатів істотно полегшує подальшу чорнову обробку, збільшуючи стійкість різця з пластинкою зі сплаву ВК8 приблизно в 3 рази.

Розрізка заготовок з титанових сплавів, що здійснюється зазвичай абразивними колами, лезовим інструментом становить значні труднощі, пов'язані як з інтенсивним зношуванням інструменту, так і невисокою (а в ряді випадків навіть з низькою) продуктивністю.

Вирішальною умовою забезпечення стійкості інструменту є проведення обробки, при якій вершина ріжучого леза здійснює різання тільки під кіркою. Це досягається зняттям фаски з торця заготовки перед початком точення та встановленням достатньої глибини різання; у разі наявності биття (через нерівності на поверхні заготівлі) допускаються значні коливання глибини різання за мінімального її значення 0,5 мм. Фаска знімається іншим або тим самим різцем, ділянкою його ріжучої кромки, що не працює при виконанні основного проходу. При обдирці кірки на великих заготовках (типу валів, злитків) не виключена можливість застосування попереднього підігріву поверхні, що обробляється [5, 6, 7].

Необхідною умовою є забезпечення відповідної температури шару, що зрізується, достатньої для локалізації шкідливого впливу кірки на контактні поверхні інструменту, але не призводить до втрати ріжучих властивостей. Попередній підігрів можна використовувати тільки при чорновій обробці (при обдирці кірки), після якої обов'язково слідує чистова обробка.

При механічній обробці титанових сплавів рекомендуються малі швидкості різання при невеликих подачах з рясною подачею рідини, що охолоджує. Для обробки застосовують різальний інструмент з більш зносостійких швидкорізальних сталей, ніж для обробки сталей, віддаючи перевагу твердим сплавам. Однак навіть при дотриманні всіх описаних заходів режими різання, особливо швидкості, повинні бути знижені в порівнянні з обробкою сталей у 3-4 рази для забезпечення прийнятної стійкості інструменту, особливо при обробці на верстатах з ЧПК.

Титан та його сплави щодо обробки різанням схожі на нержавіючу сталь. При механічній обробці титанових сплавів необхідно дотримуватись наступних правил:

1. Інструмент повинен бути завжди жорстко закріплений для запобігання надмірній вібрації.

2. Повинний застосовуватися гострий інструмент. При безперервному різанні виправдав себе інструмент з вольфраму карбїду, тоді як при переривчастому різанні рекомендується швидкорізальний інструмент (із вмістом кобальту 7-8%). Для обробки високоміцних титанових сплавів потрібен інструмент з хрому карбїду на кобальтовій основі.

3. Для усунення ковзання ріжучого інструменту деталі слід застосовувати постійну подачу. Підвищення стійкості досягається безперервним різанням. Уривчасте різання знижує стійкість інструменту.

4. Для зменшення налипання та задирання, а також для відведення тепла, що виділяється при різанні титану, рекомендується застосовувати відповідні охолодні рідини.

Важливою особливістю механічної обробки деталей з титанових сплавів є необхідність забезпечення ресурсних, особливо втомних, характеристик, які вирішальною мірою зумовлені якістю поверхневого шару, що утворюється після обробки різанням.

Внаслідок низької теплопровідності та високої хімічної активності оброблюваного матеріалу застосування шліфування як процесу фінішної обробки для титанових сплавів обмежене. При шліфуванні титанових сплавів легко утворюються припали, які суттєво знижують міцність втоми. Крім того, при шліфуванні в поверхневому шарі виникають залишкові напруження розтягування і дефектні структури, що також знижують міцність втоми. Тому шліфування, якщо воно використовується при обробці деталей з титанових сплавів, повинно проводитися при знижених швидкостях і по можливості замінюватися лезовою обробкою або низько швидкісними методами абразивної обробки, такими, наприклад, як хонінгування. Якщо ж

застосовується шліфування, воно повинне виконуватися при строго регламентованих режимах з наступним контролем на відсутність припалів та супроводжуватися зміцненням поверхневим пластичним деформуванням

**Конференційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 18.06.2024р.**

для оснащення ріжучих інструментів, призначених для обробки титанових сплавів.

Для забезпечення оптимальних умов різання та високої якості поверхні деталей слід суворо дотримуватися геометричних параметрів інструменту з швидкорізальних сталей та твердих сплавів.

**Конференційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 18.06.2024р.**

Конференційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 18.06.2024р.

1 мм. Режими різання при точінні титану $V = 24 - 30$ м/хв, $S < 0,2$ мм,
глибина різання $t = 0,5 - 3,0$ мм.

Для збільшення продуктивності механічної обробки титанових сплавів
різанням і підвищення стійкості ріжучого інструменту застосовують
галоїдовмісні мастило-охолоджуючі рідини типу РЗ СОР-8.

Точіння рекомендується проводити з подачею охолоджувальної рідини
під тиском 1-1,5 МПа знизу струменем, спрямованим у щілину між

Конференційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 18.06.2024р.

1.5 Висновки

В даному розділі розглянуто основні властивості титану та титанових сплавів, приведено відомості щодо застосування в різних галузях промисловості. Проаналізовано переваги та недоліки властивостей матеріалу та їх вплив на механічну обробку різанням.

2 Спеціальний розділ

2.1 Аналіз CAD/CAM-систем

У дослівному перекладі термін CAD/CAM (Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing) означає комп'ютерне проектування та виготовлення. Під комп'ютерним проектуванням розуміється розробка конструкторського проекту виробу з урахуванням тривимірного геометричного моделювання деталей і складальних одиниць, з наступним автоматизованим формуванням комплекту креслярсько-конструкторської документації. Система, що виконує комп'ютерне проектування, називається CAD-системою [10].

Якщо CAD-система під час проектування вирішує лише завдання автоматизації отримання комплекту креслярсько-конструкторської документації, її відносять до класу 2D (тобто «плоських») систем. CAD-система, в якій проектування виконується на основі тривимірних моделей, відноситься до класу 3D (тобто «об'ємних») систем.

Під комп'ютерним виготовленням розуміється автоматизоване формування, на основі наявної геометричної моделі виробу, програм для виготовлення деталей виробу на обладнанні з ЧПК. Система, що вирішує це завдання, називається CAM-системою. Деякі CAM-системи мають обмежені засоби для моделювання, але зазвичай моделі деталей, на підставі яких будується процес обробки, приймаються з CAD-системи через узгоджені інтерфейси.

CAD/CAM-системою називається система, яка забезпечує інтегроване вирішення завдань розробки конструкторського проекту виробу та формування керуючих програм для обробки деталей виробу на устаткуванні з ЧПК. Об'єднання цих, досить різних класів завдань у межах однієї системи обумовлено тим, що й вирішення виходить з використанням єдиної тривимірної геометричної моделі виробу. Спільність моделі дозволяє

уникнути всіх проблем, пов'язаних із передачею даних з однієї системи до іншої, забезпечує інтегроване рішення проектних завдань.

Побудова просторової геометричної моделі виробу, що проектується, є центральним завданням комп'ютерного проектування. Саме ця модель використовується в CAD/CAM-системі для подальшого вирішення завдань формування креслярсько-конструкторської документації, проектування засобів технологічного оснащення, розробки програм для верстатів з ЧПК [10].

Важливо також, що при 3D проектуванні різко зменшується кількість помилок у проекті. Це відбувається з таких причин:

1. Конструктор може наочно бачити результат своєї роботи у процесі проектування;
2. Види креслення формуються виходячи з моделі автоматично і тому виключаються ситуації, коли інформація у вигляді не відповідає іншому;
3. При проектуванні складальних одиниць є можливість перевірити збирання та виявляти помилки на рівні моделей.

Створювана геометрична модель зберігається у пам'яті комп'ютера як певний математичний опис і на екрані у вигляді просторового об'єкта. Об'єкт може відображатися у різному уявленні: каркасному, з видаленням невидимих ліній, напівпрозорому та напівтоновому.

Розрізняють поверхневе (каркасно-поверхневе), твердотільне та гібридне моделювання.

При поверхневому моделюванні спочатку будується каркас – просторова конструкція, що складається з відрізків прямих, дуг кіл і сплайнів. Каркас грає допоміжну роль і є основою для подальшого побудови поверхонь, які «натягуються» на елементи каркасу.

Залежно від способу побудови розрізняють такі види поверхонь: лінійчасті; обертання; кінематичні; що проходять через поздовжні та поперечні перерізи; поверхні для «затягування вікон» між трьома та більш суміжними поверхнями; планарні поверхні.

Хоча поверхні визначають межі тіла, але самого поняття «тіло» в режимі поверхневого моделювання не існує, навіть якщо поверхні обмежують замкнутий об'єм. Це найважливіша відмінність поверхневого моделювання від твердотільного.

Інша особливість полягає в тому, що елементи каркасно-поверхневої моделі не пов'язані один з одним. Зміна одного з елементів не спричиняє автоматичної зміни інших. Це дає більшу свободу під час моделювання, але водночас значно ускладнює роботу з моделлю.

Твердотільне моделювання має у своїй основі ідеологію, яка суттєво відрізняється від ідеології каркасно-поверхневого моделювання. Твердотільна модель є цілісним об'єктом, що займає замкнуту частину простору. Завжди можна точно сказати, знаходиться точка всередині твердого тіла, на його поверхні або поза тілом. При зміні моделі будь-якого елемента будуть змінюватися всі інші елементи, пов'язані з ним. Внаслідок цього зміниться форма твердого тіла, але збережеться його цілісність.

Елементами, з яких будується тверде тіло, можуть бути: елементи витягування (отримані витягуванням плоского контуру перпендикулярно до його площини); елементи обертання (отримані обертанням плоского контуру навколо заданої осі); фаски; заокруглення; оболонки; ребра жорсткості та ін. Твердотільний об'єкт будується шляхом послідовного «додавання» або «віднімання» елементів. Так, якщо до вже наявної твердотільної моделі додати елемент витягування, то цей елемент утворює на моделі виступ, а при відніманні елемента на моделі утворюється поглиблення. Якщо при побудовах доступні одночасно кілька твердотільних об'єктів, то над будь-якими двома твердотільними об'єктами, що перетинаються в просторі, можна виконувати булеві операції об'єднання, віднімання та перетину.

Твердотільне моделювання передбачає можливість встановлення параметричних залежностей між елементами твердого тіла чи кількох тіл. При цьому зміна одного з параметрів (наприклад, довжини елемента) призводить до відповідної перебудови всіх пов'язаних параметричних

елементів. Таке моделювання, яке називається параметричним, дає конструктору додаткові зручності. Так, можна встановити параметричні залежності між елементами твердотільного складання і тим самим автоматизувати контроль збирання виробу.

При гібридному моделюванні забезпечується можливість одночасної роботи з твердотілими об'єктами та поверхнями. При цьому можна «відрізати» поверхню частину твердого тіла, перетворювати замкнуті поверхнями об'єм у тверде тіло і т.п.

**Конференційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 18.06.2024р.**

Спроектвана 3D-модель деталі у системі SolidWorks представлена на рисунках 2.1 та 2.2.

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 18.06.2024р.





Рисунок 2.1 – 3D-модель «Фланець»



Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 18.06.2024р.




Рисунок 2.2 – 3D-модель «Фланець»

2.2 Моделювання механічної обробки деталі

Для моделювання процесу точіння було вибрано деталь «Фланець». Обробка даної деталі характеризується великими обсягами припуску, що знімається (до 88% від обсягу заготовлі), у поєднанні з низькою швидкістю різання даних матеріалів це призводить до значних матеріальних витрат на механічну обробку. Значний обсяг припуску, що знімається, припадає на токарну обробку деталі.

Підвищення ефективності токарної обробки деталі «Фланець» з титанового сплаву VT22 спрямоване на раціональне використання наявного обладнання та інструменту за рахунок пошуку оптимальних параметрів механічної обробки, що в даний час є актуальним завданням. Вирішення цієї задачі дозволить, зрештою, знизити собівартість, підвищити продуктивність і конкурентоспроможність виготовлення даної деталі.

Таблиця 3.1 - Технологічний процес виготовлення деталі «Фланець»

№ операції	Найменування операції
------------	-----------------------

**Конференційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 18.06.2024р.**

Для проектування механічної обробки деталі «Фланець» було обрано програмний комплекс FeatureCAM [11]. Результати проектування дозволяють наочно побачити результат своєї роботи у процесі проектування.

Для моделювання процесу точіння деталі «Фланець» необхідно експортувати її до програми Delcam FeatureCAM через спеціальний інтерфейс (узгоджені формати для обміну інформацією).

При відкритті програми FeatureCAM з'являється вікно Майстер нового проекту, в якому пропонується на вибір типи операції, вибираємо токарно-фрезерну операцію, одиницю вимірювання – міліметр (рисунок 2.3).

**Конференційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 18.06.2024р.**

У вікні, що спливає, базуємо деталь щодо осі z. У наступному вікні підганяємо розміри заготовки за розмірами деталі. Тепер все готове для побудови технології обробки деталі.

Для завдання траєкторії токарної обробки необхідно збудувати «криві», поверхні яких оброблятимуться. Після завдання кривих необхідно вибрати «елементи» та створити новий елемент (рисунок 2.4). За аналогією створюються інші переходи. Результат приведений на рисунку 2.5.


Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 18.06.2024р.

Рисунок 2.4 – Моделювання деталі «Фланець»

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 18.06.2024р.

Рисунок 2.5 – Деталь «Фланець» у FeatureCAM

Траєкторії руху інструмента для першого установа приведені на
рисунок 2.6 – 2.8.



Конференційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 18.06.2024р.





Рисунок 2.6 – Траєкторії руху інструмента (1-й установа)



Конференційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 18.06.2024р.





Рисунок 2.7 – Траєкторії руху інструмента (1-й установа)

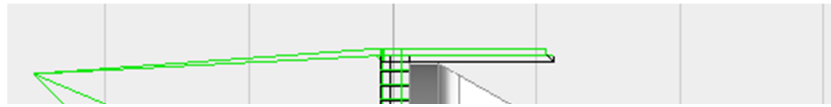


Конференційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 18.06.2024р.



Рисунок 2.8 – Траєкторії руху інструмента (1-й установ)

Траєкторії руху інструмента для другого установка приведені на
рисунок 2.9 – 2.10.



Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 18.06.2024р.

Рисунок 2.9 – Траєкторії руху інструмента (2-й установ)

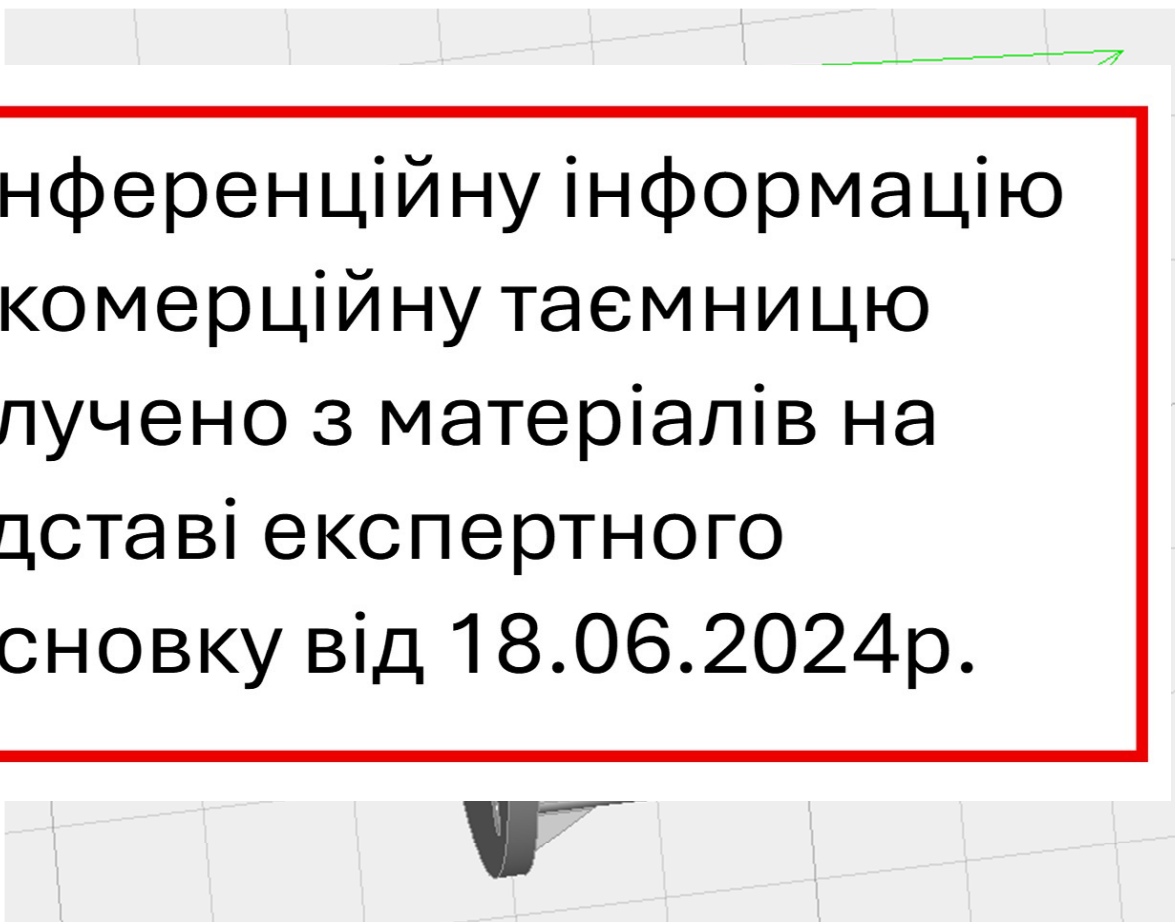


Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 18.06.2024р.



Рисунок 2.10 – Траєкторії руху інструмента (2-й установ)

Загальний вигляд траєкторій руху інструмента для першого та другого переходів представлено на рисунку 2.11.



Конференційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 18.06.2024р.

Рисунок 2.11 – Траєкторії руху інструмента (1-й та 2-й установ)

Частина коду керуючої програми для токарних операцій обробки деталі «Фланець» приведена нижче. повний текст програми – в долатках.

Конференційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 18.06.2024р.

N55 G0 X10.4724 Z0.1969
N60 X10.2918 Z0.0039

**Конференційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 18.06.2024р.**

N150 X9.8451
N155 X9.873 Z-2.3795
N160 G0 Z0.0869
N165 G1 X9.063
N170 Z-2.3935
N175 X9.4541
N180 X9.4819 Z-2.3795
N185 G0 X10.4724
N190 Z0.1969
N195 G28 U0
N200 G28 W4.9213
.....

2.7 Висновки

В даному розділі було виконано моделювання процесу механічної обробки деталі «Фланець» з використанням програм SolidWorks та DelCam.

3 Науково-дослідницький розділ

3.1 Аналіз робіт з оптимізації процесів різання титанових сплавів

Перед написанням цієї магістерської роботи було проаналізовано роботи щодо оптимізації процесів різання титанових сплавів. Аналіз деяких із них наведено нижче.

У роботах [12, 13] представлено методику визначення оптимальних параметрів операції механічної обробки, що забезпечують підвищення ефективності виготовлення деталей із титанових сплавів при фрезеруванні. У цій роботі розроблено математичну модель оптимізації операції фрезерної обробки титанових сплавів, отримано методику призначення оптимальних режимів різання при фрезеруванні титанового сплаву, визначено вплив параметрів операції механічної обробки титанових сплавів на її ефективність. Обсяг припуску при фрезеруванні займає перше місце за кількістю серед механічних обробок деталей. Так як обсяг знімається припуску при токарних операціях стоїть на другому місці після фрезерування слід і для даної операції розробити математичну модель оптимізації.

Робота [14] написана з метою підвищення продуктивності торцевого фрезерування титанових сплавів за рахунок нових високопродуктивних інструментальних матеріалів із дрібнозернистою структурою. У ній розроблено комплекс взаємозалежних моделей, що описують особливості процесу високошвидкісної обробки титанових сплавів, оптимізовано режими високошвидкісного фрезерування сплавів на основі титану з урахуванням розроблених технологічних обмежень, що враховують тепловий фактор та різновиди зносу ріжучого інструменту, характерні для даного типу обробки.

У роботі [15] представлено вирішення актуального наукового завдання вдосконалення технологічного процесу шліфування титанових сплавів за рахунок застосування , що забезпечують проникнення СОТС у зону різання Були сформульовані такі наукові висновки: розроблено алгоритм і методику

вибору режимів різання та характеристик переривчастого кола при шліфуванні титанових сплавів, що забезпечує оптимізацію, механічних, гідродинамічних і теплофізичних процесів, що відбуваються в зоні різання, визначено технологічні можливості інструменту, що враховують вплив також стан робочої поверхні кола (знос його зерен) на якість обробленої поверхні.

У роботах [16-19] розглядається методи та приведені результати досліджень ефективності механічної обробки титанових сплавів лезовим та абразивним інструментом.

3.2 Постановка мети та завдань дослідження

В даний час підвищення ефективності виготовлення деталей з титанових сплавів є актуальним завданням, а технології обробки титанових сплавів не містять в достатньому обсязі методик призначення оптимальних режимів різання титанових сплавів при точінні. Виходячи з цього сформульована мета та завдання роботи.

Мета роботи: оптимізація режиму різання механічної обробки для підвищення ефективності виготовлення деталей з титанових сплавів.

Поставлені завдання:

1. Визначення параметрів механічної обробки титанових сплавів.
2. Розробка математичної моделі оптимізації режиму різання титанового металу. Оптимізація режиму різання.
3. Визначення впливу параметрів механічної обробки титанових сплавів її ефективність.

3.3 Визначення режимів різання при точінні титанових сплавів

Як програмне забезпечення при математичному моделюванні процесу точіння титанових сплавів застосовуємо програму Mathcad 14.

Вихідні дані для розрахунку параметрів механічної обробки:

В Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 18.06.2024р.

2. Подача S визначається залежно від глибини різання та діаметра оброблюваної поверхні (за довідниками).

3. Відповідно до теорії різання, рекомендована швидкість різання визначається за такою формулою:

$$V = \frac{C_V}{T^{m_V} \cdot t^{x_V} S^{y_V}} K_V \text{ (м/хв)} \quad (3.2)$$

де C_V, x_V, y_V, m_V - коефіцієнти, що залежать від виду оброблюваного матеріалу і матеріалу різальної частини інструменту.

K_V - поправочний коефіцієнт на швидкість залежно від матеріалу заготівлі.

4. Після визначення швидкості різання проводиться обчислення частоти обертання шпинделя за формулою:

$$n = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot D} \text{ (об/хв)} \quad (3.3)$$

де V – швидкість різання, м/хв;

D – діаметр оброблюваної поверхні, мм.

5. Обчислення сили різання

Силу різання розраховується за формулою:

$$P_Z = 10 \cdot C_{PZ} \cdot t^{x_{PZ}} \cdot S^{y_{PZ}} V^{n_{PZ}} \text{ (Н)} \quad (3.4)$$

де C_{PZ} , x_{PZ} , y_{PZ} , n_{PZ} - коефіцієнти, що залежать від виду оброблюваного матеріалу і матеріалу різальної частини інструменту.

6. Розрахунок потужності різання

Потужність різання розраховується за формулою:

$$N = \frac{P_Z \cdot V}{60 \cdot 102} \text{ (кВт)} \quad (3.5)$$

Для визначення параметрів механічної обробки при точінні титанових сплавів доцільно використовувати алгоритм, блок-схема якого представлена на рисунку 3.1.

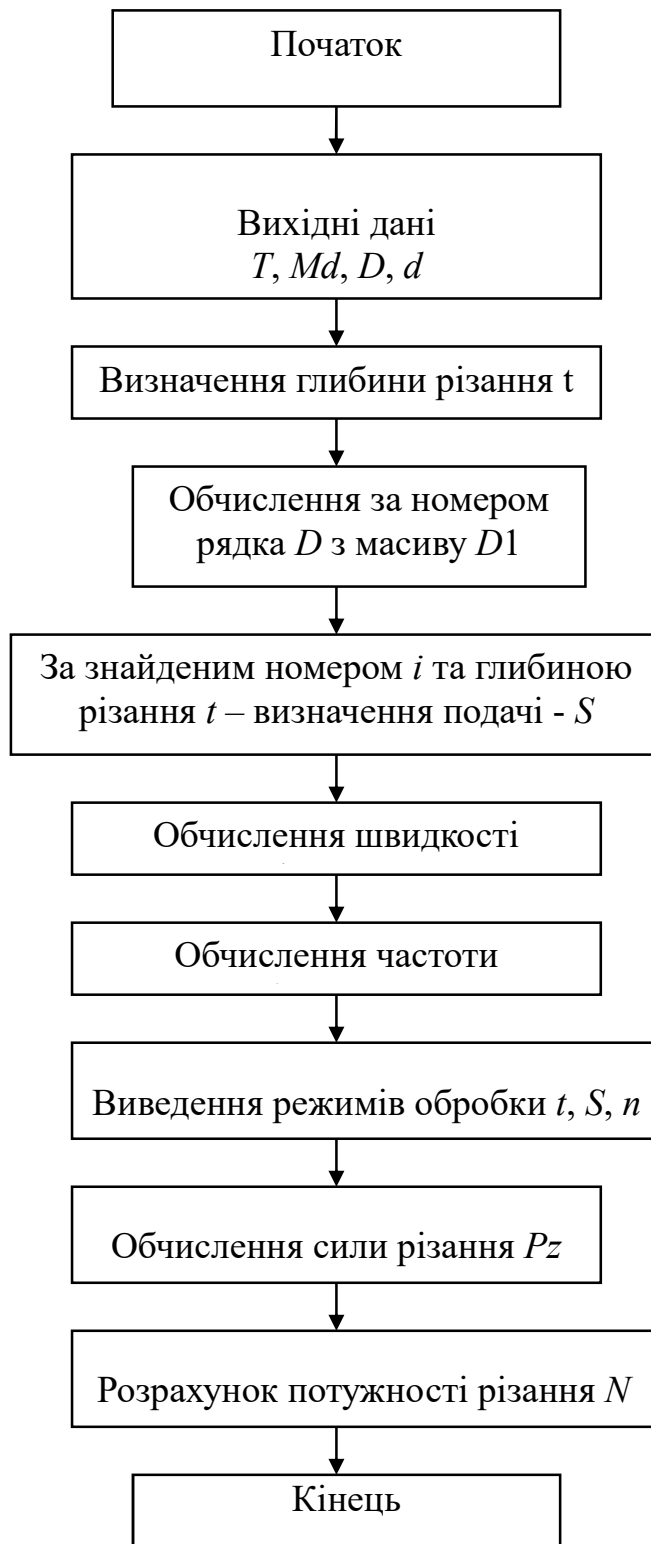


Рисунок 3.1 – Блок-схема програми визначення параметрів механічної обробки титанових сплавів

Лістинг програми наведено у Додатках.

3.4 Розробка математичної моделі процесу точіння титанових сплавів

3.4.1 Вибір методу математичного програмування процесу точіння титанових сплавів

В даний час для вирішення задачі пошуку оптимальних рішень застосовують такі методи:

- методи дослідження функцій класичного аналізу;
- методи, що ґрунтуються на використанні невизначених множників Лагранжа;
- варіаційне обчислення;
- динамічне програмування;
- принцип максимуму;
- лінійне програмування;
- нелінійне програмування.

Методи нелінійного програмування застосовують на вирішення оптимальних завдань із нелійними функціями мети. На незалежні змінні можуть бути накладені обмеження у вигляді нелінійних співвідношень, що мають вигляд рівностей або нерівностей. По суті, методи нелінійного програмування використовують, якщо жоден з перерахованих вище методів не дозволяє скільки-небудь просунути у вирішенні оптимальної задачі. Тому зазначені методи іноді називають також прямими методами розв'язання оптимальних завдань [22-24].

Для отримання чисельних результатів важливе місце приділяється нелінійному програмуванню та у вирішенні оптимальних завдань такими методами, як динамічне програмування, принцип максимуму на певних етапах їх застосування.

Нелінійні завдання складні, часто їх спрощують тим, що призводять до лінійних. Для цього умовно приймають, що на тій чи іншій ділянці цільова функція зростає чи зменшується пропорційно до зміни незалежних змінних.

У короткій формі завдання нелінійного програмування можна записати

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 18.06.2024р.

інакше висловлюючись, завдання полягає у виборі таких невідомих значень змінних, підпорядкованих системі обмежень у вигляді нерівностей, у яких досягається максимум (чи мінімум) цієї функції. При цьому не обумовлюються ні форми цільової функції, ні нерівностей. Можуть бути різні випадки: цільова функція нелінійна, а обмеження – лінійні; цільова функція лінійна, а обмеження (хоча одне з них) нелінійні; і цільова функція, та обмеження нелінійні [22-24].

Завдання, у яких кількість змінних та (або) кількість обмежень нескінченна, називаються завданнями нескінченно мірного нелінійного програмування. Завдання, у яких цільова функція та (або) функції обмежень містять випадкові елементи, називаються завданнями нелінійного стохастичного програмування.

Для вирішення поставленої задачі нелінійного програмування застосовують ефективні чисельні методи оптимізації – це методи наближеного або точного вирішення математичних завдань оптимізації, що зводяться до виконання кінцевого числа елементарних операцій над числами.

Також використовується оптимальна модель методами математичного програмування, тобто шляхом пошуку максимуму або мінімуму деяких

функцій або функціоналів при заданих обмеженнях (умовна оптимізація) і без обмежень (безумовна оптимізація). Оптимальна модель охоплює кілька варіантів (технологічних способів) виробництва, розподілу або споживання і призначена для вибору таких значень змінних, що характеризують ці варіанти, щоб було знайдено кращий з них.

Після визначення технологічних обмежень зводимо нерівності та рівняння цільової функції в одну систему. Перехід до лінійної системи здійснюється логарифмуванням [22-24].

3.4.2 Оптимізація параметрів механічної обробки при точінні титанових сплавів

Оптимальним управлінням вважається така дія на процес різання, який у кожний момент часу забезпечує максимум продуктивності (мінімум собівартості) при задоволенні всіх умов обмежень. У цьому вся розумінні завдання оптимізації є однокритеріальною і може бути вирішена класичним методом нелінійного програмування. Під керуючими впливами зазвичай розуміють подовжню подачу на оборот заготівлі та швидкість різання, а глибину різання вважають головним збуренням. Таким чином, для заданих умов токарної обробки існують такі постійні значення подовжньої подачі на обертг заготівлі та швидкості різання, які призводять до максимуму продуктивності [22-24].

Найбільш раціонально використання принципів оптимального управління на верстатах з ЧПК, оскільки саме тут можна отримати відчутний економічний ефект від оптимізації, оскільки верстато-хвилина є дорогою і, внаслідок автоматизації допоміжних рухів, відсоток часу обробки у загальному технологічному часі виготовлення деталі збільшується.

Основою оптимізації процесу різання є його оптимізаційна математична модель, яка пов'язує критерій оптимізації з керуючими впливами – подачею та швидкістю різання. В результаті розв'язання задачі

оптимізації знаходять керуючий вплив, який забезпечує максимум продуктивності або мінімум собівартості при безумовному виконанні вимог обмежень якості обробки.

Розробка математичної моделі процесу різання є найважливішим етапом створення алгоритму оптимізації. При традиційному, класичному підході математична модель будується у вигляді системи рівнянь та нерівностей, які виражають зв'язки між керуючими впливами, обмеженнями та прийнятим критерієм оптимальності на основі класичних залежностей теорії різання [22-24].

Для випадку обробки поздовжнім точінням за один прохід з постійною глибиною різання, яка дорівнює припуску на обробку (ідеальний випадок), режим різання буде оптимальним при такому поєднанні подачі та швидкості різання, коли основний технологічний час буде мінімальним.

Таке оптимальне рішення знаходять, відшуковуючи таке невід'ємне значення керуючих впливів (подачі S та частоти обертання n шпинделя) при задоволенні всіх обмежень, які доставляють мінімум критерію оптимальності – технологічному часу T_o .

Таким чином, для випадку поздовжнього точіння оптимізаційна математична модель може бути виражена наступною системою рівнянь та нерівностей:

**Конференційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 18.06.2024р.**

- головний та допоміжний кути у плані різця – ϕ, ϕ_1 , град;
- радіус при вершині інструменту – r , мм;
- коефіцієнти для розрахунку швидкості різання – C_v, x_v, m_v, y_v, k_v ;
- коефіцієнти для розрахунку складової сили різання – $C_{pz}, x_{pz}, y_{pz}, n_{pz}$;
- допустима сила за міцністю слабкої ланки механізму подачі – P_x ;
- товщина ріжучої пластини – C_m , мм;
- допустима напруга на вигин – $\sigma_{\text{доп}}$, МПа;
- розміри перерізу різця – висота H , ширина B , мм;
- виліт різця – l_p , мм;

**Конференційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 18.06.2024р.**

з одного боку і швидкістю різання, що визначається кінематикою верстата, з іншого боку. Схема до розрахунку наведено рисунку 3.2.

Фактична швидкість різання:

$$V_{\phi} = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \text{ (м/хв)} \quad (3.8)$$

Швидкість різання при розрахунку за емпіричною формулою:

Конференційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 18.06.2024р.

Рисунок 3.2 – Схема до розрахунку стійкості різця

Підставивши швидкості різання в обмеження, отримаємо:

$$\frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \leq \frac{C_V \cdot K_V}{T^{m_V} \cdot t^{x_V} S^{y_V}} \quad (2.9)$$

де n - частота обертання шпинделя, об/хв;

S – поздовжня подача інструмента, мм/об;

Конференційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 18.06.2024р.

Обмеження (3.12) встановлює взаємозв'язок між ефективною потужністю, що витрачається на процес різання, і потужністю електроприводу головного руху верстата.

Ефективна потужність різання залежить від швидкості різання та

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 18.06.2024р.

Якщо виразити швидкість різання V через частоту обертання n , підставити отриманий вираз у формулу ефективної потужності (3.13), то отримана залежність міститиме оптимізовані параметри S та n .

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 18.06.2024р.

$$P_x \leq [P_x] \quad (3.16)$$

Сила P_x залежить від елементів різальної частини різця та режимів різання (t, S, V), від властивостей оброблюваного матеріалу та зносу різця, від умов різання та інших факторів.

Оскільки параметри визначення сили P_x немає, то розрахунок ведемо із співвідношення залежності сил $P_z:P_y:P_x$. У середньому співвідношення складових сил різання можна прийняти 1:0,45:0,35. Тоді сила $P_x = P_z \cdot 0,35$. Допустима сила P_x на токарний верстат із ЧПК С830ВЕ дорівнює 10 кН. Схема до розрахунку наведено на рисунку 2.4.

$$10 \cdot C_{Pz} \cdot t^{x_{Pz}} \cdot S^{y_{Pz}} V^{n_{Pz}} \cdot 0,35 \leq [P_x] \quad (3.17)$$

**Конференційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 18.06.2024р.**

Якщо виразити швидкість різання V через частоту обертання n , підставити отриманий вираз у формулу сили P_z , то отримана залежність міститиме оптимізовані параметри S та n .

Після логарифмування та підстановки $x_1 = \ln(100S)$, $x_2 = \ln(n)$ отримаємо такі вирази:

Конференційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 18.06.2024р.

де $M_{и}$ – згинальний момент, Н · м;

W – момент опору перерізу різця, м³.

Якщо висловити згинальний момент $M_{и}$ через розрахункову формулу сили різання P_z , підставити отриманий вираз у формулу напруги на вигин $\sigma_{и}$, то отримана залежність міститиме оптимізовані параметри S та n . Ескіз обробки наведено на рисунку 3.5.

Конференційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 18.06.2024р.

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 18.06.2024р.

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 18.06.2024р.

$[\sigma_p]$ – допустима напруга, здатна витримати пластину без руйнувань, МПа.

Це обмеження встановлює взаємозв'язок подачі з допустимими параметрами, що впливають на міцність ріжучої пластини. Тангенційна сила P_z впливає на ріжучу пластину як сила вигину.

$$y_{pz} \cdot x_1 \leq b_5 \quad (3.29)$$

Конференційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 18.06.2024р.

кутів у плані та радіусу r округлення вершини різця в плані), твердості матеріалу НВ, глибини шару, що зрізується, подачі і швидкості різання.

Шорсткість поверхні не повинна перевищувати необхідну:

Конференційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 18.06.2024р.

менше 0,07 мм/об, у зв'язку з тим, що малий переріз шару титанового сплаву, що зрізується, може призвести до самозаймання стружки. Тобто має виконуватися нерівність:

$$0,07 \leq S \leq S_{\min} \quad (3.34)$$

Обмеження 8

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 18.06.2024р.

, яку
юбці
до зі
ивно
тися
3.35)
ясні
м до
цодо

цна подат $v_{\max} = 0,0 \text{ мм/с}, v_{\min} = 0,01 \text{ мм/с}.$

Обмеження 9

Розрахункова величина швидкості різання може бути менше, ніж можлива, з найменшого числа оборотів верстата, тобто. має виконуватися

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 18.06.2024р.

.36)
ніж
гися
.37)
1(n)
.38)

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 18.06.2024р.

Для оптимізації параметрів механічної обробки при точінні титанових сплавів доцільно використовувати алгоритм, блок-схема якого представлена на рисунку 3.6. Лістинг програми наведено у Додатках.

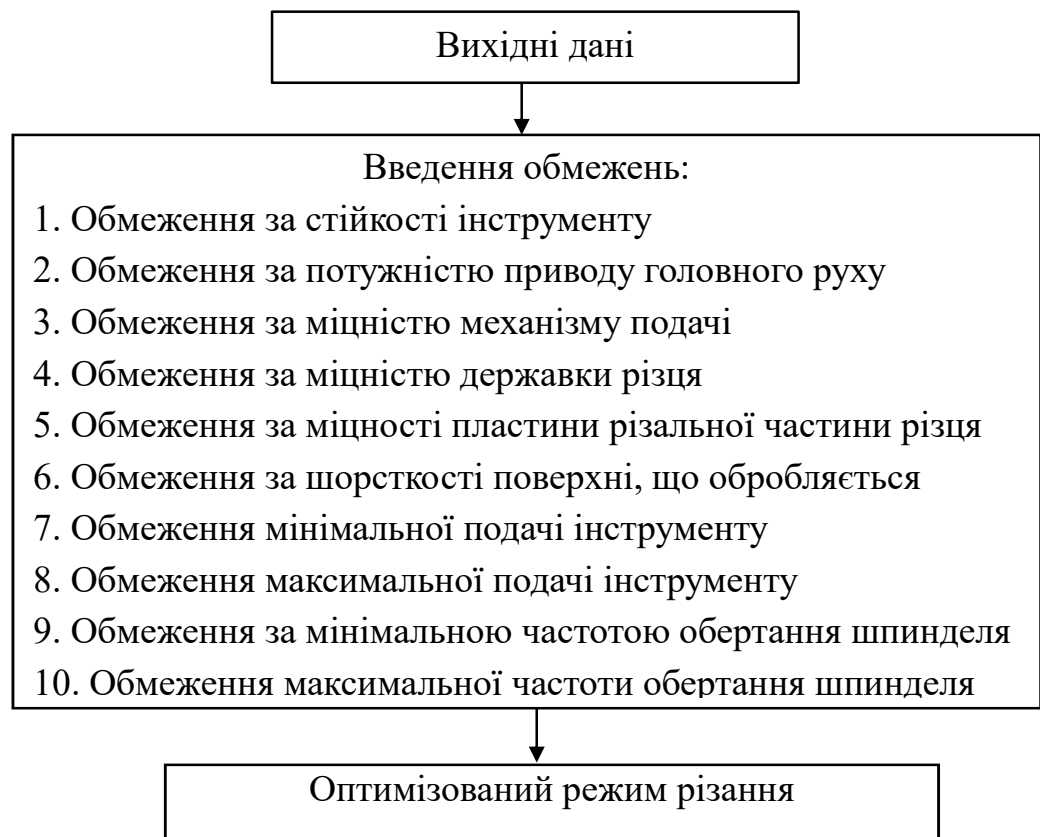


Рисунок 3.6 – Блок-схема програми оптимізації параметрів механічної обробки титанових сплавів

3.5 Визначення впливу параметрів механічної обробки титанових сплавів на її ефективність

Для аналізу залежностей оптимального режиму різання від зміни параметрів обробки, слід визначити:

- залежність оптимального режиму різання ($V_{\text{опт}}, S_{\text{опт}}$) від періоду стійкості інструменту T ;
- залежність оптимального режиму різання ($V_{\text{опт}}, S_{\text{опт}}$) від глибини різання t ;
- залежність потужності $N_{\text{рез}}$ різання та складової сили P_z від глибини різання t ;
- залежність оптимального режиму різання ($V_{\text{опт}}, S_{\text{опт}}$) від головного кута в плані ϕ різця.

1) Аналіз залежності оптимального режиму різання ($V_{\text{опт}}, S_{\text{опт}}$) від періоду стійкості інструменту T

Щоб визначити цю залежність, слід провести оптимізацію режиму різання $V_{\text{опт}}$ та $S_{\text{опт}}$ титанового сплаву з період стійкості від 30 до 60 хвилин.

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 18.06.2024р.

Рисунок 3.7 – Залежність оптимального режиму різання
від стійкості інструменту

Аналіз отриманих результатів на графіку за рисунком 3.7 свідчить, що при збільшенні стійкості інструменту T швидкість різання $V_{\text{опт}}$ та $S_{\text{опт}}$ знижується майже за лінійною залежністю.

2) Аналіз залежності оптимального режиму різання ($V_{\text{опт}}$, $S_{\text{опт}}$) від глибини різання t

Для визначення аналізу даної залежності слід провести оптимізацію режиму різання титанового сплаву з глибиною різання від 3 до 10 мм (чорнова обробка).

Аналіз отриманих результатів на графіку на рисунку 3.8 свідчить, що закон оптимального управління процесом точіння має дві зони:

- оптимальна обробка до глибини різання 4 мм відбувається з постійною подовжньою подачею на оборот заготівлі (рівною 0,6 мм/об), проте швидкість різання знижується за лінійною залежністю;

- оптимальна обробка з глибиною різання, яка перевищує 4 мм, виконується з практично постійною швидкістю різання (вона трохи збільшується), тим не менш, подовжня подача на оборот заготівлі знижується також за лінійною залежністю.

**Конференційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 18.06.2024р.**

від глибини різання

3) Аналіз залежності потужності різання $N_{рез}$ та складової сили P_z від глибини різання за оптимального режиму

Для проведення аналізу даної залежності слід провести оптимізацію режиму різання титанового сплаву з глибиною різання від 3 до 10 мм.

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 18.06.2024р.

Рисунок 3.9 – Залежність потужності $N_{рез}$ та сили P_z від глибини різання t

Щодо енергетичних характеристик оптимального процесу різання, можна зробити висновки з аналізу графіка на малюнку 3.9. При підвищенні глибини різання потужність різання збільшується. Це відбувається через те, що глибина різання безпосередньо впливає на підвищення складової сили P_z . Для підвищення продуктивності з великими глибинами різання (чорнова обробка) необхідно використовувати потужніший верстат. Такий результат свідчить про певну оптимальність конструктивного рішення вибору параметрів верстата.

4) Аналіз залежності оптимального режиму різання ($V_{опт}$, $S_{опт}$) від головного кута в плані ϕ різця

Для проведення аналізу цієї залежності, слід провести оптимізацію режиму різання титанового сплаву з головним кутом у плані ϕ різця від 20° до 90° .

**Конференційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 18.06.2024р.**

Рисунок 3.10 – Залежність оптимального режиму різання від головного кута в плані ϕ різця

Аналіз отриманих результатів з графіка на рисунку 3.10 свідчить, що оптимальна обробка титанового сплаву зі збільшенням головного кута в плані ϕ різця до 70° йде з постійною подачею на оберт заготовки та постійною швидкістю різання. А в діапазоні від 70° до 90° подача зменшується, а швидкість різання збільшується. Такий результат пояснюється тим, що при меншому куті 70° обмеження стійкості різця не утворює оптимальної вершини області можливих значень режиму різання.

3.6 Висновки

В даному розділі було вирішено наступні питання:

- визначено параметри механічної обробки титанового сплаву;
- складено математичну модель оптимізації режимів різання титанового сплаву;
- проведено оптимізацію та визначено оптимальні режими різання титанового сплаву при точінні;
- проаналізовано вплив параметрів механічної обробки титанового сплаву на її ефективність.

4. Загальні висновки

В аналітичному розділі розглянуто основні властивості титану та титанових сплавів, приведено відомості щодо застосування в різних галузях промисловості. Проаналізовано переваги та недоліки властивостей матеріалу та їх вплив на механічну обробку різанням.

В спеціальному розділі виконано моделювання процесу механічної обробки деталі «Фланець» з використанням програм SolidWorks та DelCam.

В науково-дослідницькому розділі визначено параметри механічної обробки титанового сплаву; складено математичну модель оптимізації режимів різання титанового сплаву; проведено оптимізацію та визначено оптимальні режими різання титанового сплаву при точінні; проаналізовано вплив параметрів механічної обробки титанового сплаву на її ефективність.

Обґрунтовано, що при збільшенні стійкості інструменту T від 30 до 60 хвилин швидкість різання V та подача S знижуються за лінійною залежністю;

Встановлено, що оптимальна обробка до глибини різання 4 мм відбувається з постійною подачею ($S = 0,6$ мм/об), проте швидкість різання знижується за лінійною залежністю; оптимальна обробка з глибиною різання, яка перевищує 4 мм, виконується з практично постійною швидкістю різання при цьому подовжня подача знижується також за лінійною залежністю.

Конференційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 18.06.2024р.

Shop, 2009. – №9. – С.67–70.

9. Корбут Е.В., Лабунець В.Ф. Особливості зношування інструменту при обробці титанових сплавів / Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К.: Вид-во НАУ «НАУ-друк», 2011. – Вип. 55. – С.83–93.

10. URL: <http://4ua.co.ua>

11. Feature CAM. Feature MILL. Feature MILL3D. FeatureTURN. Інструкція користувача / Delcam USA // 13-я редакція. – 275 Ист Саус Темпл, Сьют 305. Солт Лэйк Сити. UT8411. – 2007. – 185 с.

Конференційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 18.06.2024р.

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 18.06.2024р.

19. Monno, M., Pittalà, G. and Linares, F. (2007), 3D Finite Element Modeling of Milling of Titanium, Proceeding of 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations.

20. Ю. Паливода. Інструментальні матеріали, режими різання, технічне нормування механічної обробки: навчально-методичний посібник / Ю. Паливода, А. Дячун, Р. Лещук. – Тернопіль, Тернопільський національний технічний університет ім. І.Пулюя, 2019. – 240с.

21. Дідик Р.П. Розрахункові операції режимів механічної обробки матеріалів: точіння, свердління, зенкерування, розгортання: навч. посіб. / Р.П. Дідик, В.В. Зіль, С.Т. Пацера. – Д.: «Національний гірничий університет», 2013. – 196 с.

22. Оптимізація режимів різання на важких верстатах. Клименко Г.П., Ковальов В.Д., Васильченко Я.В., Шаповалов М.В., Щербакова А.Ю. / Вісник НТУ «ХП», 2022. №2 (6). С. 43-48.

23. Математичне моделювання та оптимізація процесів металообробки : монографія / Ф.В. Новіков. – Х. : Вид. ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2014. – 384 с.

24. Кроль О.С. Методи та процедури оптимізації режимів різання: монографія. - Луганськ: вид-во ВНУ ім. В. Даля, 2013. – 260 с.

ДОДАТКИ

Вихідні дані:

- Обробл. матеріал:

1. Рє

2. Рє

3. Зє

**Конференційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 18.06.2024р.**

4. По

5. По

**Конференційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 18.06.2024р.**

(XB)

6. Режим обробки:

7.І

**Конференційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 18.06.2024р.**

8.І

Вихідні дані:

- Те

- Гл

- Ол

- Сл

- Шл

- Шл

- Пл

- Кл

- Гл

кут

- Рл

- Кл

- Кл

- Дл

- Тл

- Дл

- Рл

- Вл

- Рл

**Конференційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 18.06.2024р.**

- Обмеження:

f(

с

1.

2.

3.

4.

5.

6.

7.

8.

и :

Опт

Под:

**Конференційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 18.06.2024р.**

5
н)

Обмеження в графічному вигляді:

- x20
- x21
- x22
- x23
- x24
- x25
- x26
- x27

**Конференційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 18.06.2024р.**

p



Дані для оптимізації:

- Режим різання до оптимізації:

Конференційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 18.06.2024р.

**Конференційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 18.06.2024р.**

N300 G0 Z-2.1094
N305 G1 X0.7864
N310 Z-2.7872

**Конференційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 18.06.2024р.**

N385 Z-2.7872
N590 X4.7181

**Конференційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 18.06.2024р.**

N890 G1 X9.0585
N895 Z0.2675
N899 V0 4511

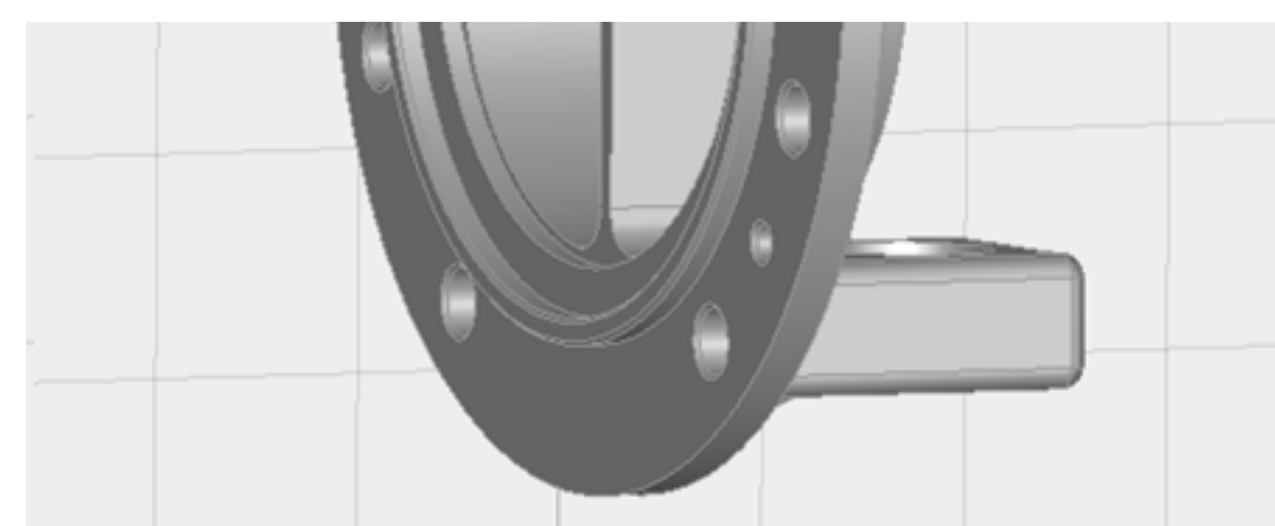
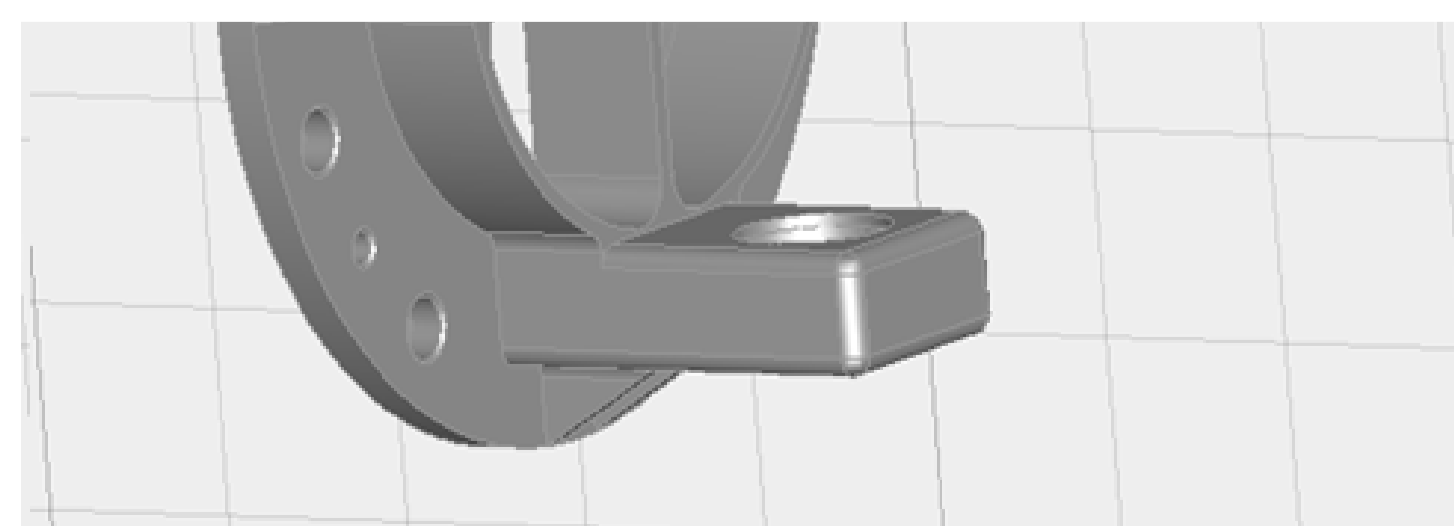
**Конференційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 18.06.2024р.**

N1175 G0 Z-0.143
N1180 G1 X1.1501

**Конференційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 18.06.2024р.**

**Конференційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 18.06.2024р.**

Конференційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 18.06.2024р.



```
N235 G80  
N240 G0 Z0.1969  
N245 G28 U0  
N250 G28 W4.9213  
( OPERATION: ROUGH BORE РОЗТОЧУВАННЯ )  
N260 T303  
N265 G50 S3000  
N270 G96 S0 M4  
N275 G0 X0.3932 Z0.1969 M8  
N280 Z-2.1094  
N285 G1 Z-2.7872 F0.01  
N290 X0.  
N295 X-0.0278 Z-2.7732
```

Конференційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 18.06.2024р.