

## ТОКАРНІ ПЛАСТИНИ ІЗ WIPER-ГЕОМЕТРІЄЮ

Важливими вимогами до сучасного металорізального інструменту є забезпечення низької шорсткості оброблених поверхонь заготовок та високої продуктивності процесу різання.

Wiper – це вид геометрії різальних пластин із зачисною кромкою, призначених для роботи на високих подачах. Wiper-геометрія застосовується в наступних випадках: для збільшення продуктивності обробки за рахунок збільшення подачі без погіршення шорсткості (рис. 1); для зменшення шорсткості поверхні при незмінній подачі. За рахунок зміни геометрії різальної кромки можливо досягти потрібної якості поверхні при обробленні різних конструкційних матеріалів.

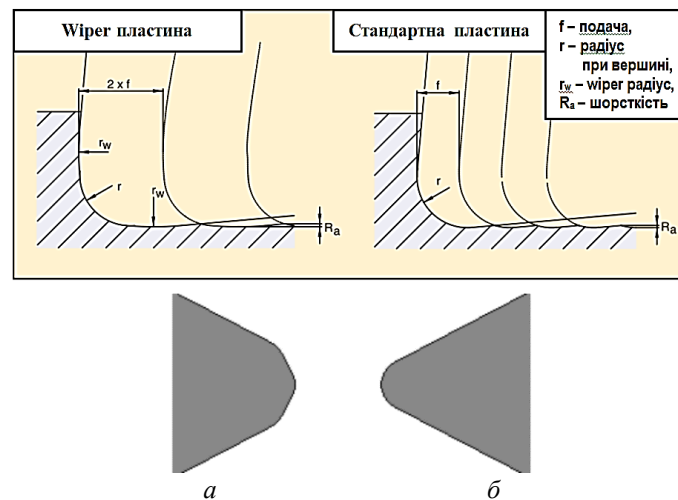


Рис. 1. Токарні різальні пластини Kennametal: а – з Wiper-геометрією, б – стандартна

Наприклад, відомий виробник різального інструменту Kennametal пропонує чорнові, напівчистові та чистові Wiper-геометрії токарних пластин (рис. 2).

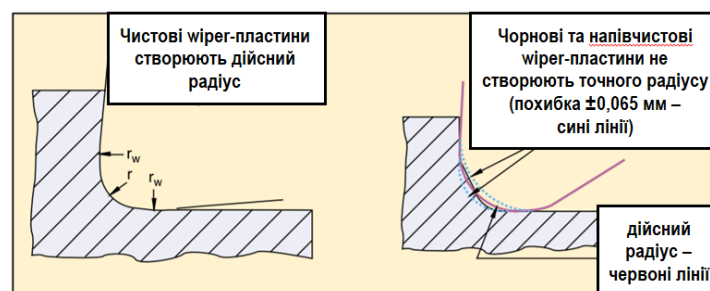


Рис. 2. Радіус при вершині токарної Wiper-пластини

Особливості експлуатації пластин Wiper: досягається збільшення подачі і продуктивності обробки; забезпечується покращення якості обробленої поверхні без зменшення подачі; кожна різальна кромка Wiper має комбінацію з 3–9 радіусів, тому сумарна довжина активної частини різальної кромки пластини Wiper більше, ніж у звичайної пластини; збільшена довжина різальної кромки покращує якість обробленої поверхні; велика довжина контакту збільшує сили різання, у зв'язку з чим пластини Wiper більш чутливі до вібрацій при обробці нежорстких деталей.

Звідси можна виділити наступні переваги даної технології: плавне видалення стружки і зниження зусилля різання завдяки глибокому профілю стружколома; забезпечується гострота і міцність ріжучої кромки; конструкція стружколома з декількома радіусами збільшує діапазон обробки і забезпечує кращу якість поверхні, що особливо важливо при чистових операціях.

## CAM-СИСТЕМА AUTODESK FEATURECAM

Autodesk FeatureCAM – це автоматизована, проста у використанні САМ-система, заснована на обробці типових конструктивно-технологічних елементів із використанням бази знань рекомендованих режимів різання. FeatureCAM дозволяє автоматично або у ручному режимі ідентифікувати елементи твердотільної моделі деталі, після чого система створює керуючу програму для обробки цих елементів. Система дає можливість розробляти надійні та ефективні керуючі програми для фрезерних, токарних, токарно-фрезерних та електроерозійних верстатів з числовим програмним керуванням, а також для операцій вимірювання щупом.

Autodesk FeatureCAM підтримує всі відомі формати файлів: Inventor (.ipt), Fusion 360 (.f3d), PowerShape (.ddx), AutoCAD (.dxf), ParaSolid (.x\_t), Solidworks (.sldprt), Catia (.mod), Step (.step), Creo (.prt), STL (.stl) та інші.

САМ-система вміщує вбудовану мережеву базу даних різальних інструментів і режимів різання. Номенклатура бази даних інструменту дозволяє редагувати або додавати власний інструмент, а також редагувати табличні режими різання і подачі. В процесі роботи FeatureCAM автоматично обирає різальний інструмент, призначає стратегії обробки, розподіляє припуск на проходи, розраховує режими різання та генерує керуючу програму.

Високий ступінь автоматизації розробки керуючих програм досягається за рахунок функції автоматичного розпізнавання типових конструктивно-технологічних елементів в САД-моделях. Можливо, як повністю автоматичне розпізнавання типових елементів, так і їх інтерактивне або навіть ручне завдання.

Інструменти симуляції дозволяють перевірити результати програмування - перевірити вірогідність зіткнень, які можуть привести до додаткових фінансових витрат і (або) простоїв обладнання.

Програмне забезпечення підтримує 2.5-, 3-, 4- і 5-осьові фрезерні верстати різних конфігурацій. Підтримуються також 5-осьові фрезерні верстати з токарними функціями, широко відомі як фрезерно-токарні або верстати карусельного типу. Спеціальні стратегії чорнового і чистового доопрацювання, поряд з безліччю інших автоматичних стратегій обробки, дозволяють досягти максимально можливої якості оброблених поверхонь, мінімізуючи тим самим обсяг ручного доведення виробу. FeatureCAM підтримує інструмент для різьбофрезерування і правої, і лівої різьби.

Модуль поздовжнього точіння забезпечує двокоординатну токарну обробку, включаючи підтримку протишпинделів, перехват деталі та подачу прутка. Модуль робить можливим швидко і легко програмування всіх видів токарної обробки. Він підтримує точіння, розточування, підрізку торця, відрізання, точіння зовнішніх і внутрішніх канавок, а також обробку простих і спеціальних видів отворів. Підтримується широкий діапазон циклів для чорнового і чистового точіння, обробки канавок, свердління, а також нарізання різьби різцем і мітчиком. Стратегії для чистового точіння використовують різні види обробки торцевих і поздовжніх елементів. Такий підхід продовжує строк життя інструменту, забезпечує кращу якість чистової обробки і більш ефективне видалення стружки.

Модуль токарно-фрезерної обробки дозволяє розробляти керуючі програми для обробки деталей за один установ на токарних верстатах з приводним інструментом і токарно-фрезерних оброблюючих центрах. Він включає всі можливості модулів фрезерування та токарно-фрезерної обробки і може використовуватися для програмування позиційної обробки на токарних верстатах, оснащених приводним інструментом і/або додатковими осями. Також підтримуються верстати з полярною інтерполяцією.

Модуль електроерозійної обробки забезпечує розробку програм 2-координатної, 2-координатної конічної і 4-координатної дротяної електроерозійної обробки на верстатах Charmilles, Agie, Sodick, Fanuc, Mitsubishi та ін. Він пропонує такий же автоматизований підхід, як і інші модулі FeatureCAM. Програма автоматично обирає із вбудованої бази знань рекомендовані технологічні параметри і генерує керуючі програми для різних стратегій різання дротом, після чого виконується повна комп'ютерна симуляція обробки.

Модуль підтримки багатомісних пристосувань призначений для обробки декількох деталей, встановлених на палеті або на спеціальному багатомісному кріпильному пристосуванні на поворотному столі. Необхідно розробити керуючу програму для обробки однієї деталі, і FeatureCAM автоматично виконає всі необхідні перетворення в код керуючої програми для обробки інших деталей. FeatureCAM пропонує набір доступних постпроцесорів, а також має спеціальний модуль XBUILD, призначений для їх розробки. Наведені характеристики дозволяють FeatureCAM утримувати одну із лідируючих позицій серед інших САМ-систем за простотою використання і швидкістю розробки керуючих програм.

## СИНТЕЗ МЕХАНІЗМУ ПО МЕТОДУ НАБЛИЖЕННЯ ФУНКЦІЙ

Методи оптимізації із застосуванням ЕОМ дають можливість вирішити, практично, будь-яке завдання синтезу механізмів. Однак ці методи дають кількісне рішення будь-якої задачі синтезу і не дозволяють бачити вплив окремих параметрів синтезу на якісні характеристики механізму. Проводити якісний аналіз очікуваних рішень дозволяє метод синтезу механізмів, що ґрунтується на теорії наближення функцій.

Завдання наближення функцій полягає в тому, що задана функція  $y = F(x)$  наближено замінюється іншою функцією  $y = P(x)$  (рис. 1). Ця функція містить  $m$  постійних параметрів  $r_1, r_2, \dots, r_m$ .

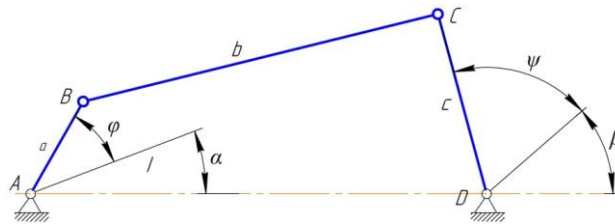


Рис. 1

Відхилення  $\Delta$  наближає функції від заданої є функцією аргументу  $x$  і параметрів наближає функції:

$$\Delta = \Delta(x, r_1, r_2, \dots, r_m) \quad (1)$$

Параметри наближає функції в задачах синтезу механізмів збігаються з параметрами синтезу або їх комбінаціями. Теорія наближення функцій дає можливість знайти шукані значення вихідних параметрів синтезу безпосередньо з системи рівнянь, що накопичується на підставі умов мінімуму максимальної величини відхилення (1).

Завдання наближеного синтезу механізмів може бути розділена на три етапи:

1. Вибір основної умови синтезу і додаткових обмежень.
2. Спрощення аналітичного вираження основної умови синтезу у вигляді відхилення від заданої функції.
3. Обчислення параметрів синтезу з умов мінімуму відхилення від заданої функції. Спосіб обчислення шуканих параметрів залежить від виду використовуваного наближення функцій.

Застосуємо метод наближення функцій для синтезу передавального шарнірного чотирихвонніка (рис. 2). Позначимо через  $\varphi$  вхідну координату, тобто, кут повороту ланки  $AB$ , а через  $\psi$  кут повороту вихідної ланки  $CD$ .

Тоді задана функція має вигляд:

$$\psi = \psi(\varphi) \quad (2)$$

Шарнірний чотирихвоннік може забезпечити точне відтворення заданої функції тільки в деяких окремих випадках. У загальному випадку він відтворює деяку іншу функцію:

$$\psi_m = \psi_m(\varphi, a, b, c, \alpha, \beta) \quad (3)$$

яка залежить від аргументу  $\varphi$  і від п'яти параметрів синтезу: довжин ланок і кутів  $\alpha$  і  $\beta$  визначають початку відрізків кутів  $\varphi$  і  $\psi$ .

Для того, щоб механізм відтворював задану функцію досить точно, слід вибрати таку комбінацію параметрів синтезу, при якій функція (3) мало відрізняється від заданої функції (2) на даному відрізьку зміни аргументу від

$$\varphi = 0 \text{ до } \varphi = \varphi_m.$$

Відхилення від заданої функції вимірюється величиною різниці:

$$\Delta\psi = \psi_m - \psi, \quad (4)$$

де  $\psi_m$  – кут повороту ланки  $CD$  в механізмі при деякому значенні кута  $\varphi$ ,  $\psi$  – задана величина кута повороту ланки  $CD$  при тому ж значенні кута.

Зробивши перестановку кутів  $\varphi$ ,  $\psi$  і  $\alpha$ ,  $\beta$  приймаючи тепер за кути  $\varphi$ ,  $\psi$  – кути між лінією  $AD$  і осями  $AH$  і  $DH$ , пов'язаними з  $AB$  і  $CD$  під кутами  $\alpha$ ,  $\beta$  відповідно. Від такої перестановки кутів положення ланок  $AB$  і  $CD$ , складових зі стійкою кути  $\alpha + \varphi$  і  $\beta + \psi$ , не змінюється. Після описаного перетворення за допомогою функції  $\psi = \psi(\varphi)$  можна легко визначити положення системи,  $Dx$  міцно пов'язаної з ланкою  $DC$ , щодо системи  $Axy$ , пов'язаної з ланкою  $AB$ .

Відповідні формули випливають з рисунку 2:

$$X_D = \cos(2\pi - \varphi), Y_D = \sin(2\pi - \varphi), \theta = \psi - \varphi. \quad (5)$$

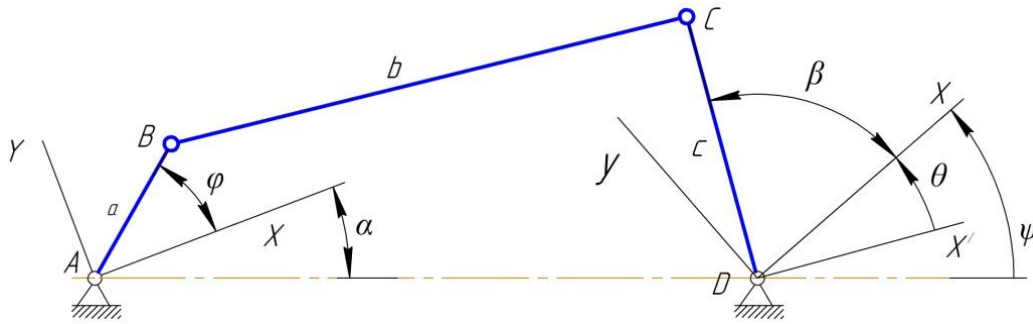


Рис. 2

Таким чином, дано рух площини  $Dx$  відносно нерухомої площини  $AXY$ , потрібно визначити точку  $C$  на площині,  $Dx$  траєкторія якої в інтервалі  $[0, \varphi_m]$ , наближається до дузі кола. При такій поставі завдання невідомими будуть координати  $x_c, y_c$  точки  $C$  в  $Dx$  і координати центру  $B, X_B$  і  $Y_B$  в площині  $AXY$ , а також радіус приближеного кола  $BC = b$ . Після визначення п'яти зазначених невідомих параметрів відповідно до рис. 2 можна обчислити розміри  $a, c$ , кути  $\alpha$  і  $\beta$ :

$$a = \sqrt{X_B^2 + Y_B^2}, c = a = \sqrt{X_C^2 + Y_C^2}, \alpha = \arctg\left(\frac{Y_B}{X_B}\right), \beta = \arctg\left(\frac{Y_B}{X_C}\right). \quad (5)$$

Була розглянута задача наближеного відтворення функції  $\psi = k\varphi$  в інтервалі  $[0, \varphi_m]$  для шарнірного чотирихвоника. Прийmemo  $k = \frac{1}{2}$ ,  $\varphi_m = 0-80^\circ$ . Розіб'ємо розглянутий інтервал на 20 рівних частин і визначимо значення,  $X_{D_i}, Y_{D_i}, \theta_i$  за формулами (5) ( $i = 1, 2-21, \varphi_1 = 0, \varphi_M = 80$ ) встановлюють 21 положення системи  $Dx$  щодо  $AXY$ . Положення точки  $C$  в системі визначається координатами:  $x_c = -2,27474, y_c = -0,55895$ . Координати центру відповідного приближеного кола та його радіус знаходимо  $X_B = -0,76325, Y_B = 0,64594, R = 1,30798$ . Далі за формулами (6) обчислюємо шукані параметри  $a = 0,9999, b = R, c = 2,3424, \alpha = 139^\circ 45', \beta = 193^\circ 48'$ . Спроекований механізм показаний на рисунку 3. Відхилення від заданої функції в зазначеному інтервалі не перевищує  $2'$ . Даний метод дозволяє з високою точністю відтворити рівняння руху вихідної ланки в механізмах з нижчими кінематичними парами.

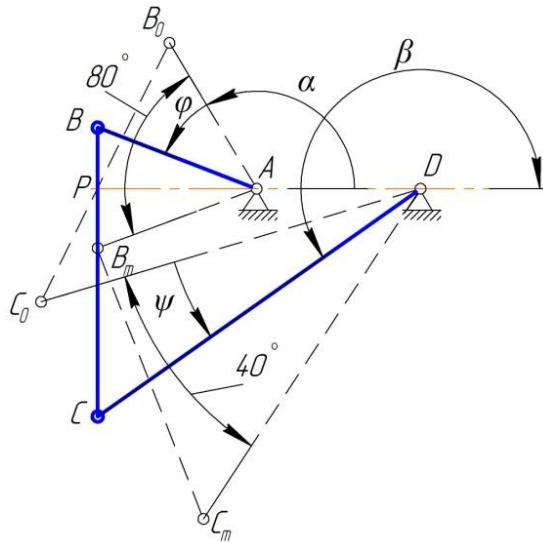


Рис. 3

**Список використаної літератури:**

1. Кіницький Я.Т. Теорія механізмів і машин. – К.: Наукова думка. – 2002. – 661 с.
2. Заблонский К.И. и др.. Теория механизмов и машин. – 1989. – К.: Вища школа. – 349 с.

Бондарчук О.С., студ.  
Самойленко С.О., студ.  
Виговський Г.М., к.т.н., проф. кафедри МІ  
Мельник О.Л., к.т.н., доц.  
Державний університет «Житомирська політехніка»

## ЧИСТОВА ОБРОБКА ДЕТАЛЕЙ ТОРЦЕВИМИ ФРЕЗАМИ, ОСНАЩЕНИМИ НАДТВЕРДИМИ МАТЕРІАЛАМИ

Основними напрямками розвитку обробки різанням є розробка новітніх та інтенсифікація існуючих технологій виготовлення деталей на основі глибоких досліджень процесів різання для можливості їх ефективного використання, управління та прогнозування з метою забезпечення високої якості обробки. Сучасне машинобудівне виробництво орієнтоване на необхідність технологічного забезпечення високої надійності техніки, підвищення її довговічності, що призводить до необхідності використання найбільш нових та сучасних високопродуктивних металообробних технологій.

Основними тенденціями розвитку машинобудування є використання нових конструкційних матеріалів, підвищення точності виготовлення заготовок, використання високошвидкісного обладнання, збільшення обсягів процесів чистої обробки тощо.

Створення інструментів із надтвердих інструментальних матеріалів, які мають високу твердість, теплостійкість та зносостійкість, дозволяють їх широке використання для обробки важкооброблюваних матеріалів з інтенсивними режимами різання. Це вимагає необхідності виконання досліджень процесів різання інструментами, оснащеними надтвердими матеріалами, особливостями яких є: високі швидкості різання; малі значення подач; різання з товщинами зрізаного шару, які близькі до радіусу округлення різальної кромки інструментів тощо.

В більшості випадків фінішна обробка плоских поверхонь важкооброблюваних матеріалів виконується шліфуванням, але характерні для цієї обробки високі сили та температури у зоні різання призводять до утворення дефектів поверхневого шару та похибок обробки, що вимагає необхідності широкого використання процесів чистого торцевого фрезерування інструментами, оснащеними надтвердими матеріалами (НТМ).

Вивчення розроблених рядом авторів конструкцій торцевих фрез для чистої обробки показало, що використання стандартної геометрії різальних елементів та їх розміщення за схемою зняття припуску за розподілом подачі викликає похибки їх розташування, що веде до різної завантаженості різальних елементів, коливанням сил різання, зменшенням періоду стійкості та погіршення якості обробки при торцевому фрезеруванні.

Розробка ступінчастих схем різання та використання косокутної геометрії різальних елементів з безвершинними різальними кромками для нових спроектованих конструкцій торцевих фрез дозволило забезпечити повну участь різальних елементів у різанні, що суттєво підвищило їх продуктивність та якість обробки.

Для забезпечення високої стійкості спроектованих ступінчастих торцевих фрез, оснащених гексанітом-Р, проводилися дослідження процесів обробки загартованих сталей твердості 56...62HRC<sub>E</sub> та високоміцних чавунів – 207...269НВ.

Результатами досліджень, встановлено, що використання ступінчастих схем різання у 3–5 разів збільшує продуктивність обробки по відношенню до звичайних чистових торцевих фрез.

При аналізі стійкості торцевих фрез, оснащених НТМ, використовувались не звичайні методи нормування стійкості фрез, як час роботи між двома переточками (період стійкості), а норми технологічного зносу. Норми технологічного зносу дозволяють врахувати продуктивність обробки, при цьому період стійкості визначається максимальною площею обробленої поверхні при забезпеченні необхідної шорсткості обробки чистовими фрезами.

Використання косокутної, безвершинної геометрії різальних елементів спроектованих фрез показало, що у процесі різання знос задньої поверхні відбувається поступово зі збільшенням величини фаски при відсутності явищ катастрофічного зносу, які характерні для різальних елементів стандартної геометрії, де переважно зношується найбільш слабка ділянка різальної кромки – вершина. Відсутність явищ катастрофічного зносу дозволяє гарантувати надійність процесу обробки, що особливо важливо для сучасних технологій чистої обробки.

При раціональних режимах обробки та геометрії різальних елементів ступінчасті торцеві фрези косокутного різання, оснащені гексанітом-Р, дозволяють в межах необхідної шорсткості (до  $R_A = 1,25$  мкм) обробити деталі із високоміцного чавуну площею  $20 \text{ м}^2$  і  $6 \text{ м}^2$  – із загартованої сталі.

М.М. Плисак, аспірант  
Г.М. Виговський, к.т.н., проф.  
Н.О. Балицька, к.т.н., доц.  
Л.Є. Глембоцька, к.т.н., доц.  
О.Л. Мельник, к.т.н., доц.

Державний університет «Житомирська політехніка»

## ВИЗНАЧЕННЯ ПРУЖНИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ З'ЄДНАННЯ «ШПИНДЕЛЬНИЙ ВУЗОЛ-ТОРЦЕВА ФРЕЗА» ПРИ ОБРОБЦІ ПЛОЩИН

Використання процесів чистового торцевого фрезерування для обробки плоских поверхонь є прогресивним методом фінішної обробки деталей. При цьому, зростання вимог до точності оброблених деталей вимагає пошуку шляхів подальшого підвищення якості обробки. Відомо, що якість обробки плоских поверхонь деталей у значній мірі визначається деформаціями технологічної системи під дією змінних за напрямками та значеннями сил різання. Кожний елемент технологічної обробляючої системи вносить свій вклад у деформації системи і таким чином впливає на сумарну похибку обробки. Дослідження показують, що на формування показників точності взаємного розташування і форми оброблених деталей значно впливає характер деформації шпиндельного вузла та торцевої фрези.

Комплексний інженерний аналіз напружено-деформованого стану шпинделя вертикально-фрезерного верстата здійснено за допомогою модуля Solidworks Simulation.

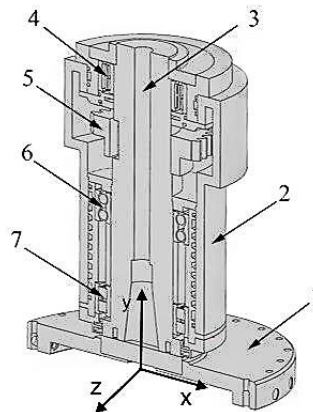


Рис. 1. 3D модель шпиндельного вузла у розрізі: 1 – торцева фреза; 2 – корпус; 3 – шпиндель; 4 – дворядний роликовий радіальний підшипник; 5 – зубчасте колесо; 6 – радіально-упорний кульковий дворядний підшипник; 7 – дворядний роликовий радіальний підшипник

Розрахунок деформацій системи «шпиндель-торцева фреза» здійснювався для процесів чорнового та чистового фрезерування.

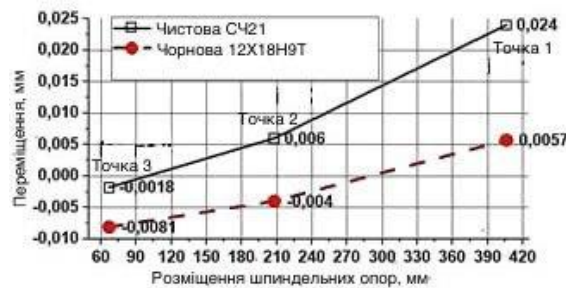


Рис. 2. Графіки переміщення шпинделя відносно своєї осі у радіальному напрямку

Визначено, що осеві пружні переміщення ножа фрези для умов обробки СЧ21 становлять 0,04 мм, а для 12Х18Н9Т – 0,3 мм, а кут нахилу фрези відносно осі шпиндельного з'єднання в результаті пружних переміщень становить 0,01 та 0,09 градусів відповідно. Це дало можливість розрахувати максимальні відхилення від площинності обробленої деталі шириною 350 мм для симетричної обробки торцевою фрезою  $D = 440$  мм, які складають 0,015 мм при обробці чавуну СЧ21 та 0,14 мм при обробці сталі 12Х18Н9Т.

## ВИКОРИСТАННЯ ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ З ПКНБ ГРУПИ VL ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ІЗ ЗАГАРТОВАНИХ СТАЛЕЙ

У зв'язку з широким впровадженням нових технологій обробки в машинобудуванні йде зростання виробництва в промисловій галузі, де застосовують лезові ріжучі інструменти із синтетичних надтвердих матеріалів, зокрема полікристалічного кубічного нітриду бору (ПКНБ) групи VL та алмазів. Це пов'язано з потребою підвищення продуктивності за рахунок збільшення швидкостей різання при обробці загартованих сталей, з використанням та без використання змащувально-охолоджених рідин, що робить такий процес сухим та екологічно чистим. Але така обробка передбачає низку науково-технічних питань, які на сьогоднішній день не повністю розкриті, зокрема довговічності інструменту, якості обробки та зменшення собівартості виготовлення, що дає можливість науковцям віднайти шлях з вирішенням цих питань та дослідити більш детально обробку надтвердими матеріалами при оптимальних режимах різання.

Вітчизняними та зарубіжними науковцями підтверджується значна ефективність при застосуванні такого матеріалу, як ПКНБ групи VL, що базується в області застосування важкооброблюваної чистової та напівчистової обробки загартованих сталей при високошвидкісних процесах різання. В деяких випадках чистова обробка таких матеріалів може давати можливість відмовитися від шліфування.

До такої групи матеріалів, як загартована сталь, відносяться сталі твердістю 45–68 HRC. Такий матеріал повинен мати стійкість до пластичних деформацій при високих температурах, високу хімічну стійкість та механічну міцність.

Матеріали ПКНБ, в залежності від вмісту кубічного нітриду бору, розрізняють як дві групи: 1) **VL** (вміст 45–65 % об. та керамічна зв'язка), 2) **VH** (вміст 70–90 % об. та зв'язки у вигляді чистих металів).

Також є третя група **VS**, але вона використовується для роботи з покриттям. Наявність захисного покриття на різальному інструменті впливає як на рівень температури на плямах спалаху на контактних поверхнях інструменту, так і на середню температуру різання.

Концентрація кубічного нітриду бору (КНБ) при роботі різального інструмента принципово визначає сфери його застосування. Перша група матеріалів призначена для обробки в умовах високих навантажень. Друга група ефективна при остаточній безударній обробці з високою швидкістю різання. Це пов'язано з тим, що композит з низьким вмістом КНБ характеризується теплопровідністю  $< 60$  Вт/мК і основна кількість тепла, що формується в зоні різання, відводиться зі стружкою.

Ефективне використання матеріалів із композитів досягається на високоточних швидкісних верстатах з частотою обертів шпинделя до 4000 об./хв. та поздовжньою подачею 0,10–0,01 мм/об. Таке технічне обладнання повинно володіти достатньою високою жорсткістю, тому що поява динамічних навантажень може не тільки погіршувати шорсткість оброблюваної поверхні, але і може бути причиною руйнування ріжучих кромки. Виготовляються інструментальний матеріал із ПКНБ групи VL частіше у вигляді пластин, в тому числі з механічним кріпленням круглих, квадратних, ромбічних форм. Також з такого матеріалу виготовляються пластини для торцевих фрез. Вони оснащуються ромбічними та круглими пластинами для обробки відкритих ступінчатих поверхонь відповідно.

Серед багатьох трибологічних та барометричних процесів, які властиві механічній обробці, важливе місце займає контактна взаємодія в системі інструмент - деталь, тому що вона істотно впливає на якість отриманих поверхонь, стійкість інструменту та ефективність протікання дифузійних процесів в зоні обробки, що в підсумку створює якість оброблюваних виробів. Для створення високоефективних інструментів для обробки матеріалів є використання інструментів із зносостійкими покриттями. В якості таких покриттів можуть застосовуватися з'єднання тугоплавких металів бора, нітриду, карбіду, карбідонітриду та оксиду. Такі покриття забезпечують зростання економічності проти дорогих та непоширених металів, та при легуванні збільшують ріжучі властивості інструмента, а саме: 1) забезпечують особливі властивості поверхні - жаростійкість, теплопровідність, заданий коефіцієнт тертя; 2) зростання експлуатаційної стійкості інструментів; 3) дають змогу для створення нових матеріалів з високою конструкційною міцністю.

Висока твердість і міцність робить такий матеріал, як ПКНБ групи VL дуже ефективним та перспективним для подальшого розвитку виготовлення інструментів та вдосконалення процесів різання. Але, на сьогоднішній день не розкриті та не представлені всі методи збільшення продуктивності за рахунок використання матеріалів з ПКНБ групи VL, нових способів захисних покриттів з урахуванням їх трибологічних властивостей у повному обсязі, що і буде основою для автора у подальшому науковому пошуку для вирішення задач з обробки загартованих сталей.

Козяр Я.А., студ.  
Яновський В.А., доц.  
Райковська Г.О., д.пед.н., проф.  
Полонський Л.Г., д.т.н., проф.

Державний університет «Житомирська політехніка»

## УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ПАЗІВ ГОРЛОВОГО КІЛЬЦЯ СКЛОФОРМУВАЛЬНОЇ МАШИНИ

Горлові кільця, як складова формового інструменту, служать для оформлення у порожнинних тарних скловиробах горл, які повинні відповідати певним умовам закупорювання, зберігання, транспортування тощо. Вони являють собою тіла обертання різних конструкцій, виготовлені, в основному, з чавуну, та складаються з двох півкільць, суміщених між собою по площині роз'єму за допомогою замка – зуба на одному півкільці та канавки на другому (рис. 1).

Чавунні горлові кільця мають термін служби близько 3 діб і потребують необхідності їх частой заміни, що знижує продуктивність підприємств скловиробів. Найбільша потреба при експлуатації склоформувальних машин спостерігається саме у них. Через це навіть ті підприємства скловиробів, що отримують формовий інструмент по кооперації, при наявності у них відповідної технічної бази змушені виготовляти горлові кільця у своїх механічних цехах, незважаючи на те, що рівень їх технічного оснащення є набагато нижчим порівняно зі спеціалізованими машинобудівними цехами, а, отже, собівартість виготовлення формового інструменту на них, наприклад, хоча б через економічну недоцільність застосування спеціальних пристроїв при виконанні операцій механічної обробки, є вищою за собівартість виготовлення у машинобудівному виробництві, а якість – нижчою.

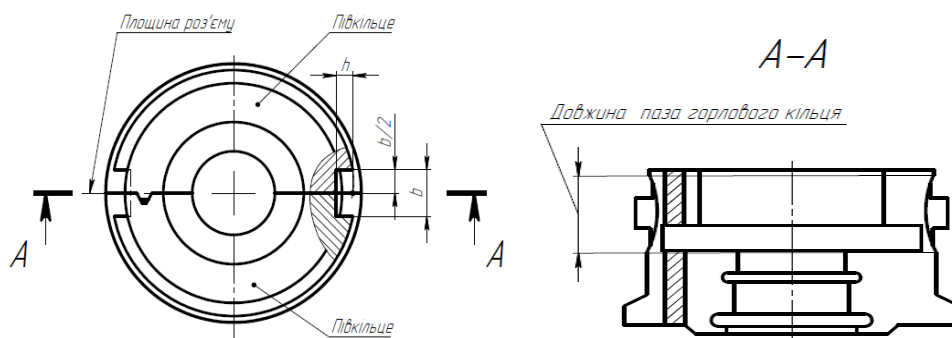


Рис. 1. Горлове кільце формувального інструменту

Два протилежних паза горлового кільця, що розташовані в обох півкільцях симетрично до площини їх роз'єму, загальна ширина яких має розмір  $b$ , а загальна глибина –  $h$  (див. рис. 1) є відповідальними конструктивними елементами горлового кільця, від якості виготовлення яких залежить можливість симетричної фіксації півкільць у кільцетримачі склоформувальної машини під час переміщення (у т. ч., і перевертання) даного механізму разом зі скляними виробами на різних етапах технологічного процесу їх виготовлення.

Діюча на даний час технологія виготовлення пазів півкільць в умовах інструментальних цехів полягає у тому, що обробка всіх зовнішніх і внутрішніх поверхонь заготовок півкільць горлового кільця виконується в зібраному стані. Пази півкільць підлягають обробці на останніх операціях технологічного процесу виготовлення горлового кільця. При цьому обробка пазів виконується окремо на кожному з півкільць.

Спочатку на кожному півкільці обробляються пази шириною  $b/2$ , розмір яких становить половину загальної ширини  $b$  паза горлового кільця. Загальні розміри пазів утворюються після суміщення півкільць між собою при їх складанні для отримання конструкції горлового кільця (див. рис. 1).

При такій технології виготовлення пазів горлового кільця значно знижується продуктивність виготовлення та виникає сумарна похибка виготовлення паза, що значно перевершує допустимі відхилення, обумовлені технічними вимогами, порушує принцип взаємозамінності півкільць, якого необхідно дотримуватися при виготовленні формового комплекту.



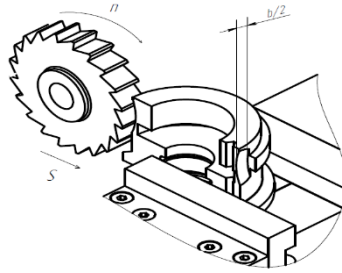


Рис. 2. Існуючий метод обробки пазів горлових півкілець

В цьому випадку розміри, взаємне розташування поверхонь та форму пазів для того, щоб горлові кільця можна було застосовувати у технологічному процесі виготовлення скловиробів, необхідно підганяти «по місцю». Якщо ж підгонка неможлива, то горлові кільця взагалі виявляються непридатними для експлуатації. Для підвищення продуктивності та якості виготовлення пазів горлового кільця внесені наступні зміни до технологічного процесу його виготовлення.

Після обробки в зібраному стані зовнішніх і внутрішніх поверхонь на заготовках півкілець, крім даних пазів, останні розбираються і на одній із зовнішніх неробочих півциліндричних поверхонь будь-якого з півкілець фрезерується лиска розмірами  $d \times c$  з паралельною площині їх роз'єму поверхнею, що при подальшій механічній обробці пазів буде використовуватися як допоміжна технологічна база (рис. 3).

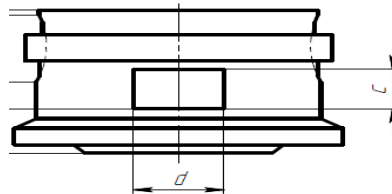


Рис. 3. Виконання лиски на одному з півкілець

Після цього заготовки півкілець знову складаються і в зібраному стані у лещатах виконується фрезерування пазів.

При цьому обробка пазів горлового кільця може виконуватися на одному установі за два переходи або за два установи зі зміною позицій (рис. 4) з використанням єдиного комплекту технологічних баз.

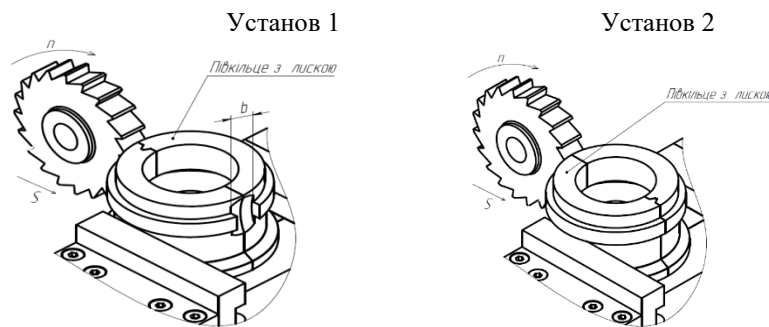


Рис. 4. Фрезерування пазів горлових кілець за два установи

Зміни у технології виготовлення пазів горлового кільця дозволяють виключити з діючого процесу здійснення обробки 4 пазів із розмірами шириною  $b/2$  окремо на кожному з півкілець, та виключити підгонку розмірів пазів, взаємного розташування поверхонь та форми «по місцю». Оскільки пази обробляються на заготовках півкілець в зібраному стані на одному і тому ж комплекті технологічних баз, то отримання технічних вимог до пазів щодо їх симетричності відносно площини роз'єму та непаралельності бокових сторін пазів між собою і відносно площини роз'єму будуть гарантовано виконуватися.

Це дозволяє забезпечити стабільність розмірів пазів горлового кільця та виконання технічних вимог стосовно їх симетричності відносно площини роз'єму півкілець, паралельності бокових сторін пазів між собою та відносно площини роз'єму, підвищити продуктивність їх виготовлення. Запропонована технологія виготовлення пазів горлових кілець склоформуальної машини впроваджується у виробництво на ПрАТ «Мар'янівський склозавод» (сmt Мар'янівка Довбиської об'єднаної територіальної громади Новоград-Волинського району Житомирської області).

Остапчук І. Ю., студ.  
Данюк В. М., студ.  
Отаманський В.В., асист.  
Мельник О.Л., к.т.н., доц.

Державний університет «Житомирська політехніка»

## ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ТОПОЛОГІЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ У МАШИНОБУДУВАННІ

За останні десятиліття застосування методів топологічної оптимізації набуло значного розвитку в ряді таких науково-виробничих напрямків як аерокосмічна сфера, автомобільна галузь, робототехніка [1, 2], біомедична галузь [3] тощо [4]. Розширенню сфери використання та підвищенню ефективності застосування різних методів топологічної оптимізації, на нашу думку серед іншого, сприяв розвиток адитивних технологій (3D друку) та реалізація інструментарію для топологічної оптимізації в CAD/CAE системах. Так, наприклад, в 2018 році інструментарій для оптимізації топології з'явився в такій популярній машинобудівній САПР як SOLIDWORKS.

Також інструменти топологічної оптимізації реалізовані в таких CAD/CAE системах як Autodesk Inventor Fusion 360, Nastran, ANSYS, COMSOL Multiphysics, PTC Creo Simulate та ін.

Інструменти для топологічної в машинобудівних САПР постійно розвиваються на знаходять своє використання в тому числі в тих випадках, де не йде мова про адитивні технології. Так в роботі [4] застосовано оптимізацію топології корпусу двохступінчастого циліндричного редуктора (рис.1). Водночас можна сказати, що топологічна оптимізація корпусних деталей редукторів в машинобудівних САПР може бути використана для концептуального дизайну деталей або для дизайну на початкових стадіях проектування [4]. Останнє пов'язано з тим, що при проектуванні деталей в машинобудуванні мають бути враховані ряд конструкторських та технологічних вимог. Для прикладу розглянемо результат оптимізації топології частини корпусу редуктора (рис.1), що виконано в роботі [4] з використанням SOLIDWORKS Simulation.

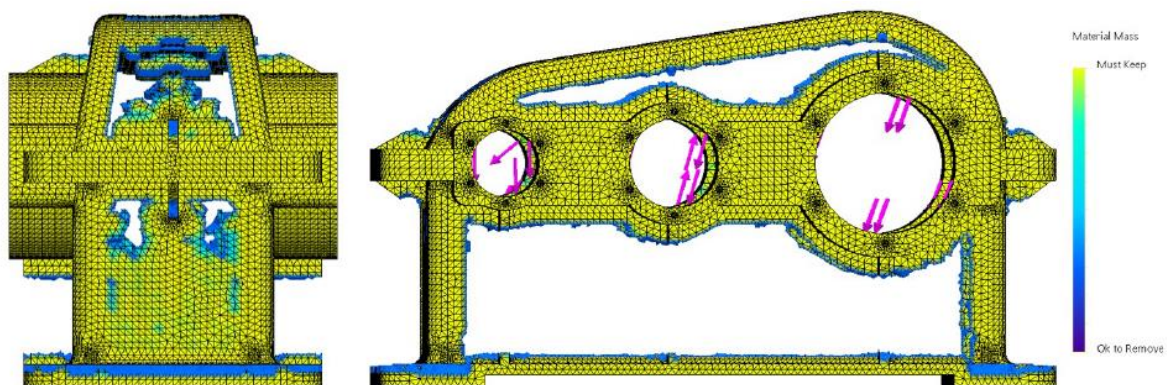


Рис.1. Результат оптимізації топології частини корпусу редуктора (еюра маси матеріалу) [4]

Як виходить з рисунка 1 неможливо повністю прийняти згенеровану форму так як, з однієї сторони, стінки корпусу мають забезпечити герметичність редуктора; з іншої – є ряд технологічних вимог до геометрії деталі (наприклад, мінімальна товщина стінки) при отриманні деталей корпусу редуктора, наприклад, литтям. Водночас там, де матеріал (елементи сітки скінченних елементів) деталі був «видалений» оптимізаційним алгоритмом, можна проектувати настільки тонку стінку, на скільки це можливо та доцільно з технологічної точки зору. Зменшення товщини стінки корпусу редуктора не призвело до втрати його жорсткості чи вагомого підвищення значення еквівалентних напружень та, водночас, дозволило знизити його масу на 7,33 % [4].

В таких програмних продуктах як Autodesk Inventor Fusion 360 засоби топологічної оптимізації представлені таким інструментом як генератор форм. Даний інструмент дозволяє генерувати форму деталі, котра буде забезпечувати бажану жорсткість при мінімізації маси. В роботі [2] використано даний інструмент на етапі концептуального проектування з метою зниження маси деталі робота. Порівняння вагових характеристик деталі до та після застосування генератора форм Autodesk показана на рисунку 2.

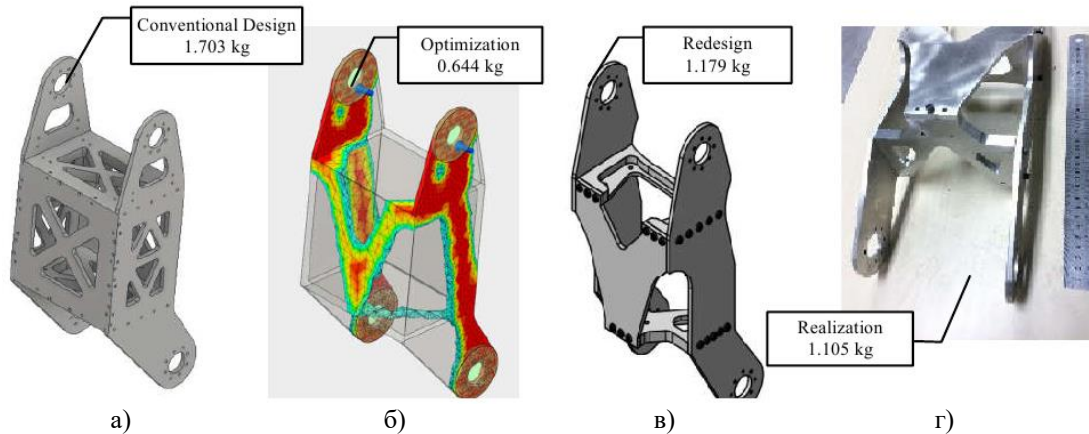


Рис.2. Порівняння вагових характеристик деталі при традиційному процесі проектування (а), на етапах застосування генератора форм (б, в) та кінцевого «виробничого» варіанту деталі (г) [2]

Відповідно до рисунка 2 застосування генератора форм дозволило при збереженні необхідних показників жорсткості знизити масу деталі на 35 %.

Водночас на сьогодні «середні» машинобудівні САПР мають певні обмеження інструментів топологічної оптимізації збірок, котрі полягають в тому, що або неможливо застосовувати топологічну оптимізацію для збірок (наприклад, SOLIDWORKS, Inventor та ін.) або можливо, проте при цьому одночасно може бути оптимізована тільки одна деталь збірки (наприклад, PTC Creo Simulate). Крім того перелік критеріїв для топологічної оптимізації в «середніх» машинобудівних САПР часто обмежений і, наприклад, знайти оптимальний розподіл матеріалу в заданій формі для забезпечення, наприклад, бажаних частотних характеристик (власних форм коливань та їхніх частот) при мінімізації маси не завжди можливо.

Також слід зазначити, що більшість «середніх» машинобудівних САПР використовують метод твердого ізотропного матеріалу з пеналізацією (SIMP), що був запропонований Bendsoe, Kikuchi (1988) та Rozvany, Zhou (1992). Але на сьогодні поряд дослідників запропоновані модифікації SIMP методу для роботи з мультіфазними матеріалами чи анізотропними матеріалами, що в майбутньому може розширити сферу застосування топологічної оптимізації для концептуального дизайну в машинобудуванні.

Таким чином можна резюмувати наступне:

- більш широке застосування методи топологічної оптимізації мають в тих сферах, де виготовлення деталей здійснюється з використанням 3D друку або мова йде про двомірні деталі (диски, зірочки тощо);
- на сьогодні функціонал більшості машинобудівних САПР дозволяє виконувати топологічну оптимізацію дизайну деталей з урахуванням ряду технологічних факторів (наприклад, можливості демонтажу деталі з форми для лиття тощо);
- в більшості випадків мова йде про використання топологічної оптимізації деталей з ізотропних однофазних матеріалів, але на сьогодні запропоновано ряд рішень для розширення топологічної оптимізації, наприклад, на двофазні матеріали чи анізотропні матеріали;
- в ряді випадків топологічну оптимізацію можна використовувати для пошуку концептуальних рішень дизайну деталей в машинобудуванні з подальшою корекцією дизайну деталі для забезпечення конструктивних чи технологічних вимог.

#### Список використаної літератури:

1. Optimization of the Structural Characteristics of the Robotic System Holder / A.Zdobytskyi, M. Lobur, M. Iwaniec, V. Breznitskyi. // Conference: 2019 IEEE 15th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM). – 2019. – С. 1–4.
2. Generate an Optimum Lightweight Legs Structure Design Based on Critical Posture in A-FLoW Humanoid Robot / A Luthfi et al. // Journal of Physics Conference Series 1007(1):012070. – 2018. – №1007. – С. 1–7.
3. J W C Teo. Topology optimization of mandible fracture plate / J W C Teo and S F Khan// IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 670 (2019) 012049. – 2019. – С. 1–6.
4. Slavov S. Optimizing Weight of Housing Elements of Two-stage Reducer by Using the Topology Management Optimization Capabilities Integrated in SOLIDWORKS: A Case Study / S. Slavov, M. Konsulova-Bakalova. // Machines. – 2019. – №7010009. – С. 1–15.

## **АЛГОРИТМ МОДЕЛЮВАННЯ СИЛОВИХ ДЕФОРМАЦІЙ КОРПУСНИХ ДЕТАЛЕЙ МЕТАЛОРІЗАЛЬНИХ ВЕРСТАТІВ У SOLIDWORKS SIMULATION**

Під час обробки на металорізальних верстатах виникають відхилення форми поверхонь на деталі. Умовно похибки поверхонь поділяють на шорсткість, хвилястість і макрогеометричну. Відношення кроку нерівностей до їх висоти у встановлених межах для шорсткості  $< 40$ , хвилястості від 40 до 1000 та макрогеометричної похибки  $> 1000$ . Одним з критеріїв, що визначає точність верстатів є жорсткість несучої системи. За класифікацією Решетова Д.Н. елементи несучої системи діляться на такі групи:

1. Станини та фундаменти;
2. Вузли для підтримки інструмента, а також його переміщення (супорти, повзуни, револьверні головки, салазки супортів і т.д.);
3. Вузли для підтримки заготовок, а також їх переміщення (столи, салазки столів, консолі і т. д.);
4. Деталі і вузли для повороту інструменту та заготовок (корпуса коробок швидкостей і подач, корпуси шпindelних бабок);
5. Шпindelі і їх опори, задні бабки, планшайби і т. д.

Похибки від пружних деформацій, перерахованих вище елементів несучої системи, можуть досягати до 80 % від загальної похибки обробки.

Складові сили різання, які виникають під час обробки, діють як на інструмент так і на деталь, за рахунок чого спостерігається взаємне віджимання один від одного, що веде до їх просторового зміщення. В результаті цих зміщень виникають похибки розмірів деталі та відхилення від форми.

Дана проблема розглядається у багатьох роботах, але залишається актуальною і по сьогоднішній день. Розвиток сучасних комп'ютерних технологій та CAD та CAE систем допомагають у дослідженнях даного питання, а також значно прискорюють проектування нових моделей верстатів. Але відомі алгоритми моделювання силових деформацій корпусних деталей не є вичерпними і потребують удосконалення.

Розглянемо типовий алгоритм моделювання з описом кожного кроку та визначимо, що слід враховувати при аналізі силових деформацій.

Перше, що необхідно для моделювання – це 3D модель досліджуваного верстата. Зазвичай при побудові геометричної моделі нехтують багатьма конструктивними елементами (отворами, ребрами, виймками і т.д.). Це зменшує навантаження на комп'ютерну техніку при розрахунках, але і може призвести до хибних результатів. Також до цього пункту можна віднести призначення і налаштування матеріалу.

Другий крок – налаштування з'єднань та контактів між поверхнями. З'єднання поверхонь у металорізальних верстатів діляться на рухомі і нерухомі. Перші реалізуються за допомогою підшипників або напрямних. Другі – це з'єднання корпусних деталей між собою і реалізуються віртуальними затягнутими стиками. Відомо, що жорсткість вузлів верстатів і верстатів в цілому головним чином залежить від деформацій стиків між деталями вузлів і в значно меншій мірі – від деформації самих деталей. При моделюванні часто нехтують призначенням і налаштуванням контактів в стиках, що веде до недостовірних результатів. Третє – призначення кріплення. Використовується 2 способи фіксації моделі верстата: закріплення станини на декілька точок опор; введення в розрахунок фундаменту (в такому випадку необхідно налаштувати контакти між опорами верстату і поверхнею фундаменту). Кожен з цих методів кріплення має свої особливості реалізації.

Четверте – призначення навантажень. Сюди можна віднести сили різання, сили, які діють від приводу верстата та сили тягіння. Слід звернути увагу, що не завжди сили мають зосереджений характер і часто їх необхідно задавати як розподілені. П'ятий крок – побудова сітки. Для аналізу корпусних деталей металорізальних верстатів використовують скінченно-елементні моделі з об'ємних тіл. У Solidworks Simulation тіло розбивається на тетраедричні твердотілі елементи. Розміри сітки підбирають в ручну проводячи декілька досліджень з різними параметрами, аналізуючи отримані результати і оцінюючи похибки розрахунку. Слід робити меншу сітку у місцях де очікуються деформація.

Останній крок в алгоритмі – це запуск дослідження і аналіз результатів. Якщо налаштування підібрані правильно і результати моделювання вдалі, то можна проводити дослідження в різних положеннях супорту. По взаємних зміщеннях інструменту і заготовки можна оцінити похибки розмірів, які можуть виникати і очікувану форму деталі.

Отже, моделювання силових деформацій корпусних деталей металорізальних верстатів за допомогою CAD та CAE систем може дозволити оцінити очікувані похибки обробки, а аналіз результатів допомагає шукати рішення по їх мінімізації. Але слід приділити значну увагу проблемам, які виникають на кожному кроці моделювання, для отримання достовірних результатів.

## ОБРОБЛЮВАНІСТЬ ЧАВУНІВ ПРИ ФІНІШНОМУ ТОРЦЕВОМУ ФРЕЗЕРУВАННІ ПЛОСКИХ ПОВЕРХОНЬ НАДТВЕРДИМИ МАТЕРІАЛАМИ

В умовах швидкого технічного прогресу питання екологічності, економічної ефективності та якості виготовлення деталей постає в машинобудуванні особливо гостро. Для того щоб продукція, яка випускається на підприємствах була конкурентоспроможною, вона має відповідати стандартам ISO 9001-2015. Успіх у вирішенні цього питання залежить від багатьох чинників: вдалого вибору матеріалу заготовки; підбору ефективного технологічного процесу обробки деталей з мінімізацією операцій на шляху до фінішної обробки; вибору інструменту та матеріалу його різальної частини, який би забезпечував максимальний термін його експлуатації та багато інших.

Серед усієї продукції яка випускається в машинобудівній галузі, велику нішу займає виробництво деталей, таких як: станини, направляючі, корпуси машин, які мають плоскі протяжні поверхні високої якості. Їх виробництво вимагає великих енергетичних зусиль, значних сировинних затрат, багато виробничих площ та великої кількості робочого інструменту. Підвищенню ефективності обробки даного типу деталей присвячується багато наукових праць та досліджень. Адже якість комплектуючих верстатного обладнання – це один із головних чинників від якого залежить якість продукції яка виробляється на ньому.

Одним з перспективних шляхів вирішення цього питання є використання продуктивних інструментів, які б дозволяли, в процесі обробки, скорочувати кількість технологічних операцій та отримувати фінішні поверхні, без шліфування.

В якості матеріалів для виготовлення вище згаданих деталей застосовуються чавуни, в першу чергу за рахунок того, що вони мають гарні ливарні властивості і вартість їх значно нижча у порівнянні з іншими матеріалами, які мають схожі з ними фізико-механічні характеристики. Крім того, вони цікаві в якості оброблюваного матеріалу тим, що присутність в них графіту сприяє, в процесі різання, утворенню крихкої та короткої стружки, що в свою чергу позитивно відображається на їх оброблюваності. Однак, разом з тим, збільшення вмісту графіту призводить до швидкого абразивного зношування різального інструменту, а це означає, що буде збільшуватися кількість необхідного для обробки інструменту, особливо в умовах роботи з великими площами. До того ж існує велика кількість різних чавунів, які відрізняються один від одного в залежності від того в якій формі присутній вуглець в сплаві та від вмісту легуючих елементів в них, і всі вони мають різні показники оброблюваності. Для їх продуктивної обробки мають бути обрані різальні інструменти з відповідних матеріалів, які б задовольняли б затребуваним вимогам. Питання вдалого підбору інструменту комплексне і об'єднує в собі знання геометрії різальної частини інструмента, режимів різання та фізико-механічних властивостей оброблюваного та інструментального матеріалів.

Саме цьому питанню і приділяється найбільше уваги в доповіді, тези якої представлені зараз, шляхом аналізу фізико-механічних властивостей чавунів, які є матеріалом для виготовлення даного типу деталей, та тому як вони піддаються механічній обробці. Проводився аналіз робіт вітчизняних та зарубіжних науковців, які присвячені оброблюваності високоміцних чавунів надтвердими матеріалами. Досліджувалися фізико-механічні властивості матеріалів, які можуть бути використані в якості інструментальних, для виготовлення різальних частин інструментів, їх зношувальність та способи підвищення їх продуктивності. Здійснювався аналіз станів які відбуваються на поверхнях оброблених деталей та інструментів в умовах різання на великих швидкостях. Розглядалося як впливають геометричні параметри різальних інструментів на режими різання, та на стійкість інструменту. Вивчалися новинки та дослідження компаній, які займаються виробництвом інструментів з ПНТМ, призначених, більшою мірою, для обробки чавунів. Особлива увага приділялася вивченню такого різновиду надтвердих матеріалів як Гексаніт-Р, який має здатність працювати з чавунами, твердість яких коливається в межах 160–600 НВ. Також проводився аналіз можливостей торцевого фрезерування чавунних протяжних плоских поверхонь деталей з застосуванням різних схем різання.

В результаті опрацювання розглянутої інформації передбачається можливість створення ефективного торцевого різального інструменту з надтвердого матеріалу, за новими перспективними схемами різання. Це дасть можливість підвищити ефективність обробки, за рахунок зменшення виробничих площ та збільшення зносостійкості інструменту. Крім того можна буде виключити з технологічного процесу абразивне шліфування, і тим самим покращити екологічність виробництва.

## ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ОБРОБКИ ПЛОСКИХ ПОВЕРХОНЬ ШЛІФУВАННЯМ РАЦІОНАЛЬНИМ ЗАСТОСУВАННЯМ МОР

У сучасному машинобудуванні до якісних показників продукції пред'являються високі вимоги. Крім того, експлуатаційні показники окремих деталей, що утворюють механізми й вузли машин, залежать не тільки від виду матеріалу, але й від того, як і за яким технологічним процесом вони виготовлені. Одним з видів викінчувальних видів обробки різанням деталей, особливо термооброблених, з сталей та сплавів високої твердості, є шліфування. Враховуючи загальну тенденцію до постійного підвищення точності й продуктивності обробки на металорізальних верстатах доля точної обробки шліфуванням постійно зростає. Саме тому кількість верстатів шліфувального типу на машинобудівних підприємствах доходить до 30 % від загального парку металорізальних верстатів.

Шліфування, як викінчувальний вид обробки, ставить жорсткі вимоги до якісних показників оброблених поверхонь, до яких загалом відносяться геометричні й фізико-механічні характеристики поверхневого шару деталі. В залежності від виду абразивної обробки досягається геометрична точність до часток мікрметра та шорсткість в межах  $R_z = 0,1 \dots 0,025$  мкм. Стан матеріалу поверхневого шару характеризується його зміцненням (наклепом), мікроструктурою, величиною й знаком залишкових напруг і глибиною їх залягання. На усі ці показники має безпосередній вплив процес шліфування, точний вибір параметрів режиму різання, вид та спосіб подачі МОР тощо.

Процес формування профілю шліфованої поверхні відбувається під дією багатьох факторів, як детермінованих (режими шліфування), так і стохастичних (профіль шліфувального круга, забрудненість МОР), тому для розрахунку характеристик шліфованих поверхонь варто використати узагальнений імовірнісний підхід. При цьому процес шліфування розглядається в контексті взаємодії двох розподілених систем: безлічі різальних крайок абразивних зерен, що знаходяться на робочій поверхні шліфувального круга, і початкової шорсткості шліфованої поверхні (опорної кривої).

Для знаходження функції розподілу висот вершин зерен шліфувального круга над рівнем зв'язки в процесі обробки слід розглянути схему його робочої поверхні, показану на рисунку 1. Вісь  $y$  спрямована по нормалі до робочої поверхні круга. За нульовий рівень прийнято математичне очікування рівня зв'язки при відомій функції її розподілу  $F_c(y)$ , в першому наближенні приймаємо:  $F_c(y) = \Phi(y/\sigma_c)$ , де  $\sigma_c$  – дисперсія рівня зв'язки.

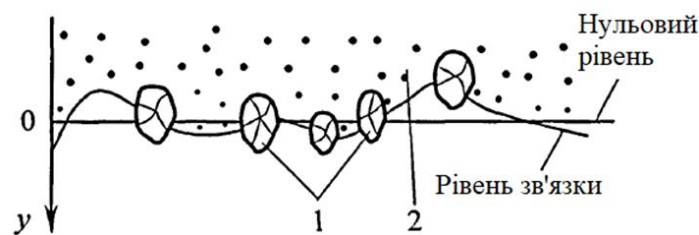


Рис. 1. Схема робочої поверхні шліфувального круга  
 1 – абразивні зерна; 2 – зв'язка

Функцію розподілення діаметрів абразивних зерен круга є можливість представити залежністю:

$$F_a(y) = \Phi \left[ \frac{\ln y - d_a}{s_a} \right] \quad (1)$$

де параметри  $d_a$  і  $s_a$  – визначаються через математичне очікування  $m_a$  та дисперсію  $\sigma_a^2$  діаметрів абразивних зерен.

Розподіл рівня зв'язки можна вважати нормальним, розподіл висот вершин зерен над рівнем зв'язки – рівномірним (для часу відразу після правки круга), а розподіл діаметрів абразивних зерен круга – логарифмічно-нормальним. Для абразивних зерен діаметром  $d_0$  щільність розподілу висоти їх вершин над рівнем зв'язки:

$$p_b^{d_0}(y) = \begin{cases} \frac{1}{d_0} & \text{при } 0 \leq y \leq d_0; \\ 0 & \text{при } d_0 < y < 0. \end{cases} \quad (2)$$

Проте, вже на початковому етапі роботи шліфувального круга закон розподілу висот вершин абразивних зерен над рівнем зв'язки змінюється внаслідок їх зношування та руйнування. Dodatkowo міжзернові проміжки поступово забиваються частинками шламу. Тому навіть на першому етапі вирішення задачі знаходження функції розподілу висот вершин зерен шліфувального круга неможливо конкретизувати закон щільності розподілу висоти виступу.

Введемо випадкові величини:  $\xi_1$  – рівень вершин абразивних зерен з врахуванням налипання на робочу поверхню круга часточок шламу,  $d_{0i}$  – діаметр абразивного зерна круга,  $d_i$  – діаметр часточки шламу на поверхні круга (рис. 2).



Рис. 2. Схема робочої поверхні круга  
1 – абразивне зерно; 2 – часточка шламу

Задавши функції розподілення випадкових величин, що визначають розташування окремих зерен абразиву та шламу можна визначити результуючу функцію розподілення висот вершин зерен з врахуванням часточок шламу в міжзерновому просторі круга.

Необхідна та достатня умова зменшення шорсткості робочої поверхні круга під час шліфування:

$$\sigma_{\Sigma B} < \sigma_B \quad (3)$$

Також

$$\sigma_B^2 > 2\beta \left( \frac{m_a}{\alpha + 2} - m_n \right)^2 + \frac{2(\alpha + 2)\sigma_a^2 + (\alpha + 1)m_a^2}{2(\alpha + 2)^2(\alpha + 3)} + 2\sigma_n^2 \quad (4)$$

Аналіз умови (4) показує, що вона може бути виконана при введенні в МОР дрібного однорідного шламу. Тоді можна прогнозувати зменшення шорсткості оброблюваної поверхні заготовки при забрудненні МОР механічними домішками, що підтверджується відомими результатами експериментальних досліджень. У разі невиконання умови (4) забруднення МОР механічними домішками призводить до збільшення висотних параметрів рельєфу робочої поверхні круга.

Якщо прийняти гіпотезу нормального розподілення функцій видаленого та залишеного матеріалу заготовки при шліфуванні можна отримати такі залежності для  $m_y$ ,  $\sigma_y$ ,  $m_z$ ,  $\sigma_z$ :

$$m_y = m_{\text{шп}} - \sqrt{-2\sigma_y^2 \ln \left( \frac{\sigma_y}{\bar{\zeta}\sigma_{\text{шп}}} \left( 1 - \Phi \left( \frac{m_{\text{шп}} - m_B}{\sigma_B} \right) \right) \right)}; \quad (5)$$

$$m_z = m_{\text{шп}} - \sqrt{-2\sigma_z^2 \ln \left( \frac{\sigma_z}{\bar{\zeta}\sigma_{\text{шп}}} \left( 1 - \Phi \left( \frac{m_{\text{шп}} - m_B}{\sigma_B} \right) \right) \right)}; \quad (6)$$

$$\sigma_y = \sigma_{\text{шп}} + \frac{\beta\sigma_{\text{шп}}^2 \sqrt{1 - \bar{\zeta}}}{\sigma_B}; \quad (7)$$

$$\sigma_z = \sigma_{\text{шп}} + \frac{\alpha\sigma_{\text{шп}}^2 (\bar{\zeta}^2 - 2\bar{\zeta})}{\sigma_B}; \quad (8)$$

**Висновок:** отримані залежності (5) – (8) дозволяють прогнозувати профіль шліфованої поверхні деталі з врахуванням вмісту у МОР механічних домішок за умови відомого розподілення механічних домішок у МОР за їх розмірами.

## МЕХАНІЧНІ ПЕРЕДАЧІ РОБОТІВ І МАНІПУЛЯТОРІВ

Привод роботи, будучи складовою частиною його маніпулятора, призначений для перетворення енергії, що підводиться в енергію руху виконавчих ланок маніпуляційної системи і пристроїв пересування робота відповідно з сигналами, які надходять від системи управління.

Загалом привід складається з перетворювача енергії у вигляді енергоустановки, тих чи інших двигунів і передавальних механізмів (передач). Елементи приводу в складі маніпулятора можуть бути охоплені як внутрішніми, так і зовнішніми зворотними зв'язками, при наявності яких привід стає стежачим, що дозволяє будувати робот з елементами адаптації.

Привід в значній мірі визначає структуру, параметри і технологічні можливості маніпулятора і робота в цілому. Основними параметрами приводу є: потужність, швидкість і швидкодія, точність відпрацювання командного сигналу. Для вибору того чи іншого приводу при проектуванні найбільш істотні наступні класифікаційні ознаки: вид енергоносія, вид виконавчих двигунів, спосіб управління, спосіб використання енергії, що надходить і відводиться від механічної системи. Важливими параметрами приводів роботів є також надійність, вартість, зручність експлуатації. По виду енергоносія розрізняють пневматичний (рис. 1.), гідравлічний, електричний приводи та їх комбінації. Нині приблизно 40 % роботів світового парку виконані з пневматичними приводами, майже стільки ж з гідравлічними, і лише близько 20 % – з електричними, при цьому частка останніх постійно зростає.

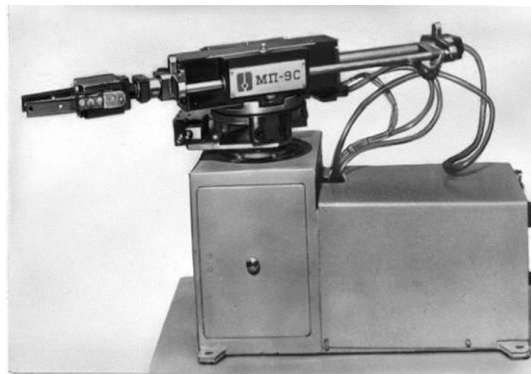


Рис 1. Маніпулятор з пневматичним приводом

Застосування пневматичних приводів в робототехніці пояснюється їх простотою, дешевизною і надійністю. Що правда, ці приводи погано керовані і тому використовуються в основному як такі, що не регулюються з цикловим керуванням. Пневматичні приводи використовуються тільки у роботах невеликої вантажопідйомності – до 10, рідше 20 кг. Основними перевагами пневматичних приводів є: простота і надійність конструкції; висока швидкість вихідної ланки (до 1 м/с при лінійному переміщенні, до 60 об./хв. при обертанні); екологічна чистота приводу (за рахунок використання стислого повітря); можливість використання повітря із заводської пневмосистеми з тиском 0,5–0,6 Мпа; висока точність позиціонування при роботі по жорстких упорах; можливість застосування в агресивних і пожежонебезпечних середовищах; відносно високий ККД (до 80 %); простота компоновки елементів; низька вартість конструкції і низькі витрати на обслуговування.

Однак, попри всі переваги пневматичних приводів, вони мають і ряд недоліків: нестабільність швидкості вихідної ланки при зміні навантаження (унаслідок стисливості повітря); необхідність демпфування руху вихідної ланки приводу в кінці ходу; наявність шуму при роботі. По функціональному призначенню пневмопристрої в приводі діляться на виконавчі, розподільні, управляючі. Виконавчі пристрої призначені для перетворення енергії стислого повітря в енергію руху робочих органів приводу. Розподільні пристрої – для зміни потоків стислого повітря в лініях. Управляючі пристрої, забезпечують задану послідовність переміщень виконавчих пристроїв відповідно до необхідного закону руху робочих органів машини. З цією метою вони передають відповідні команди на розподільні пристрої.

За типом виконавчих пристроїв розрізняють приводи зворотнопоступального і обертового рухів. В перших виконавчим пристроєм є пневмоциліндр на два положення, в приводах обертового руху виконавчими пристроями є поворотний пневмодвигун або роторний лопатний пневмодвигун.



Гідравлічні приводи найбільш складні і дорогі у зрівнянні з пневматичними та електричними. Проте при потужності 500–1000 Вт. і вище вони мають найкращі масогабаритні характеристики і тому являються основним типом приводу для важких і надважких роботів. Гідравлічні приводи добре керуються, тому вони вони знайшли також вжиток у роботах середньої вантажопідйомності, коли важливі високоякісні динамічні характеристики.

Широке розповсюдження гідроприводу в робототехніці обумовлено наступними його перевагами: висока швидкість; використання в якості робочого тіла нестиснутої рідини (це дає можливість здійснити управління за заданою програмою, отримати високу стабільність швидкості вихідної ланки, при зміні навантаження на неї в широкому діапазоні і високу точність позиціонування); безступінчастість регулювання швидкості вихідної ланки; великий коефіцієнт посилення по потужності (більше 1000) і великі передавальні зусилля; достатньо високий ККД; відносно мала маса виконавчих пристроїв; великий досвід розробки і експлуатації гідроприводів в різних галузях техніки; широкий асортимент елементів гідроприводів, що випускаються промисловістю; відсутність додаткових кінематичних ланцюгів між вихідною ланкою приводу і його робочим органом.

Разом з тим, гідроприводи мають ряд недоліків: використання в якості робочого тіла рідини вимагає створення спеціальних насосно-акумуляторних установок (НАУ). Ці установки вмонтовуються в конструкції робота, щоб зберегти його мобільність і автономність, і приводять до збільшення маси робота; ресурс робочої рідини обмежений і її необхідно часто міняти (а разом з цим міняти і фільтри); із зміною температури в'язкість рідини міняється, а отже міняються характеристики гідроприводу; межа робочих температур рідини приводу 150 °С, тому експлуатація його в середовищі з підвищеною температурою неможлива; наявність парів робочої рідини на нафтовій основі щільністю 5 г/м<sup>3</sup> є небезпекою для здоров'я; можливість протікання рідини через сальники.

Основний виконавчий орган гідроприводу - гідроциліндр. Він забезпечує зворотно – поступальний рух ланок маніпулятора. Конструктивно він не відрізняється від пневмоциліндру. Для отримання безперервного обертального руху застосовують гідравлічні мотори. Найчастіше використовується шестеренчастий, або лопатний мотори. У роботах широко застосовуються гідравлічні приводи з електричним управлінням. У цих приводах електричний управляючий сигнал, за допомогою електромагнітного перетворювача або електродвигуна (постійного струму або крокового) перетворюється в переміщення золотника, регулюючого потік рідини в гідросистемі.

Електричний привід, не дивлячись на його хорошу керованість, простоту приводу енергії, великий ККД і зручність експлуатації має найгірші масогабаритні характеристики, ніж пневматичний та гідравлічний приводи. Прогресивне збільшення в останні роки електромеханічних роботів в загальному парку роботів у світі викликано швидким процесом у створенні нових типів електричних двигунів, спеціально призначених для роботів і здатних створювати більш компактні комплексні приводи всіх потребуючих типів. Основна область призначення електричних приводів у робототехніці на сьогоднішній день - це роботи середньої вантажопідйомності (десятки кілограм), легкі роботи з високоякісним управлінням і мобільні роботи.

Основні переваги електромеханічного приводу наступні: висока швидкість; широкий діапазон регулювання частоти обертання; компактна конструкція двигунів і можливість вбудовувати в них датчики швидкості й положення; рівномірність обертання; великий крутячий момент на максимальній швидкості; висока надійність; висока точність позиціонування за рахунок застосування цифрової вимірювальної системи з високоточними датчиками в ланцюзі зворотного зв'язку; низький рівень шуму і вібрації; широкі можливості взаємозамінюваності двигунів; компактність конструкції перетворювачів; зручність підведення енергії; можливість тривалої експлуатації без перевірки і обслуговування (якщо використовуються безколекторні двигуни).

До недоліків можна віднести: наявність щіток в колекторах двигунів постійного струму; обмеженість використання у вибухонебезпечних середовищах; наявність додаткового кінематичного ланцюга між електродвигуном і робочим органом робота; велика залежність швидкості вихідної ланки від навантаження, що приводить до необхідності створення додаткових контурів регулювання.

Основною ланкою електромеханічного приводу є електродвигун. У роботах використовуються всі типи електродвигунів. Конструктивно електропривод може компоуватися з маніпуляційною системою по двох принципово різних схемам. Перша, найбільш поширена, – схема з двигунами розташованими на рухомих ланках (послідовний привод). Така компоновка приводить до збільшення переміщуваних мас і габаритних розмірів руки (значить, необхідні двигуни підвищеної потужності), але забезпечує зручність управління. У другій схемі двигуни винесені на нерухому підставу ПР і пов'язані з ланками руки передачами (паралельний привод). В даному випадку рука має менші габаритні розміри і масу. Проте, при цьому мають справу з механізмом, що має складний кінематичний зв'язок між ланками і двигуном, що створює труднощі в управлінні. Крім того, в довгих кінематичних ланцюгах неминучі підвищені люфти, а значить нижче точність. Оптимальна компоновка полягає в розумному поєднанні обох названих схем.

Остапчук І.Ю., студ.  
 Науковий керівник: Шостачук А.М., к.т.н., доц.  
 Державний університет «Житомирська політехніка»

## ТЕОРІЯ ГВИНТОВОГО ЧИСЛЕННЯ В КІНЕМАТИЧНОМУ АНАЛІЗІ МЕХАНІЗМІВ РОБОТІВ

Гвинтове числення – це один із розділів векторного числення, в якому головним об'єктом розрахунків є гвинт. Метод гвинтів був оформлений і пояснений у 90-х роках XIX століття на основі робіт В.Кліффорда, А.П. Котельникова й Е.Штуді та являється узагальненням векторного числення. Гвинт представляється як пара колінеарних векторів  $(r, r_0)$ , прикладених у певній точці. Вектор  $r$  називають вектором гвинта, ним визначається пряма – вісь гвинта. Вектор  $r_0$  – момент гвинта. Нехай  $r = \overline{AB}$ , в якому  $A$  – задане число,  $B$  – кінець вектора відносно точки  $O$ . Тоді з колінеарності випливає, що

$$r_0 = \rho \times r. \quad (1)$$

Число  $\rho$  називають параметром гвинта, його можна виразити як вектор  $\overline{OA}$ . Для системи ковзних векторів скалярна добуток головного вектора на головний момент відносно точки в просторі, не залежить від вибору вказаної точки. Перемноживши скалярно-геометричну суму всіх векторів системи:

$$r = \sum_{k=1}^n r_k - \text{співвідношення між головним моментом системи і ковзним вектором відносно нової точки}$$

$O'$  та головним моментом тієї ж системи відносно точки  $O$ :  $r_{O'} = r_0 + \rho \times r$ . Отримаємо:

$$r \cdot r_{O'} = r \cdot r_0 + r \cdot (\rho \times r) = r \cdot r_0, \quad (2)$$

де  $\rho$  – вектор, що з'єднує точки  $O'$  і  $O$ .

Скалярний добуток головного вектору на головний момент системи ковзних векторів називається інваріантом системи і позначається буквою  $J$ . При розгляді систем ковзних векторів можуть бути такі випадки:

$$\left\{ \begin{array}{l} 1. r \neq 0, r_0 \neq 0, j \neq 0; \\ 2. r = 0, r_0 \neq 0; \\ 3. r \neq 0, j = r \cdot r_0 = 0; \\ 4. r = 0, r_0 = 0. \end{array} \right. \quad (3)$$

У першому випадку головний вектор і головний момент є довільними, в другому випадку головний вектор рівний нулю, в третьому випадку головний момент системи відносно будь-якої точки перпендикулярний головному вектору, а в четвертому випадку характеризує нульову систему векторів. Геометричний образ еквівалент системи векторів, представлений головним вектором і моментом системи відносно точки – називається мотором (від «момент» та «вектор»). Мотор  $(r, r_0)$  у якому момент  $r_0$  колінеарний вектору, називається гвинтом. Вісь гвинта – центральна вісь системи; вектор гвинта – головний вектор; момент гвинта – головний вектор системи відносно довільної точки центральної осі. Будь-який ковзний вектор є також гвинтом з нульовим параметром, а пряма на якій він лежить є віссю цього гвинта. Гвинт  $R$  цілком описує мотор  $(r, r_0)$  для будь-якої точки простору. Ще одна важлива складова для подальшого розрахунку це комплексний вектор:

$$r + \omega \cdot r_0, \quad (4)$$

де  $\omega$  – фактор, квадрат якого рівний нулю.

Надалі в розгляді алгебри гвинтів перенесення комплексно алгебри векторів буде базуватись на заміні одних геометричних параметрів зовсім іншими, але співвідношення між поняттями залишаються. Тому алгебра гвинтів буде надалі виражена великими літерами. Основними формулами теорії гвинтів є формула для скалярного квадратного вектора (відповідно гвинта) і формула для кута між двома векторами (відповідно між осями гвинтів).

$$R^2 = R_x^2 + R_y^2 + R_z^2 = r^2 e^{2\omega\rho}, \quad (5)$$

де  $e$  – одиничний гвинт, вісь якого перетинається під прямим кутом осі  $R_1$  і  $R_2$ :

$$\cos(R_1; R_2) = \frac{R_{1x}R_{2x} + R_{1y}R_{2y} + R_{1z}R_{2z}}{\sqrt{R_{1x}^2 + R_{1y}^2 + R_{1z}^2} \sqrt{R_{2x}^2 + R_{2y}^2 + R_{2z}^2}}. \quad (6)$$

Розглянемо застосування перенесення в теорії переміщень твердого тіла. Переміщення виражене гвинтом, у якого вектор рівний куту оберту, а момент рівний вектору поступального переміщення; вісь гвинта співпадає з віссю переміщення тіла.

Нехай тоді пряма  $a$  з одиничним гвинтом  $R$  рухається в просторі, описуючи деяку поверхню, яку назовемо траєкторія  $a$ . Нехай різні положення прямої і гвинта будуть функціями часу  $t$ . швидкість прямої назовемо гвинт  $V = dR/dt$ , прискорення назовемо  $W = d^2R/dt^2$ . Ми отримуємо вираз:

$$V = \frac{dr}{dt} = \frac{dR}{dS} \frac{dS}{dt} = T \frac{dS}{dt};$$

$$|V| = \frac{dS}{dt} = TV.$$
(7)

де  $dS$  – елемент комплексної дуги поверхні:  $dS = ds + \omega ds^0 = dse^{op}$ ;

$T$  – центральна нормаль.

Тому утворюється теорема, в якій можемо сказати: швидкість прямої є гвинт, комплексний модуль якого дорівнює похідній по часу від комплексного елемента  $S$  траєкторії, а віссю слугує центральна нормаль до траєкторії. Параметр швидкості рівень параметру прямої.

Перетворимо вираз:

$$\frac{d^2R}{dt^2} = \frac{d}{dt} \left( \frac{dR}{dt} \right) = \frac{d}{dt} (TV) = T \frac{dV}{dt} + V \frac{dT}{dS} \frac{dS}{dt} = T \frac{dV}{dt} + V^2 \frac{dT}{dS}.$$
(8)

Як наслідок:

$$W = \frac{d^2R}{dt^2} = T \frac{dV}{dt} + V^2 \frac{N}{P},$$
(9)

де  $N$  – головна нормаль;

$P$  – радіус кривизни.

Тоді доведено ще одну теорему. Прискорення прямої представляє суму двох гвинтів: комплексний модуль одного з них рівний похідній по часу від модуля швидкості прямої, а віссю слугує центральна нормаль, комплексний модуль другого з них рівний квадрату модуля швидкості, поділеному на радіус кривизни поверхні, а віссю слугує головна нормаль.

Нехай тверде тіло в момент  $t$  перебуває в миттєвому русі, характеризується гвинтом  $U$ , одиничний модуль якого  $E$ , модуль  $U'$ , а параметр  $p$ , тоді миттєвий кінематичний гвинт тіла буде:

$$U = EU' = Eue^{op}.$$
(10)

Тепер розглянемо складові гвинта по осям  $R$  і  $S$  та віссю кута  $\theta$ :

$$U = U' + U'' = RU' + RU'' = RU \cos \theta + SU \sin \theta,$$

$$dS = ds + ds^0 = U \sin \theta dt,$$

$$V = \left| \frac{dR}{dt} \right| = \frac{dS}{dt} = U \sin \theta.$$
(11)

Тому впливає ще одна теорема: при миттєвому гвинтовому переміщенні твердого тіла, характеризується гвинтом  $U$ , швидкість будь-якої прямої тіла є гвинт, рівний гвинту добутка гвинта  $U$  на одиничний гвинт  $R$  цієї прямої.

$$V = U \times R = TU \sin \theta = Tue^{op} \sin \theta.$$
(12)

Наслідок: центральна нормаль траєкторії прямої зустрічається під прямим кутом вісь миттєвого гвинта. Центральні нормалі траєкторії всіх прямих тіла в момент  $t$  утворюють щітку.

Як результат ми можемо бачити, що теорія гвинтів знайшла своє місце у дослідженні кінематики рухів будь-якого об'єкту, через свою здатність замінювати складні механізми гвинтом. Це дає змогу спрощено розглядати і рахувати кінематику руху і переміщення у просторі тіла. Також велику роль грає принцип перенесення, що і дає змогу розглядати гвинт в кінематиці механізму.

В якості прикладу розглянемо кінематичний ланцюг з двома обертальними та однією поступальними парами (рис. 1).

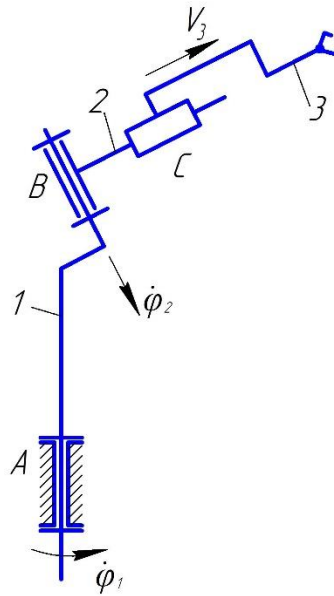


Рис. 1. Кінематичний ланцюг з двома обертальними та однією поступальними парами

Кінематичні гвинти цього маніпулятора утворюють двовісну групу. В якості вісей основних гвинтів візьмемо вісі  $Vx2y2z2$ , пов'язані з ланкою 2. Приведемо вектори відносних лінійних і кутових швидкостей до точки В. Отримаємо:

$$\vec{\Omega}_B = \vec{\omega}_1 + \vec{\omega}_2 = \omega_1 \vec{k}_1 + \omega_2 \vec{i}_2; \quad (13)$$

$$\vec{V}_B = \vec{V}_3 = V_3 \cos \varphi_3 \vec{k}_1 + V_3 \sin \varphi_3 \vec{i}_1,$$

де  $\vec{\omega}_1$  і  $\vec{\omega}_2$  – вектори відносних кутових швидкостей в обертальних парах А і В.

$\vec{V}_3$  – вектор відносної лінійної швидкості в поступальній парі С.

Вектор  $\vec{\Omega}_B$  є головний вектор системи швидкостей, а  $\vec{V}_B$  – головний момент. Тоді параметр кінематичного гвинта:

$$p = \frac{V_3 \omega_1 \cos \varphi_3 + V_3 \omega_2 \sin \varphi_3}{\omega_1^2 + \omega_2^2}. \quad (14)$$

Таким чином, параметр кінематичного гвинта цього маніпулятора залежить не тільки від кутових та лінійних відносних швидкостей, а і від кута між ланками 1 і 2.

**Список використаної літератури:**

1. Воробьев Е.И. Механика промышленных роботов: Учеб. пособие для вузов: В 3кн. / Под ред. К.В. Фролова, Е.И. Воробьева. Кн. 1: Кинематика и динамика. – М.: Высшая школа, 1988. – 304 с.
2. Диментберг Ф.М. Винтовое исчисление и его приложения механике. М.: Наука, 1965. – 200 с.

## ЗАСТОСУВАННЯ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ СУЧАСНОГО ІНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ОСНАЩЕННЯ

Одним з перспективних напрямів розвитку сучасного машинобудування є розробка та впровадження нових адитивних технологій швидкого виготовлення виробів (rapid fabrication). Суть адитивних технологій полягає в пошаровій побудові геометричної форми деталей з порошкового матеріалу на основі CAD-моделей, тривимірна геометрична форма яких представляється в цифровому вигляді за допомогою програм твердотільного моделювання (SolidWorks, CATIA, ProE, AutoCAD тощо). Адитивні технології інтенсивно розвиваються з 80-х років ХХ ст., та відкривають можливості виготовляти (вирощувати) деталі за допомогою послідовного нанесення спеціального матеріалу на об'єкт, що генерується.

Основні переваги застосування адитивних технологій в машинобудуванні полягають в наступному:

- виключення на виробництві конфлікту між конструктором і технологом;
- можливість оперативного виготовлення деталей складної геометричної форми;
- можливість оперативного внесення змін до конструкції деталі на етапі передачі її у виробництво (при необхідності здійснення модернізації);
- виготовлення різних виробів для дослідного виробництва;
- ліквідація процесів виготовлення спеціального інструментального оснащення, що є властивим для традиційних методів обробки;
- мінімізація втрат матеріалу і відходів (стружки) в процесі виготовлення деталей;
- можливості для спрощення логістики, скорочення часу постачань, зменшення об'ємів складських запасів.

- перехід до широкого виготовлення виробів машинобудування в умовах малосерійного та одиничного виробництва, що дає можливість задовольнити потреби як можна більшої кількості індивідуальних замовників та збільшити номенклатуру виробів, що виготовляються.

Процеси, що застосовуються в адитивних технологіях, залежать від виду матеріалів, що використовуються для виготовлення (вирощування) деталей :

- полімери (рідкі матеріали) – стереолітографія, пошарове наплавлення, струминний друк;
- полімери та кераміка (порошкоподібні матеріали) – 3D-друк, селективне лазерне спікання, селективна лазерна плавка;
- метали (порошкоподібні матеріали) - пряме лазерне спікання металів, електронно-променева плавка, пряме нанесення металів, точне лазерне формування;
- полімери, метали, кераміка, композиційні матеріали (тверді матеріали) - пошарове виготовлення об'єктів з листового металу (листи), довільне формування екструзії (дріт).

Одним з перспективних напрямів застосування адитивних технологій є виготовлення технологічного оснащення – верстатних пристроїв, різального та допоміжного інструментів для серійного виробництва.

При цьому відпадає необхідність в застосуванні у виробництві дороговартісного інструментального оснащення, що витримує десятки і сотні тисяч циклів. За допомогою сучасних адитивних технологій можна зробити матрицю або прес-форму з легкого сплаву з меншим терміном експлуатації (ресурсом).

На даний час на машинобудівних підприємствах існує велика потреба у виготовленні великої номенклатури спеціального технологічного оснащення (наприклад, прес-форм), що мають складні фасонні поверхні. Наприклад, виготовлення майстер-моделей (оправок) з АВС-пластику за допомогою методу швидкого прототипування – Fused Deposition Modeling (FDM). Після чого виконується металізація поверхні отриманих оправок – обміднення або нікелювання.

Для існуючого традиційного виробництва адитивні технології відкривають нові можливості. Так конструкція прес-форми може бути виготовлена (вирощена) разом з каналами охолодження довільної конфігурації, що неможливо зробити звичайними методами механічної обробки. В цьому випадку канали охолодження прокладаються в масиві прес-форми так, як це необхідно, а не так, як дозволяють традиційні технології. Застосування ливарних форм з рівномірним або регульованим охолодженням дозволяє скоротити час охолодження відливки у формі до 30 %.

Адитивні технології пошарового синтезу металу при виробництві різального інструменту застосовують в німецькій компанії *Maral*, де застосований гібридний метод. Цей метод полягає в тому, що хвостовик спірального свердла виготовляється за традиційними технологіями, а його різальна частина – методом лазерного наплавлення. Це дає можливість створення абсолютно нової геометрії інструментів та дозволяє збільшити їх термін служби.

Таким чином, застосування адитивних технологій для виготовлення сучасної технологічної оснастки в машинобудуванні має такі переваги:

1. Прискорене впровадження у виробництво нових видів оснастки. Адитивні технології значно скорочують терміни розробки прототипів та сприяють впровадженню інновацій у виробництво. Так як виробникам іноді доводиться відкладати запуск у виробництво нових виробів по причині застарілого оснащення. У свою чергу адитивні технології допомагають максимально швидко (оперативно) оновлювати необхідне інструментальне оснащення.

2. Зниження собівартості виробів, що виготовляються. Виробництво металевих виробів на сучасному 3D-принтері дорожче, ніж традиційні методи металообробки, але при виготовленні деталей з пластика адитивні технології можуть зменшити вартість виробництва. 3D-друк металом може бути економічно вигідним при невеликій партії кінцевої продукції або коли виріб має дуже складну геометрію. Найбільшу вигоду адитивні технології приносять при виробництві виробів з дорогих матеріалів, оскільки при цьому значно знижується кількість відходів. У конструкцію виробів часто доводиться вносити зміни вже після запуску їх в масове виробництво. Адитивні технології дозволяють одночасно проводити випробування декількох дослідних зразків, це знижує витрати, пов'язані з внесенням змін до виробничого процесу.

3. Підвищення якості виробів, що виготовляються. Адитивні технології дозволяють отримувати монолітні об'єкти високої щільності, механічні властивості яких можуть бути вищі, ніж у литих деталей.

Крім того, адитивні технології дозволяють легко вдосконалювати і оптимізувати конструкцію технологічної оснастки об'єднуючи декілька деталей в одну, при цьому зменшується кількість складальних операцій. Адитивні технології дозволяють виготовляти деталі складної геометричної форми з мінімальною кількістю дефектів в короткі терміни. На якість литих деталей великий вплив робить теплообмін між матеріалом деталі та рідиною, що охолоджує форму. Як правило канали для прокачування охолоджувальної рідини виконуються прямими, що призводить до уповільненого і нерівномірного охолодження. Адитивні технології дозволяють отримувати такі канали необхідної форми, тому така відливка охолоджується швидко і рівномірно, при цьому підвищується якість виготовленої деталі.

4. Поліпшення ергономіки конструкції оснастки та продуктивності праці. Адитивні технології знижують витрати на оперативне впровадження нового оснащення та зменшують термін його окупності. Як правило в існуючому виробництві необхідні значні витрати та виникають складні організаційні проблеми, що пов'язані з розробкою і впровадженням нової технологічної оснастки примушують експлуатувати її «до останнього».

Адитивні технології допомагають швидко замінювати різальні інструменти, що вийшли з ладу. Вони дозволяють прискорити і здешевити процес оптимізації інструменту, підвищити його ергономіку. Вдосконалене таким чином оснащення дає можливість прискорити процес виготовлення нових виробів, зменшити собівартість виробництва та кількість браку.

#### 5. Виготовлення спеціального оснащення для малосерійного та одиничного виробництва.

Адитивні технології дозволяють оперативно виготовляти спеціальну технологічну оснастку для малосерійного та одиничного виробництва. Особливо це стосується медичної галузі.

Застосування адитивних технологій для виготовлення технологічного оснащення може стати хорошим варіантом для виробничих підприємств, яким доводиться вкладати в його розробку значні кошти. Адитивні технології варто використати для виробництва інструментів, при виготовленні яких використовуються дорогі матеріали, і утворюється велика кількість відходів.

У міру свого вдосконалення адитивні технології отримують все більш широке застосування на підприємствах сучасного машинобудування.

## **ВИЗНАЧЕННЯ ТРУДОМІСТКОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ЗА ЇХ КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНОЮ СКЛАДНІСТЮ В УМОВАХ БАГАТОНОМЕНКЛАТУРНОГО ВИРОБНИЦТВА**

На сьогоднішній день, випуск промислової продукції в умовах великосерійного та масового виробництва втрачає свою актуальність. Все більше уваги приділяється організації випуску багатономенклатурної продукції в умовах серійного та малосерійного виробництва. Слід відмітити, що на даний час багато машинобудівних підприємств випускають продукцію в режимі індивідуальних замовлень та в невеликій кількості. При цьому продукція має бути виготовлена якісно та відповідно до технічних умов і доставлена замовнику в задані терміни. Це призводить до необхідності проведення на етапі конструкторсько-технологічної підготовки виробництва оперативного і точного визначення трудомісткості виготовлення деталей з метою забезпечення їх виготовлення в задані терміни, підвищення ефективності функціонування виробничої системи, а також до необхідності дослідження нових організаційно-управлінських завдань, які необхідно вирішувати при виготовленні промислових виробів з урахуванням специфіки і проблем багатономенклатурного серійного та малосерійного виробництва.

Оцінка прогнозованої трудомісткості виготовлення деталей машинобудування може бути виконана кількома методами, одним з яких є метод оцінки конструкторсько-технологічної складності деталі, що базується на декомпозиції виробу на прості (елементарні) конструктивні елементи. Методологія формування показника конструктивно-технологічної складності деталі коректно встановлює зв'язок між її елементарними конструктивними елементами (поверхнями), способами їх виготовлення і трудомісткістю процесів обробки. Метод технічного нормування, що оснований на оцінці конструктивно-технологічних складностей деталей враховує як властивості деталей так і фактори виробничої системи організаційно-технічного рівня. Даний метод дає можливість ще на стадії конструкторсько-технологічної підготовки виробництва оперативно та точно розрахувати трудомісткість виготовлення деталей.

Конструктивно-технологічна складність деталі являє собою міру витрат необхідних виробничих ресурсів для її виготовлення на підприємстві, комплексно враховує його структурні характеристики в відповідності зі сформованим рівнем засобів виробництва. Конструктивно-технологічна складність деталі впливає на інтенсивність зростання інформації про розроблюваний об'єкт. Вона необхідна для послідовного переходу на нові етапи розробки аж до експлуатації виробу. Від кількості наявної інформації про деталь повністю залежить швидкість технологічної підготовки виробництва. Складність конструкції зумовлює умови комплектації виробів, організацію та витрати праці в процесах виготовлення, технічного обслуговування і ремонту. Даний метод встановлює зв'язок між трудомісткістю процесів виготовлення, конструктивними елементами деталі та способами їх механічної обробки. Це надає можливість прогнозувати трудомісткість виготовлення деталі ще на стадії розробки технологічного процесу.

Показник конструктивно-технологічної складності служить для оцінки складності, а відповідно і технологічності деталі з точки зору її геометричної конструкції, наявності та складності конструктивно-технологічних елементів, а також в цілому її виготовлення, але лише в загальному вигляді, тобто без урахування того, які саме моделі технологічного обладнання будуть застосовуватися.

Визначення прогнозованої трудомісткості виготовлення деталей машинобудування може використовуватися на етапі конструкторсько-технологічної підготовки серійного та малосерійного виробництва в умовах відсутності повного комплексу технологічної документації в конкретній виробничій системі, або для підбору виробничої системи з раціональним організаційно-технічним рівнем з метою мінімізації трудомісткості і собівартості виготовлення деталі, що має сприяти економії трудових і фінансових ресурсів та підвищення ефективності функціонування машинобудівних підприємств.

Отже, конструктивно-технологічну складність, та міру її трудомісткості механічної обробки (виготовлення) можна розглядати як характерні параметри деталі, такі як точність, шорсткість тощо. Складність деталі визначається незалежно від технологічного процесу обробки, а її оцінка не вимагає попередньої розробки технологічного процесу, вона може бути визначена на стадії конструювання за робочим кресленням деталі. Конструктор, розробляючи робоче креслення деталі, має можливість визначити з його допомогою її конструктивно-технологічну складність. Застосування поняття конструктивно-технологічної складності деталі дозволяє вирішувати цілий ряд задач, що виникають на різних етапах життєвого циклу виробу, зокрема, оперативно забезпечити оцінку трудомісткості основних етапів її виготовлення та розмірів витрат на їх реалізацію.

Мохорт Д.В., студ.

Ночвай В.М., к.т.н.

Полонський Л.Г., д.т.н., проф.

Державний університет «Житомирська політехніка»

## РЕМОНТ КОЛІС ВАГОНЕТОК ДЛЯ КЕРАМІЧНИХ ВИРОБІВ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОДУГОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ

Робота присвячена вирішенню проблеми відновлення та зміцнення коліс вагонеток для сушіння та випалювання керамічних виробів (цегла, керамічна плитка). Колеса вагонеток для керамічних виробів є деталями технологічного обладнання по виробництву будівельних матеріалів, що найбільш швидко спрацьовуються. Спрацювання робочої поверхні колеса призводить до зупинки вагонетки, зняття і списання в брукт спрацьованих коліс та установку нових. Це викликає непродуктивні простой технологічного обладнання та в кінцевому підсумку втрати виробництва.

Спрацьоване колесо вагонетки являє собою цілком «здорову» деталь, у якій спрацьований верхній робочий шар металу, що складає 2...5 % маси деталі. Колеса виготовляють зі сталі, поверхня кочення для набуття високої твердості піддається поверхневому гартуванню. Термін служби колеса визначається головним чином спрацюванням робочого шару поверхні кочення та реборд.

Процес відновлення деталей – це складна конструкторсько-технологічна задача, при рішенні якої частково змінюють деякі характеристики деталі, закладені конструктором, наприклад матеріал окремих ділянок, фізико-механічні властивості і шорсткість поверхонь.

На підставі результатів дослідно-експериментальних робіт та проведених досліджень фізико-механічних властивостей покриттів, а також практичного досвіду, розроблено технологічний процес відновлення та зміцнення спрацьованих коліс вагонеток для керамічних виробів методом автоматичного електродугового наплавлення, який складається з наступних основних операцій:

1) підготовка колеса вагонетки (очищення від бруду та мастила; відбір деталей, що підлягають відновленню; зняття залишків нерівномірного спрацювання);

2) підготовка дротових матеріалів (очищення дроту від бруду; намотування дроту на котушки);

3) наплавлення покриття (встановлення та закріплення колеса в центрах маніпулятора; наплавлення шарів покриття на спрацьовані поверхні колеса);

4) токарна обробка колеса з наплавленими покриттями (режими чорнової обробки покриттів:  $V = 20...25$  м/хв.;  $S = 0,15...0,2$  мм/об.;  $t = 0,3...0,4$  мм; матеріал різального інструменту – тверді сплави, ВК3, ВК4, гексаніт; режими фінішної обробки покриттів:  $V = 25...30$  м/хв.;  $S = 0,1...0,15$  мм/об.;  $t = 0,15...0,2$  мм; матеріал різального інструменту – тверді сплави, гексаніт, ельбор-Р);

5) вихідний контроль (візуальний огляд; контроль твердості покриттів; контроль розмірів колеса; контроль шорсткості поверхонь; контроль форми).

Для відновлення коліс механізованим наплавленням вибрано порошкові дроти марок ПП АН-105, ПП АН-125, ПП АН-135, ПП ТН-250. Для наплавлення покриттів в середовищі вуглекислого газу вибрано дроти: Нп-50, Нп-85, Нп-65Г, Св-08Г2С. Діаметр дротів – 1,2...3,2 мм.

Для електродугового наплавлення зовнішніх циліндричних поверхонь коліс самозахисним порошковим дротом з коливанням електроду, дротом суцільного перерізу в середовищі вуглекислого газу по спіралі, вибрано установку моделі УД 209 зі зварювальним випрямлячем моделі ВДУ-506:

Відновленню підлягають колеса з спрацьованою поверхнею кочення, витонченими або обломленими ребордами, тріщинами або вилущеним робочим шаром. При відновленні наплавляють циліндричну частину колеса, а також вертикальну стінку реборди. Автоматичне наплавлення коліс ведеться одним електродом з використанням двох варіантів: по гвинтовій лінії та по замкнутому кільцю з автоматичним зміщенням електрода на крок після кожного повного оберту колеса, що наплавляється.

Кількість напавленого металу визначається в залежності від ступеня спрацювання колеса. Колесо відновлюють до розміру по кресленню, для чого на його поверхню наносять один, два та більше шарів. Наплавлення дозволяє отримати на поверхні виробу зносостійкий шар металу, який має необхідні експлуатаційні властивості – зносостійкість, твердість і т. п.

Вимірювання твердості відновлених поверхонь колеса проводились з використанням приладу моделі ТК-14-250 і отримано наступні результати: HRC 20, HRC 50...58, HRC 50...58, HB 240...260 при використанні дротів марок ПП АН-105, ПП АН-125, ПП АН-135, ПП ТН-250 відповідно. Виробничі випробування показали, що ресурс відновлених коліс методом електродугового наплавлення збільшується в 1,5...2 рази.

Результати роботи можуть бути використані при відновленні спрацьованих коліс технологічного обладнання на підприємствах по виробництву будматеріалів та інших підприємствах.



Громовий О.А., к.т.н., доц.  
Бондарчук В.М., ст. викл.  
Сіненос Є.О., магістр

Державний університет «Житомирська політехніка»

## СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ ОБРОБКИ ЧАВУНІВ ТОРЦЕВИМ ФРЕЗЕРУВАННЯМ

В сучасному машинобудуванні частка деталей із чавуну складає до 75% від загальної маси виливків. Для їх лезової обробки широко використовуються торцеві фрези, оснащені твердими сплавами, керамікою і надтвердими матеріалами. Значну частину оброблюваних чавунних деталей становлять плоскі і корпусні деталі верстатів: станини, стійки, рами, направляючі тощо.

Відомо, що заміна звичайного сірого чавуну високоміцним дозволяє значно знизити вагу виливків за рахунок зменшення товщини їхніх перетинів, при збереженні і, в деяких випадках, підвищенні експлуатаційної надійності. Встановлено, що високоміцний чавун (ВЧ) у багатьох випадках може успішно застосовуватися замість сірого і ковкого чавуну, вуглецевої і легованої сталі. Перспективними є розроблені способи одержання ВЧ з кулястим і вермикулярним графітом. В цих матеріалах добре сполучаються високі фізико-механічні та технологічні властивості.

Чавун з кулястим графітом має високу міцність і демпферну здатність, зносостійкість і втомну стійкість, задовільну оброблюваність. З нього виготовляються кулачкові та колінчасті вали, обкладки поршнів, зубчасті колеса, поршневі кільця та ін., що вимагає підвищення продуктивності їх механічної обробки. В автомобільній промисловості широко використовується ВЧ з вермикулярним графітом. Такий чавун майже у 2 рази міцніше сірого, тому є значно більш ефективним при виготовленні блоків і головок блоків циліндрів дизельних двигунів. Визначено, що висока в'язкість, невелика питома вага, висока теплопровідність та вібростійкість, а також висока демпферна здатність і зносостійкість цих матеріалів дозволяє застосовувати їх також і в авіаційній промисловості.

Аналіз інструментальних рішень для обробки торцевим фрезеруванням ВЧ представлений фірмами Kyocera, Tungaloy, Sumitomo Electric, Hitachi і Mitsubishi Materials, SECO Carbology, Becker Diamantwerkzeuge Gmb показує наступне. Основні проблеми обробки цих чавунів пов'язані з їхньою підвищеною міцністю (до 1200 Н/мм<sup>2</sup>), що приводить до підвищеного зношування інструментів. Тому для фрезерування ВЧ рекомендуються фрези з обертальними пластинами. Відзначено, що оптимальним різальним матеріалом при торцевому фрезеруванні ВЧ є твердий сплав з покриттям (швидкість різання 100–200 м/хв) і кераміка (400–600 м/хв). Фрезерування вимагає збільшення крутних моментів на шпинделі верстатів і збільшення числа різальних кромок в інструментах.

Зокрема SECO Carbology пропонує багатогранні різальні пластини нового покоління Triple Zero™. Пластини ТК2000 з покриттям призначені для важкої чорнової обробки, нестабільних умов переривчастого різання. Фірма Becker Diamantwerkzeuge Gmb випускає двосторонні пластини з різальною частиною із надтвердих матеріалів, які збільшують ресурс стійкості інструментів. Пластини зі змішаної кераміки з покриттям, розроблені фірмою Tungaloy, призначені для чорнового і чистового фрезерування чавуну зі швидкістю до 2000 м/хв. Фірмою Iscar випущена серія торцевих фрез F45NMD-R08 з діаметрами 80–200 мм, оснащених твердими сплавами, і придатними для чорнової та напівчистої обробки із глибиною різання до 5,5 мм. В більшості випадків фрезерування виконують на верстатах підвищеної жорсткості інструментом з числом різальних ножів від 2 (при діаметрі фрези до 12 мм) до 8 (при діаметрі фрези до 130 мм).

Суттєвим резервом підвищення продуктивності обробки є можливість створення нових конструкцій ступінчастих торцевих фрез глибинного різання, які б дозволили поєднати декілька операцій обробки (чорнову, напівчистову і чистову операції) за один прохід.

Існуючі рішення в цьому напрямку мають частковий характер, відсутні основи створення ефективного модульного інструмента для фрезерних верстатів, не вирішені проблеми його працездатності, надійності, конструктивних елементів торцевих фрез. Недостатньо вивченими є можливості використання сучасних надтвердих матеріалів в різальній частині інструментів.

## ОБРОБКА ВАЖКООБРОБЛЮВАНИХ МАТЕРІАЛІВ

Сучасне машинобудування все частіше потребує застосування важкооброблюваних матеріалів, які характеризуються особливими фізико-механічними властивостями, такими як висока стійкість, твердість, пластичність та в'язкість при великих температурах, в умовах значних тисків, корозії цих матеріалів в різних середовищах. Застосування важкооброблюваних матеріалів для виготовлення деталей підвищує їх довговічність та надійність. Але обробка даних матеріалів супроводжується значними силовими напруженнями та високою температурою в зоні різання, що є основною причиною низької оброблюваності. Оброблюваність різанням важкооброблюваних матеріалів передусім залежить від хімічного складу, та наперед визначає експлуатаційні характеристики, такі як жароміцність, корозійну стійкість, механічну міцність тощо, разом з тим, обробка цих матеріалів призводить до інтенсивного зношування інструменту та негативно позначається на продуктивності обробки, показниках якості обробленої поверхні тощо.

У процесі різання таких матеріалів, що володіють низькою теплопровідністю і підвищеними характеристиками міцності, виникають високі температури і великі тиску на ріжучу кромку.

Згідно з класифікацією Я.Л. Гуревича всі важко оброблювальні матеріали та сплави поділяються на 8 груп, пізніше класифікація була розширена за рахунок включення тугоплавких металів і склопластиків.

До групи I класифікації віднесені теплостійкі сталі, що допускають експлуатацію до температури 500 °С (34ХНМ, Х6СМ і ін.). Основний легуючий елемент – хром (до 6 %), а також добавки нікелю (до 3 %) і кремнію. Оброблюваність деталей з цих сталей задовільна.

До групи II віднесені сталі з вмістом хрому більше 12 % і невеликою кількістю інших легуючих елементів. Це високоміцні сталі, що зберігають свої якості при температурі до 500–600 °С і при впливі слабо агресивних середовищ (30Х13, 14Х17Н2, 09Х16Н4Б). У відпаленому стані оброблюваність більшості марок задовільна, в термічно зміцненому стані оброблюваність їх різко знижується.

Сталі групи III за складом хромонікелеві. Типовий представник цієї групи – сталь 12Х18Н10Т. Вони можуть бути використані як жароміцні, стійкі в агресивних середовищах. У більшості випадків це немагнітні сталі, добре зварюються; коефіцієнт оброблюваності сталей типу 12Х18Н10Т при точінні приблизно в 2 рази вище коефіцієнта оброблюваності сталі 45.

Сталі групи IV за складом також хромонікелеві з добавкою інших легуючих елементів (45Х14Н14В2М, 10Х11Н23ТЗМР і ін.). Це жароміцні, жаростійкі і кислотостійкі матеріали. Коефіцієнт оброблюваності в 3-4 рази нижче ніж у сталі 45. Сталі групи V - жароміцні деформуються на нікелевій і залізо-нікелевій основі (ХН70Ю, ХН67МВТЮ, ХН77ТЮР і ін.). Крім нікелю вони містять велику кількість хрому і невелику кількість молібдену, титану, алюмінію та інших легуючих елементів. Головна область застосування - виготовлення деталей, що працюють при високих температурах (до 900 °С), наявності агресивних середовищ і значних механічних навантажень. Це один з найбільш важкооброблюваних матеріалів, коефіцієнт оброблюваності 0,1–0,3 щодо сталі 45.

Жароміцні ливарні сплави групи VI (ЖС6-К, ХН67ВМТЮЛ і ін.) Також представляють собою високолеговані матеріали на нікелевій основі. Їх оброблюваність ще більш гірша, ніж матеріалів попередньої групи, що пояснюється наявністю інтерметалідних і карбідних включень, що призводять до підвищеного абразивного зношування інструменту, особливо з швидкорізальних сталей.

Матеріали групи VII – це сплави на основі титану. Обсяг використання деталей з титанових сплавів безперервно зростає. Особливості титанових сплавів з точки зору їх оброблюваності різанням наступні:

- низька теплопровідність;
- за хімічним складом близькі до інструментальним матеріалам, що призводить до адгезії стружки з поверхнею інструменту;
- малий модуль пружності і мала пластичність.
- через ці особливості оброблюваність деталей з титанових сплавів на таких операціях, як нарізування різьблення мітчиками і плашками, протягування, шліфування, сильно знижена.

До групи VIII входять низьколеговані високоміцні сталі (28ХЗСНМВФА, 42Х2ГСНМ і ін.). Підвищені характеристики міцності цих сталей обумовлені наявністю хрому, нікелю, добавок вольфраму, молібдену, ванадію, застосуванням подвійних операцій термічної обробки. У відпаленому стані їх оброблюваність знаходиться на рівні оброблюваності звичайних конструкційних сталей, після термообробки оброблюваність різко падає. У зв'язку з цим технологічний процес обробки деталей з цих матеріалів потрібно розробляти, по можливості, таким чином, щоб більша частина припуску була знята на відпалених заготовках, залишаючи мінімум припуску на чистові операції.

У ІХ групу матеріалів об'єднані тугоплавкі метали і сплави. Для цих металів характерна виключно висока температура плавлення, тому їх застосовують для виготовлення деталей апаратів, що працюють при температурі до 2000–2500 °С. За оброблюваності різанням їх можна розділити на три групи. Найбільш важко оброблювальні метали - вольфрам, молібден. Сплави на основі берилію відрізняються крихкістю і токсичністю і сприяють абразивного зношування інструменту. І, нарешті, сплави на основі танталу і ніобію мають цілком задовільною оброблюваністю, що дозволяє здійснювати їх різання навіть інструментом з швидкорізальних сталей при швидкості до 30 м/хв.

Групу Х складають різного роду неметалеві матеріали (склопластики, слоуда). Їх широко застосовують при виготовленні друкованих плат, складних корпусів, отриманих литтям під тиском і армованих металевою арматурою, і багатьох інших деталей. Більшість деталей з цих матеріалів легко обробляються, але при обробці різанням виникають певні труднощі.

Вибір інструментального матеріалу для обробки важко оброблювальних сплавів визначається його основними і технологічними властивостями, умовами обробки - властивостями оброблюваного матеріалу, необхідною продуктивністю, а також конструкцією ріжучого інструменту.

Тверді сплави, ріжуча кераміка, надтверді матеріали є найбільш оптимальним вибором використання матеріалів для ріжучого інструменту. Їх показники твердості та теплостійкості значно перевищують інструментальні та швидкорізальні сталі, які є найбільш розповсюдженими. При обробці важкооброблюваних матеріалів твердими сплавами, керамікою і надтвердими матеріалами забезпечується значна більша стійкість інструменту в порівнянні з інструментом з швидкорізальних сталей. Ряд важкооброблюваних матеріалів взагалі неможливо обробити інструментом з швидкорізальних сталей.

Тверді сплави, ріжучу кераміку і ряд надтвердих матеріалів на основі алмазу і кубічного нітриду бору одержують методом спікання, після чого матеріал набуває остаточні властивості, тобто високу твердість. Обробка лезовим інструментом неможлива, виконується тільки абразивна обробка готового матеріалу. Це визначає неможливість або дуже високу вартість виготовлення виробів складної форми. Заготовки з таких матеріалів у вигляді пластинок припаюються або механічно кріпляться до корпусу інструменту.

При точінні кристалічних покриттів на контактних ділянках інструменту з надтвердих матеріалів на основі кубічного нітриду бору, на відміну від інших видів інструментальних матеріалів, не спостерігається слідів адгезійного зношування. Також, з підвищенням швидкості різання зменшується вплив неоднорідності структури оброблюваного матеріалу на інтенсивність зношування інструменту. Можливість підвищення швидкості різання при зрізання малих припусків дозволяє підвищити продуктивність механічної обробки та знизити її собівартість.

Таким чином, наведені вище переваги використання інструменту з надтвердих матеріалів на основі кубічного нітриду бору мають суттєву перевагу над іншими інструментальними матеріалами, але їх використання є досить витратним та потребує подальших досліджень можливості їх здешевлення.