

**ВИСОКОЕФЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ
В ПРИЛАДОБУДУВАННІ**

УДК 621.9.02

**МЕТОД РОЗРАХУНКУ СИЛ РІЗАННЯ МОДЕЛЮВАННЯМ САД
СИСТЕМОЮ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЗРІЗУ
РАДІУСНИМИ ФРЕЗАМИ***Лещенко О. І.**Приазовський державний технічний університет, Маріуполь, Україна**E-mail: aLeshenko1954@gmail.com*

Точність обробки поверхонь складного профілю значною мірою залежить від обраної стратегії обробки, яка дозволить створити на інтервалах програмної траєкторії інструменту однакові, у певних межах, силові характеристики процесу формоутворення. У цьому випадку з'являється можливість включити до програми керування верстатами з CNC модулі підналагодження, які формують на окремих ділянках, векторні значення поправок, що залежать від пружних деформацій процесу різання. Тому особливо важливо знати модуль і напрямок результуючого вектору сил різання, який не обов'язково збігається з напрямом подачі.

Метою даної роботи є створення методу розрахунку сил різання моделюванням САД системою геометричних параметрів зрізу, фрезею з нелінійною твірною. Твердотільне моделювання процесу побудовано на основі булевих операцій «перетину» та «віднімання» 3D об'єктів: зубів радіусної фрези з гвинтовою різальною крайкою та заготовки, що «переміщується» зі швидкістю подачі. Інструментом для реалізації цього методу є програмний модуль, створений на основі API функцій, вхідними даними для якого є: 3D інструмент та заготовка, а також рівняння траєкторії її переміщення під час руху врізання на дискретне значення подачі. Орієнтація на властивості API додатка дає можливість моделювати різні траєкторії під час обробки поверхонь складного профілю, наприклад, гвинтові або трохгойдальні. У перспективі можливо враховувати в моделі процеси пластичної деформації в зоні стружкоутворення підключенням зовнішніх модулів.

У ході проведених досліджень фрезерування кінцевими радіусними фрезами з гвинтовою різальною крайкою, коли два або більше зубів знаходяться в межах дуги контакту було встановлено шляхом 3D моделювання, який товщини і ширини шар зрізає кожен із зубів у процесі подачі на оберт. Отже, в процесі формоутворення присутні різні за напрямом і модулем змінні нормальні та тангенціальні сили різання у функції від кута повороту фрези. Тому прийняте в теорії різання поняття «окружна сила на фрезі», як постійна складова процесу, може стати суттєвою причиною помилки при розгляді найважливіших питань механізму збудження різних за своєю природою коливань, що виникають у зоні обробки.

Ключові слова: *фрези з радіусною твірною; твердотільне моделювання; САД системи; API додаток; пружні деформації у ході процесу різання; векторне підсумовування сил різання.*

Вступ

На сьогодні особливо важливим напрямком у механообробці є фрезерування складно-профільних поверхонь кінцевими радіусними або сферичними фрезами на багатоопераційних верстатах, де вплив сил різання на точність формоутворення, продуктивність та собівартість важко переоцінити. Еволюцію розвитку досліджень з вивчення сил різання при фрезеруванні [1] можна простежити у низці робіт світових учених, в яких нелінійна модель містить осьову глибину різання, товщину шару зрізу та коефіцієнти, що визначаються експериментально залежно від властивостей оброблюваного матеріалу, швидкості різання, зносу інструменту тощо. На

сьогодні найчастіше сили різання при фрезеруванні, розраховуються за відомою формулою статичного вигляду [2], серйозним недоліком якої є те, що вона відображає результати експериментальних даних, що відповідають конкретним умовам механічної обробки. У математичному сенсі це означає пропорційне масштабування нелінійних рівнянь, що може спричинити значні похибки апроксимації.

Сучасним перспективним напрямом отримання значень сил різання при фрезеруванні є розрахунки за допомогою МКЕ, наприклад, програмою ABAQUS з використанням моделі динамічного руйнування матеріалу Джонсона - Кука. Рядом Європейських фірм застосовується методи-

ка розрахунку сил різання через питому силу, ймовірні значення якої для різних груп оброблюваних матеріалів наведено у довіднику GARANT [3] або каталозі KORLOY 2013 [4]. Як відомо, питомим тиском різання є сила різання, яка припадає на одиницю площі поперечного перерізу шару зрізу, виражається в ньютонах на квадратний міліметр ($\text{H}/\text{мм}^2$) і яка пов'язана насамперед зі ступенем зсувної деформації в процесі стружкоутворення. І. А. Тімі встановлено, що питомий тиск залежить від товщини шару зрізу - чим тонше зріз, тим більше питомий тиск різання, і навпаки, тобто ці показники мають домінуючий характер на сили різання. Незважаючи на те, що на питому силу різання вирішальний вплив мають властивості оброблюваного матеріалу – зокрема його твердість, вона не розглядається як його постійна фізико-механічна характеристика, щодо процесу різання. Наприклад, при постійній товщині зрізу спостерігається сталість складових зусиль різання на відміну від обробки, наприклад радіусними фрезами. У цьому випадку зріз має серпоподібну форму зі змінною товщиною та довжиною різального

леза, а визначення його геометричних характеристик аналітично вимагає застосування апарату диференціальної геометрії.

Процес різання супроводжується впливами збурюючих сил різання на зуби фрези і реакціями від їх дії на заготовку. Наприклад, при вимірюванні сил різання прилад фактично фіксує силу реакції, тому при подальшому викладі матеріалу саме її ми розумітимемо під силою різання.

Сила різання при фрезеруванні фрезою радіуса R (рис. 1) розкладається на дві складові [5], що мають домінуючий вплив на точність обробки: тангенціальну силу P_z , що збігається за напрямом з вектором швидкості різання V_p , та діє в процесі стружкоутворення на площинку зрізу q_s і радіальну силу P_y , розташовану в площині, перпендикулярній до цього вектору. При роботі з фрезами, що мають гвинтові зубці, виникає осьова сила P_o , яка при правому напрямку гвинтових зубів ліворізальної фрези спрямована до гнізда шпинделя і не істотно впливає на точність формоутворення.

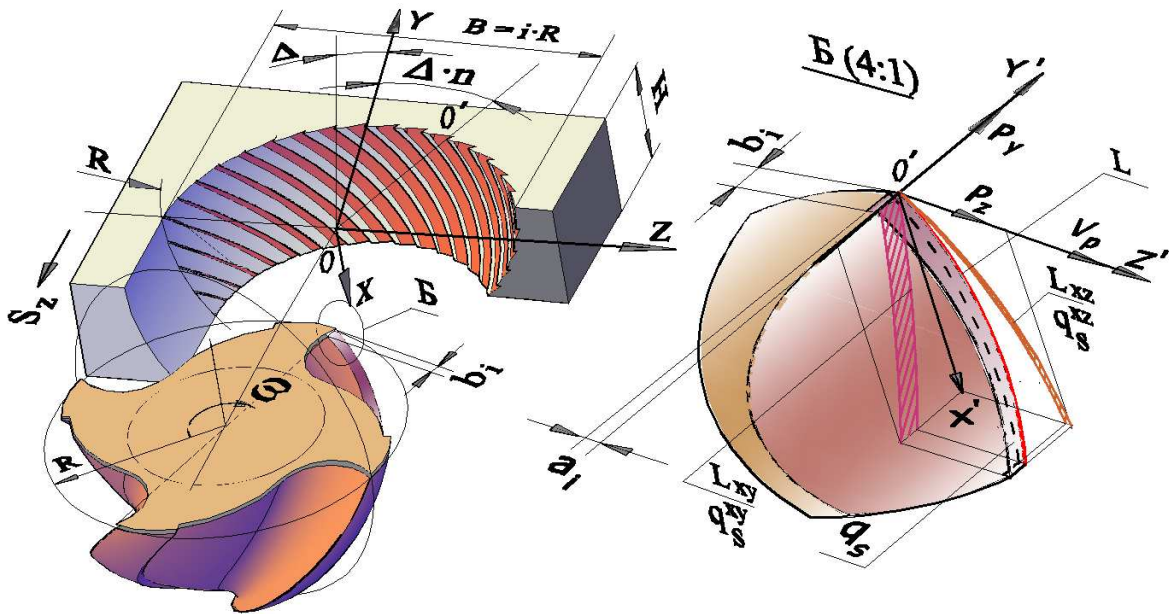


Рис. 1. Моделювання дії сил на заготовку, як реакції сил різання від контакту із зубом фрези: сили P_z - у напрямку швидкості різання V_p і сили P_y , що лежить у площині перпендикулярній V_p при фрезеруванні шириною $B=14.3$ мм радіусною фрезою $R=8$ мм з дискретною її повороту на кут Δ , поточних параметрах перетину зрізу $b_i \cdot a_i$ з площинкою зрізу q_s , активною різальною крайкою L та її проєкціями L_{xy} , L_{xz} на координатні площини XY , XZ , проєкціями площинки зрізу q_s^{xy} , q_s^{xz} на ці площині

У кожному із значень сил P_z , P_y є складові, похідні від впливу сил стружкоутворення на передню поверхню P_z^γ, P_y^γ і сил, викликаних тертям задньої поверхні зуба фрези P_z^α, P_y^α з переднім γ і заднім α кутами по обробленій поверхні.

Розрізняють питомі сили, діючі [5, 6] на поточну площинку зрізу q_s для тангенціальної C_z^γ, C_z^α та радіальної U_y^γ, U_y^α складових сили різання, для передньої C^γ та задньої C^α поверхонь. Відомі формули для визначення P_z та

P_y зі множниками значень питомих сил, що діють на передню та задню поверхні інструменту, мають вигляд [5]:

$$P_z = P_z^\gamma + P_z^\alpha = C_z^\gamma \cdot q_s + C_z^\alpha \cdot \sum L_{xy}, \quad (1)$$

$$P_y = P_y^\gamma + P_y^\alpha = U_y^\gamma \cdot q_s + U_y^\alpha \cdot \sum L_{xz}, \quad (2)$$

де $\sum L_{xy}$, $\sum L_{xz}$ - сумарне значення проєкцій частин різальних крайок, активних в даний момент зубів фрези на площині, перпендикулярні напрямку дії сил P_z , P_y , відповідно.

Аналітичні моделі розрахунку сил різання значною мірою мають приватний характер з експериментальними коефіцієнтами. Якщо в даний момент різання здійснюється декількома зубцями, то не векторне, а арифметичне додавання проєкцій частин активних крайок у формулах (1), (2) надає додаткову похибку. Крім цього, можливе різне розуміння того, для якого зуба фрези вказувати в розрахунках значення площадки зрізу q_s .

Точність обробки поверхонь складного профілю значною мірою залежить від обраної стратегії обробки, яка дозволить створити на інтервалах траєкторії однакові, у певних межах, силові характеристики процесу формоутворення. У цьому випадку з'являється можливість включення до програми для CNC верстатів модулів підналагодження, які формують на певних ділянках векторні значення поправок, як реакторів на пружні деформації процесу різання. Тому особливо важливо знати модуль і напрямок результуючого вектору сил різання, який не обов'язково збігається з напрямком подачі.

Мета роботи. Розрахувати сили різання методом моделювання CAD системою геометричних параметрів зрізу в зоні контакту заготовки та фрези з нелінійною твірною різальною крайкою. Твердотільне моделювання процесу побудувати на основі булевих операцій «перетину» та «віднімання» 3D об'єктів: зубів радіусної фрези з гвинтовою різальною крайкою та заготовки, що «переміщається» зі швидкістю подачі. Розрахунок виконати як векторне підсумовування сил стружкоутворення, діючих в даний момент на зуби фрези в активній зоні фрезерування.

Основна частина.

Доведено [7], що якщо на будь-яку поверхню діє рівномірно розподілений тиск, то незалежно від форми поверхні проєкція рівнодіючої сил тиску на задану ось дорівнює добутку тиску на ділянку проєкції поверхні на площину, що перпендикулярна до заданої осі.

Отже, якщо визначити проєкції перерізу зрізу q_s^{xy} , q_s^{xz} на координатні площини XY, XZ відповідно, можна отримати векторне значення сили різання на зуб фрези. У цьому випадку (1), (2) можна подати у вигляді:

$$P_z = P_z^\gamma + P_z^\alpha = C_z^\gamma \cdot q_s^{xy} + C_z^\alpha \cdot q_s^{xz}, \quad (3)$$

$$P_y = P_y^\gamma + P_y^\alpha = U_y^\gamma \cdot q_s^{xy} + U_y^\alpha \cdot q_s^{xz}. \quad (4)$$

Питомі сили різання розраховуються за наступними формулами [5]:

$$C_z^\gamma = \tau_p \cdot (\varepsilon + 1), \quad (5)$$

$$C_z^\alpha = 1.5 \cdot \tau_p \cdot \varepsilon \cdot \rho + \mu \cdot \sigma_T \cdot h, \quad (6)$$

$$U_y^\gamma = \tau_p \cdot (\varepsilon + 1) \cdot tg(\psi), \quad (7)$$

$$U_y^\alpha = 1.5 \cdot \tau_p \cdot \rho \cdot (3.17 \cdot \varepsilon + 1) \cdot tg(\psi) + \sigma_T \cdot h, \quad (8)$$

де τ_p - дотична напруга вздовж умовної площини зсуву; ε - відносний зсув; ρ - радіус округлення різальної крайки; μ - коефіцієнт тертя по задній поверхні; σ_T - межа плинності оброблюваного матеріалу; h - ширина площинки зношування на задній поверхні.

Дамо коротку характеристику параметрів, що входять до формул (5) - (8), і наведемо їх значення прийняті для обробки заготовки з матеріалу ст. 35 ($\sigma_B = 530 \text{ МПа}$, $\sigma_T = 315 \text{ МПа}$) [3] цілісною твердосплавною ВК8 радіусною фрезою $R=8 \text{ мм}$.

Експериментально підтверджено, що незалежно від умов різання, дотичне напруження τ_p має рівномірний розподіл вздовж усієї умовної площини зсуву і, як встановлено М. Ф. Полетика, пропорційне межі міцності на розтягування оброблюваного матеріалу σ_B [8]. Приблизні значення напруги зсуву, виміряні за допомогою динамометра при різанні сталі, за даними дослідників Е. М. Trentn [9], можна прийняти $\tau_p = 480 \text{ МПа} > \sigma_B$.

Подання питомих сил, як розрахункових пов'язано, перш за все, зі ступенем зсувної деформації процесу стружкоутворення [10]. Відносний зсув $\varepsilon(\xi, \gamma)$ визначається через коефіцієнт усадки стружки ξ та передній кут інструменту γ . В працях М. І. Клушина і М. Б. Гордона [10] встановлено, що при обробці ст. 35 домінуючий вплив на усадку стружки ξ надає геометрія передньої поверхні інструменту, нахил якої γ викликає зміну температури і коефіцієнта тертя. Геометричні параметри закордонних фрез здебільшого є комерційною таємницею, але нормативи встановлюють, що до фрез менше розміру $\varnothing 20 \text{ мм}$ кути в нормальному перерізі: передній $\gamma = 16^\circ$, задній $\alpha = 12^\circ$. Тому для даних умов обробки конструкційної сталі, при коливанні температури в межах $500..600 \text{ t}^\circ\text{C}$ в зоні різання, коефіцієнті усадки стружки $\xi = 3.14$ відносний зсув приймається рівним $\varepsilon = 3.27$ [11].

Радіус закруглення різальної крайки фрези змінюється в міру зносу і при чистовій обробці конструкційних сталей кінцевими фрезами $\varnothing 16 \dots \varnothing 48$ може коливатися в інтервалі $\rho = 0.2 \dots 0.25$ [3].

Допустима ширина площинки зношування h на задній поверхні фрези діаметром більше $\varnothing 16$ мм при чистовій обробці конструкційної сталі повинна мати максимальне значення в межах $h=0.1\dots 0.15$ [3]. Досліди Н. Н. Зорева показали, що нормальні та дотичні питомі сили різання на задній поверхні розподілені рівномірно на ширині фаски зносу.

При моделюванні умов тертя на площинках контакту «стружка інструмент», «інструмент-заготовка» використовується закон Кулона-Амонтона, на основі якого отримані значення коефіцієнтів тертя [12] на задній поверхні, зокрема для твердосплавної фрези, таке значення може бути прийнятим, як $\mu = 0.22$.

За умови лезової обробки питомі тиски мають аналогічну природу, проте умови тертя на передній поверхні через кут дії ψ обумовлюють різний вплив на деформаційні процеси, що відбуваються в шарі зони зрізу первинної пластичної деформації. Тому кут дії ψ визначається кутом тертя та переднім кутом інструменту або за визначенням І. А. Тіме є кутом між площиною сколювання та передньою поверхнею інструменту. При передньому куті фрези $\gamma = 16^\circ$, відносному зсуві $\varepsilon = 3.27$ і коефіцієнті тертя $\mu = 0.22$, кут дії приймаємо $\psi = 30^\circ$ [11].

Для розрахунку сили різання P , що діє на заготовку (сили «відштовхування» [5]), як реакцію від дії сил зуба фрези розглянемо процес зустрічного фрезерування зразка висотою $H < R$ фрезею радіуса R з гвинтовою різальною крайкою. Розрахунок параметрів активної частини різальних крайок фрези такого типу представляє складне аналітичне завдання, тому скористаємося для цієї мети твердотільним моделюванням CAD системою процесу формоутворення. В основу моделювання покладено булеві операції «віднімання» (subtract) та «перетин» (intersect) над твердотільними об'єктами: гвинтові зубці фрези – матеріал заготовки. У CAD системі будемо 3D твердотільний об'єкт (SOLID) - радіусу $R=8$ мм фрезу $\varnothing 16$ мм із чотирма гвинтовими зубами з кутом підйому витка 40° , переднім кутом $\gamma = 10^\circ$ у нормальному перерізі (рис. 1, а). Модель заготовки висотою $H=0.75 \cdot R=6$ мм з тороїдальною вибіркою $R=8$ мм. Процес фрезерування заготовки моделюється внаслідок побудови дискретного кутового Δ^0 ряду 3D SOLID зрізів, з геометрією, що змінюється при подачі на зуб S_z і повороті фрези з кутовою швидкістю ω .

API функції через інтерфейс Active Automation забезпечують можливість доступу до геометричних визначників в ієрархії твердого тіла. У розглянутій задачі цей інструментарій дозволяє отримати не тільки об'єм фігури зрізу (рис. 1, б), але і його поточну площу контакту із заготовкою q_s , а також довжини робочих частин різальних

крайок L . Створений програмний додаток до CAD пакету дозволить автоматизувати процес послідовної побудови n 3D SOLID зрізів внаслідок задання інтерференції зубів фрези та заготовки. Інструментарій дає можливість отримати доступ до внутрішніх таблиць 3D об'єкта і визначити компоненти кожної збудованої моделі зрізу (LastBody), її граней (Face), ребер (Edge) і вершин (Vertex), які існують на кінцях будь-якого ребра і описують точки контакту між ребрами. Отже, в об'єктному коді пронумерованих точок вершин зрізу є інформація щодо ребер, яким вони належать [13, 14, 15]. Якщо пов'язати початок координатної системи $X'Y'Z'$ з вершиною зуба фрези O' - фактично з вершиною фігури зрізу, то можна визначити грань поточного перерізу зрізу $bi-ai$, яка є площиною контакту q_s передньої поверхні фрези з деталлю. Як «плоский знімок» 3D об'єкта (FLATSHOT) з базовою точкою вставки O' , для ребер перерізу можна визначити не тільки проекції L_{xy} , L_{xz} ліній різальної крайки фрези L на координатні площини $X'Y'$ і $Z'X'$, але і проекції q_s^{xy} , q_s^{xz} площинки контакту q_s .

При фрезеруванні поверхонь складного профілю кінцевими фрезами обробка відбувається, як правило, з кутом контакту менше 180° . Якщо задана умова, що для заготовки в даний момент обробки (рис. 2, а) активні тільки два зуби фрези з чотирьох, то ширина фрезерування повинна дорівнювати $B=i \cdot R=1.8 \cdot R=14.3$ мм, а кут контакту приблизно дорівнює 150° . Параметри 3D Solid зрізів розраховуються внаслідок моделювання зустрічного фрезерування при дискретних поворотах (рис. 2, а) фрези на кути кратні $\Delta \cdot n=10^\circ \cdot n$ для $n=0, 1, 2, \dots, 9$ з подачею заготовки на оберт $S=0.36$ мм/об (0.09 мм/зуб) та максимальною глибиною різання $H=6$ мм $< R$. Якщо в роботі одночасно знаходиться кілька зубів фрези, то сила різання дорівнюватиме векторній сумі сил, що діють в даний момент на окремі зубці. 3D моделювання повороту фрези, з урахуванням гвинтової спрямованості її зубів відтворює наступну послідовність дій. При куті $\varphi = 180^\circ$ відбувається врізання зубом 1, тоді як зуб 3 виходить із зони різання, а зуб 2 при куті $\beta = 120^\circ$ починає зрізати припуск. При послідовному кутовому положенні фрези β , $\beta - \Delta$, $\beta - 2 \cdot \Delta$, $\beta - 3 \cdot \Delta, \dots, \beta - n \cdot \Delta$ для зуба 1 кут врізання буде залишатися деяке число кутових дискрет рівним $\varphi = 180^\circ$, потім $\varphi - \Delta$, $\varphi - 2 \cdot \Delta, \dots$, доки він не займе положення зуба 2, а зуб фрези 2 займе положення зуба 3 і вийде з зони обробки. Слід зазначити, що в робочому просторі кута контакту 150° зуби фрези працюють з різною глибиною різання. За формулами (5) – (8) розраховуємо для вищенаведених фізико-технічних властивостей матеріалу та умов різання, геометрії фрези та заготовки, відповідні питомі сили різання

$$C_z^\gamma = 1680 \text{ Н/мм}^2, C_z^\alpha = 422.2 \text{ Н/мм}^2,$$

$$U_y^\gamma = 969.35 \text{ Н/мм}^2, U_y^\alpha = 893.7 \text{ Н/мм}^2.$$

Для розрахунку векторної суми сил різання, що діють на зубці фрези 1, 2 заповнюємо таблицю 1 для 10 вимірювань $n=0,1...9$, зроблених у кутових положеннях $\beta - n \cdot \Delta$. У таблицю вносимо такі

дані: отримані CAD додатком значення q_s^{xy} і q_s^{xz} , як 3D проекції на координатні площинки зрізу при кутових положеннях φ^n, β^n зубів фрези; розраховані сили різання P_{z1}^n, P_{y1}^n (3) та P_{z2}^n, P_{y2}^n (4) за координатними напрямками Z, Y.

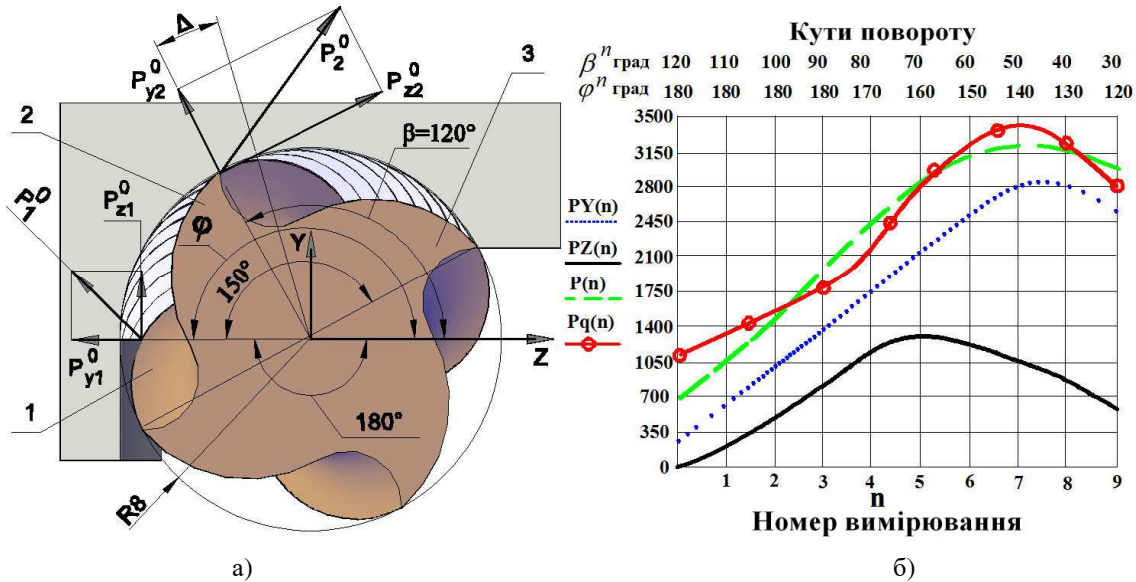


Рис. 2. Сили різання при фрезеруванні фрезою радіуса $R8$ мм: а – положення на початку різання векторів сил P_1^0, P_2^0 , що діють на зуби фрези 1 і 2 та їх відповідних радіальних P_{y1}^0, P_{y2}^0 і тангенціальних P_{z1}^0, P_{z2}^0 проекцій; б – графіки зміни сил радіальної $PY(n)$, тангенціальної $PZ(n)$, сумарних, тобто результуючих розрахункових $P(n)$ та експериментальних $Pq(n)$ при вимірах $n=0,1...9$, або при кутах повороту φ^n, β^n

Таблиця 1. Таблиця розрахункових даних сил різання, що діють на зубці фрези

n	Зуб фрези 1					Зуб фрези 2				
	$q_s^{xy} \text{ мм}^2$	$q_s^{xz} \text{ мм}^2$	φ^n град	P_{z1}^n Н	P_{y1}^n Н	$q_s^{xy} \text{ мм}^2$	$q_s^{xz} \text{ мм}^2$	β^n град	P_{z2}^n Н	P_{y2}^n Н
0	0.0002	0.0003	180	4.62	4.619	0.0002	0.0003	120	162.09	205.99
1	0.0018	0.0029	180	42.48	43.366	0.0018	0.0029	110	423.30	476.99
..
9	0.0808	0.1688	120	2070.09	2291.87	0.0808	0.1688	30	58.84	46.96
Номер рядка матриці	Номер колонки матриці		0	1	2	Номер колонки матриці		0	1	2
			M1					M2		

Отримана таблиця дозволяє сформувані дві матриці $M1, M2$ розміром 10×3 , дії сил різання на зуби фрези 1, 2 залежно від їхнього кутового положення, що відповідає номеру виміру n . Проекції результуючої сили різання $P(n)$, що діє на зубці фрези при поточних кутах φ^n, β^n її повороту (або номера вимірювання n) дорівнюють: радіальна силу різання $PY(n)$ - сумі проекцій P_{y1}^n, P_{y2}^n на ось

Y і тангенціальна $PZ(n)$ - сумі проекцій P_{z1}^n, P_{z2}^n на вісь Z (рис. 2, б). Рівняння мають вигляд:

$$PY(n) = M1_{n,2} \cdot \sin(M1_{n,0}) - M1_{n,1} \cdot \cos(M1_{n,0}) + M2_{n,2} \cdot \sin(M2_{n,0}) - M2_{n,1} \cdot \cos(M2_{n,0}), \quad (9)$$

$$PZ(n) = M1_{n,2} \cdot \cos(M1_{n,0}) + M1_{n,1} \cdot \sin(M1_{n,0}) + M2_{n,2} \cdot \cos(M2_{n,0}) + M2_{n,1} \cdot \sin(M2_{n,0}). \quad (10)$$

Модуль сили різання $P(n)$ при кутах повороту φ^n, β^n фрези (або номера вимірювання n) визначає функціональна залежність:

$$P(n) = \sqrt{PY(n)^2 + PZ(n)^2}. \quad (11)$$

Годограф вектору сил $GA(F(n), \lambda)$ визначається його модулем $|P(n)|$ та кутом нахилу λ , що дорівнює (рис. 3, а):

$$\lambda = \pi - \arctan\left(\frac{PY(n)}{PZ(n)}\right), \quad (12)$$

який показує зміну модуля вектору сил у діапазоні (685 < $P(n)$ < 3220) Н, у кутовому секторі (25.87° < $\lambda(n)$ < 86.68) град.

На кафедрі технології машинобудування Приазовського державного технічного університету виготовлено дослідний зразок приладу для вимірювання складових сили різання (рис. 3, б), базовим елементом якого є рухлива масивна плита (кубод) 1. На прямокутних гранях плити встановлено дванадцять датчиків (OILM R 60:2000) малих переміщень 2, деформація чутливих елементів

яких, що контактують з упорами закріпленого на столі верстата корпусу приладу, пропорційна зусиллям різання в даному напрямку. Верхня частина плити кріпиться до платформи 3 з державкою 4 для закріплення експериментальної заготовки 5, геометрія якої відповідає формі, показаній на рис. 1. Заготовка обробляється фрезеруванням радіусною фрезою 7 радіусом $R8$ мм, закріпленою в шпинделі 8. Сигнали кожного з датчиків, як складові сил різання PX, PY, PZ подаються через мультиплекорну систему – контролер, на вхід ПК, де шляхом векторного підсумовування, алгоритм якого задається користувачем, формуються масиви складових у фіксовані моменти часу.

При обробці заготовки з частотою обертання шпинделя 750 об/хв вектор сили різання за оберт інструменту змінюється за модулем і напрямом. Пульсуючий характер силового впливу на датчики, його чутливість та швидкодія враховуються при побудові алгоритму зчитування сигналів в буферну пам'ять через розрахункові часові інтервали (1 об/0.08 с).

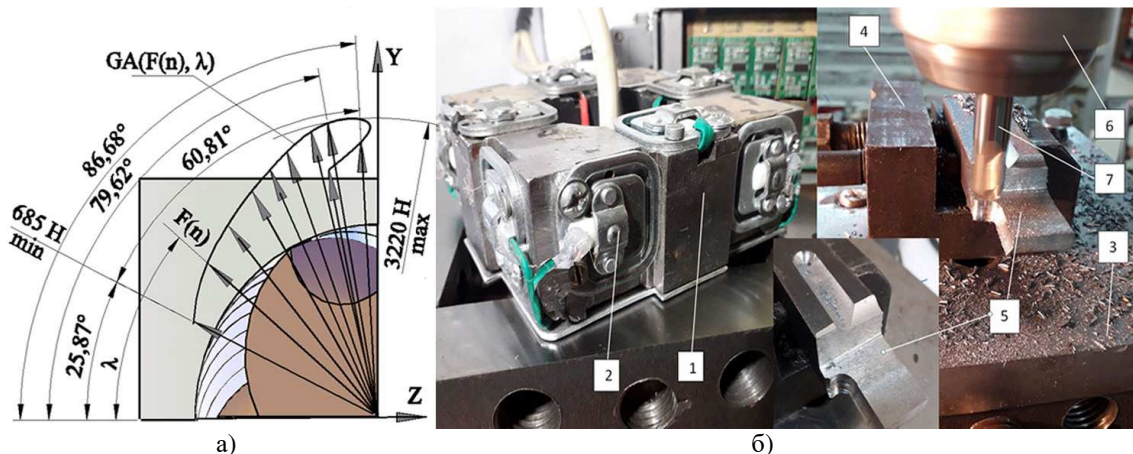


Рис. 3. Годограф $GA(F(n), \lambda)$ вектора сили різання на оберт фрези (а) і прилад для їх вимірювання в ході експерименту (б)

При «опитуванні» кожного з датчиків послідовність середніх значень вибірки 20 вимірювань, визначає силові характеристики процесу різання. Результати підсумовування векторних зусиль, що діють по нормалі до чутливого елемента датчика, формують вихідний масив даних і його графічне відображення в діалоговому вікні, при цьому враховується положення інструмента відносно заготовки, котра переміщується зі швидкістю подачі. При визначеній швидкодії приладу та заданій швидкості різання отримано значення 8 сил $Pq(n)$ (рис. 2, б) на розрахунковому інтервалі $n=2,3..10$. Якщо різниці експериментальних даних та даних, отриманих 3D моделюванням (табл. 1), підпорядковані закону нормального розподілу, то статистичну перевірку гіпотези їх тотожності можна виконати за t -критерієм Стьюдента. При ступені сво-

боди 6, стандартному відхиленні вибірки 63.73 розрахункове значення критерію $t=5.650 < 5.959$ [16] менше рівня значущості, що доводить збіжність експериментальних та розрахункових даних.

Властивість збіжності перебуває на межі з низки причин: при визначенні питомих сил різання взято універсальні табличні значення, що враховують фізичні процеси стружкотворення, а експериментальні дані містять певну похибку непрямих вимірів і силового тарування приладу.

Висновки

Розрахунок силових параметрів лезової обробки протягом тривалого періоду був предметом численних досліджень, результати яких у більшості випадків мали статичний характер даних у фіксований момент часу. Разом з тим можливості

сучасних CNC систем керування верстатами дозволяють перейти до побудови програм з елементами динамічного програмування. У цьому випадку керуючі програми представляють n-кроковий процес прийняття рішень залежно від зміни прогнозованих умов обробки. Наприклад, пружних відтискань при відомому характері зміни зусиль різання, які значною мірою визначають ширину поля розсіювання розмірів оброблених деталей. Докорінно змінився інструментарій дослідження. Такі програми, як ABAQUS, ANSYS наразі знайшли широке застосування при дослідженні процесів стружкоутворення в механообробці.

Для визначення сил різання рекомендується враховувати довжину проекції різальних крайок зубів фрези, аналітичний розрахунок яких не є простим завданням. Тому за умови безперервної зміни активної частини крайки, у розрахунках приймається їхнє певне усереднене значення. Для сучасних CAD систем доступні будь-які побудови 3D тіл і поверхонь, що обмежують їх, а застосування до них булевих операцій відкривають широкі можливості їх редагування. У цій роботі методом 3D моделювання отримані площі ряду перерізів зрізу (табл. 1) при неповному бічному фрезеруванні радіусною фрезою з гвинтовим зубом торціальної поверхні заготовки. Інструментом для реалізації цього методу є програмний модуль, створений на основі API функцій, вхідними даними для якого є: 3D заготовка та інструмент, рівняння траєкторії його переміщення та параметри врізання під час руху подачі. Орієнтація на API додаток дає можливість моделювати різні траєкторії, гвинтові або трохлойдальні під час обробки поверхонь складного профілю. У перспективі, можливо, враховувати в моделі процеси пластичної деформації в зоні стружкоутворення підключенням зовнішніх модулів.

У ході проведених досліджень фрезерування кінцевими радіусними фрезами з гвинтовою різальною крайкою, коли два або більше зубів знаходяться в межах дуги контакту, було встановлено 3D моделюванням, а також величини товщини і ширини шару, що зрізає кожен із зубів у процесі подачі на оберт. Отже, в процесі формоутворення присутні різні за напрямом і модулем змінні нормальні та тангенціальні сили різання у функції від кута повороту фрези (рис. 2, а) (рис. 3). Тому прийняте в теорії різання поняття «окружна сила на фрезі», як постійна складова процесу, може стати суттєвою причиною помилки при розгляді найважливіших питань механізму збудження різних за своєю природою коливань, що виникають у зоні обробки.

Література

[1] O. Rott, D. Homberg, C. Mense, A comparison of analytical cutting force models. Preprint no. 1151, WIAS, Berlin, 2006. 23 p.

- [2] Справочник технолога-машиностроителя: в 2-х т. / Ред.: А. М. Дальский, А. Г. Косилова, Р. К. Мещеряков, А. Г. Суслов. 5-е изд., испр. Москва: Машиностроение, 2003, Т.1. 912 с.
- [3] GARANT. Machining Handbook [Справочник по обработке резанием]. [Электронный ресурс]. Доступно: www.garant-tools.com
- [4] Каталог KORLOY 2013. Металлорежущий инструмент и инструментальная оснастка. Режущий инструмент. [Электронный ресурс]. Доступно: <http://www.korloy.com/ru/download/cata.do>
- [5] Ю. Н. Внуков, А. Г. Саржинская, “Особенности расчета составляющих силы резания при торцевом фрезеровании сферическими фрезами”, *Сборник научных работ НТУ «ХПИ»: Сучасні технології в машинобудуванні*, №5, НТУ «ХПИ», 2010.
- [6] Ю. А. Розенберг, С. И. Тахман, *Силы резания и методы их определения. Учебное пособие: Ч.1. Общие положения*. Курган, КМИ, 1995.
- [7] В. И. Феодосьев, *Сопrotивление материалов: Учебник для втузов*. 9-е изд., перераб. Москва, СССР: Наука, 1986.
- [8] М. Ф. Полетика, “Влияние свойств обрабатываемого материала на процесс стружкообразования”, *Вестн. Машиностроения*, № 7, с. 45-48, 2001.
- [9] Е. М. Трент, *Резание металлов*. Москва, СССР: Машиностроение, 1980.
- [10] А. М. Розенберг, А. Н. Еремин, “Относительный сдвиг”, в *Элементы теории процесса резания металлов*. Москва, СССР: Машгиз, 1956, 320 с., с. 14.
- [11] В. С. Кушнер, О. Ю. Бургонова, *Теория стружкообразования: монография*. Омск, РФ: Изд-во ОмГТУ, 2011.
- [12] М. Ф. Полетика, *Контактные нагрузки на режущих поверхностях инструмента*. Москва, СССР: Машиностроение, 1969.
- [13] Н. С. Свирневский, *Разработка приложений для продуктов Autodesk: Учебное пособие*. Хмельницкий, Україна: ХНУ, 2017.
- [14] А. И. Лещенко, “Расчетно-графическое 3D моделирование площадей среза и силовых зависимостей при обработке концевыми фрезами”, на *X Всеукр. науч.-техн. конф. з міжнародною участю. Процеси механічної обробки, верстати та інструмент*, Державний університет «Житомирська політехніка», Житомир, 2019, с. 137-139.
- [15] О. І. Лещенко, “Моделювання точності обробки складно-профільних поверхонь за допомогою CAD/CAE систем”, на *IX Міжнародній науково-технічній конф.*, Львів-Плай. Львів, 2020, с. 111–113.
- [16] Г. Н. Положий, *Математический практикум*. Москва, СССР: Изд-во физ.-мат. лит., 1960.

УДК 621.9.02

А. И. Лещенко*Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь, Украина***МЕТОД РАСЧЕТА СИЛ РЕЗАНИЯ ПУТЕМ МОДЕЛИРОВАНИЯ САД СИСТЕМОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СРЕЗА РАДИУСНЫМИ ФРЕЗАМИ**

Целью данной работы является расчет сил резания методом моделирования САД системой геометрических параметров среза в зоне контакта заготовки и инструмента с нелинейной образующей. Твердотельное моделирование процесса построено на основе булевых операций «пересечения» и «вычитания» 3D объектов: зубьев радиусной фрезы с винтовой режущей кромкой и заготовки, «перемещающейся» со скоростью подачи. Инструментом для реализации данного метода является программный модуль, созданный на основе API функций, входными данными для которого являются: 3D заготовка и инструмент, уравнение траекторией его перемещения и параметры врезания при движении подачи. Ориентация на свойства API приложение дает возможность моделировать различные траектории, винтовые или трохойдальные при обработке поверхностей сложного профиля. В перспективе, возможно, учитывать в модели процессы пластической деформации в зоне стружкообразования путем подключения внешних модулей.

Ключевые слова: фрезы с радиусной образующей; твердотельное моделирование САД; API приложение; векторное суммирование сил резания.

Alexander Leshchenko*Azov State Technical University, Mariupol, Ukraine***METHOD FOR CALCULATING CUTTING FORCES BY MODELING CAD WITH A SYSTEM OF GEOMETRIC CUTTING PARAMETERS WITH RADIAL MILLS**

The accuracy of processing surfaces of a complex profile largely depends on the selected processing strategy, which will allow creating the same, within certain limits, power characteristics of the shaping process at the intervals of the programmed tool path. In this case, it becomes possible to include tuning modules in programs for CNC machines that form vector values of corrections in certain areas, as reactors for elastic deformations of the cutting process. Therefore, it is especially important to know the modulus and direction of the resulting cutting force vector, which does not necessarily coincide with the feed direction.

The purpose of this work is to build a method for calculating cutting forces by modeling the geometric parameters of a cut with a CAD system, a cutter with a nonlinear generatrix. Solid modeling of the process is based on the Boolean operations of "intersection" and "subtraction" of 3D objects: the teeth of a radius cutter with a helical cutting edge and a workpiece "moving" at a feed rate. The tool for the implementation of this method is a software module created on the basis of API functions, the input data for which are: a 3D tool and a workpiece, the equation of the trajectory of its movement and the parameters of the infeed movement. Targeting API properties, the application makes it possible to simulate various trajectories, helical or trochoidal, when machining complex surfaces. In the future, it is possible to take into account the plastic deformation processes in the chip formation zone in the model by connecting external modules.

In the course of the conducted research on milling with radial end mills with a helical cutting edge, when two or more teeth are within the arc of contact, it was determined by 3D modeling how much thickness and width the layer cuts off each of the teeth during the feed per revolution. Consequently, in the process of shaping, normal and tangential cutting forces, which are different in direction and modulus, are present as a function of the angle of rotation of the cutter. Therefore, the concept of "circumferential force on the cutter", accepted in the theory of cutting, as a certain constant component of the process, can introduce an error when considering the causes of the excitation mechanism of vibrations of different nature that arise in the processing zone.

Keywords: Radius cutters; CAD solid modeling; API application; vector summation of cutting forces.

*Надійшла до редакції
08 жовтня 2021 року*

*Рецензовано
12 листопада 2021 року*