

Л.В. ПРИСЯЖНИЙ, Є.А. УРБАНИЮК

Хмельницький національний університет

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ВИГОТОВЛЕННЯ МАТРИЦЬ ПРЕС-ФОРМ

В роботі представлено вивчення похибок оброблення поверхонь матриць прес-форм. До них належать похибки, викликані утворенням гребінців та похибки апроксимації поверхонь 3D-моделей. За результатами досліджень отримані рекомендації для розроблення керуючих програм для чистового фрезерування формотворних поверхонь мало- (до 100 мм) та крупногабаритних матриць прес-форм.

Ключові слова: матриці прес-форм, чистове фрезерування, висота гребінців, похибка апроксимації, програмування в САМ-пакеті.

L.V. PRYSYAZHNYI, E.A. URBANYUK

Khmelnytskyi National University

THE PERICULARITIES OF MODERN TECHNOLOGIES APPLICATION OF MATRICES MOLDS' MANUFACTURING

The paper presents the analysis of errors of molds' machining surfaces, including errors that are caused by the formation of combs and errors in the approximation of the surfaces of 3D matrix models. These errors should be taken into account in the process of the develop of the control programs in the CAM package for operations that are performed on CNC machines. The following tasks were set: a) to reduce of the height of the combs to the permissible value (0,01...0,02 mm) by selecting of the tool diameter, interlacing and machining strategy; b) to study the peculiarities of the forming of the approximation's error of matrices' 3D models, depending on the shape and the size of the model, and to develop recommendations for the reducing them to acceptable values. Error formation was studied using 3D models with dimensions up to $L \times B \times H = 500 \times 500 \times 500$ mm. Dependences of the height of the combs on the milling step were obtained when machining the horizontal plane for the different diameters of a spherical mill. The influence of the inclination angle of the machined plane and the milling step for a spherical milling cutter $\varnothing 10$ mm on the height of the combs was studied. Recommendations for the choice of milling strategies with constant and variable milling step have been developed. Triangulated surface models were created by the translation of the solid 3D models of typical matrix elements from the CAD program that uses Parasolid kernel into stl format. The marginal error values for the approximation of 3D models in the form of a parallelepiped, cylinder, sphere, and torus with different aspect ratios by X, Y and Z coordinates are presented in the tables. According to the results of the research, recommendations were obtained for the development of control programs for finishing milling of molding surfaces of small- (up to 100 mm) and large-sized die molds.

Keywords: mold matrix, finishing milling, the height of the combs, error of approximation, programming in the CAM program.

Вступ

Складними у виготовленні деталей машинобудівного виробництва є формотворні деталі з фасонними поверхнями, такими як матриці прес-форм для виливання під тиском виробів з термопластичних матеріалів. Такі матриці прес-форм можуть мати елементи різної форми, що виступають чи заглиблені.

Чистове оброблення формотворних поверхонь різної форми цих матриць (рис. 1), зазвичай, виконують сферичними фрезами на високошвидкісних верстатах з числовим програмним керуванням (ЧПК). Після чистового фрезерування на формотворних поверхнях часто залишаються гребінці, які попередньо знімають шліфувальною шкіркою з наступним поліруванням до шорсткості Ra0,4 мкм.

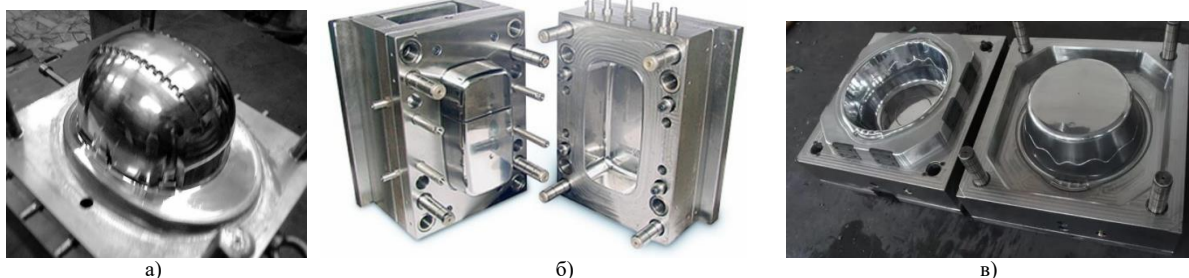


Рис. 1. Матриці прес-форм з типовими формотворними елементами: а) з виступом, близьким за формою до сферичної; б) з елементами призматичної форми; в) з елементами конічної форми

Практикою встановлено, що висота гребінців на поверхнях матриць після чистового оброблення сферичними фрезами не повинна перевищувати 0,01...0,02 мм, що дасть можливість виконати наступні викінчувальні операції доведення та полірування без надмірних витрат.

Проблема утворення гребінців на оброблювальних поверхнях деталей розглядалась в роботах [1–3], де авторами отримані окремі залежності для визначення їх висоти. Крім того в довідках (Help) до відомих САМ-пакетів [4–7] вказується на необхідність задання параметрів операції фрезерування, які впливають на точність і якість оброблених просторових поверхонь. В роботах авторів [8, 9] відмічається, що більшість CAD-систем буде для САМ-пакетів триангульовані (апроксимовані плоскими трикутниками) поверхневі моделі у форматі stl-файлів. При цьому твердотільна модель трансформується в поверхневу модель з певними похибками (похибки апроксимації), які окрім утворених гребінців очевидно можуть спричинити додаткові похибки форми обробленої поверхні. Тому комплексне вивчення питання формоутворення гребінців та можливих похибок, викликаних апроксимацією поверхонь 3D-моделей при проектуванні

операцій та розробленні керуючих програм для чистового фрезерування формотворних поверхонь матриць на верстаті з ЧПК, є актуальним і є метою даної роботи. Завданнями роботи є:

а) виділення типових елементів матриць, що потребують просторового фрезерування, та аналіз утворення гребінців на їх поверхнях та розроблення рекомендацій для їх зменшення до допустимого значення (0,01...0,02 мм) шляхом вибору стратегії оброблення;

б) вивчення особливостей формування похибки апроксимації 3D-моделей залежно від форми та розмірів моделі та розроблення рекомендацій з їх зменшення до допустимих значень.

Аналіз утворення гребінців на типових формотворних елементах матриць

Більшість матриць прес-форм є деталями середніх типорозмірів, що не перевищують габаритів $L \times B \times H = 500 \times 500 \times 500$ мм. Формотворні елементи матриць прес-форм представляють собою виступи та заглиблення різноманітної форми, які мають переважно прості типові форми: циліндра, конуса з крутими та похилими стінками, паралелепіпеда чи призми з прямими і нахиленими круто чи полого стінками або сфери. Вибрані для аналізу та моделювання оброблення типові елементи матриць представлені на рис. 2.

Найбільшу складність для оброблення представляють виступи та заглиблення з нахиленими стінками, які потребують застосування сферичних фрез. Під час моделювання оброблення матриць в САМ-пакетах можливе застосування різних стратегій оброблення, тобто оброблення з постійним чи змінним кроком фрезерування як у вертикальному, так і у горизонтальному напрямках, що особливо важливо при обробленні виступів з крутими та нахиленими стінками.

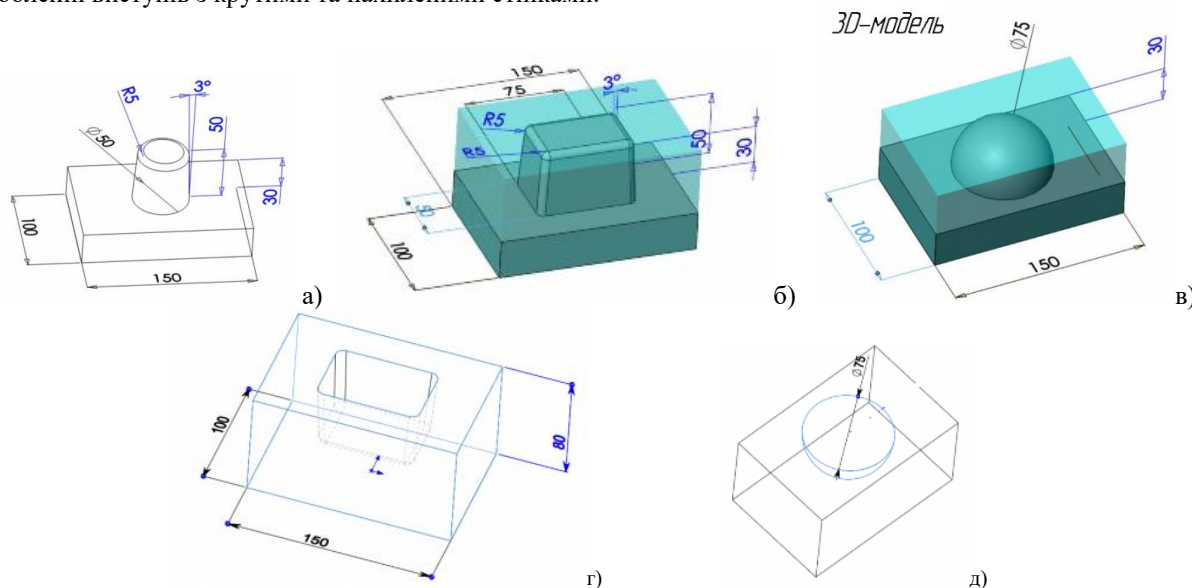


Рис. 2. Типові елементи матриць, вибрані для аналізу та моделювання оброблення: а – конічний виступ; б – призматичний виступ; в – сферичний виступ; г – призматичне заглиблення; д – сферичне заглиблення

На рис. 3 наведені схеми утворення гребінців при обробленні типових елементів з нахиленими стінками, випуклими та увігнутими криволінійними поверхнями.

Визначити висоту гребінців h з врахуванням результатів [2] можна за наступними формулами:

$$\text{для схеми а)} \quad h = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{s}{2\cos\gamma}\right)^2}, \quad (1)$$

$$\text{для схеми б)} \quad h = (R + \rho) \sqrt{1 - \left(\frac{s}{2R}\right)^2} - \sqrt{\rho^2 - \left(\frac{(R+\rho)s}{2R}\right)^2} - R, \quad (2)$$

$$\text{для схеми в)} \quad h = R - (R - \rho) \sqrt{1 - \left(\frac{s}{2R}\right)^2} - \sqrt{\rho^2 - \left(\frac{(R-\rho)s}{2R}\right)^2} - R, \quad (3)$$

тут h – висота гребінців; R – радіус фрези; s – крок фрезерування; γ – кут нахилу стінки елемента; ρ – радіус опуклої чи увігнутої поверхні відповідно.

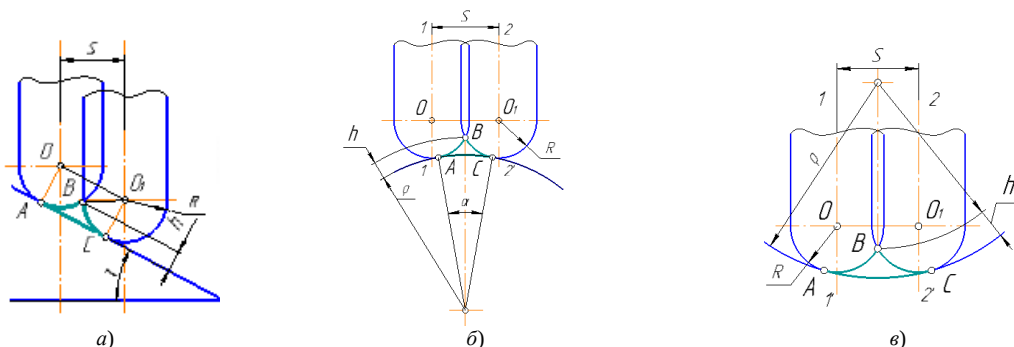


Рис. 3. Схеми утворення гребінців при обробленні: а) нахиленої стінки елемента; б) опуклої поверхні; в) увігнутої поверхні

Висоту гребінців при обробці нахилених стінок можна однозначно визначити за формулою (1). Для опуклих і увігнутих поверхонь (рис. 2, б і в) отримано формули розрахунку висоти гребінців лише для окремих випадків. Тому для загального випадку нами пропонується визначати висоту гребінців h на окремих ділянках криволінійних поверхонь з врахуванням кута γ нахилу дотичної, проведеної в точці контакту фрези з криволінійною поверхнею деталі до горизонту (див. рис. 4), про що детальніше буде розглянуто нижче.

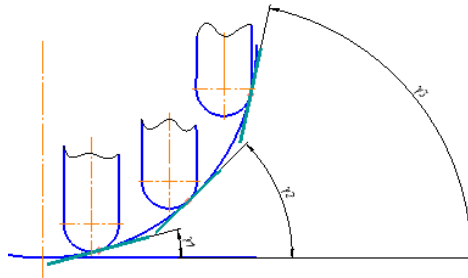


Рис. 4. Характер зміни кута γ при фрезеруванні увігнутих поверхонь

Вибір стратегії оброблення та діаметра інструменту для різних елементів матриць прес-форм

При підготовці керуючих програм підприємства машинобудівної галузі використовують системи автоматизованої підготовки програм середнього класу CAMWorks, FeatureCAM, SolidCam, PowerMill, Cimatron, Espirit та інші, а також так звані важкі CAD/CAM/CAE-пакети NX, CATIA та Creo. Практично всі ці пакети забезпечують вибір стратегій оброблення просторових поверхонь з *постійним* та *змінним* кроком фрезерування.

Перевагою стратегій з *постійним кроком* проходів фрезерування є простота встановлення параметрів операції, що дає програмісту можливість швидко їх налагодити та згенерувати керуючу програму. Прикладом такої стратегії оброблення може бути стратегія «Чистова з постійним Z» (рис. 5,а), що використовуються у пакеті FeatureCAM.

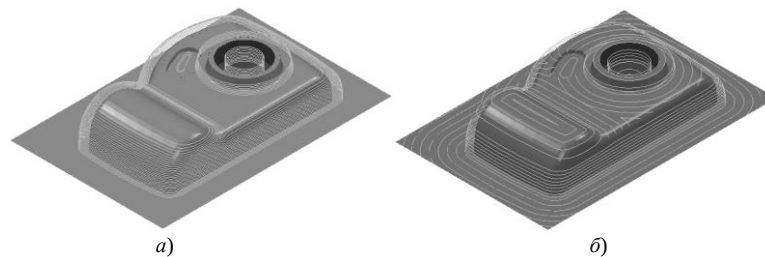


Рис. 5. Траєкторії руху фрези при обробленні за різними стратегіями: а) за стратегією «Чистова з постійним Z»; б) за стратегією «Оптимізована Z-стратегія»

Вона створює пошарову траєкторію, що складається із сегментів з постійною координатою по осі Z. Це добре працює на поверхнях з кутом нахилу більше 75° . На поверхнях з кутом нахилу менше 15° для отримання допустимої висоти гребінців глибину різання зменшують, збільшуючи разом з тим міжрядкову подачу (крок фрезерування) s в площині XY. При виборі діаметра фрези враховуються радіуси заокруглень та заглиблень елементів матриць, що обробляються. З іншого боку, діаметр сферичної фрези впливає на висоту гребінців h . Для розрахунку висоти гребінців зручніше використовувати радіус фрези R , і, як видно із формули (1), висоту гребінців можна зменшити, збільшуючи величину R . Проте збільшення діаметра фрези може суттєво збільшити вартість різального інструменту. Зокрема, збільшення діаметра сферичної фрези фірми ATORN з $\varnothing 6$ до $\varnothing 16$ збільшує її вартість з 48,3€ до 215€ [10], тобто в 4,5 разу.

Таким чином, завданням програміста, який розробляє керуючу програму в САМ-пакеті, є: за попередньо вибраними значеннями діаметра фрези D , допустимої висоти гребінців h та кута нахилу стінки γ встановити величину міжрядкової подачі s . Процедура підбору значення s можна провести з використанням графіків залежностей висоти гребінців від параметрів D , γ та s відповідно.

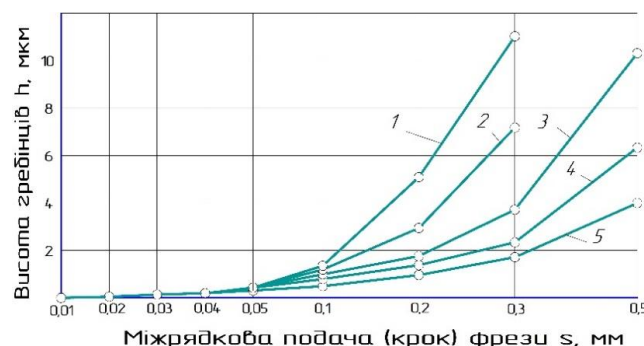


Рис. 6. Залежність висоти гребінців h від кроку s при фрезеруванні горизонтальної площини для різних діаметрів фрези: 1 – $D=2$ мм; 2 – $D=3$ мм; 3 – $D=6$ мм; 4 – $D=10$ мм; 5 – $D=16$ мм

Визначення висоти гребінців h проводили в програмі MS Excel, змінюючи крок фрезерування s в межах від 0,01 мм до 1,0 мм при діаметрах сферичних фрез $D = 2 \dots 16$ мм. Діаметри фрез для моделювання приймалися стандартними і вибиралися із каталогу фірми «ATORN» [10].

Графік залежності висоти гребінців h від кроку фрезерування s під час оброблення горизонтальної площини представлений на рис. 6.

З наведеного графіка видно, що гребінці висотою до 2 мкм отримуються при використанні фрез діаметром більше 10 мм і кроку фрезерування до 0,1 мм.

Графік залежності висоти гребінців h від кута нахилу оброблюваної площини γ та кроку фрезерування s для сферичної фрези $\varnothing 10$ мм представлений на рис. 7.

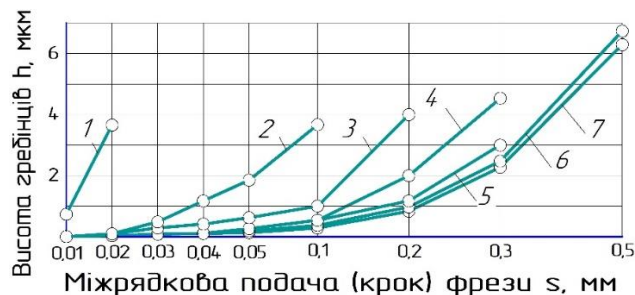


Рис. 7. Залежність висоти гребінців h від кроку фрезерування s при різних кутах нахилу стінки γ : 1 – 87°; 2 – 75°; 3 – 60°; 4 – 45°; 5 – 30°; 6 – 5°; 7 – 0°

З графіка (див. рис. 7) видно, що при обробленні стінок з кутом нахилу $\gamma = 87^\circ$ отримання гребінців з висотою до 2 мкм можливе при малих кроках фрезерування у горизонтальній площині (до 0,015 мм), хоча при цьому різко зростає міжрядковий крок фрези у вертикальній площині. Очевидно, що оброблення деталі при таких малих горизонтальних міжрядкових кроках призведе до суттєвого збільшення часу оброблення.

Більш складною у налагодженні є стратегія зі змінним кроком фрезерування. Прикладом такої стратегії оброблення може бути «Оптимізована Z-стратегія» (рис. 5,6), що використовується у пакеті FeatureCAM. «Оптимізовану Z-стратегію» зі змінним кроком фрезерування доцільно використовувати для створення траєкторії з постійним Z-зміщенням для прямовисних ділянок моделі і траєкторії зі зміщенням в площині XY для пологих ділянок.

Вибираючи відповідну, зокрема, оптимізовану стратегію оброблення, можна керувати висотою гребінців в горизонтальному і вертикальному напрямках. Це дозволяє забезпечити допустиму висоту гребінців при фрезеруванні як похилих, так і крутих стінок, а також криволінійних поверхонь складної форми.

Врахування похибок апроксимації поверхонь матриць при програмуванні їх оброблення

В САМ-модулі для побудови траєкторії руху інструменту потрібна триангульована поверхнева модель (формат файлів stl). Однак значна кількість САД-пакетів працює на твердотільному ядрі Parasolid, яке може створювати поверхневі моделі з похибкою [8, 9]. Завданням даного дослідження було встановити, як впливають геометрична форма 3D-моделі, її розміри та їх співвідношення на величину цієї похибки та розроблення рекомендацій із її зменшення до допустимих значень. З цією метою нами досліджувалась точність побудови триангульованих поверхневих 3D-моделей у форматі stl у системі SolidWorks.

Огранені поверхневі моделі створювались шляхом транслювання підготовленої 3D-моделі у файл stl-формату. Вікно для налагоджування запису файлу представлено на рис. 8. Граничні значення точності огранювання 3D-моделі задавали, переміщуючи повзунок «Отклонение» відповідно в ліве та праве крайнє положення, знімаючи при цьому покази (похибку апроксимації) у віконці «Допуск» (рис. 8).

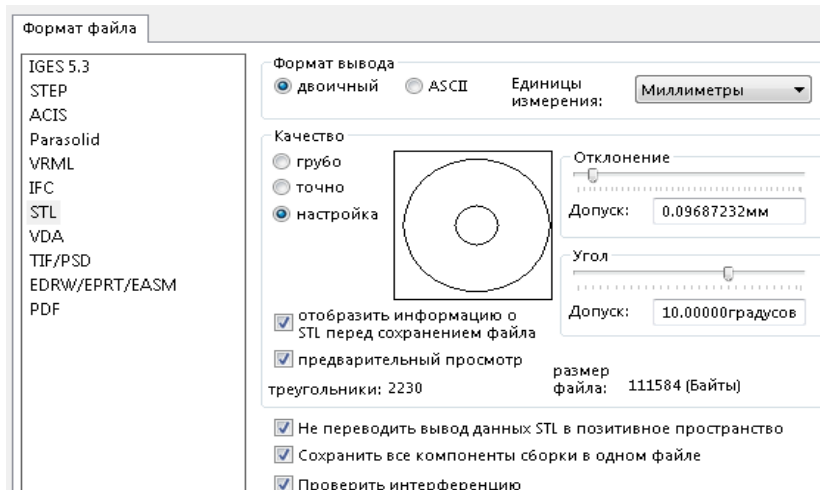


Рис. 8. Вікно налагоджування точності огранювання 3D-моделі у форматі stl

Вплив геометричної форми і розмірів твердотільної 3D-моделі на параметри ограненої поверхневої моделі

В процесі дослідження вивчався вплив форми та розмірів однакових за габаритами (за координатами X, Y та Z) 3D-моделей у вигляді куба, циліндра та сфери на можливі граничні значення похибок апроксимації при їх трансляції в поверхневу триангульовану модель формату stl.

Таблиця 1

Вплив форми та розмірів вихідної однакової за габаритами (координати X, Y, Z) 3D-моделі на точність її апроксимації та розміри stl-файла

Апроксимована модель	Розміри, мм	Відхилення граней, мм		Число граней триангульованої моделі, точно/грубо	Розмір файла, точно/грубо, Кб
		мінімальне	максимальне		
Куб 	10×10×10	0.001	0.021	12/12	3/3
	100×100×100	0.009	0.206	12/12	3/3
	500×500×500	0.043	1.032	12/12	3/3
Циліндр 	Ø10×10	0.001	0.021	680/144	192/41
	Ø100×100	0.009	0.206	680/144	192/41
	Ø500×500	0.043	1.032	680/144	192/41
Сфера 	Ø10	0.001	0.021	57,1×10 ³ /2352	16,2 ×10 ³ /666
	Ø100	0.009	0.206	57,1×10 ³ /2352	16,2 ×10 ³ /666
	Ø500	0.043	1.032	57,1×10 ³ /2352	16,2 ×10 ³ /666

В таблиці 1 наведені граничні відхилення граней ограненої поверхневої моделі від твердотільної 3D-моделі, відповідне число граней (трикутників) та розміри файла формату stl для них. Відхилення граней вказує на відстань від апроксимованої грані ограненої поверхневої моделі до поверхні твердотільної 3D-моделі і є похибкою апроксимації. При програмуванні оброблення в САМ-пакеті потрібно враховувати мінімальне значення відхилення граней. З отриманих результатів видно, що похибка апроксимації однакових за габаритами (за координатами X, Y та Z) 3D-моделей не залежить від їх форми (для куба, циліндра та сфери отримані однакові значення), а залежить лише від їх розмірів. Графік залежності похибок апроксимації огранених поверхневих моделей від їх розмірів наведений на рис. 9.

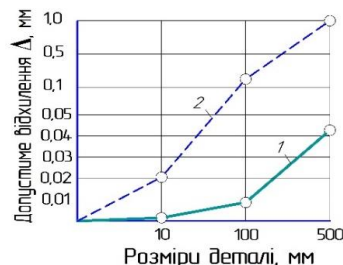


Рис. 9. Відхилення граней поверхневої та однакової за габаритами (за координатами X, Y та Z) моделі, підготовленої для програмування в САМ-модулі, при різних габаритних розмірах деталі: 1 – мінімальні; 2 – максимальні

Очевидно, що апроксимацію моделі деталі можна проводити лише в діапазоні, обмеженому лініями графіка 1 і 2. Для підвищення точності stl-файла рекомендується використовувати нижню межу 1.

Вплив співвідношення розмірів призматичної та циліндричної 3D-моделей на параметри ограненої поверхневої моделі

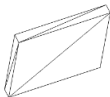
Наступним кроком було вивчення впливу співвідношення сторін 3D-моделі на похибку апроксимації. У вихідних моделях у вигляді куба з розмірами сторін 10 мм та 500 мм послідовно змінювали розміри окремих сторін, задаючи їм значення 10, 100 та 500 мм. Моделі при цьому приймали форми куба, пластини та стержня. Параметри апроксимованої моделі (табл. 2) знаходили аналогічно.

З отриманих результатів видно, що найбільші значення похибки апроксимації (0,043 мм та 0,035 мм) мають моделі з трьома (500×500×500 мм) та двома (10×500×500 мм) найбільшими габаритними розмірами. У моделей, що мають видовжену форму (наприклад, стрижень 10×10×500 мм та видовжена пластина 10×100×500 мм), похибки апроксимації майже однакові (0,0249 мм і 0,0253 мм відповідно).

У вихідних моделях у вигляді циліндра з розмірами Ø10×10 мм та Ø500×500 мм послідовно змінювали висоту, задаючи її значення 10, 100 та 500 мм. Моделі при цьому приймали форму циліндра, циліндричного стрижня та круглої пластини. Параметри апроксимованих циліндричних моделей наведені в табл. 3. З отриманих результатів видно, що найбільші похибки апроксимації (0,043 мм та 0,035 мм) мають моделі з найбільшим діаметральними розмірами (Ø500×500 мм та Ø500×10 мм). Крім цього модель з найбільшим діаметральним розміром та найменшою довжиною (Ø500×10) має більшу похибку апроксимації (0,035 мм), ніж модель з найменшим діаметральним розміром та найбільшою довжиною (Ø10×500 – 0,025 мм).

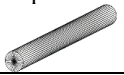
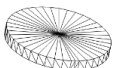
Таблиця 2

**Вплив форми та розмірів вихідної призматичної 3D-моделі
з різним співвідношенням розмірів граней на точність її апроксимації та розміри stl-файла**

Апроксимована модель	Розміри, мм	Відхилення грані, мм		Число граней триангульованої моделі, точно/грубо	Розмір файла, точно/грубо, Кб
		мінімальне	максимальне		
 Куб	10×10×10	0,001	0,021	12/12	3/3
 Стрижень	10×10×100	0,005	0,120	12/12	3/3
	10×10×500	0,0249	0,595	12/12	3/3
 Пластина	10×100×100	0,007	0,169	12/12	3/3
	10×100×500	0,0253	0,607	12/12	3/3
	10×500×500	0,035	0,842	12/12	3/3
 Куб	500×500×500	0,043	1,032	12/12	3/3

Таблиця 3

**Вплив форми та розмірів вихідної циліндричної 3D-моделі
на параметри ограненої моделі та розміри stl-файлу**

Апроксимована модель	Розміри, мм	Відхилення грані, мм		Число граней триангульованої моделі, точно/грубо	Розмір файла, точно/грубо, Кб
		мінімальне	максимальне		
 Циліндр	Ø10×10	0,001	0,021	680/144	192/41
 Циліндричний стрижень	Ø10×100	0,005	0,120	288/144	82/41
	Ø10×500	0,025	0,595	144/144	41/41
 Кругла пластина	Ø100×10	0,007	0,169	752/160	213/45
	Ø500×10	0,035	0,842	752/160	213/45
 Циліндр	Ø500×500	0,043	1,032	680/144	192/41

Вплив форми та розмірів 3D-моделі у вигляді тора на параметри ограненої поверхневої моделі

На формотворних поверхнях прес-форм часто зустрічаються заокруглення та галтелі у вигляді торових поверхонь. Тому наступним кроком було вивчення форми та розмірів 3D-моделі у вигляді тора на похибку апроксимації. Апроксимували торові 3D-моделі із зовнішнім діаметром 10, 50, 100 та 500 мм та радіусом бокової поверхні в 2, 10 та 25 мм. З отриманих результатів (табл. 4) видно, що найбільшу похибку апроксимації (0,035 мм) мають моделі з найбільшим зовнішнім діаметром тора (Ø500). Зміна радіуса бокової поверхні тора з 2 мм до 25 мм та форма поверхні у вигляді тора на похибку апроксимації моделі не впливає.

Отримані результати показують, що похибка апроксимації поверхневих моделей в САД-пакетах, які використовують геометричне ядро Parasolid, не залежить від форми створюваних моделей, але залежить від розмірів моделі та їх співвідношення і може досягати значень для матриць з розмірами $L \times B \times H = 100 \times 100 \times 100$ мм до 0,009 мм, а для матриць з розмірами $L \times B \times H = 500 \times 500 \times 500$ мм до 0,043 мм, що для більшості завдань оброблення є може бути допустимим. Дана похибка не є критичною для виконавчих поверхонь матриць, до яких не пред'являються підвищені вимоги до точності форми.

Варто відмітити, що похибка апроксимації поверхневої моделі при її використанні в САМ-пакеті, спричинює вплив на побудову траєкторії руху фрези, що може призвести до додаткового збільшення висоти

гребінців. При розробленні керуючої програми в САМ-пакеті є можливість обмежувати величину похибки апроксимації в налагоджуваннях до імітації операції чистового оброблення поверхні до 0,01 мм, а після виконання імітації операції виконати відповідну перевірку. Для цього 3D-модель записують до та після імітації оброблення в stl-форматі та знаходять похибки апроксимації та похибки оброблення поверхні з врахуванням утворених гребінців.

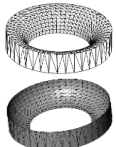
Особливості розроблення керуючої програми в САМ-пакеті при комплексному врахуванні висоти гребінців та похибки апроксимації

Як видно вище проведеного аналізу, встановлення параметрів операції чистового фрезерування виконавчих поверхонь матриць під час розроблення керуючих програм в САМ-пакеті є *багатоваріантною* задачею щодо обмеження висоти гребінців до 0,01...0,02 мм, що дасть можливість виконати наступні операції без надмірних витрат. Для крупногабаритних моделей (з розміром найбільшої сторони понад 100 мм) домінуючою похибкою може бути похибка апроксимації, яку визначають, користуючись табл. 1–4, та задають в САМ-пакеті, користуючись якомога точнішими налаштуваннями. Після чого, задавшись висотою гребінців до 0,01 мм, з допомогою графіків (рис. 6 та рис. 7) підбирають діаметр сферичної фрези D та величину міжрядкової подачі s . Далі виконують імітацію оброблення 3D-моделі в САМ-пакеті, проводять візуальну перевірку отриманих результатів (відхилень обробленої поверхні від заданої (включаючи величину зарізів та недорізів), а також висоту гребінців) та при необхідності, коригують параметри операції.

Для малогабаритних моделей (з найбільшою стороною менше 100 мм) похибка апроксимації є незначною (за даними табл. 1 менше 0,009 мм). У цьому випадку стає можливим встановити допустиму висоту гребінців в межах 0,01...0,02 мм та вибрати за графіками на рис. 6 і 7 кращі параметри операції (дешевшу фрезу меншого діаметра та більше значення міжрядкової подачі).

Таблиця 4

Вплив форми та розмірів вихідної 3D-моделі у вигляді тора на параметри ограненої моделі та розміри stl-файлу

Апроксимована модель	Розміри, мм	Відхилення грані, мм		Число граней триангульованої моделі, точно/грубо	Розмір файла, Кб
		Мінімальне	Максимальне		
1/4 опуклого чи увігнутого зовні тора 	Ø10×R2	0.001	0.017	23284/1188	6.6×10 ³ /336
	Ø50×R2	0.004	0.084	11356/1252	3.2×10 ³ /354
	Ø100×R2	0.007	0.168	8712/1252	2.5×10 ³ /354
	Ø500×R2	0.035	0.842	6600/1370	1.9×10 ³ /388
	Ø50×R10	0.004	0.085	23284/1188	6.6×10 ³ /336
	Ø100×R10	0.007	0.169	17102/1244	4.8×10 ³ /352
	Ø500×R10	0.035	0.842	8712/1252	2.5×10 ³ /354
	Ø100×R25	0.007	0.171	25608/1354	7.2×10 ³ /383
1/4 опуклого чи увігнутого всередину тора 	Ø500×R25	0.035	0.842	12412/1252	3.5×10 ³ /354
	Ø10×R2	0.001	0.017	23432/1232	6.6×10 ³ /336
	Ø50×R2	0.004	0.084	11338/1260	3.2×10 ³ /357
	Ø100×R2	0.007	0.168	8728/1260	2.5×10 ³ /357
	Ø500×R2	0.035	0.842	6600/1370	1.9×10 ³ /388
	Ø50×R10	0.004	0.085	23432/1232	6.6×10 ³ /349
	Ø100×R10	0.007	0.169	17182/1260	4.9×10 ³ /357
	Ø500×R10	0.035	0.842	8728/1260	2.5×10 ³ /357
	Ø100×R25	0.007	0.171	26072/1336	7.4×10 ³ /388
	Ø500×R25	0.035	0.842	12452/1260	3.5×10 ³ /357

Висновки

Розроблені рекомендації щодо програмування оброблення мало- (до 100 мм) та крупногабаритних матриць прес-форм в САМ-пакеті дозволяють програмісту скоротити час на вибір прийнятного варіанту виконання операції на верстаті з ЧПК та уникнути додаткових витрат на наступних операціях їх оброблення.

Література

1. Дружинский И.А. Сложные поверхности. Математическое описание и технологическое обеспечение / Дружинский И.А. – Л. : Машиностроение, 1985.– 263 с.
2. Rong-Shine Lin. Efficient Tool-Path Planning for Machining Free-Form Surfaces [Побудова ефективних траєкторій руху інструменту для оброблення просторових поверхонь]. Journal of Engineering for Industry. Vol. 118, 1996. P. 21–28.
3. Родин П.Р. Обработка фасонных поверхностей на станках с числовым программным управлением / Родин П. Р., Линкин Г. А., Татаренко В. Н. – К. : Техніка, 1976. – 200 с.
4. 3-осьове фрезерування в CAMWorks [Електронний ресурс] // HCL Tehnologies Limited, 2019. – Режим доступу : <https://camworks.com/modules/3-axis-milling> (дата звернення 3.12.2019).

5. Справка по FeatureCAM/О настройке обработки/Атрибуты по умолчанию для фрезерования [Электронный ресурс] // Autodesk Knowledge Network, 2019. – Режим доступа : www.help.autodesk.com/view/FCAM/2020/RUS (дата звернення 3.12.2019).
6. Справочное руководство по PowerMill 2018 [Электронный ресурс] // Autodesk, Inc., 2020. – Режим доступа: <https://knowledge.autodesk.com/ru/support/powermill/learn-explore/caas/downloads/downloads/RUS/content/powermill-2018-reference-help.html?v=2018> (дата звернення 3.12.2019).
7. HSR/HSM – Фрезерная скоростная 3D обработка/Чистовая обработка HSM в SolidCAM [Электронный ресурс] // SolidCAM, 2019. – Режим доступа : <https://www.solidcam.com/ru/cam-resheniya/moduli-cam/hsm-frezernaya-skorostnaya-3d-obrabotka/> (дата звернення 3.12.2019).
8. Доброскок В. Л. Возможности современных САД систем при переходе к триангулированным моделям / В. Л. Доброскок // Високі технології в машинобудуванні [High technologies of machine-building] : зб. наук. пр. – Харків : НТУ "ХПІ", 2010. – Вип. 1 (20). – С. 79–86.
9. Щеляев А.И. Format Works – обмен данными между CATIA и SolidWorks [Электронный ресурс] / А.И. Щеляев // Сайт компании ТЕСИС. – Режим доступа : https://tesis.com.ru/infocenter/downloads/3dtransvidia/FormatWorks_2010.pdf
10. Каталог фрезерного инструмента фирмы “ATORN”. – 2017. – 350 с.

References

1. Druzhinskij I.A. Slozhnye poverhnosti. Matematicheskoe opisanie i tehnologicheskoe obespechenie / Druzhinskij I.A. – L. : Mashinostroenie, 1985.– 263 s.
2. Rong-Shine Lin. Efficient Tool-Path Planning for Machining Free-Form Surfaces [Pobudova efektyvnykh traiektoriy rukhu instrumentu dlia obroblennia prostorovykh poverkhon]. Journal of Engineering for Industry. Vol. 118, 1996. P. 21–28.
3. Rodin P.R. Obrabotka fasonnykh poverhnostej na stankah s chislovym programmym upravleniem / Rodin P. R., Linkin G. A., Tatarenko V. N. – K. : Tehnika, 1976. – 200 s.
4. 3-osevo frezeruvannia v CAMWorks [Elektronnyi resurs] // HCL Technologies Limited, 2019. – Rezhim dostupu : <https://camworks.com/modules/3-axis-milling> (data zvernennia 3.12.2019).
5. Sправка po FeatureCAM/О настройке обработки/Атрибуты по умолчанию для фрезерования [Elektronnij resurs] // Autodesk Knowledge Network, 2019. – Rezhim dostupu : www.help.autodesk.com/view/FCAM/2020/RUS (data zvernennia 3.12.2019).
6. Spravochnoe rukovodstvo po PowerMill 2018 [Elektronnij resurs] // Autodesk, Inc., 2020. – Rezhim dostupu : <https://knowledge.autodesk.com/ru/support/powermill/learn-explore/caas/downloads/downloads/RUS/content/powermill-2018-reference-help.html?v=2018> (data zvernennia 3.12.2019).
7. HSR/HSM – Frezernaya skorostnaya 3D obrabotka/Chistovaya obrabotka HSM v SolidCAM [Elektronnij resurs] // SolidCAM, 2019. – Rezhim dostupu : <https://www.solidcam.com/ru/cam-resheniya/moduli-cam/hsm-frezernaya-skorostnaya-3d-obrabotka/> (data zvernennia 3.12.2019).
8. Dobroskok V. L. Vozmozhnosti sovremennykh CAD sistem pri perehode k triangulirovannym modelyam / V. L. Dobroskok // Vysoki tekhnologii v mashynobuduvanni [High technologies of machine-building] : zb. nauk. pr. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2010. – Vyp. 1 (20). – S. 79–86.
9. Shelyaev A.I. Format Works – obmen dannymi mezhdu CATIA i SolidWorks [Elektronnij resurs] / A.I. Shelyaev // Sajt kompanii TESIS. – Rezhim dostupu : https://tesis.com.ru/infocenter/downloads/3dtransvidia/FormatWorks_2010.pdf
10. Katalog frezernogo instrumenta firmy “ATORN”. – 2017. – 350 s.

Рецензія/Peer review: 11.12.2019 Надрукована/Printed: 12.01.2020

Рецензент: д.т.н., проф. Харжевський В.О.