

**ВИСОКОЕФЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ
В ПРИЛАДОБУДУВАННІ**

УДК 621.914.1

**АНАЛІТИЧНА МОДЕЛЬ РУХУ ОБ'ЄКТІВ ТЕХНОЛОГІЧНОГО
ПРОЦЕСУ КОНТУРНОГО ФРЕЗЕРУВАННЯ МЕТАЛІВ**

Скицюк В. І., Клочко Т. Р.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

E-mail: t.klochko@kpi.ua

Вступ. У статті йдеться про актуальну проблему, яка виникає при механічній обробці металів, тобто створення аналітичного супутнього опису технологічних процесів обробки різанням. Розглянуто вплив основних напрямків фізики металообробки на точність виготовлення прецизійних деталей приладів. Аналізуючи весь перелік проблем, пов'язаних з аналітичним описом процесу механічної обробки металів, необхідно визначити низку теоретичних засад металообробки. Отже, доведено, що врахування реальних координат траєкторій руху об'єктів технологічного процесу механічної обробки металів надає можливості підвищення точності обробки деталі.

Основна частина. Вирішуємо задачу руху твердого тіла (інструмента) у твердому тілі (деталі), тобто маємо типово негативну технологію. Процес негативної технології відбувається зі знищенням надлишкового матеріалу аж до поверхні деталі. Для фрезерної обробки вводиться низка понятійних траєкторій, які вважаються нормалізованими. Оскільки всі інструменти та деталі або заготовки мають свою панданну зону, то у траєкторіях руху об'єктів завжди враховується це явище у вигляді еквідістанти.

Аналізуючи всі види металообробки, можна зробити один досить вагомий висновок, а саме, що надлишковий матеріал руйнується у три основних способи. Визначено елементарні способи руйнації речовини та відповідні їм рухи інструменту, тобто: лінійна руйнація; кільцева руйнація; руйнація у формі диску. Процес негативного технологічного процесу відбувається за умови, що твердість інструмента та його динамічні властивості перевищують аналогічні параметри матеріалу деталі. При цьому панданний об'єм зруйнованого матеріалу значно більший за об'єм зруйнованої частини матеріалу заготовки деталі. Відбувається це внаслідок значного зростання шорсткості окремих часточок зруйнованого матеріалу. Для проведення аналітичного дослідження ми приймаємо низку умов, які відкидають вторинні ознаки. Проведено моделювання взаємного руху різального інструмента і деталі при контурному фрезеруванні. Створені формалізовані моделі контурної фрезерної обробки надають опис фантомного руху інструменту та заготовки під час виготовлення деталі.

Висновки. Розглянуто ідеалізовані формалізовані моделі руху технологічних об'єктів під час контурного фрезерування. Ці моделі надають можливість дослідити основні засади причин утворення похибок, оскільки являють собою ідеалізовані траєкторії відносно реальних технологічних операцій. Попри ці дослідження контурного руху інструмента існують явища, які супроводжують металообробку, як супутні, і яким теж необхідно приділяти увагу. Таким супроводжуючим явищем є панданна зона різального інструменту. Подальшими необхідними дослідженнями є створення моделей руху цієї панданної зони в просторі деталі, що надає можливості вдосконалення траєкторії контурного руху різального інструмента, а таким чином підвищення точності виготовлення прецизійних деталей.

Ключові слова: траєкторії руху об'єктів; контурне фрезерування; фантомний рух; негативні технології.

Вступ

Аналізуючи стан сучасної обробки металів [1 - 4], виникає необхідність створення аналітичного апарату, який досить точно забезпечує супутній опис технологічних процесів обробки різанням, до яких, наприклад, можна віднести визначення траєкторії руху різального інструмента, деталі або заготовки у робочому просторі технологічного обробного обладнання.

При розгляді цих теоретичних засад можна виділити наступні основні напрямки стосовно фізики металообробки. По-перше, це режими різання матеріалів, коли для умов обробки кожного матеріалу розробляється низка рекомендацій стосовно режимів обробки. У зв'язку з цим існує значний розвиток матеріалознавства як науки, що може сприяти створенню матеріалів із попередньо заданими параметрами. Як наслідок, значний розвиток теорії

різання металів викликала теоретичне обґрунтування геометрії інструменту, а також пов'язаного з цим зносу різального леза та впливу цього явища на геометрію деталі як чиннику формотворення поверхні. Водночас, існує проблема стружкоутворення, яка вирішується окремо. Все це тісно пов'язане з розподілом сил різання, які виникають у процесі обробки. Різання як фізичний процес є екзотермічним, розгляду особливостей якого присвячується низка науково-практичних робіт [3, 4, 5]. Ще одним супутнім явищем в обробці металів є вібрації, які мають значний вплив на точність виготовлення деталі, тобто на можливість геометричних спотворень поверхні об'єкта [2, 5, 6]. Отже, врахування реальних координат траєкторій руху об'єктів технологічного процесу механічної обробки металів надає можливості підвищення точності обробки деталі.

Постановка задачі

Необхідно відмітити, що всі ці процеси мають цілу низку піднапрямків досліджень, які є наслідком того, що кожний спосіб обробки металів вимагає свого особливого розгляду. Тим не менш, аналізуючи весь перелік проблем, пов'язаних з аналітичним описом процесу механічної обробки металів, необхідно помітити деяку односторонність вирішення задач металообробки. Таким чином, ми маємо цілу низку теоретичних засад металообробки, але не маємо зразка, відносно якого можемо визначати якість розрахунку тої чи іншої технологічної операції. Особливо це стосується руху інструменту в робочому просторі виготовлення деталі. Отже, ми вирішуємо задачу руху твердого тіла (інструмента) у твердому тілі (деталі), тобто маємо типово негативну технологію. Процес негативної технології відбувається зі знищенням надлишкового матеріалу аж до поверхні деталі [7]. У цьому випадку розглядається саме процес обробки поверхні деталі за повної відсутності концепції руху інструмента в просторі технологічного обладнання. Здебільшого надається розмір від одної величини і до іншої. Загальної концепції, яка б надавала рекомендації

щодо виконання тієї чи іншої траєкторії руху інструмента, не існує.

Наразі існують дослідження стосовно окремих технологічних задач таких, наприклад, як фрезерні «кишені» та «колодязя» на площині деталі [8].

Задача побудови траєкторії руху інструменту на верстатах з ЧПК відноситься до найбільш складних задач металообробки, оскільки велика кількість часткових технологічних задач вимагає створення складних аналітичних моделей. Для цього виведено поняття елементарного технологічного переходу як безперервного процесу обробки одної елементарної поверхні заготовки (деталі) одним інструментом.

Таким чином, для фрезерної обробки вводиться низка понятійних траєкторій, які вважаються нормалізованими, наприклад:

- Архімедові спіраль з проходами, які еквідистантні контуру бажаної площини і мають праву та ліву модифікацію (спіраль та антиспіраль);
- Стрічкова спіраль із проходами, еквідистантними виступам, і має чотири різновиди;
- Стрічкова спіраль із проходами, нееквідистантними контуру площини за умови построгового переміщення;
- Складна траєкторія, коли її форма є комбінацією попередніх траєкторій.

Все це стосується технологічних операцій фрезерування. В той час, як технологічні операції точіння практично не згадуються, не кажучи вже про свердлування, розгортання тощо. Траєкторії точіння, свердлування тощо, попри свою простоту, теж є траєкторіями руху інструменту, які потребують відповідного математичного забезпечення.

Отже, оскільки всі інструменти мають свою панданну зону, то у траєкторіях руху завжди враховується це явище у вигляді еквідистанти.

Аналізуючи всі види металообробки, можна зробити один досить вагомий висновок, а саме, що надлишковий матеріал руйнується у три основних способи (рис. 1).

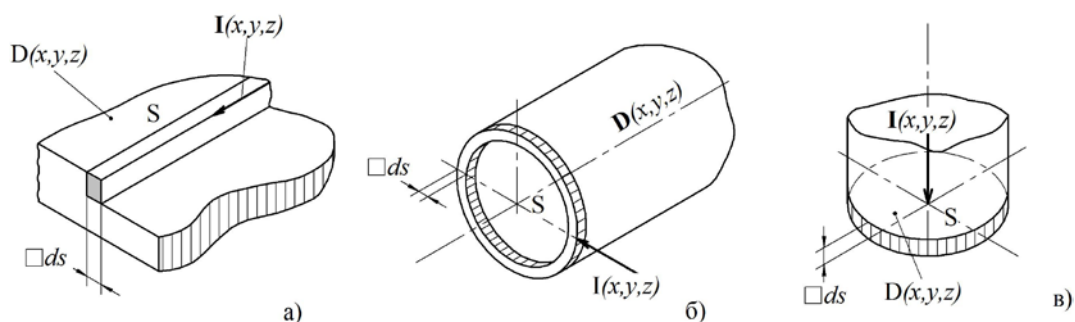


Рис. 1. Елементарні способи руйнації речовини та відповідні їм рухи інструменту, де: а) лінійна руйнація; б) кільцева руйнація; в) руйнація у формі диску

За першого способу це звичайний лінійний рух інструменту (рис. 1, а). Такий рух є характерним для технологічних операцій додання, стругання, фрезерування тощо.

За другого способу це є кільцевий від'єм матеріалу, характерний для точіння (рис. 1, б). У третій спосіб від'єм матеріалу відбувається у вигляді диску, що характерно для свердлування (рис. 1, в). Таким чином, необхідним є створення аналітичного підґрунтя визначення траєкторії руху різального інструмента в робочому просторі технологічного обладнання за умови механічного руйнування матеріалу заготовки. Величина об'єму зруйнованого матеріалу за закінченням технологічним процесом може розподілятися на три основні векторні величини, які пов'язані з рухом інструментом у технологічному просторі.

Підґрунтя класичних способів руху інструмента

У випадку металообробки ми маємо типовий випадок руху твердого тіла (інструмент) у масі іншого твердого тіла (деталь), тобто негативну технологію [5, 7, 9, 10]. Наслідком такого руху є руйнування певного об'єму твердого матеріалу (деталь) з метою отримання необхідної геометрії, тобто форми об'єму. Процес такого руйнування відбувається за умови, що твердість інструмента та його динамічні властивості перевищують аналогічні параметри матеріалу деталі. У наслідок такого технологічного процесу утворюється зруйнований матеріал деталі у вигляді стружки різної форми. При цьому панданий об'єм зруйнованого матеріалу значно більший за об'єм зруйнованої частини матеріалу заготовки деталі. Відбувається це внаслідок значного зростання шорсткості окремих часточок зруйнованого матеріалу. Для проведення досконального дослідження ми приймаємо низку умов, які відкидають вторинні ознаки.

Водночас, форма матеріалу заготовки (деталі) розглядається як абстрактне скалярне поле $D(x, y, z)$ визначеної конфігурації, яка відповідає формам класичної геометрії деталі (вісь, паралелепіпед, отвір тощо). Відповідно це скалярне поле можна уявити як векторне $\mathbf{D}(x, y, z)$, пристайне до скалярного [11, 12].

Аналогічно функція $I(x, y, z)$, що характеризує траєкторію руху інструмента, розглядається в одному випадку як скалярна, а в другому, як векторна $\mathbf{I}(x, y, z)$. У кожному випадку ми маємо елементарний об'єм dQ заготовки, який руйнується, та є часткою загального об'єму $Q(x, y, z)$, що підлягає руйнуванню.

Безпосередньо з цим об'ємом пов'язана маса $M(x, y, z)$ та густина $\rho(x, y, z)$ матеріалу

заготовки деталі. Тобто ми маємо загальний об'єм деталі, який утворюється внаслідок різниці скалярних функцій повного об'єму $Q(\Sigma)$ та об'єму $Q(x, y, z)$, тобто

$$Q(\Sigma) - Q(x, y, z) = D(x, y, z), \quad (1)$$

де скалярна функція $D(x, y, z)$ є кінцевим результатом між функцією повного об'єму $Q(\Sigma)$ та функцією $Q(x, y, z)$ при їх взаємодії.

Враховуємо, що між об'ємом та поверхнею існує залежність у вигляді

$$dQ = dx dy dz,$$

де dx, dy, dz - елементарні розміри за трьома координатами x, y, z ,

а елементарна площинка ds за кожною координатою визначається тоді, як

$$\begin{aligned} ds_1 &= dx dy \\ ds_2 &= dy dz \\ ds_3 &= dx dz \end{aligned} \quad (2)$$

Отже, як наслідок між елементарним об'ємом та елементарними площинками існує зв'язок через третю координату, тобто [11, 12, 13]

$$\begin{aligned} \frac{dQ}{ds_1} &= dz, \\ \frac{dQ}{ds_2} &= dx, \\ \frac{dQ}{ds_3} &= dy. \end{aligned} \quad (3)$$

Тобто за кожною координатою маємо відповідні співвідношення

$$dQ = dz ds_1; \quad dQ = dx ds_2; \quad dQ = dy ds_3. \quad (4)$$

Таким чином, якби ми не знищували залишковий матеріал заготовки, елемент руйнування можна було б визначити за площиною перерізу та величиною подовження за визначеною координатою. Отже, можна дійти висновку, що в будь-яких випадках існує площина руйнування ds та подовження dx, dy , а також dz .

У загальному вигляді всі види руйнувань у металообробці можна змоделювати у вигляді просторової лінії з перерізом ds . Отже, така просторова траєкторія може бути описана за допомогою звичайної математичної залежності [13]

$$L = \int_{t_0}^t dl, \quad (5)$$

де t_0 та t є значення незалежного параметра у крайніх точках траєкторії.

Величина dl визначиться як

$$dl = \sqrt{[\dot{x}(t)]^2 + [\dot{y}(t)]^2 + [\dot{z}(t)]^2} = \sqrt{\left(\frac{d\mathbf{r}}{dt}\right)^2} dt = \left|\frac{d\mathbf{r}}{dt}\right| dt = |d\mathbf{r}|, \quad (6)$$

\mathbf{r} - радіус-вектор руху інструмента.

Залежності (5) та (6) є дуже складними щодо виконання, навіть для верстатів з CNC. Тому ці вирази використовуються виключно для криволінійних гвинтових траєкторій, коли виготовляються поверхні лопатей турбін тощо.

Заради спрощення технологічних проблем конструкцію деталі виконують з максимальною кількістю плоских фрезерувань. У такому разі вираз (6) приймає вигляд

$$dl = \sqrt{dx^2 + dy^2} = \sqrt{1 + y'(x)} dx, \quad (7)$$

для кривої у полярних координатах

$$l = \int_{\phi_1}^{\phi_2} dl = \int_{\phi_1}^{\phi_2} \sqrt{\rho^2 + \dot{\rho}^2} d\phi \quad (8)$$

при

$$dl = \sqrt{\rho^2 + \dot{\rho}^2} d\phi. \quad (9)$$

Для прямолінійних траєкторій використовується звичайна залежність для опису прямої лінії, яка є результатом спрощення виразів (5), (6), (7), (8), (9), тобто

$$y = kx + b. \quad (10)$$

Якщо розглядати рух інструменту за цими траєкторіями, то необхідно враховувати, що вектори інструментального руху та векторного поля деталі взаємодіють під кутом, яки

Моделювання взаємного руху різального інструмента і деталі при контурному фрезеруванні

Отже, якщо вираз (5) розглядати, як опис однієї із загальної кількості ділянок (рис. 2), то маємо можливість перейти до інтегральної суми

$$\lim_{AB \rightarrow 1} \sum_{AB=1}^n I_x(x_{AB}, y_{AB}) \Delta x_{AB} + I_y(x_{AB}, y_{AB}) \Delta y_{AB} = \int_L I_x(x, y) dx + I_y(x, y) dy, \quad (11)$$

де I_x , I_y – проєкції інструментального вектора на координати руху інструмента.

Таким чином, ми отримали криволінійний інтеграл за траєкторією руху інструменту.

Цей криволінійний інтеграл можна перетворити у звичайний, якщо уявити $x = x(t)$, $y = y(t)$. У такому випадку отриманий інтеграл обчислюється за інтервалом зміни t :

$$\int_L I_x(x, y) dx + I_y(x, y) dy = \int_t^t [I_x[x(t), y(t)] x'(t) + I_y[x(t), y(t)] y'(t)] dt. \quad (12)$$

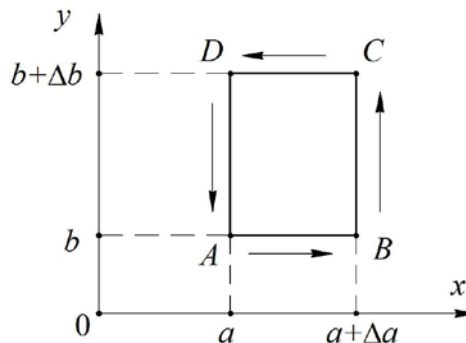


Рис.2. Параметри контуру фрезерування

Користуючись вище означеними тезами, розглянемо рух інструменту при контурному фрезеруванні (рис. 1).

Отже, визначити довжину шляху радіального інструменту, дотримуючись правил інтегрування, можна наступним чином:

$$\begin{aligned} \int I_x dx + I_y dy &= \int_0^{\Delta a} I_x(a+t, b) dt + \int_0^{\Delta b} I_y(a+\Delta a, b+t) dt - \\ &- \int_0^{\Delta a} I_x(a+t, b+\Delta b) dt - \int_0^{\Delta b} I_y(a, b+t) dt = \\ &= - \int_0^{\Delta a} [I_x(a+t, b+\Delta b) - I_x(a+t, b)] dt + \\ &+ \int_0^{\Delta b} [I_y(a+\Delta a, b+t) - I_y(a, b+t)] dt \end{aligned} \quad (13)$$

Застосовуючи теорему Лагранжа про середнє та виконавши низку перетворень, отримуємо наступний результат

$$\int_L I_x dx + I_y dy = \iint_S \left(\frac{\partial I_y}{\partial x} - \frac{\partial I_x}{\partial y} \right) dx dy. \quad (14)$$

Отриманий вираз (14) є непевним з тієї причини, що у загальному випадку точна величина криволінійного інтегралу не зберігається, коли головна умова інтегрування $\frac{\partial I_x}{\partial y} = \frac{\partial I_y}{\partial x}$ не

виконується. Тим не менш, існує доказ рівняння (14) у [13, 14], який доводить, що за певних припущень це цілком можливо, тобто це є застосування методики М.В. Остроградського [14]. Вираз (14) має назву формули Гріна і є частковим випадком формули Стокса.

Отже, якщо методика М.В. Остроградського доводить, що в ідеальних математичних умовах рівняння (14) виконується, то за реальних умов воно не може бути виконане, тобто

$$\frac{\partial I_x}{\partial y} \neq \frac{\partial I_y}{\partial x}, \text{ але } \frac{\partial I_x}{\partial y} = \frac{\partial I_y}{\partial x} = [S]. \quad (15)$$

Таким чином, при реальних рухах ця умова наближається до $gradD(x, y)$, який є залежним від градієнта руху інструмента.

Як наслідок взаємодії двох градієнтів руху технологічних об'єктів отримуємо функцію похибки фрезерування

$$\begin{aligned} \text{rot}[gradD(x, y) \times gradI] &= \\ &= gradD(x, y) \cdot \Delta I - gradI \cdot \Delta D + \frac{dVD}{dVI} - \frac{dVI}{dVD}, \end{aligned} \quad (16)$$

де Δ - оператор Лапласа, ∇ - векторний оператор Гамільтона.

Якщо провести низку спрощень, то є можливість довести, що вираз (16) приблизно дорівнює сумі градієнтів, тобто

$$\text{rot}[gradD(x, y) \times gradI] = gradD(x, y) + gradI. \quad (17)$$

Отже, вищерозглянуті моделі є формалізованими моделями контурної фрезерної обробки, які надають опис фантомного руху інструменту та заготовки під час виготовлення деталі. У реальності цей рух виконується з низкою похибок, які призводять до похибок формотворення поверхні деталі.

Висновки

Розглянуто ідеалізовані формалізовані моделі руху технологічних об'єктів під час контурного фрезерування. Ці моделі надають можливість дослідити основні засади причин утворення похибок, оскільки являють собою ідеалізовані траєкторії відносно реальних технологічних операцій. Попри ці дослідження контурного руху інструмента існують явища, які супроводжують металообробку, як супутні, і яким теж необхідно приділяти увагу. Таким супроводжуючим явищем є панданна зона різального інструменту [15].

Подальшими необхідними дослідженнями є створення моделей руху цієї панданної зони в просторі деталі, що надає можливості вдосконалення траєкторії контурного руху різального інструмента, а таким чином підвищення точності виготовлення прецизійних деталей.

Література

- [1] Andrzej Wiczorek, Rafal Burdzik, Piotr Folega and Lukasz Konieczny, "Modern trends in diagnostics of technical condition of material handling equipment drives", *Journal of Measurements in Engineering*, Vol. 1, Issue 3, pp. 143-147, 2013.
- [2] С.А. Зелинский, Ю.А. Морозов, Ю.А. Серебряный, "Математическая модель процесса контурного фрезерования нежестких деталей", *Праці Одеського політехнічного університету*, Вип. 1(45), с. 28-33, 2015.
- [3] Farbod Akhavan, Niaki Laine Mears, "A comprehensive study on the effects of tool wear on surface roughness, dimensional integrity and residual stress in turning IN718 hard-to-machine alloy", *Journal of Manufacturing Processes*, Vol.

- 30, (December 2017), pp. 268-280. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.09.016>
- [4] E. J. A. Armarego, R. H. Brown. *The machining of metals*. Prentice-Hall, Technology & Engineering, 437 pages, 1969.
- [5] Г.С. Тимчик, В.І. Скицюк, М.А. Вайнтрауб, Т.Р. Клочко. *Засоби контролю процесів механообробки надточних деталей*. Київ: НТУУ «КПІ», 2011. 516 с.
- [6] D. R. Koehler, "Geometric-distortions and physical structure modeling", *Indian J. Phys.*, 87: 1029, 2013. DOI:10.1007/s12648-013-0321-5.
- [7] Тимчик Г.С., Скицюк В.І., Клочко Т.Р. *Теорія біотехнічних об'єктів. Том 1. Узагальнені властивості біотехнічного об'єкта*. Київ: НТУУ"КПІ", ВПК "Політехніка", 2016. 274 с., іл.
- [8] Р.Э. Сафраган, А.Э. Полонский, Г.Э. Таурит. *Эксплуатация станков с числовым программным управлением*. Киев, Украина: Техніка, 1974. 308 с.
- [9] Скицюк В.І., Клочко Т.Р., "Визначення координати уявно-реальної поверхні межової панданної зони об'єкта. Частина 1", *Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування*, Вип. 53(1), pp. 49-56, 2017.
- [10] Скицюк В.І., Клочко Т.Р., "Вплив технологічного фантому точності виготовлення деталей у приладобудуванні", *Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування*, Вип. 53(1), pp. 69-77, 2017.
- [11] И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. *Справочник по математике*. Москва: Наука, 1967. 608 с.
- [12] Andre Angot. *COMPLEMENTS DE MATHEMATIQUES à l'usage des ingénieurs de l'électrotechnique et des télécommunications*, Paris, 778, 1957.
- [13] Granino A. Korn, Theresa M. Korn. *Mathematical Handbook for Scientists and Engineers: Definitions, Theorems, and Formulas for Reference and Review (Dover Civil and Mechanical Engineering)*. 2 Revised Edition, 1152, 2000.
- [14] В.Грэнвиль и Н. Лузин. *Курс дифференциального и интегрального исчисления. Часть 1. Дифференциальное исчисление*, изд. 5-е. Москва-Ленинград : Объединенное научно-техн. изд-во НКТП СССР, Главн. Ред. Техн.-теорет. лит.-ры, 1937, 408 с.
- [15] Тимчик Г.С., Скицюк В.І., Клочко Т.Р. *Теорія біотехнічних об'єктів. Том 2. Динаміка польових взаємодій об'єктів*. Київ: ТОВ «Інтердрук», 2017. 224 с., іл.

УДК 621.914.1

В.И. Скицюк, Т.Р. Клочко*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина***АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА КОНТУРНОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ**

Введение. В статье речь идет об актуальной проблеме, которая возникает при механической обработке металлов, то есть создания аналитического сопутствующего описания технологических процессов обработки резанием. Рассмотрено влияние основных направлений физики металлообработки на точность изготовления прецизионных деталей приборов. Анализируя весь перечень проблем, связанных с аналитическим описанием процесса механической обработки металлов, необходимо определить ряд теоретических основ металлообработки. Итак, доказано, что учет реальных координат траекторий движения объектов технологического процесса механической обработки металлов предоставляет возможности повышения точности обработки детали.

Основная часть. Предложено решение задачи движения твердого тела (инструмента) в твердом теле (детали), то есть имеем типично негативную технологию. Процесс негативной технологии происходит с уничтожением избыточного материала до поверхности детали. Для фрезерной обработки вводится ряд понятийных траекторий, которые считаются нормализованными. Поскольку все инструменты и детали или заготовки имеют свою панданну зону, то в траекториях движения объектов всегда учитывается это явление в виде эквидистанты. Анализируя все виды металлообработки, можно сделать один достаточно весомый вывод, а именно, что избыточный материал разрушается тремя основными способами. Определены элементарные способы разрушения вещества и соответствующие им движения инструмента, то есть: линейное разрушение; кольцевое разрушение; разрушение в форме диска. Процесс негативного технологического процесса происходит при условии, что твердость инструмента и его динамические свойства превышают аналогичные параметры материала детали. При этом панданный объем разрушенного материала значительно больше объема разрушенной части материала заготовки детали. Происходит это вследствие значительного роста шероховатости отдельных частиц разрушенного материала. Для проведения аналитического исследования мы принимаем ряд условий, которые отвергают вторичные признаки. Проведено моделирование взаимного движения режущего инструмента и детали при контурной фрезеровании. Созданные формализованные модели контурной фрезерной обработки предоставляют описание фантомного движения инструмента и заготовки при изготовлении детали.

Выводы. Рассмотрены идеализированные формализованные модели движения технологических объектов во время контурного фрезерования. Эти модели дают возможность исследовать основные принципы причин образования погрешностей, поскольку представляют собой идеализированные траектории относительно реальных технологических операций. Несмотря на эти исследования контурного движения инструмента, существуют явления, которые сопровождают металлообработку, как сопутствующие, и которым тоже необходимо уделять внимание. Таким сопровождающим явлением является панданна зона режущего инструмента. Последующими необходимыми исследованиями является создание моделей движения этой панданной зоны в пространстве детали, что дает возможность совершенствования траектории контурного движения режущего инструмента, а таким образом повышения точности изготовления прецизионных деталей.

Ключевые слова: траектории движения объектов, контурное фрезерование, фантомное движение, отрицательные технологии.

V.I. Skytsiouk, T. R. Klotchko*National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine***ANALYTICAL MODEL OF OBJECT'S MOVEMENT AT TECHNOLOGICAL PROCESS OF CONTOUR MILLING METALS**

Introduction. The article deals with the actual problem that arises in the machining of metals, that is, the creation of an analytical accompanying description of technological processes of cutting. The influence of basic directions of metalworking physics on the precision of manufacturing precision parts of devices is considered. After analyzing the whole list of problems related to the analytical description of the metal machining process, it is necessary to determine a number of theoretical foundations of metalworking. Thus, it is proved that taking into account the real coordinates of the trajectories of the objects of the technological process of metal machining gives the possibility of improving the accuracy of machining of the workpiece.

Main part. We solve the problem of motion of a solid body (tool) in a solid body (parts), that is, we have a typically negative technology. The process of negative technology is the destruction of excess material down to the surface of the workpiece. For milling processing, a number of conceptual trajectories are introduced, which are considered

normalized. Since all tools and parts or workpieces have their own pandanic zone, the phenomenon of equidistance is always taken into account in the trajectories of object movement.

Analyzing all types of metalworking, one can draw a fairly strong conclusion, namely that the excess material is destroyed in three main ways. The elementary methods of a substance destruction and the corresponding movements of the instrument are determined, that is: linear destruction; annular destruction; disk-shaped destruction. The negative technological process is carried out on condition that the hardness of the tool and its dynamic properties exceed the similar parameters of the workpiece material. In this case, the pandal volume of the destroyed material is much greater than the volume of the destroyed part of the workpiece material. This is due to the significant increase in the roughness of the individual particles of the destroyed material. For analytical research, we accept a number of conditions that reject secondary attributes. The simulation of the reciprocal movement of the cutting tool and the details of contour milling are performed. The formalized models of contour milling machining created describe the phantom movement of the tool and the workpiece during the manufacture of the workpiece.

Conclusions. Idealized formalized motion models of technological objects during contour milling are considered. These models provide an opportunity to investigate the underlying causes of error generation as they represent idealized trajectories with respect to actual technological operations. Despite these studies of tool contouring, there are phenomena that accompany metalworking as concomitant and also need attention. This is pandanic area of cutting tool. Further necessary research is the creation of models of motion of this pandan zone in the space of the workpiece, which gives the opportunity to improve the trajectory of the contour movement of the cutting tool, and thus increase the precision of manufacturing precision parts.

Keywords: object trajectories, contour milling, phantom motion, negative technologies.

*Надійшла до редакції
11 жовтня 2019 року*

*Рецензовано
29 жовтня 2019 року*