

DOI: 10.20535/1810-0546.2018.6.143490

УДК 621:620.179.14

Г.С. Тимчик, В.І. Скицюк, Т.Р. Клочко*

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

ЧИННИКИ МІКРОДРЕЙФУ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ ПРИ МЕХАНІЧНІЙ ОБРОБЦІ

Проблематика. У статті йдеться про актуальну проблему дослідження чинників втрати точності виготовлення точних деталей механічною обробкою в умовах серійного та масового виробництва, зокрема виникнення мікродрейфу поверхні деталі при обробці, що призводить до втрати функції контролю точності параметрів формотворення.

Мета дослідження. Метою роботи є створення аналітичного підґрунтя контролю розмірів під час виготовлення партії деталей, що є основою для рекомендацій щодо подальшої розробки контрольно-вимірювальних приладів для роботи в умовах серійного та масового виробництва.

Методика реалізації. Запропоновано модель зміни параметрів технологічного процесу (на прикладі токарної обробки), що можна розглядати як окремо взятую дискрету з окремо взятою деталлю. Показано, що геометричні розміри мають паралельний перенос у часі з деталі на деталь. Такий підхід дає змогу розглядати окремо взятую дискрету відносно i -ї деталі як закінчену визначену функцію для окремого дослідження.

Результати дослідження. Доведено, що за такого розгляду процесу враховано основні складові, які впливають на утворення необхідного розміру. Розглянуто складові, які вносять похибки в отримання розміру деталі. Визначено модель виникнення температурного дрейфу поверхні деталі та впливу на точність відпрацювання координати поверхні.

Висновки. Запропоновано модель врахування мікродрейфу поверхні деталі, який виникає внаслідок розходження абсолютних і локальних координат об'єкта. Подальші дослідження повинні бути спрямовані на виявлення конструктивних особливостей вимірювальних перетворювачів, що дають змогу також враховувати наявність мікродрейфу поверхні технологічного об'єкта. Таким чином, будуть обґрунтовані принципи побудови основних типів конструкції вимірювальних головок з урахуванням розміщення об'єктів технологічного процесу в робочому просторі металообробного верстата при вимірюванні фізичних властивостей окремих визначених локальних ділянок поверхні заготовки (або готової деталі).

Ключові слова: мікродрейф; механічна обробка; поверхня деталі; температурний дрейф; серійне виробництво.

Вступ

Сучасне серійне та масове виробництво прецизійних деталей механічною обробкою на автоматизованому технологічному обладнанні має низку проблем, пов'язаних із підтримкою високої якості формотворення поверхні цих деталей [1], вимірювання розмірів об'єктів технологічного процесу [2]. Наразі ці проблеми досліджені, наприклад, у [3, 4, 5] з урахуванням особливостей проведення процесу лезової обробки матеріалів, зокрема впливу зносу різального інструмента на якість поверхні деталей. Проте не досліджено певні чинники, внаслідок яких виникає мікродрейф поверхні деталі при обробці, що призводить до втрати функції контролю точності параметрів формотворення.

Постановка задачі

Метою роботи є створення аналітичного підґрунтя контролю розмірів під час виготов-

лення партії деталей, яке є основою для рекомендацій щодо розробки контрольно-вимірювальних приладів для роботи в умовах серійного та масового виробництва.

Методика дослідження похибки формотворення технологічного об'єкта

У попередніх роботах [6, 7] розглядалися процеси утворення реальних розмірів у технологічних процесах виготовлення деталей на CNC-верстатах. Наразі такі процеси стосуються не лише простих лінійних розмірів, а й більш складних функцій уявного характеру. Проте перш ніж розглядати складні функціональні перетворення, варто розглянути елементарне підґрунтя, тобто низки фундаментальних складових за різних технологічних процесів. Суть проблеми полягає в тому, що, маючи ідеальну функцію, перетворення уявного фантома деталі на реальний об'єкт має низку перешкод. За своєю сутністю ці перешкоди є наслідком

* corresponding author: t.klochko@kpi.ua

похибок виконання окремих елементів формотворення (наприклад, деталі металообробного верстата). Всі ці похибки формотворення технологічного об'єкта мають векторний характер, а результатом їх суми є векторна сума (просторова), а не алгебрична, як це використовують зазвичай у виробничій практиці. Принцип векторного підрахунку є добре відомим як алгебричний, але проблема полягає в тому, що підрахунок векторних сум є досить складною задачею. До того ж початок кожного наступного вектора є закінченням попереднього. Як результат, все це призводить до утворення низки векторних матриць, визначення добутку яких є вкрай складною математичною задачею. Тому для спрощення процесу визначення похибки реалізації скористаємося найпростішою технологічною операцією, коли початки відліку всіх векторів збігаються.

Так, у [7] було показано, що технологічні процеси можна розглядати як низку векторів, які в кінцевому випадку утворюють цілком монотонну функцію, що складається з окремих ділянок лінійних функцій. Наразі звичайний технологічний процес отримання визначеного розміру для певної деталі є детермінованим у часі. Водночас геометричні розміри мають паралельний перенос у часі з деталі на деталь. У такому випадку зміну параметрів технологічного процесу можна розглядати як окремо взятую дискрету з окремо взятою деталлю. Такий підхід дає змогу розглядати окремо взятую дискрету відносно i -ї деталі як закінчену визначену функ-

цію для окремого дослідження (див. наведений у наступному розділі рис. 1) [8].

Моделювання процесу дрейфу координати поверхні об'єкта

Для дослідження беремо токарну обробку як один із простих і найбільш застосовуваних технологічних процесів. При цьому плинні діаметри послідовності з n деталей утворюють детерміновану криву (рис. 1, *a*). Час, який витрачено на виготовлення деталей, визначається простим сумуванням величин як Δt_i , а відстань, яку проходить різальний інструмент, становить Δx_i . Фіктивний час очікування у технологічних циклах не враховуємо, оскільки він не впливає на кінцевий результат при визначенні діаметра $L(R)_i$. Таким чином, ми маємо можливість визначитися з повним часом роботи інструмента при виготовленні партії деталей з урахуванням його часу стійкості, тобто

$$T_n = nt_i \text{ і } X_{\text{ін}} = n\Delta x_i. \quad (1)$$

В (1) необхідно мати на увазі той факт, що вирази враховують лише тільки шлях і час, коли інструмент знаходився у стані обробки конкретної деталі, і зовсім не враховують шляху та часу, необхідних на переходи, базування тощо. У такому випадку залежності (1) можна використовувати як базу до утворення часових і шляхових координат [8].

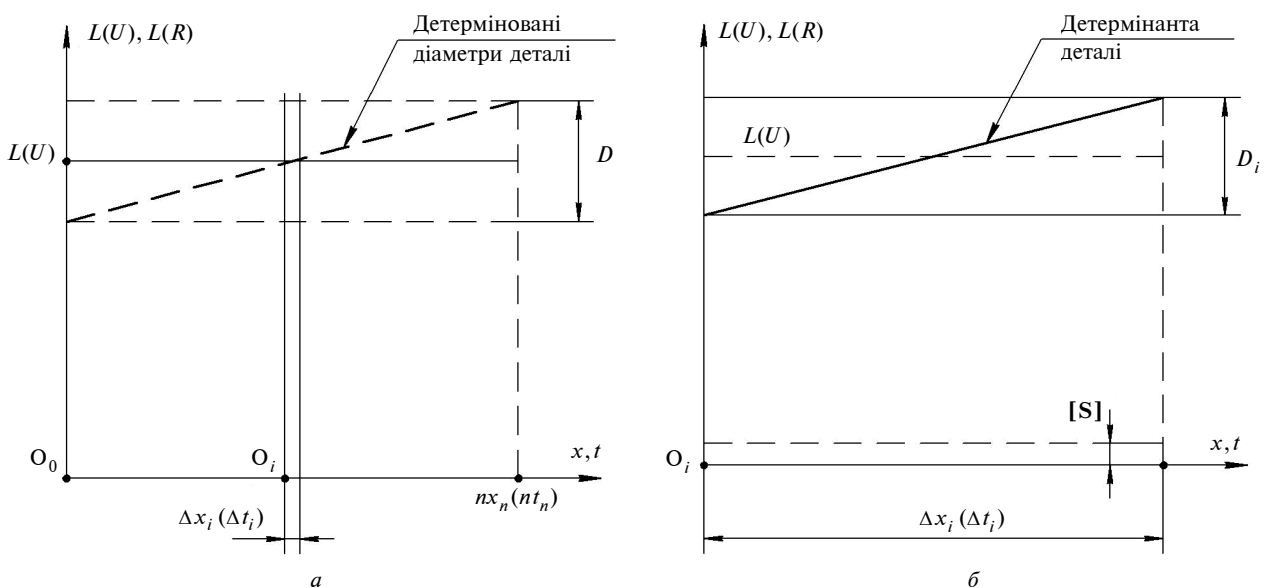


Рис. 1. Діаграма зміни розмірів послідовності деталей: *a* – загальний процес, *б* – виокремлена детермінанта деталі

Зміна плинного розміру деталі (діаметра) $L(R)_i$ відбувається в межах дуальності D відносно уявного розміру $L(U)_i$, тобто технологічного фантома (ТФ) (див. рис. 1, а).

Дослідимо окремих фрагмент загальної функції зміни розміру на окремо визначеній i -й деталі.

Отже, за такого розгляду процесу маємо врахувати основні складові, які впливають на утворення необхідного розміру (рис. 2). Наразі ми маємо кілька таких складових у реальній системі координат.

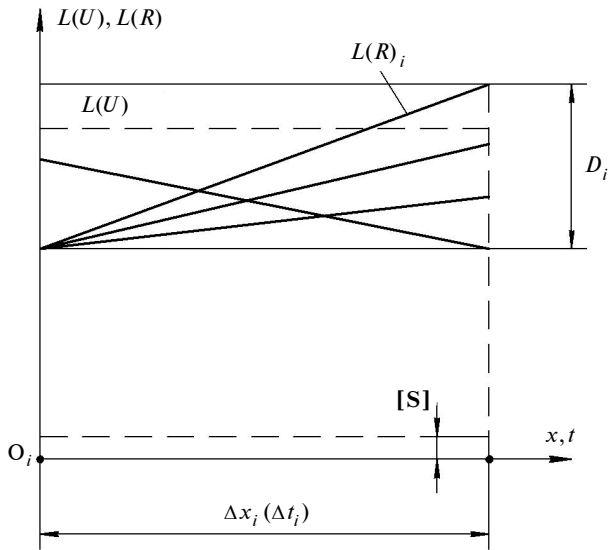


Рис. 2. Діаграма утворення реального розміру $L(R)_i$ на засадах уявного розміру $L(U)_i$ для окремо взятої деталі

Першою складовою, яка заважає досягти величини $L(U)$, є невизначеність початку координати відліку. Ця невизначеність має величину $[S]$ і при виконанні умови

$$\lim_{[S] \rightarrow 0} L(R) - [S] \rightarrow L(U)$$

може бути засобом реальної оцінки якості виробництва. Але річ у тім, що як би ми не вибирали метод вимірювання, величина $[S]$ завжди наявна за будь-яких засобів щодо отримання високоякісного результату. Як наслідок, ми маємо можливість отримати точну геометрію деталі, але в межах величини $[S]$. Водночас невизначеність діаметра деталі на шляху різання Δx_i теж становить не більше за величину $[S]$. Ця ситуація для металообробки є ідеальною, проте на заводі стають інші процеси, які

вносять свої похибки. Насамперед це розмірний знос інструмента.

Отже, другою складовою, яка вносить похибку в отримання розміру $L(U)$, є розмірний знос інструмента h_ξ (рис. 2). Особливістю цієї похибки є те, що вона рівномірно зростає від нуля до повної руйнації робочої частини інструмента (в сучасних технологічних процесах виготовлення точних деталей ця величина покладається від 0,3 до 0,5 мм). Якщо розглядати загальний процес виробництва партії деталей (рис. 1, а), то детерміновані діаметри деталей дають уявлення про процес зносу без урахування інших похибок. На окремо визначеній деталі цей процес можна вважати лінійним, як це відображено на рис. 2. У металообробці прийнято використовувати, крім прямого параметра зносу h_ξ [1], ще два: стійкість інструмента залежно від часу роботи $h_\xi(t)$ та від довжини треку різання, тобто

$$h_\xi(t_i) = \frac{L(R)_{\max} - L(R)_{\min}}{\Delta t_i}$$

$$\text{і } h_\xi(\Delta X_i) = \frac{L(R)_{\max} - L(R)_{\min}}{\Delta x_i}.$$

Отже, ці параметри мають однозначний зв'язок із параметрами за виразами (1).

За такого випадку розмірний знос інструмента визначається як

$$h_\xi = h_\xi(t_i) \cdot t \text{ або } h_\xi = h_\xi(\Delta x_i) \cdot x.$$

Необхідно зауважити, що в металообробці більш вживаним є перший параметр зносу, тобто залежний від часу і який досить часто у загальному інтегральному підсумку розглядається як період стійкості. На визначеній ділянці деталі (Δx_i) знос можна вважати лінійною функцією, що визначається за виразом

$$h_\xi = h_\xi(t_{i-1}) + k_{\xi,t} \cdot t$$

або

$$h_\xi = h_\xi(\Delta x_{i-1}) + k_{\xi,x} \cdot x,$$

де $h_\xi(t_{i-1})$ та $h_\xi(\Delta x_{i-1})$ – значення зносу після попередньої деталі ($i-1$), t – плинний час, який змінюється в межах $0 \leq t \leq t_i$, X – плинна координата інструмента в межах $0 \leq x \leq \Delta x_i$.

За своєю сутністю знос інструмента діє таким чином, що необхідний нам розмір збільшується на визначеній відстані й у межах окремої деталі підкорюється закономірності $y = kx$. Водночас слід зауважити, що відхилення від траєкторії зносу на відстані Δx_i не повинно перевищувати **[S]**. Наразі величина Δx_i може бути значно більшою і не задовольняти цю умову. У граничному випадку вона може сягати величини **D**, тобто

$$\lim_{\Delta x_i \rightarrow n\Delta x_i} \mathbf{D}_i = \mathbf{D}. \quad (2)$$

Особливістю такої ситуації є те, що, на відміну від звичайного випадку (див. рис. 2), коли траєкторія зносу перетинає рівень $L(U) + \mathbf{[S]}$ один раз, при виконанні умови (2) вона може перетинати цей рівень двічі.

Друга похибка, яка виникає за процесу точіння, обумовлена деформаціями в обробній технологічній системі (ОТС), отже, це є деформації як деталі, так і ОТС під дією сил різання. Водночас необхідно зауважити, що конструкція ОТС передбачає певні деформації у межах точності всієї системи в цілому [9]. За конструювання верстатів вважається, що деформується деталь, а потім верстат. Тобто величина деформації верстата буде набагато менша, ніж деталі за однакових навантажень. Токарна обробка є вельми специфічним технологічним процесом, оскільки передбачає два варіанти кріплення деталей. За першим варіантом деталь затискається в патроні консольно, а основна сила деформації лежить у площині вісі обертання деталі та площині переміщення інструмента. У другому варіанті це двоопорна схема, коли деталь з одного боку затискається у шпинделі, а з іншого підперта центром (обробка в центрах). Проекція сили різання лежить у площині різального інструмента і має рух уздовж деталі.

У першому випадку це кріплення деталі з фланцевою конфігурацією, а у другому – форми вала. При точінні вплив зносу на деформацію мінімальний, а тому можемо вважати його не на стільки впливовим. На відміну від зносу, деформації можуть бути досить точно враховані, якщо відомі коефіцієнти пружності по координатах. У кінцевому випадку деформації відхилення від форми є залежними від точки дії сили та мають параболічну залежність від координати прикладення сили.

Для консольного кріплення деталі така залежність у спрощеному вигляді має вигляд

$$Y(x) = -\frac{P \cdot \Delta x_i \cdot x^2}{2EI_x} \quad (3)$$

та для двоопорної схеми (проточка в центрах)

$$Y(x) = -\frac{P \cdot \Delta x_i \cdot x^2}{24EI_x}, \quad (4)$$

де P – сила тиску в площині різання, I_x – статичний момент інерції деталі.

Окрім того, для цього параметра похибки є характерною одна особливість, на відміну від інших: ця похибка не має накопичувальної частини. Якщо не змінюються обладнання і деталь (форма, матеріал), то вона стабільно повторюється за кожного технологічного циклу. Будь-які зміни можуть відбуватися лише за значного зносу інструмента, який викликає відповідну зміну сили тиску в площині сили P різання у виразах (3) і (4). Отже, при виготовленні серії деталей похибка від деформації буде однаковою для всіх деталей без винятку. Але існує певний перехід, коли необхідно враховувати діаметр деталі та її “виліт” на шпинделі. Наразі рекомендованими у виробництві розмірами вважаються ті, коли співвідношення діаметра до величини “виліту” не більше ніж один до двох. Як наслідок, це позначається на величинах Δx_i і $L(R)_i$. У першому випадку величину деформації на довжині деталі Δx_i можна вважати лінійною функцією ($y = kx$), подібною до поведінки функції зносу. При проточці у центрах співвідношення Δx_i і $L(R)_i$ може сягати кількох десятків. Тому величину прогину, який формує похибку діаметра, необхідно розглядати як стрілку прогину параболи. Водночас максимальний прогин буде відповідати координаті $\Delta x_i/2$. Отже, якщо позначити для консольного кріплення $\Delta x_i = k_0 L(R)_i$, де $0 < k_0 < 1-2$ є відношенням довжини деталі до її діаметра, то за статистичного моменту для круга

$$I = \frac{\pi \cdot d^4}{64} = \frac{\pi \cdot L^4(R)_i}{64}$$

максимальна деформація буде становити

$$h_{\mu_0} = -\frac{32k_0^3 P}{\pi \cdot EL(R)_i}.$$

Для кріплення в центрах ця величина визначається при $\Delta x_i = k_1 L(R)_i$ при $2 < k_1 < n$:

$$h_{\mu_1} = -\frac{2}{3} \cdot \frac{k_1^3 \cdot P}{\pi \cdot EL(R)_i}.$$

Стосовно кріплення у центрах необхідно зробити одне зауваження. Деталь типу вал (вісь) під час обробки перебуває під дією двох сил. Одна сила є проекцією на горизонтальну площину загальної сили різання (P_x) і є основним чинником деформації деталі.

Друга є осью та притискає деталь до шпинделя. Деформації від цієї сили невеликі та практично непомітні на загальному тлі.

Третьою складовою, яка має безпосередній вплив на утворення розміру $L(R)$, є температурний дрейф (див. рис. 2). Серед усіх чинників, які впливають на розмір $L(R)$, цей є найбільш невизначеним у просторово-часових координатах робочого простору технологічного обладнання.

Основна проблема криється в тому, що у цьому випадку складаються дві величини дрейфу.

Перша складова температурного дрейфу є найпростішою, яка має лінійний характер і стоюється формотворення деталі, при цьому величина дрейфу є залежною знов-таки від двох параметрів. Перший є найвпливовішим параметром, який є наслідком геометричних розмірів деталі: чим більший розмір, тим більша теплова деформація. До того ж такий дрейф призводить як до радіальної зміни розміру деталі, так і до зміни поздовжнього розміру. Другим параметром впливу на розмір є матеріал деталі, а саме його коефіцієнт теплового розширення [10].

Другою складовою температурного дрейфу є тепловий дрейф інструмента (різального, вимірювального) і технологічного обладнання, який є нелінійною функцією. Отже, зміна координат позиціонування інструмента і деталі в робочому просторі обробного обладнання є залежною від температурного дрейфу цілої низки деталей верстата, які є невідконтрольними у процесі обробки.

Окрім того, необхідно зауважити, що ця складова температурного дрейфу може набувати як додатного, так і від'ємного значення залежно від часу роботи верстата.

Як наслідок, просторово-часові координати поверхні деталі та верхівки інструмента є настільки невизначеними, що виникає необхідність постійного контролю всього технологічного процесу обробки деталі.

У підсумку величину спотворення розміру від коливань температури в зоні обробки можна визначити як

$$L(R)_t = (1 + h_t)L(U),$$

де

$$h_t = \alpha_b + \alpha_d,$$

α_b – коефіцієнт температурного дрейфу верстата, шпинделя та різального інструмента, α_d – коефіцієнт температурного дрейфу деталі.

Отже, маємо можливість створити в загальному вигляді підґрунтя результату переходу від $L(U)$ до $L(R)$:

$$L(R) = h_{\Sigma}L(U),$$

де $h_{\Sigma} = h_{\xi} + h_{\mu} + h_t$.

Вплив окремих складових можна визначити так:

$$L(R)_{\xi} = n \int_0^D (1 + h_{\xi})L(U)_i dx, \quad (5)$$

$$L(R)_{\mu} = n \int_0^D (1 + h_{\mu})L(U)_i dx, \quad (6)$$

$$L(R)_t = n \int_0^D (1 + h_t)L(U)_i dx, \quad (7)$$

До виразів (5), (6), (7) необхідно зробити зауваження: кожен із них є реальним за відсутності обох інших.

Отже, як наслідок, ми отримуємо дрейф розмірів у межах партії деталей, який необхідно зменшити для підвищення точності виготовлення точної продукції.

Висновки

У результаті проведених досліджень запропоновано модель врахування мікродрейфу поверхні деталі, який виникає внаслідок розходження абсолютних і локальних координат об'єкта.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на виявлення конструктивних особливостей вимірювальних перетворювачів, що дають змогу також враховувати наявність мікродрейфу поверхні технологічного об'єкта.

Таким чином, будуть обґрунтовані принципи побудови основних типів конструкції вимірювальних головок з урахуванням розміщення об'єктів технологічного процесу в робочому просторі металообробного верстата при вимірюванні фізичних властивостей окремих визна-

чених локальних ділянок поверхні заготовки (або готової деталі).

* * *

Дослідження виконано за рахунок коштів фінансування проекту ДР 0117U004263 МОН України.

References

- [1] E.J.A. Armarego and R.H. Brown. *The Machining of Metals*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1969.
- [2] S.S. Volosov *et al.*, *Active Control of Dimensions*. Moscow, SU: Mashinostroyeniye, 1984.
- [3] T. Kopp *et al.*, “Experimental investigation of the lateral forces during shear cutting with an open cutting line”, *J. Mater. Proces. Technol.*, vol. 238, pp. 49–54, 2016. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2016.07.003
- [4] D.R. Koehler, “Geometric-distortions and physical structure modeling”, *Indian J. Phys.*, vol. 87, p. 1029, 2013. doi: 10.1007/s12648-013-0321-5
- [5] F. Akhavan and N.L. 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”, *J. Manufacturing Processes*, vol. 30, pp. 268–280, 2017. doi: 10.1016/j.jmapro.2017.09.016
- [6] V.I. Skytsiuk and T.R. Klotchko, “Definition of the coordinate of the imaginary and real surfaces of the border pandan zone of the object. Part 1. General regularities”, *Bulletin of National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute” Ser. Instrument Making*, no. 53(1), pp. 49–55, 2017. doi: 10.20535/1970.53(1).2017.106693
- [7] V.I. Skytsiuk and M.A. Weintraub, “Analytical study of the implementation of imaginary functions for coordinate propulsive systems of machine equipment (Part 2)”, *Bulletin of National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute” Ser. Instrument Making*, no. 46, pp. 117–125, 2013.
- [8] I.N. Bronstein and K.A. Semendyaev, *Handbook of Mathematics*. Moscow, SU: Nauka, 1967, 608 p.
- [9] C. Kittel, *Introduction to Solid State Physics*, 8th ed. Wiley, 2004.
- [10] O.A. Gerashchenko *et al.*, *Temperature Measurements*. Kyiv, SU: Naukova Dumka, 1989.

Г.С. Тымчик, В.И. Скицюк, Т.Р. Ключко

ФАКТОРЫ МИКРОДРЕЙФА ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

Проблематика. В статье рассмотрены аспекты актуальной проблемы исследования факторов потери точности изготовления точных деталей механической обработкой в условиях серийного и массового производства, в частности возникновение микродрейфа поверхности детали при обработке, что приводит к потере функции контроля точности параметров формообразования.

Цель исследования. Целью работы является создание аналитической модели контроля размеров при изготовлении партии деталей, которая может быть основой рекомендаций по дальнейшей разработке контрольно-измерительных приборов для работы в условиях серийного и массового производства.

Методика реализации. Предложена модель изменения параметров технологического процесса (на примере токарной обработки), что можно рассматривать как отдельно взятую дискрету с отдельно взятой деталью. Показано, что геометрические размеры имеют параллельный перенос во времени с детали на деталь. Такой подход позволяет рассматривать отдельно взятую дискрету относительно рассматриваемой детали как законченную определенную функцию для отдельного исследования.

Результаты исследования. Доказано, что при таком подходе к рассмотрению процесса учтены основные составляющие, которые влияют на образование необходимого размера. Показаны составляющие, которые вносят погрешности в получение размера детали. Предложена модель возникновения температурного дрейфа поверхности детали и влияния на точность отработки координаты поверхности.

Выводы. Предложена модель учета микродрейфа поверхности детали, который возникает вследствие различия абсолютных и локальных координат объекта. Дальнейшие исследования должны быть направлены на выявление конструктивных особенностей измерительных преобразователей, позволяющих также учитывать наличие микродрейфа поверхности технологического объекта. Таким образом, будут обоснованы принципы построения основных типов конструкции измерительных головок с учетом расположения объектов технологического процесса в рабочем пространстве металлообрабатывающего станка при измерении физических свойств отдельных определенных локальных участков поверхности заготовки (или готовой детали).

Ключевые слова: микродрейф; механическая обработка; поверхность детали; температурный дрейф; серийное производство.

G.S. Tymchik, V.I. Skytsiouk, T.R. Klotchko

FACTORS OF MICRODRIFT OF PIECE SURFACES IN MECHANICAL PROCESSING

Background. The article considers the aspects of an actual problem of research of factors of accuracy loss of exact piece manufacturing by mechanical processing in conditions of serial and mass production, in particular occurrence of a piece surface microdrift during processing that leads to the accuracy control function loss of shaping parameters.

Objective. The aim of the paper is to create an analytical model for controlling the dimensions of a batch of pieces, which can be the basis for recommendations for the further development of instrumentation for operation in mass production.

Methods. A model for changing the technological process parameters referring turning machining) is proposed, which can be regarded as a single discrete sample with a single piece taken. It is shown that the geometric dimensions have a parallel transfer in time from one piece to another. This approach allows us to consider a single discrete sample with respect to the piece in question, as a completed definite function for a separate study.

Results. It is proved that with this approach to the process consideration the main components that influence the formation of the required dimension are taken into account. The components that influence piece dimensions are shown. A model for the appearance of a temperature drift of the piece surface and the effect on the accuracy of working out the surface coordinate is proposed.

Conclusions. The model for taking into account the piece surface microdrift is proposed, which arises from the difference between the absolute and local coordinates of the object. Further studies should be aimed at identifying the design features of the measuring transducers, which also allow for the presence of the surface microdrift of the technological object. Thus, the principles of constructing the basic types of the design of measuring heads will be justified taking into account the location of process objects in the working space of the metalworking machine in measuring the physical properties of certain specific local area of the workpiece surface (or finished part).

Keywords: microdrift; mechanical processing; piece surface; temperature drift; mass production.

Рекомендована Радою
приладобудівного факультету
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції
2 жовтня 2018 року

Прийнята до публікації
6 грудня 2018 року