

УДК 621.9.08

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2023-22-05

Денисюк В.Ю., Пташенчук В.В.

Луцький національний технічний університет

АНАЛІЗ ПОХИБОК ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ ПРИ АВТОМАТИЧНОМУ РОЗМІРНОМУ КОНТРОЛІ

В статті описано вплив на точність механічної обробки деталей різних факторів автоматизованого комплексу, що складається з металорізального верстата та приладу активного контролю. Завданням даного комплексу є отримання деталей з обробленою поверхнею, розміри якої повинні знаходитись у межах заданого поля допуску. Прилади активного контролю не виключають впливу на розмір, одержуваний у результаті обробки, всіх діючих на верстат, прилад та деталь факторів, що викликають похибки. До таких факторів насамперед відносяться непостійність температури оброблюваної деталі під час її вимірювання наприкінці обробки, що виникає через нагрівання деталі в процесі шліфування, коливання припуску та механічних властивостей оброблюваного матеріалу, затуплення ріжучого інструменту, а також непостійності температури змащувально-охолоджувальної рідини та навколишнього повітря. Крім того, на вимірювання впливають також зношення вимірювальних наконечників приладу та зміна його температури під впливом навколишнього середовища. Наведено похибки обробки, що виникають внаслідок різних причин, які безпосередньо впливають на отримання розміру деталі в момент закінчення обробки, або виявляються на оброблених деталях.

Ключові слова: вимірювання, похибка, точність, оброблення, система, верстат, прилад активного контролю

Постановка проблеми. Перспективи розвитку методу активного контролю пов'язані з підвищенням вимог до розмірної точності деталей в машино- і приладобудуванні. Шліфувальні та хонінгувальні верстати з приладами активного контролю повинні забезпечувати отримання виробів із заданим полем розсіювання розмірів, що відповідає прийнятому полю допуску та його розташуванню. Точність отримання розмірів виробів залежить від численних факторів, пов'язаних з конструкцією верстата, приладами активного контролю, режимами та умовами обробки тощо [1].

Точність обробки деталей за розміром і формою забезпечує верстат, а прилади активного контролю, енкодери та інші вимірювальні прилади та пристрої, встановлені на верстаті або поряд з ним – це допоміжні засоби, які дозволяють організувати оптимальний процес обробки, повну автоматизацію із зворотним зв'язком за розміром.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Підвищення точності обробки досягається вдосконаленням технологічних процесів виготовлення деталей і в першу чергу застосуванням прецизійних металорізальних верстатів. Для зменшення похибок вдосконалюють конструкцію верстатів, застосовують кращі за характеристиками матеріали, використовують різні методи компенсації температурних і динамічних похибок. Резервом для підвищення точності металообробних верстатів є і застосування при обробці деталей приладів активного (управляючого) контролю [2, 3].

Сучасний верстат все більше перетворюється в складну обробну систему, що включає як пристрої для виконання процесів обробки, так і пристрої для управління цими процесами в залежності від різних факторів. Найбільш повно ця тенденція проявляється в обробних автоматах і верстатах з числовим програмним управлінням [4].

З одного боку, все більша увага звертається на динамічні властивості верстата, так як постійно потрібне збільшення продуктивності обробки. З іншого боку, основне завдання верстата – забезпечення необхідних метрологічних характеристик оброблених деталей (при забезпеченні необхідної економічності та продуктивності обробки). Тому до основних показників самого верстата слід віднести його метрологічні характеристики [5].

Таким чином, металорізальний верстат можна розглядати як систему регулювання, що володіє певними динамічними властивостями і призначену для забезпечення заданих налаштуванням значень метрологічних характеристик оброблених деталей протягом певного

часу. Такий підхід дозволяє, використовуючи положення теорії автоматичного регулювання та її математичний апарат, найбільш повно охарактеризувати металообробний верстат і намітити шляхи підвищення його якості [5].

Мета роботи полягає у підвищенні точності обробки деталей при автоматичному розмірному контролі за рахунок зменшення впливу на розмір, одержуваний у результаті обробки, всіх діючих на верстат, прилад та деталь факторів, що викликають похибки.

Викладення основного матеріалу. Результат автоматичного контролю в процесі обробки на шліфувальних та хонінгувальних верстатах визначається вихідною командою, що свідчить про досягнення оброблюваним розміром заданого значення. Виняток становлять рідше застосовувані показуючі прилади, де результат контролю визначається при досягненні стрілкою або світловим показником заданої поділки шкали (зазвичай нульової).

Точність приладу характеризується межею допустимої похибки Δ_n протягом встановленого часу роботи приладу на верстаті або обробки партії деталей. У автоматичних командних приладах похибка Δ_n є похибкою остаточної видачі команди. Однак визначити безпосередньо похибку Δ_n важко. Тому при нормуванні та визначенні показників точності приладів вимушено роблять два припущення. По перше, замість похибки Δ_n нормують її складові, які можна встановити експериментально, і, по-друге, ці складові визначають за умов, наближених до умов роботи приладу на верстаті. При необхідності, але дуже рідко, похибку Δ_n розраховують за відомими її складовими. Однак знати та перевіряти складові похибки приладу надзвичайно важливо, тому що вони забезпечують точність, надійність та роботоздатність приладу.

Похибку Δ_n можна представити як складову з основних похибок, властивих приладам незалежно від умов експлуатації, та додаткових похибок, що залежать від умов експлуатації.

Основними складовими похибками Δ_n є похибка спрацьовування (видачі) остаточної команди δ_{cn} , похибка налаштування остаточної команди на заданий розмір δ_n та похибка від зміщення рівня налаштування остаточної команди δ_{zn} протягом встановленого інтервалу часу.

Крім того, залежно від умов роботи приладу та його конструкції, додатково виникають складові похибки, що викликаються різними причинами, наприклад, інерційністю приладу та змінною швидкістю зміни контрольованого розміру (вхідного сигналу), коливаннями температури змащувально-охолоджуючої рідини (ЗОР), що потрапляє на вимірювальний пристрій, нестабільністю установки контактних наконечників на контрольовані деталі та іншими причинами.

Таким чином, межа допустимої похибки приладу:

$$\Delta_n = \delta_{zn} + \sum \delta_c + \sqrt{\psi_{cn}^2 + \psi_n^2 + \sum \psi^2}, \quad (1)$$

де $\sum \delta_c$ – сума систематичних складових похибки, що виникають додатково;

$\sum \psi^2$ – сума квадратів випадкових складових похибки, що виникають додатково.

Основні складові похибки приладу ψ_{cn} , ψ_n та δ_{zn} нормовані (ГОСТ 8517-90 «Прилади керуючі при шліфуванні»), а додаткові вказують у технічних умовах на прилад. Зазвичай вказують три основні похибки:

- похибка спрацьовування остаточної команди ψ_{cn} , яка, залежно від конструкції та призначення приладу, становить $\psi_{cn} = 0,1 - 0,5$ мкм;
- похибка налаштування ψ_n , становить $\psi_n = 0,5 - 1,0$ мкм;
- похибка від зміщення налаштування δ_{zn} за 1500 умовних спрацьовувань, становить $\delta_{zn} = 0,8 - 1,5$ мкм.

Похибка спрацьовування ψ_{cn} , характеризуючи нестабільність отримання остаточної команди приладу, є випадковою величиною і визначається межею допустимої похибки.

У квазістатичному режимі при повільній зміні розміру (наприклад, зі швидкістю менше 1,0 мкм/с) під контактним наконечником приладу та в динамічному режимі при великій, але постійній швидкості (5 – 15 мкм/с) зміні розміру значення похибки ψ_{cn} становить $\psi_{cn} = 0,1 - 0,5$ мкм.

Допустиму похибку спрацьовування ψ_{cn} відповідно до закону нормального розподілу випадкових похибок приймають $\psi_{cn.p} = \pm 2\sigma$, де σ – середня квадратична похибка спрацьовування. Однак, враховуючи малі значення ψ_{cn} , їх нормують і визначають розмахом. Тому складові похибки зазвичай не мають розподілу, який би відповідав теоретичній кривій нормального розподілу, хоча симетричні розподіли похибок, що зустрічаються на практиці,

зазвичай наближаються до неї. Це дозволяє використовувати теоретичні властивості кривої у практиці оцінки похибок автоматичного контролю.

Похибка налаштування ψ_n приладу характеризує точність, з якою він може бути налаштований на заданий рівень (розмір) за допомогою власних настроювальних елементів (вимірювального оснащення та електронного блоку). По суті ψ_n є систематичною похибкою і проявляється як систематична при обробці партії деталей без налаштування приладу, наприклад, при його випробуваннях [6]. Однак у промисловій експлуатації при частих підналаштуваннях приладу систематична похибка δ_n проявляється як випадкова ψ_n з нормальним чи рівномірним розподілом та визначається середнім значенням (систематична складова) та середньою квадратичною похибкою σ_n .

Систематичну складову зазвичай не враховують, оскільки вона мала і може бути компенсована зміною рівня налаштування. На практиці ψ_n визначається межею допустимої похибки. Похибка налаштування ψ_n становить $\psi_n = 0,3 - 0,5$ мкм. У мікропроцесорних приладах із цифровим відліком налаштування керуючих команд і нуля виконується набором за допомогою клавіатури з дискретністю 0,1 мкм, що забезпечує невелике (близько 0,1 мкм) значення похибки налаштування.

Похибка від зміщення рівня налаштування δ_{zn} виникає через зміни рівня налаштування команди приладу під час тривалої безперервної роботи. Ці зміни визначаються багатьма випадковими внутрішніми та зовнішніми факторами та найбільш повно характеризуються випадковим процесом зміщення налаштування $\zeta(t)$. Однак таку характеристику незручно визначати та нормувати. Тому на практиці користуються будь-яким власним показником зміщення рівня налаштування, наприклад, допустимим зміщенням налаштування δ_{zn} . Ця величина показує, що протягом встановленого часу зміщення рівня налаштування не повинно перевищувати її абсолютного значення. За такої оцінки похибка від зміщення налаштування δ_{zn} є систематичною та становить для прецизійних приладів не менше 0,8 – 1,2 мкм за 4 або 8 годин безперервної роботи. *Динамічні похибки* приладу викликаються його інерційністю, змінною швидкістю зміни контрольованого розміру та неправильною формою контрольованої поверхні (наприклад, некруглістю циліндричної деталі). Динамічна похибка – це різниця між похибкою приладу в динамічному режимі та його статичною похибкою в даний момент часу.

При автоматичному контролі вимірюється розмір, що безперервно змінюється, і внаслідок інерційності приладу його вихідний сигнал відстає від вхідного (розміру), а моменти видачі керуючих команд відстають від моментів досягнення розміром деталі заданого значення. В результаті деталь трохи перешліфовується. За постійної швидкості зміни контрольованого розміру виникає систематична динамічна похибка:

$$\delta_o = Vt_0, \quad (2)$$

де V – середня швидкість зміни розміру (знімання припуску), мкм/с;

t_0 – середнє значення постійної часу приладу, назване часом відставання (запізнювання); він показує, наскільки вихідний сигнал (у даному випадку команда приладу) відстає від вхідного сигналу (зміни розміру) при його безперервній зміні. Ця складова частково компенсується зміщенням рівня налаштування остаточної команди і не враховується при визначенні похибки приладу. Значно більший вплив має випадкова складова динамічної похибки, що викликається в основному змінною швидкістю зміни розміру (знімання припуску) та непостійністю часу t_0 . Її величина залежить від коливань швидкості зміни контрольованого розміру в момент наближення до закінчення обробки та видачі остаточної команди та визначається виразом:

$$\delta_o = \pm 2\sigma = \pm \sqrt{(t_0\sigma_v)^2 + (V\sigma_t)^2}, \quad (3)$$

де σ_v – середня квадратична похибка, що характеризується непостійністю швидкості зміни розміру при припиненні обробки;

σ_t – середня квадратична похибка, що характеризується змінністю часу t_0 .

Швидкість знімання припуску з контрольованої деталі наприкінці обробки (при виходженні) зменшується від 5 мкм/с до майже нульового значення. Час відставання t_e сучасних індуктивних мікропроцесорних приладів становить від 0,05 до 0,1 с. У приладів з часом відставання $t_e < 0,1$ з похибки δ_o невеликі і становлять менше 0,5 мкм. Значення часу відставання t_e збільшується у приладів, призначених для контролю переривчастої поверхні, оскільки такі прилади забезпечені демпфуючими елементами та модулями пам'яті в електронному блоці.

Динамічна похибка може виникнути також при контролі деталей, що мають відхилення геометричної форми вимірюваної поверхні. Так, при контролі діаметра овальних циліндричних деталей на контактні наконечники скоби впливає вхідна величина приблизно синусоїдальної форми з амплітудою до декількох мікрметрів і частотою 2 – 20 Гц.

Форма аналогового вихідного сигналу (струм, напруга) приладу залежить від його інерційності. У разі використання інерційного приладу (наприклад, з $t_e = 0,3$ с) вихідний сигнал усереднюється і остаточна команда видається орієнтовно за середнім розміром (у перерізі) контрольованої деталі або за розміром, що перевищує його середнє значення. Вихідний сигнал швидкодіючого приладу (наприклад, індуктивного з $t_e < 0,1$ с) практично повторюватиме вхідний сигнал, і остаточна команда видаватиметься при досягненні мінімального розміру у контрольованому перерізі рівня налаштування.

Таким чином, при автоматичному контролі інерційним приладом розміри оброблених деталей розташовуються симетрично відносно рівня налаштування, а при контролі швидкодіючим приладом розміри деталей будуть зміщені відносно цього рівня. Зі сказаного випливає, що контроль деталей з відхиленням геометричної форми може призвести до систематичної похибки, що викликає зміщення розмірів партії оброблюваних деталей відносно рівня налаштування та випадкової похибки, що призводить до деякого додаткового розсіювання розмірів деталей. Обидві ці складові невеликі, причому систематична похибка частково компенсується при корекції налаштування приладу.

Похибка δ_n виникає через нестабільність положення контактних наконечників на контрольованій поверхні. Ці похибки можуть мати систематичну та випадкову складові. Систематична складова пов'язана з початковим неправильним положенням вимірювального оснащення відносно деталі, а випадкова – з нестабільністю його підведення. Систематична складова компенсується при налаштуванні приладу.

При зміщенні одного сферичного контактного наконечника з контрольованого діаметра (рис. 1) з'являється похибка:

$$\delta_d = d(1 - \cos\varphi) = \frac{e^2}{2(R+r)}. \quad (4)$$

Аналогічна похибка виникає від непаралельності ножеподібних вимірювальних наконечників (рис. 2).

При зміщенні двох наконечників з лінії вимірювання (рис. 1) виникає похибка:

$$\delta_d = \frac{e^2}{R+r}. \quad (5)$$

З формули (5) видно, що при нестабільності підведення вимірювального пристрою в робоче положення менше 10 мкм цієї похибкою можна знехтувати.

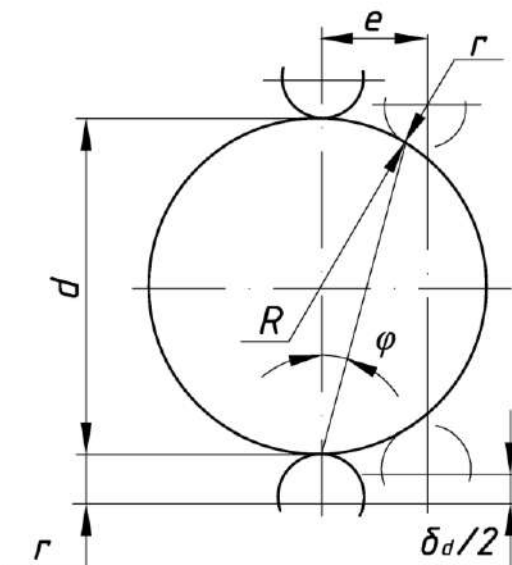


Рисунок 1 – Похибка, що виникає при зміщенні сферичних контактних наконечників при контролі валу

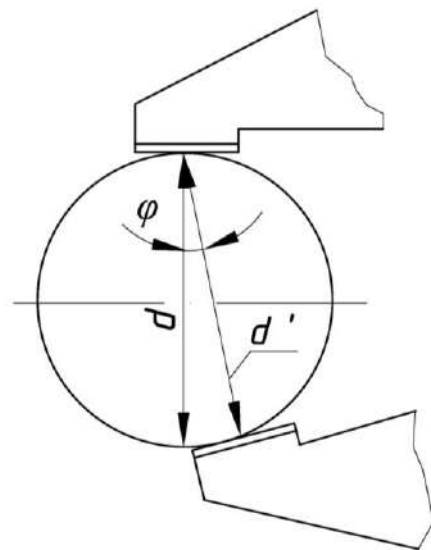


Рисунок 2 – Похибка, що виникає від непаралельності ножеподібних контактних наконечників

При нахилі площини вимірювальних наконечників (рис. 3) виникає похибка, що визначається співвідношенням:

$$\delta_d = D \frac{(1 - \cos \varphi)}{\cos \varphi} (1 - \cos \varphi) = \frac{e^2}{2(D + d)}. \quad (6)$$

Порівняно великі похибки виникають при одночасному нахилі обох вимірювальних наконечників та зміщення одного з них (рис. 4):

$$\delta_d = a\varphi + D \frac{(1 - \cos \varphi)}{\cos \varphi}. \quad (7)$$

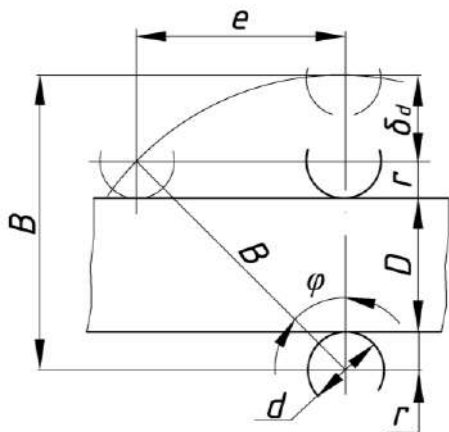


Рисунок 3 – Похибка, що виникає при нахилі скоби (контактних наконечників)

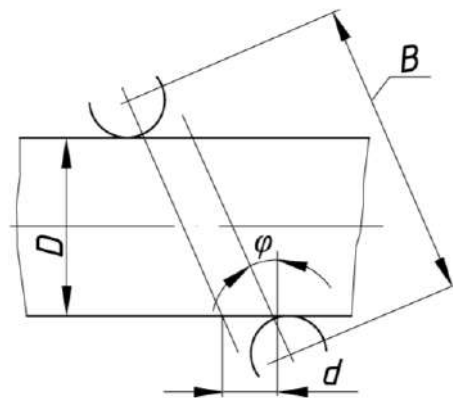


Рисунок 4 – Похибка, що виникає при нахилі та зміщенні контактних наконечників

При внутрішніх вимірюваннях при зміщенні наконечників з діаметральної площини отвору або їх нахилі виникають похибки, аналогічні наведеним вище.

Так, при зміщенні одного наконечника з лінії вимірювання (рис. 1.5) виникає похибка:

$$\delta_d = \frac{e^2}{2(R + r)}. \quad (8)$$

При зміщенні обох наконечників виникає похибка:

$$\delta_d = \frac{e^2}{R - r}. \quad (9)$$

При нахилі площини наконечників відносно вертикальної площини (рис. 1.6) виникає похибка:

$$\delta_d = \frac{e^2}{2(D - d)}. \quad (10)$$

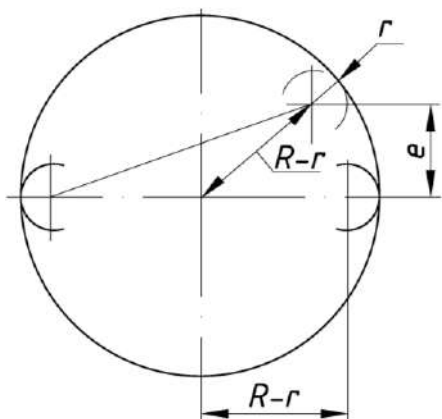


Рисунок 5 – Похибка, що виникає при зміщенні сферичних контактних наконечників при контролі отворів

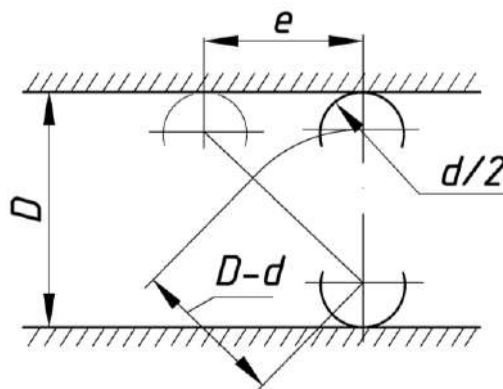


Рисунок 6 – Похибка, що виникає при зміщенні сферичних контактних наконечників з лінії вимірювання під час контролю отворів

Як видно з наведених співвідношень, у більшості випадків зазначені похибки є дуже малими, проте їх необхідно враховувати при проектуванні пристроїв підведення та орієнтації вимірювального оснащення в робоче положення. Пристрої підведення повинні бути жорсткими, і вимірюване оснащення, що підводиться ними, повинно займати строго однакове положення при кожному підведенні у робоче положення.

Температурна похибка δ_m дуже впливає на точність приладу і виникає від коливання температури навколишнього повітря, охолоджувальної рідини, що потрапляє на вимірювальне оснащення, від обдування його потоком повітря, що йде від шліфувального круга та від нагрівання контактних наконечників при терті їх по поверхні контрольованої деталі.

Температурна похибка має систематичну δ_m і випадкову ψ_m складові. Через деякий час після початку обробки температура приладу стабілізується, і зміна рівня налаштування приладу характеризує систематичну складову температурної похибки, яка може бути компенсована його підналаштуванням. Випадкова складові похибки виникає під дією короточасних теплових імпульсів, наприклад, при правці шліфувального круга, коли настає деяка перерва у встановленому режимі роботи верстата.

Температурні похибки приладу можуть досягати кількох мікрометрів. Однак поки що не розроблено методів їх розрахунку з потрібною точністю. Зменшити температурні похибки приладів вдається за допомогою конструктивних заходів. У деяких випадках у конструкціях вимірювального оснащення застосовують матеріали з малим коефіцієнтом лінійного розширення (інвар, титан) та їх комбінацію, що компенсують загальні температурні деформації відповідальних вузлів. Хороші результати дає виконання вимірювального оснащення, розташованого в зоні обробки, в корпусах, що захищають перетворювачі, плоскі пружини підвіски та інші відповідальні елементи від попадання на них охолоджувальної рідини і обдування потоком повітря. Така конструкція дозволяє суттєво зменшити випадкову складову температурної похибки.

Зношування вимірювальних наконечників викликає систематичну похибку δ_z . Параметри зношування залежать від використовуваного матеріалу для наконечників, величини вимірювального зусилля, швидкості переміщення контрольованої поверхні та часу контакту наконечників з поверхнею. Наконечники приладів виготовляють із твердого сплаву, природних та синтетичних полікристалічних алмазів. При роботі приладів на круглошліфувальних верстатах наконечники з твердого сплаву зношуються після початкового припрацювання на 2 – 4 мкм протягом зміни, а з доведених алмазів – на 0,2 – 0,5 мкм протягом зміни. При частому налаштуванні приладу (3 – 4 рази на зміну) похибка від зношування практично компенсується і може не враховуватися. При роботі приладів на верстатах-автоматах без підналаштування протягом однієї-двох змін ця похибка повністю входить у похибку приладу.

Таким чином, формулу (1) для підрахунку межі допустимої похибки приладу можна подати в наступному розгорнутому вигляді:

$$\Delta_n = \delta_{zn} + \delta_{mc} + \delta_z + \sqrt{\psi_{cn}^2 + \psi_n^2 + \psi_d^2 + \sum \psi_d^2 + \psi_m^2}. \quad (11)$$

Характер розподілу випадкових складових похибок приладу та розглянутих нижче складових похибок обробки, як правило, не відомий. Вважають, що у більшості випадків вони розподілені за нормальним законом, і тоді найбільш точною характеристикою розсіювання похибки є середнє квадратичне відхилення σ . Насправді випадкові похибки приладу через їх малі долемікронні значення частіше оцінюють граничним чи довірчим значенням, або розмахом. Для похибок приладів активного контролю достатня надійність оцінки забезпечується за довірчої ймовірності $P_d = 0,95$. Тоді похибка становить $\delta = \pm 2\sigma$.

Висновки. Розглянуті складові похибок не однаково впливають на загальну похибку приладу Δ_n . Домінуючий вплив на неї має систематична похибка від зміщення налаштування δ_{zn} , систематична δ_m і випадкова ψ_m температурні похибки та випадкова динамічна похибка ψ_d . Кожна з цих складових може мати значення понад 1 мкм. Інші складові, як правило, мають долемікронні значення.

На точність обробки крім похибки видачі кінцевої команди приладу Δ_n впливають похибки, зумовлені системою ВПД. Точність обробки залежить від багатьох параметрів системи ВПД та умов обробки, тобто від верстата. Похибки обробки, що виникають внаслідок різних причин, можна звести до трьох складових похибки, які безпосередньо впливають на отримання розміру деталі в момент закінчення обробки, або виявляються на оброблених деталях.

Інформаційні джерела

1. Марчук В.І, Михалевич В.Т. Автоматизоване управління точністю оброблення деталей: монографія. Луцьк: РВВ ЛНТУ, 2013. 184 с.
2. Денисюк В.Ю., Симонюк В.П., Лапченко Ю.С. Технологічне забезпечення точності деталей підшипників засобами активного контролю. «Прогресивні напрямки розвитку технологічних комплексів»: зб. наук. праць VI Міжнар. наук.-техн. конф. м. Луцьк, 2-4 черв. 2020 р. Луцьк, 2020. С. 148 – 149.
3. Денисюк В.Ю. Визначення похибок обробки деталей при використанні засобів активного контролю. «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2023)»: зб. тез доп. XIII Міжнар. наук.-практ. конф., м. Чернігів, 25–26 травня 2023 р. Чернігів, 2023. Т. 1. С. 115 – 116.
4. Денисюк В. Ю., Симонюк В. П., Лапченко Ю. С. Засоби активного контролю в машино- та приладобудуванні і перспективи їх розвитку. «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2021)»: зб. тез доп. XI Міжнар. наук.-практ. конф., м. Чернігів, 26–27 травня 2021 р. Чернігів, 2021. Т. 1. С. 100 – 101.
5. Денисюк В.Ю. Динамічні похибки в системах активного контролю та їх визначення в умовах експлуатації. «Інформаційно-вимірвальні технології ІВТ-2022»: зб. тез доп. Міжнар. наук.-практ. конф., м. Львів, 9–10 листопада 2022 р. Львів, 2022. С. 53 – 55.
6. Денисюк В. Ю., Симонюк В. П., Лапченко Ю. С., Новосад Б. І. Метрологічне забезпечення точності приладів активного контролю в процесі обробки. «Перспективні технології та прилади»: зб. статей. 2020. Вип. 16. С. 38 – 47.

Denysiuk V., Ptashenchuk V.

Lutsk National Technical University

ANALYSIS OF PART PROCESSING ERRORS WITH AUTOMATIC DIMENSIONAL CONTROL

The article describes the influence of various factors on the accuracy of mechanical processing of parts of an automated complex consisting of a metal cutting machine and an active control device. The task of this complex is to obtain parts with a machined surface, the dimensions of which must be within the specified tolerance field. Active control devices do not exclude the influence on the size obtained as a result of processing of all factors acting on the machine, the device and the detail, which cause errors. Such factors primarily include temperature inconsistencies of the processed part during its measurement at the end of processing, which occurs due to heating of the part during the grinding process, fluctuations in the allowance and mechanical properties of the processed material, blunting of the cutting tool, as well as inconsistencies in the temperature of the lubricating and cooling liquid and the surrounding air. In addition, measurements are also affected by wear of the measuring tips of the device and changes in its temperature under the influence of the environment. Processing errors arising from various reasons that directly affect the size of the part at the end of processing, or are found on the processed parts, are given.

Key words: measurement, error, accuracy, processing, system, machine, active control device