

ВИЗНАЧЕННЯ ТА УРАХУВАННЯ ВЕЛИЧИНИ ВЗАЄМОКОМПЕНСАЦІЇ ПОХИБОК ПРИ ПРОГНОЗУВАННІ ТОЧНОСТІ ОБРОБЛЕННЯ НА ВЕРСТАТАХ З ЧПК

Приходько Василь Петрович

кандидат технічних наук, доцент
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна
ORCID: 0000-0003-1852-3777
privas0718@gmail.com

Пуховський Євген Степанович

доктор технічних наук, професор
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна
ORCID: 0000-0001-7843-0922
puhovskije50@gmail.com

Данилова Людмила Миколаївна

кандидат технічних наук, доцент
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна
ORCID: 0000-0002-4442-3959
Danylova.liudmyla@ill.kpi.ua

Лапковський Сергій Вікторович

кандидат технічних наук, доцент
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна
ORCID: 0000-0002-9870-9231
arkovskysamsung@gmail.com

Гаврушкевич Наталія Валеріївна

асистент
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна
ORCID: 0000-0002-6229-7458
gavrushkevichnataliya@gmail.com

На основі результатів експериментальних досліджень визначені величини та коефіцієнти взаємокомпенсації похибок технологічних розмірів. Їх використання дозволяє формалізувати урахування впливу взаємокомпенсації похибок при розмірному аналізі та підвищити ефективність прогнозування оцінки точності замикаючих ланок – конструкторських розмірів за рахунок суттєвого, більше ніж у 2 рази, зменшення прогнозних величин полів розсіювання та наближення їх до реальних значень, внаслідок чого підвищити якість оцінки технологічних процесів на стадії їх проектування. Показано приклад використання одержаних результатів при розрахунку операційних розмірних ланцюгів для прогнозування оцінки точності конструкторського розміру, який засвідчив важливість і ефективність урахування взаємокомпенсації похибок технологічних розмірів для підвищення якості оцінки та ухвалення більш обґрунтованих рішень щодо прийнятності технологічного процесу чи необхідності його коригування. Не урахування взаємокомпенсації похибок технологічних розмірів приводить, при розрахунках величин полів розсіювання замикаючих ланок будь-яким із методів (тах-тіп, імовірнісний), до суттєвого – більше ніж у 2,3 рази завищення прогнозних величин полів розсіювання замикаючих ланок відносно фактичних. Наслідком чого може бути помилкове введення додаткової обробки, яка в дійсності буде непотрібною.

Використання отриманих результатів у практичній діяльності дозволяє підвищити якість прогнозування оцінки точності та може бути основою для подальшого створення алгоритмів виявлення таких ланок і автоматизації відповідних розрахунків. Формалізація розрахунків та урахування взаємокомпенсації похибок технологічних розмірів, у сукупності з подібними рішеннями для інших процедур, відкривають шлях до подальшої автоматизації розмірного моделювання та аналізу технологічних процесів.

Ключові слова: взаємокомпенсація похибок, оцінка точності розмірів, розмірне моделювання, автоматизація розмірного аналізу.

DOI <https://doi.org/10.32845/msnau.2022.4.12>

Вступ. Сучасне виробництво, за рахунок широкого застосування верстатів з ЧПК та багатофункціональних верстатних систем на їх основі, потребує швидкого проєктування та впровадження у виробництво операційних технологічних процесів (ТП) виготовлення деталей (Bilapenko et al., 2019). Розроблення таких ТП, є одним із важливих, але достатньо трудомістких етапів технологічної підготовки виробництва. Однією зі складових проєктування ТП, від якої залежить рівень якості ТП щодо забезпечення вимог до точності розмірів та вартість оброблення деталей, є розмірне моделювання та аналіз технологічних процесів (РМА ТП) (Bondarenko, 1993; Mercier, 1997; Prykhodko, 2021; Rud et al., 2019).

Метою розмірного моделювання та аналізу технологічних процесів (РМА ТП) є створення технологічних процесів, що надійно забезпечать задану точність конструкторських розмірів, при скороченні витрат часу і ресурсів на їх впровадження та реалізацію у виробництві, за рахунок знаходження оптимальних варіантів і усунення можливих помилок на етапі проєктування ТП, а не на етапі їх впровадження чи у процесі виробництва (Prykhodko, 2021). Для досягнення поставленої мети у процесі розмірного моделювання та аналізу технологічних процесів вирішуються два основні завдання (Kravchenko, 2009; Bondarenko, 1993; Prykhodko, 2021; Rud et al., 2019): 1. Оцінка здатності запропонованого технологічного процесу забезпечити необхідну точність конструкторських розмірів (КР). 2. Визначення параметрів (номінальних значень, допусків і граничних відхилень) технологічних (операційних) розмірів, припусків та розмірів заготовок, необхідних для реалізації ТП у виробництві.

Прогнозування точності конструкторських розмірів, яка буде забезпечена при виконанні розробленого ТП, виконується у процесі РМА ТП на основі формування і розрахунку операційних розмірних ланцюгів, що відображають структуру і модель впливу точності складових ланок-технологічних розмірів на точність замикаючих ланок-конструкторських розмірів.

Якість прогнозованої оцінки точності КР, що буде забезпечуватись при виготовлення деталей, безпосередньо впливає на якість висновків щодо придатності та на ефективність рекомендацій щодо шляхів поліпшення розроблених ТП. Вона залежить від двох основних чинників: якості оцінки прогнозованої точності технологічних розмірів-складових ланок ОРЛ, а також від якості та повноти урахування впливу їх точності на точність конструкторських розмірів. Питання прогнозованої оцінки точності технологічних розмірів (ТР) висвітлені в наукових публікаціях достатньо широко, зокрема методологічні підходи (Bondarenko, 1993; Kravchenko, 2009; Prykhodko, 2021; Rud et al., 2019; Kamali Nedjid et al., 2009), є достатньо довідкових даних, що характеризують параметри точності процесів та способів оброблення деталей (Bondarenko et al., 1992; Dietrich et al., 2004; Drake, 1999; Kravchenko, 2009; Prykhodko, 2021; Rud et al., 2019; Swift & Booker, 2013). Наявність методик і доступність інформації щодо параметрів точності технологічних розмірів,

у сукупності з формалізацією процедури, дозволяють виконувати прогнозну оцінку точності ТР як у ручному (Kravchenko, 2009; Bondarenko, 1993; Mercier, 1995; Prykhodko, 2021; Rud et al., 2019), так і в автоматизованому режимі (Prykhodko, 2021; Prykhodko et al., 2022). Таким чином, завдання якісної оцінки прогнозованої точності технологічних розмірів-складових ланок ОРЛ на даний час в основному вирішено, у тому числі, в частині автоматизації розрахунків.

Актуальність. Вирішення проблеми забезпечення повноти урахування впливу точності ТР на точність конструкторських розмірів і високої якості прогнозування знаходиться на недостатньому рівні та потребує подальшого дослідження та поліпшення. Одним із актуальних завдань, вирішення яких дозволить підвищити якість прогнозування точності конструкторських розмірів, є урахування взаємокомпенсації похибок технологічних розмірів при розрахунках операційних розмірних ланцюгів для оцінки точності КР, які є замикаючими ланками в таких ланцюгах. Не зважаючи на визнання істотного впливу точності технологічних розмірів на оцінку точності конструкторських розмірів, визначення і урахування взаємокомпенсації похибок не має єдиної формалізованої методології та необхідних статистичних даних для їх розрахунку. У зв'язку з чим у науковій літературі пропонується і використовується декілька підходів, зокрема на основі виявлення і розрахунку пов'язаних ОРЛ (Bondarenko et al., 1992; Kravchenko, 2009) та на основі використання особливих «замикаючих – замінюючих» ланок ОРЛ (Bondarenko, 1993; Rud et al., 2019). Використання зазначених підходів потребує високої кваліфікації технологів, є трудомістким, а через недостатню формалізацію, виникають труднощі їх автоматизації. У зв'язку з такими вадами, на практиці, у багатьох випадках, взаємокомпенсацію похибок ТР взагалі не ураховують, що не викликає появи браку, через використання додаткового (надлишкового) оброблення, але приводить до збільшення витрат на виконання додаткових переходів та до зростання вартості продукції. При такому підході, часто у виробництві, на основі досвіду, вдаються до самостійного коригування ТП (зменшення кількості переходів), що породжує невідповідність реального ТП тому, який представлено в технологічній документації та є наслідком недоліків проєктування та розмірного аналізу ТП, зокрема ігнорування взаємокомпенсації похибок.

Матеріали та методи досліджень. У даний час у наукових роботах, присвячених розмірному моделюванню та аналізу технологічних процесів (Kravchenko, 2009; Bondarenko, 1993; Dietrich et al., 2004; Prykhodko, 2021; Rud et al., 2019) відзначається важливість і необхідність урахування взаємокомпенсації похибок, у той же час відсутні дані та методологічні рекомендації, що дозволили б розраховувати відповідні величини та враховувати їх при прогнозуванні точності розмірів в умовах виробництва. Зокрема, відомі лише дані щодо компенсації похибок для штапованих та литих заготовок, які можуть досягати 60 – 70 % допуску на розмір (Kravchenko, 2009; Rud et al., 2019), у той же час такі дані для оброблення

заготовок точінням, розточуванням, фрезеруванням на верстатах ЧПК відсутні.

Усунення зазначених недоліків можна досягти за рахунок формалізації процедур на основі використання відповідних залежностей для розрахунку прогнозно оцінки КР, з урахуванням взаємокомпенсації похибок ТР (Prykhodko, 2021): $\omega A1_k = \omega F1 + \omega F2 - 2\omega k$ або у загальному вигляді, якщо ОРЛ має $m-1$ складових ланок, серед яких є одна пара «зв'язаних» СЛ з компенсацією похибок (ωF_{p1} і ωF_{p2} , причому $\omega F_{p1} < \omega F_{p2}$), формула буде:

$$[\omega A_i] = \sum_{i=1}^{m-3} |\xi_i| \omega F_i + (|\xi_{p1}| \omega F_{p1} + |\xi_{p2}| \omega F_{p2} - 2 \cdot k \cdot \omega_{p1}),$$

де k – величина коефіцієнту взаємокомпенсації.

Для використання такого формалізованого підходу, який є передумовою автоматизації процедури прогнозно оцінки точності та підвищення якості оцінки, необхідне проведення досліджень для встановлення даних щодо величин взаємокомпенсації похибок ТР та відповідних коефіцієнтів для різних способів оброблення.

Метою даної праці є підвищення якості оцінки прогнозно точності конструкторських розмірів, при розмірному моделюванні та аналізі ТП, на основі експериментального визначення та урахування величин і коефіцієнтів взаємокомпенсації похибок технологічних розмірів при токарному обробленні на верстатах з ЧПК.

Забезпечення високої якості прогнозування точності, одержуваних при обробленні, розмірів є важливим завданням розмірного моделювання і аналізу технологічних процесів (РМА ТП), оскільки прогнозно оцінки точності розмірів є основою для прийняття рішень щодо: 1) здатності розроблених ТП забезпечити необхідну точність конструкторських розмірів; 2) необхідності та напрямків можливого поліпшення ТП; 3) обґрунтованого

призначення допусків технологічних розмірів, що приводяться на операційних ескізах.

Для визначення величини взаємокомпенсації, на основі використання експериментально-статистичних даних, що характеризують точність різних способів та процесів оброблення (Kravchenko, 2009; Bondarenko, 1993; Dietrich et al., 2004; Drake, 1999; Rud et al., 2019; Swift & Booker, 2013; Pasquet & Marche, 2004), у даній роботі виконувався аналіз забезпечення точності лінійних розмірів при токарній обробці на верстатах з ЧПК. Дослідження проводилось шляхом порівняльного аналізу двох варіантів одержання конструкторського розміру (КР) А1 (рис. 1): 1 варіант – КР одержують прямим формуванням – обробленням двох поверхонь в одному установі, зв'язаних технологічним розміром (ТР) F3, що співпадає з КР А1. У цьому випадку КР А1 є замикаючою ланкою дволанкового ОРЛ, який має одну складову ланку – технологічний розмір F3 (на рис. 1 не показаний), що співпадає з КР А1; 2-й варіант – КР А1 одержують формуванням 2-х технологічних розмірів 1-го типу (Prykhodko, 2021) F1, F2, тобто він є замикаючою ланкою багатоланкового ОРЛ, складовими ланками якого є два ТР.

У виробництві, в залежності від умов оброблення, буде використовуватись один із зазначених варіантів, але на схемах, приведених далі, для виявлення впливу взаємокомпенсації похибок ТР використовуються і порівнюються одночасно 2 варіанти, що реалізуються за допомогою однієї і тієї ж технологічної оброблювальної системи (ТОС).

При одержанні розмірів F1, F2 коливання положень вимірювальної бази розмірів, що співпадає з технологічною базою, а також оброблюваних поверхонь, у значній мірі будуть викликані одними і тими ж причинами (факторами), наприклад, наявністю пружних деформацій

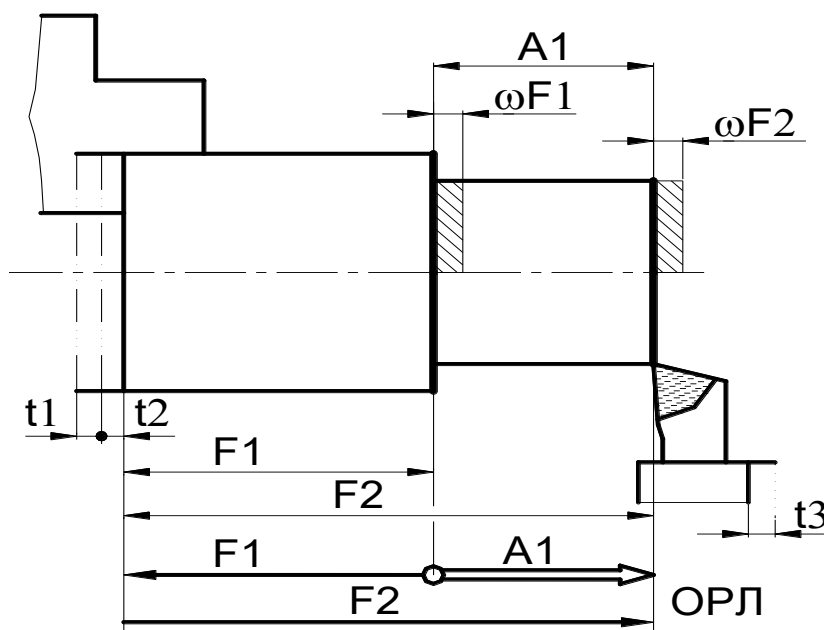


Рис. 1. Схема оброблення деталі та розмірний ланцюг, що описує розмірні зв'язки при отриманні розміру А1 за програмою на верстаті з ЧПК

$\Delta u = \Delta P_y / j$. Відповідні пружні деформації будуть спричинювати синхронне зміщення вимірювальної бази обох технологічних розмірів $F1$, $F2$, а оскільки вони є складовими ланками різних типів ($F1$ -зменшуюча, $F2$ -збільшуюча) це приведе до повної взаємокомпенсації їх похибок, зокрема викликаних деформаціями (похибки закріплення) та зміщеннями, внаслідок похибок базування, на величини відповідно $t1$, $t2$.

Розсіювання положень оброблюваних поверхонь, внаслідок пружних та температурних деформацій, зношення інструменту та інших факторів, будуть впливати на розсіювання величини замикаючої ланки – конструкторського розміру, тобто на його точність. При цьому вплив більшості із зазначених факторів характеризуватиметься певною синхронністю за напрямом їх впливу на обидва технологічні розміри та, у деякій мірі за величиною, тому зміщення оброблюваних поверхонь, при обробленні заготовки, будуть відбуватись в одному напрямку, але відрізнятяться на деяку величину, внаслідок чого, а також за наявності можливого впливу інших факторів, буде мати місце тільки часткова компенсація відповідних похибок. Слід зауважити, що в ідеалізованому варіанті, у випадку абсолютної однорідності умов оброблення обох поверхонь, величини полів розсіювання ТР були б однаковими та повністю взаємно компенсувались, а величина поля розсіювання замикаючої ланки-КР дорівнювала б нулю. Така ситуація мало ймовірна, вона приведена тут для ілюстрації механізму впливу взаємокомпенсації похибок ТР на точність КР. Викладене обґрунтування дає підстави стверджувати, що в серійному та великосерійному виробництві при значній однорідності заготовок та умов обробки частини ωFi будуть компенсуватись, що відобразиться на точності КР, а отже повинно враховуватись при розмірному аналізі ТП.

Урахування взаємокомпенсації похибок технологічних розмірів означає, що при визначенні сумарної похибки розміру ωAi вона повинна бути зменшена на подвійну величину зкомпенсованої частини похибки (Prykhodko, 2021)

$$\omega A1k = \omega F1 + \omega F2 - 2\omega k$$

Тобто при визначенні частини похибки ωFi , яка повинна використовуватись при розрахунку сумарної похибки, необхідно величину поля розсіювання, що відповідає економічній точності процесу та є оцінкою точності відповідного ТР, зменшити на величину зкомпенсованої похибки, бо інакше це означатиме заниження прогнозованої точності обробки, що, в свою чергу, призведе до помилкових рекомендацій щодо необхідності додаткової обробки для підвищення точності конструкторського розміру.

Результати. На основі графічного представлення схеми оброблення (рис. 1) рівняння операційних розмірних ланцюгів та полів розсіювання, для зазначених варіантів оброблення будуть такими:

$$\text{Для варіанту 1} - A11 = F3 \text{ (1) та } \omega A11 = \omega F3 \text{ (2)}$$

$$\text{Для варіанту 2} - A12 = F1 + F2 \text{ (3) та } \omega A12 = \omega F1 + \omega F2 \text{ (4)}$$

де $A11$, $A12$ – позначення конструкторського розміру $A1$, що відповідають 1 і 2 варіантам оброблення (представлення технологічних розмірів);

$\omega A11$, $\omega A12$ – величини полів розсіювання замикаючої ланки-конструкторського розміру, що відповідають 1 і 2 варіантам представлення технологічних розмірів;

$F1$, $F2$ – технологічні розміри, задані від опорної технологічної бази;

$F3$ – технологічний розмір, заданий між 2-ма оброблюваними поверхнями, що забезпечується програмою;

$\omega F1$, $\omega F2$, $\omega F3$ – величини полів розсіювання складових ланок – технологічних розмірів. Очевидно, що в результаті обробки, незалежно від варіанту задання технологічних розмірів, точність замикаючої ланки – конструкторського розміру $A1$ буде однаковою. Тобто $\omega A11 = \omega A12$, а це означає, що праві частини рівнянь (2) і (4) також повинні мати однакові величини. Така рівність має місце завдяки наявності взаємокомпенсації похибок технологічних розмірів $F1$, $F2$, яка може бути врахована уведенням у праву частину рівняння (4) відповідної складової.

З урахуванням взаємокомпенсації похибок технологічних розмірів $F1$, $F2$ рівняння (4), в якому однією із складових буде величина взаємокомпенсації ωk матиме вигляд: $\omega A12k = \omega F1 + \omega F2 - 2\omega k$ (5)

$$\text{Тоді можна записати } \omega A11 = \omega A12k \text{ або } \omega F3 = \omega F1 + \omega F2 - 2\omega k \text{ (6)}$$

Рівняння (6) у вигляді зручному для розрахунку величин похибок взаємокомпенсації буде таким: $2\omega k = \omega F1 + \omega F2 - \omega F3$ (7)

Використовуючи довідкові дані, що характеризують точність технологічних розмірів – $\omega F1$, $\omega F2$, $\omega F3$, та, розв'язавши рівняння (7) відносно ωk , було знайдено величини взаємокомпенсації похибок технологічних розмірів для різних умов і діапазонів розмірів.

Підставляючи в рівняння (7) статистичні дані (величини полів розсіювання технологічних розмірів – $\omega F1$, $\omega F2$, $\omega F3$), що враховують тип розмірів і характеризують їх точність та одержані на основі аналізу (Bondarenko et al., 1992; Dietrich et al., 2004; Drake, 1999; Swift & Booker, 2013) визначено абсолютні значення ωk та відносну величину – коефіцієнт взаємокомпенсації (K), тобто частку величини поля розсіювання технологічного розміру, що буде компенсована $K = \omega_k / \omega_{F1}$. Визначення зазначених величин проводилось для умов оброблення на токарних верстатах з ЧПК, чорнове і чистове оброблення, для 3-х діапазонів розмірів, тобто оцінювався вплив виду оброблення та величини одержуваних розмірів.

Оцінка величин похибок, що взаємокомпенсуються при чорновій обробці на токарних верстатах з ЧПУ, діапазон поздовжніх розмірів $L < 80$ мм. Для зазначеного діапазону розмірів усереднені значення полів розсіювання, що характеризують середню економічну точність оброблення, приймалися такими: $\omega F1 = \omega F2 = 0,25$ мм для розмірів $F1 = 30$ мм, $F2 = 70$ мм., $\omega F3 = 0,2$ мм. Підставивши значення у рівняння (7), знаходили фактичне значення величини взаємокомпенсації: $2\omega k = 0,25 + 0,25 - 0,2 = 0,3$ мм; $\omega k = 0,15$ мм;

Частка похибки, що взаємокомпенсується, становить $K=0,15/0,25=0,6$ або 60% величини поля розсіювання технологічного розміру.

Діапазон поздовжніх розмірів $L = 80 - 260$ мм. Аналогічно, розглянутому вище діапазону розмірів, знаходили чисельне значення поля розсіювання замикаючої ланки для нового діапазону розмірів, тобто $A1: 80 < A1 < 260$ мм. Складові ланки $F1, F2$ мають величини в діапазоні від 80 до 260 мм. Усереднені значення полів розсіювання приймалися такими: $\omega F1 = \omega F2 = 0,3$ мм., $\omega F3 = 0,2$ мм. Фактичне значення величини взаємокомпенсації:

$2\omega_k = 0,3 + 0,3 - 0,2 = 0,4$ мм; $\omega_k = 0,2$ мм; Частка похибки, що взаємокомпенсується, становить $K=0,2/0,3=0,67$ або 67% величини поля розсіювання технологічного розміру.

Виконавши розрахунки, одержали значення для інших діапазонів розмірів: Діапазон розмірів $L = 260 - 500$ мм. – $\omega_k = 0,2$ мм; $K=0,2/0,35=0,57$ або 57% величини поля розсіювання технологічного розміру. Діапазон розмірів $L > 500$ мм. – $\omega_k = 0,2$ мм; $K=0,2/0,4=0,5$ або 50% величини поля розсіювання технологічного розміру. Аналогічний аналіз та розрахунки були виконані для чистової обробки на токарних верстатах з ЧПК. Одержані результати представлені на графіку (рис. 2). Аналіз отриманого графіку (рис. 2) дає підставу зробити висновок, що із збільшенням розміру обробки величина взаємокомпенсації має тенденцію до збільшення для обох видів обробки. Для чорнкової обробки вона лежить у межах 0,15 – 0,2 мм, а для чистової – 0,09 – 0,13 мм.

На основі одержаних результатів також був побудований графік (рис. 3) для розрахунку коефіцієнтів взаємокомпенсації похибок технологічних розмірів. Аналіз результатів свідчить, що частка похибки обробки, яка взаємокомпенсується ($K = \omega_k / \omega_{Fi}$), у залежності від величин розмірів, при чорнвовій обробці на верстатах з ЧПК

та забезпеченні відповідних розмірів програмою, коливається в межах від 0,5 до 0,67 поля розсіювання технологічного розміру, а при чистовій обробці – в межах від 0,5 до 0,6. Таким чином, у залежності від діапазонів отримуваних розмірів, у розрахунках доцільно приймати такі величини коефіцієнтів взаємокомпенсації похибок технологічних розмірів: 1) при чорнвовому обробленні – у діапазонах розмірів 0 – 260 мм. ($K = 0,6 - 0,65$); 261-750 мм. ($K = 0,5 - 0,6$); 2) при чистовому обробленні – у діапазоні розмірів від 0 – 750 мм. ($K = 0,5 - 0,6$).

Для експериментальної оцінки величини взаємокомпенсації похибок та підтвердження результатів, отриманих на основі аналізу статистичних даних та представлених вище, були виконані експериментальні дослідження в умовах реального виробництва при виконанні розточування отвору на токарній операції по обробленню деталі «Корпус» на верстаті з ЧПК (рис. 4).

Конструкторський розмір A_k можна забезпечити двома варіантами (схемами) призначення технологічних розмірів (ТР), які будуть представлені відповідними операційними ланцюгами, що відображатимуть вплив точності технологічних розмірів на точність замикаючої ланки-конструкторського розміру. При аналізі обох варіантів виходили з того, що фактична точність розміру A_k повинна бути однаковою в обох варіантах, оскільки вона буде результатом функціонування однієї і тієї ж технологічної системи (ТОС). Це твердження є основою методики, що використовувалась для визначення частки похибок ТР, які взаємокомпенсуються.

Після оброблення, на кожній деталі із вибірки 50 штук, проводились вимірювання 3-х технологічних розмірів $F1, F2, Fk$ (рис. 4). За результатами вимірювань, для вибірки величин кожного розміру, розраховувались значення середньоквадратичних відхилень та відповідні поля розсіювання $\omega F_i = 6S$ ($\omega F1, \omega F2, \omega Fk$), які є оцінками фактичної точності технологічних розмірів.

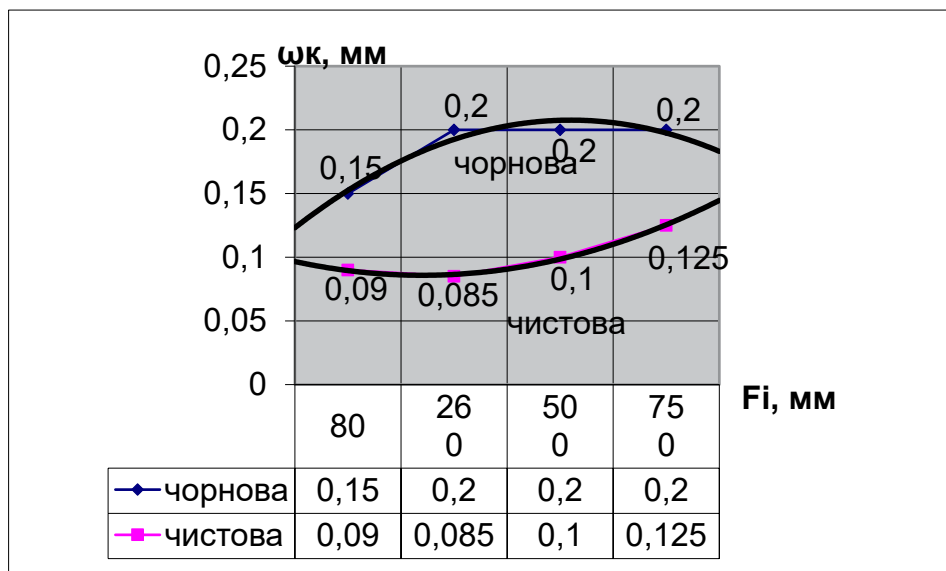


Рис. 2. Залежність величини взаємокомпенсації похибок обробки від величини технологічного розміру та виду обробки (чорнова, чистова)

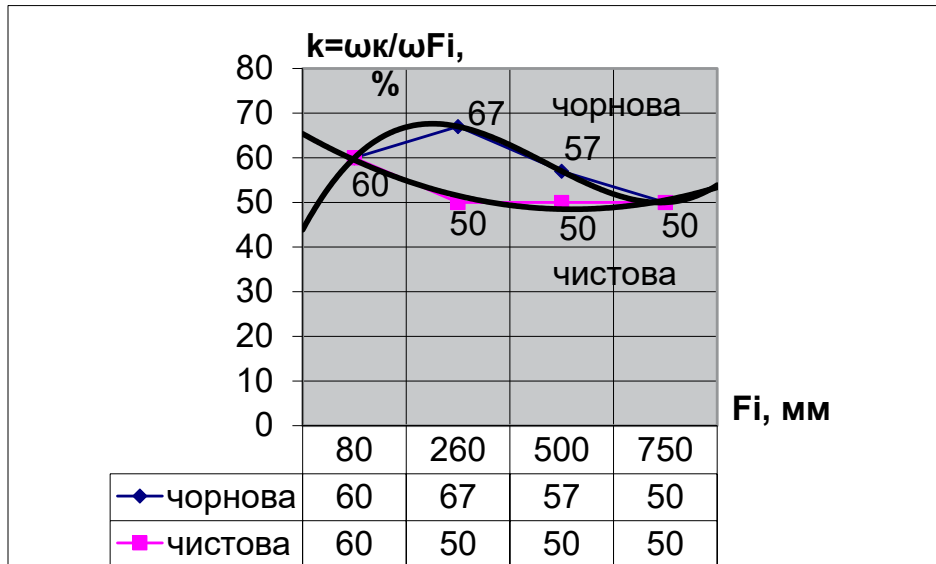


Рис. 3. Залежність величини коефіцієнту взаємокомпенсації від величини технологічного розміру та характеру обробки (чорнова, чистова)

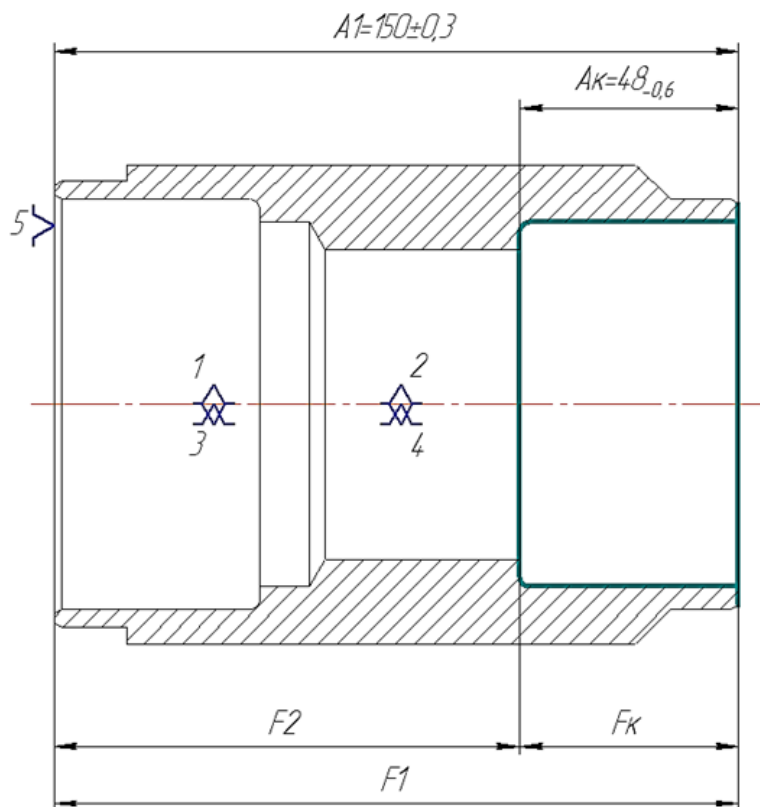


Рис. 4. Ескіз оброблення деталі «Корпус»

На підставі одержаних результатів проводився аналіз та порівняння оцінок точності замикаючої ланки – розміру A_k для 2-х варіантів.

1-й варіант: Задавались і забезпечувались технологічні розміри F_1 і F_k . Технологічний розмір F_k – заданий від налагоджувальної бази – торця, що обробляється на тій же операції. У такому варіанті ОРЛ для оцінки точності замикаючої ланки буде таким: $[A_k] = F_k$. При цьому

F_k буде відноситись до типу ТР, що забезпечуються програмою, тобто $\omega F_k = \omega_{ек} F_k = 0,20 \text{ мм}$.

2-й варіант: Задавались і забезпечувались 2 технологічні розміри – F_1 і F_2 . У цьому випадку розмір A_k буде замикаючою ланкою ОРЛ: $[A_k] = F_1 - F_2$, а величини полів розсіювання замикаючої ланки розраховувались:

$$\text{методом максимуму-мінімуму } [\omega A_k] = \omega F_1 + \omega F_2 \quad (8)$$

$$\text{та імовірнісним методом } [\omega A_k] = 1,2 \cdot \sqrt{\omega^2 F_1 + \omega^2 F_2} \quad (9)$$

На основі оброблення результатів вимірювань одержали: $\omega F1 = 6S_1 = 0,25\text{мм.}$; $\omega F2 = 6S_2 = 0,28\text{мм.}$, $\omega F_k = 6S_k = 0,19\text{мм.}$, тоді з урахуванням цих величин були розраховані величини полів розсіювання конструкторського розміру Ак.

Для варіанту 1. $\omega_{Ак} = \dot{E}F_k = 0,19\text{мм.}$, що можна вважати оцінкою фактичної точності конструкторського розміру Ак.

Для варіанту 2 прогнозні величини $\omega_{Ак}$ розраховувались 2 методами:

2.1. Розрахунок методом максимуму – мінімуму згідно з рівнянням (8): $[\omega_{Ак1}] = 0,25 + 0,28 = 0,53\text{мм.}$

2.2. Розрахунок імовірнісним методом згідно з рівнянням (9):

$$[\omega_{Ак2}] = 1,2\sqrt{0,0625 + 0,0784} = 1,2 \cdot 0,375 = 0,45\text{мм.}$$

Отже, розраховані значення величин полів розсіювання замикаючих ланок є завищеними відносно фактичного значення (0,19 мм.) для методу максимуму – мінімуму у $0,53/0,19 = 2,8$ рази, а для імовірнісного – у $0,45/0,19 = 2,4$ рази.

З урахуванням того, що і в 1-му і в 2-му варіантах використовувались одні і ті ж заготовки можна стверджувати, що експериментальне значення $\omega_{Fk} = 0,19\text{мм.}$ наближається до об'єктивно існуючої (дійсної) величини поля розсіювання конструкторського розміру $\omega_{Ак}$, а отже різниця між дійсним і розрахованими прогнозними значеннями пояснюється недоліками методології розрахунку прогнозних значень $\omega_{Ак}$, а саме неврахуванням взаємокомпенсації похибок технологічних розмірів $\omega F1$ і $\omega F2$. Виходячи з такої гіпотези, на основі одержаних експериментальних даних, були розраховані величини взаємокомпенсації та коефіцієнт взаємокомпенсації похибок ТР, які необхідно використовувати в розрахунках ОРЛ з такими ланками. Тобто вважали, що різниця між величиною $\omega_{Ак}$ і її розрахованими значеннями $\omega_{Ак1}$ та $\omega_{Ак2}$ є величиною взаємокомпенсації ($2\omega_k$). У даному випадку має місце часткова взаємокомпенсація похибок положень оброблюваних поверхонь внаслідок однонаправлених пружних та температурних деформацій ТОС, зносу інструменту та інших факторів. Тоді сумарна величина взаємокомпенсації всіх похибок для кожного з технологічних розмірів $F1$ і $F2$ буде однаковою і становитиме ω_k , а отже при розрахунку величини поля розсіювання замикаючої ланки $[Ак]$ методом max-min залежність (1) матиме вигляд:

$$[\omega_{Ак}] = \omega F1 + \omega F2 - 2\omega_k \quad (10)$$

З урахуванням того, що $[\omega_{Ак}] = \omega_{Fk}$, рівняння (10) можна записати, замінивши $\omega_{Ак}$ на відому величину ω_{Fk} , тоді воно матиме вигляд:

$$\omega_{Fk} = \omega F1 + \omega F2 - 2\omega_k \quad (11)$$

Після підстановки знайдених експериментальних значень ω_{Fk} , $\omega F1$ та $\omega F2$ у рівняння (11) розраховали невідому величину ω_k .

$$2\omega_k = \omega F1 + \omega F2 - \omega_{Fk} = 0,25 + 0,28 - 0,19 = 0,34\text{мм.};$$

$$\omega_k = 0,34/2 = 0,17\text{мм.}$$

Розраховавши частки величин взаємокомпенсації похибок відносно загальної величини поля розсіювання

кожного з ТР, тобто коефіцієнти взаємокомпенсації, одержали наступні їх величини:

$$k_1 = \omega_k / \omega F1 = 0,17/0,25 = 0,68;$$

$$k_2 = \omega_k / \omega F2 = 0,17/0,28 = 0,61;$$

Отже на підставі результатів експериментального дослідження, для переходів розточування, що виконуються на верстатах ЧПК, коефіцієнти взаємокомпенсації похибок технологічних розмірів рекомендується приймати в межах 0,6 – 0,7, що близько до їх величин, одержаних на основі аналізу статистичних даних і представлених вище.

Обговорення. Ігнорування взаємокомпенсації похибок технологічних розмірів при оцінці прогнозної точності, незалежно від вибору методу розрахунку (максимуму-мінімуму, імовірнісний) приводить до завищення більше ніж у 2 рази прогнозних величин у порівнянні з фактичними, а отже і до помилкових рішень щодо прийнятності відповідних ТП, наслідком яких буде збільшення витрат на виготовлення деталей.

Одержані у даній роботі результати, засвідчили необхідність та важливість урахування, у процесі виконання розмірного аналізу ТП, взаємокомпенсації похибок технологічних розмірів при оцінюванні прогнозної точності конструкторських розмірів, їх використання у практичній діяльності дозволяє підвищити якість прогнозної оцінки точності та може бути основою для подальшого створення алгоритмів виявлення таких ланок і автоматизації відповідних розрахунків. Крім того, одержані результати свідчать про необхідність і доцільність подальшого проведення аналогічних досліджень для інших видів оброблення, наприклад, фрезерування.

Висновки. 1. На основі проведених досліджень встановлені величини і коефіцієнти взаємокомпенсації похибок технологічних розмірів при виконанні токарної обробки на верстатах з ЧПУ.

2. Величини коефіцієнтів взаємокомпенсації похибок технологічних розмірів при токарній обробці на верстатах з ЧПК рекомендується приймати: для чорнового оброблення – в межах 0,55 – 0,65, а для чистового 0,5 – 0,6.

3. Використання отриманих величин і коефіцієнтів взаємокомпенсації похибок технологічних розмірів дозволяє формалізувати урахування впливу взаємокомпенсації похибок при прогнозуванні точності та суттєво підвищити ефективність прогнозної оцінки точності замикаючих ланок – конструкторських розмірів, одержуваних при обробці, за рахунок суттєвого, більше ніж у 2 рази зменшення прогнозних величин полів розсіювання і наближення їх до реальних значень і, тим самим, дозволяє скоротити витрати на оброблення.

4. Не урахування взаємокомпенсації похибок технологічних розмірів приводить, при розрахунках прогнозних величин полів розсіювання замикаючих ланок будь-яким із методів (max-min, імовірнісний), до суттєвого – у 2,3 – 2,8 рази завищення прогнозних величин полів розсіювання замикаючих ланок відносно фактичних. Наслідком чого може бути уведення додаткової обробки, яка у дійсності не буде необхідною.

Бібліографічні посилання:

1. Bilanenko, V. H., Prykhodko, V. P., Melnyk, O. O. (2019). Proektuvannia tekhnolohichnykh protsesiv. Chastyna 1. Obroblennia detalei-til obertannia. [Design of technological processes. Part 1. Processing of parts-bodies of rotation] Elektronnyi resurs: navchalnyi posibnyk dlia studentiv spetsialnosti 131 «Prykladna mekhanika»– Elektronni tekstovi dani (1 fail: 12,8 Mbait) – Kyiv : KPI im. Ihoria Sikorskoho – 232s. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/27740> [in Ukrainian]
2. Bondapenko S.H., Cherednikov O.V. y dr.(1992) Razmernyi analiz konstruktseyi. [Dimensional analysis of structures]. Spravochnyk. K.: Tekhnika, – 150s. [in Ukrainian]
3. Bondarenko S.H. (1993). Rozmirni rozrakhunky mekhanoskladalnoho vyrobnytstva [Dimensionals accounts of mechano-assembly production]. Kyiv. Minosvity Ukrainy, instytut systemnykh doslidzhen osvity Ukpainy. [in Ukrainian].
4. Dietrich, R., Garsaud, D. Gentillon, S., Nicolas, M.(2004). Précis de méthodes d'usinage : méthodologie, production et normalisation, [Handbook of machining methods: methodology, production and standardization] 7ème édition, Ed. NATHAN – AFNOR, 182p.[in French]
5. Drake, Paul J. Jr. (1999). Dimensioning and Tolerancing Handbook, McGraw-Hill, New York., 704 pages.
6. Kravchenko, L. S., (2009). Razmernyi analiz pry proektirovanny, yzghotovlenyy y sborke [Dimensional analysis in design, manufacture and assembly]: Uchebn. posobyе [dlia stud. mashynostroyt. spetsyaln.]. – Kharkov: NTU «KhPY», – 356 s. [in Ukrainian].
7. M. Kamali Nedjid, F. Vignat and F. Villeneuve (2009), Simulation of the geometrical defects of manufacturing, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 45, No. 7-8, pp. 631-648, DOI: 10.1007/s00170-009-2001-3
8. Mercier, J. (1993) “De l'étude de fabrication à l'analyse d'usinage, 2ème édition”, Edition de la Technique moderne – Pierron, Sarguemines, 294p.(in French)
9. Pacquet, G., Marche, L., (2004). Guide de la productique, [Guide to production] Ed. Delagrave, Paris, 412p. [in French]
10. Prykhodko V., Pukhovskiy Y., Danylova L., Lapkovskiy S., Sapon S. (2022). Informatsiine zabezpechennia rozmirnoho modeliuвання ta analizu tekhnolohichnykh protsesiv.[Information support for dimensional modeling and analysis of technological processes]. Tekhnichni nauky ta tekhnolohii. № 3(29). S.77-93. [in Ukrainian]
11. Prykhodko, V.P. (2021). Rozmirne modeliuвання ta analiz tekhnolohichnykh protsesiv: navchalnyi posibnyk dlia studentiv spetsialnosti 131 «Prykladna mekhanika» [Dimensional modeling and analysis of technological processes: study guide for students of specialty 131 “Applied mechanics”]. KPI im. I. Sikorskoho. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/38826>. [in Ukrainian]
12. Rud, V.D., Herasymchuk, O.O., & Markova, T.P. (2008). Rozmirno-tochnistnyi analiz konstruktseyi ta tekhnolohii [Dimensional-accuracy analysis of constructions and technologies]. Lutsk: RVV LDTU,- 344p. [in Ukrainian]
13. Swift, K G; Booker, J D (2013). Manufacturing process selection handbook, Oxford : Butterworth-Heinemann., 512 p.

Prykhodko V. P., PhD in Technical Sciences, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine

Pukhovskiy Ye. S., Doctor of Technical Sciences, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine

Danylova L. M., PhD in Technical Sciences, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine

Lapkovskiy S. V., PhD in Technical Sciences, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine

Havrushkevych N. V., Assistant, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine

Determination and accounting of the value of mutual compensation of errors in predicting the accuracy of processing on machines with CNC

Based on the results of experimental studies, the values and coefficients of mutual compensation of errors in technological dimensions are determined. Their use makes it possible to formalize the consideration of the influence of the mutual compensation of errors in the dimensional analysis and to increase the efficiency of the predictive assessment of the accuracy of the master links – design dimensions due to a significant, more than 2 times, reduction in the predictive values of the scattering fields and their approximation to real values, as a result of which the technological processes assessment quality will be increased at the stage of their design.

An example of the use of obtained results in the calculation of operational dimension chains for the predictive assessment of design dimension accuracy is shown. It has proved the importance and efficiency of taking into account the mutual compensation of technological dimension errors to improve the assessment quality and make more informed decisions about the acceptability of technological process or the need for its adjustment.

While calculating the magnitudes of scattering fields of closing links by any of the methods (max-min, probabilistic), failure to take into account the mutual compensation of errors of technological dimensions leads to a significant, more than 2.3 times, overestimation of the predicted values of scattering fields of closing links relative to the actual ones. The consequence of which may be the erroneous introduction of additional processing, which in reality would be unnecessary.

The use of obtained results in practice allows to improve the predictive accuracy assessment quality and can be the basis for the further creation of algorithms for the detection of such links and automation of corresponding calculations.

Formalization of calculations and taking into account the mutual compensation of errors of technological dimensions, together with similar solutions for other procedures, open the way to further automation of dimensional modeling and analysis of technological processes.

Key words: mutual compensation of errors, assessment of dimensional accuracy, dimensional modeling, automation of dimensional analysis.