

УДК 531.1; 62-2

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2026-28-5

Защепкіна Н. М., ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9397-6632>

Тимчик Р. Г.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## НАЛАШТУВАННЯ РІЗУЧОГО ІНСТРУМЕНТА НА ВЕРСТАТІ З ЧПК

*Розмірний знос різального інструмента – це складне, комплексне явище. Існує кілька різних механізмів зносу, які діють самостійно або у поєднанні один з одним. Виділяють чотири основні види зносу: абразивний, адгезійний, дифузійний та втомний. Однак досі жодному з дослідників не вдалося точно, виключно лише теоретичним шляхом передбачити інтенсивність зносу різального інструмента та його вплив на геометричні розміри оброблюваних деталей.*

*Тому для визначення часових характеристик достовірної інтенсивності зношування інструмента в конкретних умовах даної технологічної системи необхідно звертатися до експериментальних досліджень. Серед режимів обробки швидкість різання чинить найбільший вплив на період стійкості різального інструмента, а отже – і на швидкість його зношування.*

*Наведено результати експериментальних досліджень за апробованою методикою визначення розмірного зносу різального інструмента та його впливу на точність обробки партії деталей. Отримані результати можуть бути використані при дослідженнях з іншими інструментами при обробці інших марок матеріалів і режимів обробки.*

**Ключові слова:** розмірний знос, підналаштування, інформаційно-вимірвальна система, геометричні розміри, точність, похибка, вимірювання.

**Постановка проблеми.** Автоматизація виготовлення прецизійних деталей в сучасному прецизійному приладобудуванні процесами механічного різання неможлива без наявності і використання аналітичних залежностей, які описують механіку цього процесу з динамічними змінами. Достовірна інформація про такі залежності є основною комплексної автоматизації виробництва. Автоматизація процесу виготовлення деталей механічною обробкою металів враховує вплив режимів обробки на зносостійкість інструмента, точність і тривалість обробки.

Відсутність універсальних аналітичних моделей про однозначний зв'язок між незалежними параметрами процесу різання (швидкістю, подачею, тощо) з одного боку, та залежними параметрами (розмірна зносостійкість інструмента, показники якості поверхні деталі, енергозатрати, тощо) з іншого боку.

Найскладнішим питанням, за інших рівних умов, виступає точність розмірів і якість поверхні виготовлення деталей, які залежать від багатьох похибок токарної обробки.

**Аналіз останніх досліджень.** Вивченню точності обробки на токарних верстатах присвячено багато робіт, і особливо на верстатах з числовим програмним керуванням (ЧПК), де автоматичне регулювання процесу обробки за фактичними значеннями його параметрів забезпечує краще використання можливостей верстата та інструменту, спрощує керуючі програми, знижує витрати на програмування та саму обробку загалом [1, 2, 3].

Дослідження похибок обробки дозволяє обґрунтовано призначити параметр управління та вибрати структуру САК. Таким чином, вивчення складових сумарної похибки чистової обробки на токарних верстатах з ЧПК є актуальним.

Сучасні Автоматичні системи граничного регулювання забезпечують підвищення продуктивності обладнання за рахунок максимального використання силових можливостей верстата при непрямому підтриманні точності в межах допуску. Але для виготовлення прецизійних деталей приладів мають обмежене використання [4, 5, 6].

Однак, хоча підвищені режими й скорочують машинний час, вони не завжди оптимальні з точки зору продуктивності та собівартості через зниження терміну служби інструменту, що, в свою чергу, призводить до необхідності його частішої заміни [7, 8, 9]. Розроблено ряд систем граничного управління, що забезпечують стабілізацію стійкісних характеристик процесу різання, рівня вібрацій та інших параметрів обробки. Наприклад, швидкість зносу інструменту стабілізують регулюванням швидкості різання за незмінної величини подачі на оберт заготовки. Недоліком розглянутих систем управління є недостатнє використання можливостей

технологічної системи. Тому були розроблені автоматичні системи оптимального управління. Такі системи поділяються на пошукові та безпошукові (за регулярним алгоритмом).

**Метою статті** є дослідження систематичних і випадкових похибок, що виникають під час обробки деталей на верстатах із ЧПК, та створення аналітичних моделей для визначення їхнього впливу на точність обробки. У роботі ставиться завдання експериментально оцінити складові сумарної похибки, зокрема розмірний знос ріжучого інструмента, його теплові деформації розмірів та похибку позиціонування супорта верстата.

**Аналіз складових сумарної похибки обробки на токарних верстатах з ЧПК.** Похибки виготовлення деталей на верстаті поділяють на систематичні та випадкові. Мінімізують ці похибки шляхом поточного налаштування положення ріжучого інструмента на верстаті.

Похибки обробки, такі як розмірний знос інструмента та його теплові деформації розмірів, тощо, призводять до зміщення початкового положення вершини інструмента, яке задається програмою обробки деталі. Компенсацію цього зміщення здійснюють розмірним підналаштуванням ріжучого інструмента, тобто додатковим переміщенням супорта верстата, що супроводжується додатковою похибкою розмірної корекції.

Основні складові сумарної похибки обробки під час роботи на верстатах із ЧПК: похибка позиціонування супорта, розмірний знос інструмента, похибка розмірної корекції, теплові похибки, тощо [10, 11].

Для практичного підтвердження теоретичних положень проведено експериментальні дослідження точності виготовлення партії ступінчастих валиків в умовах чистового точіння на верстаті ТПК-125 ВМ із системою ЧПК типу «Електроніка К.60.680-CNC». Для визначення похибки позиціонування супорта вимірювали положення супорта у базовій точці за допомогою індикатора типу ІЦЦ 25,4/0,001 мм, який був жорстко з'єднаний за допомогою кронштейна з салазками супорта (рис. 1).



Рисунок 1 – Індикатор ІЦЦ 25,4/0,001 мм

**Постановка експериментальних досліджень.** Індикатор упирався вимірювальним наконечником у упор, встановлений на супорті верстата. Ціна поділки шкали індикатора 0,001 мм, діапазон вимірювань складав 1 мм. Після обробки чергової деталі супорт повертався у нульове положення. Готова деталь знімалася з верстата й передавалася на вимірювальну позицію.

Встановлювалася нова заготівка, і цикл повторювався. Після обробки партії з 10 деталей задавали різні значення корекції положення вершини інструмента. Вимірювання діаметрів деталей у перерізах А–А та В–В здійснювали за допомогою мікрометра з ціною поділки 0,001 мм (див. рис. 2).

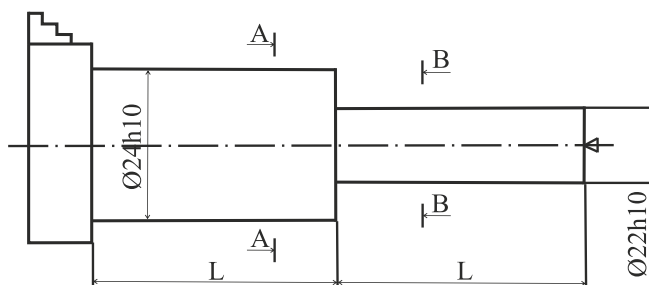


Рисунок 2 – Схема вимірювань діаметра деталі

За показами мікрометра побудовано точкові діаграми вимірювання розмірів  $X_{nk}$  і  $X'_{nk}$  у партії деталей (див. рис. 3), а за показами індикатора – діаграми положення супорта верстата у нульовій точці.

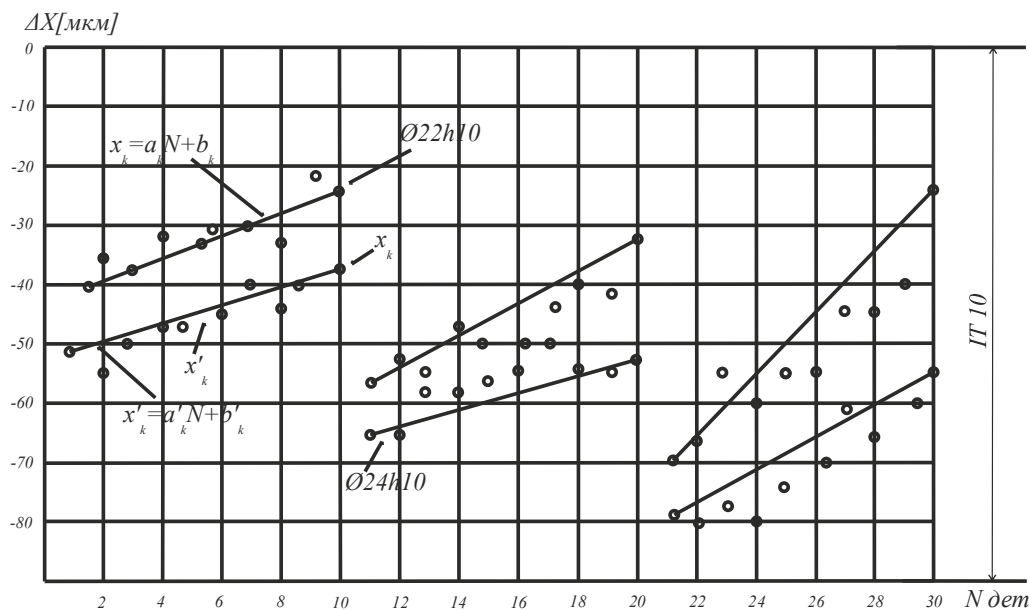


Рисунок 3 – Діаграма розмірів партії деталей

Множина вимірних розмірів у партії 10 шт. деталей, а також різниця положень  $Z_{nk}$  супорта між заданим за програмою значенням переміщення з урахуванням корекції та фактичним – за показами індикатора, розглядалися як випадкові величини, де  $n$  – номер деталі, а  $k$  – номер корекції.

Випадкову складову сумарної похибки обробки за результатами вимірювань значень  $X_{nk}$  і  $X'_{nk}$  для кожної реалізації розраховували як вибіркові дисперсії  $\sigma_{nk}$  і  $\sigma'_{nk}$  розсіювання розмірів деталей відносно їхніх середніх значень.

**Оцінка точності позиціонування інструмента.** Статистичні показники точності позиціонування визначали по діаграмі положення супорта. На графіку точності позиціонування (рис. 4) показано накопичені відхилення  $A$ . Їх визначали як алгебраїчну різницю екстремальних середньоарифметичних значень відхилень фактичних положень супорта від запрограмованих, та середньоквадратичні відхилення  $\sigma_a$  розсіювання відхилень під час десятикратного підходу до запрограмованого положення в межах кожної реалізації.

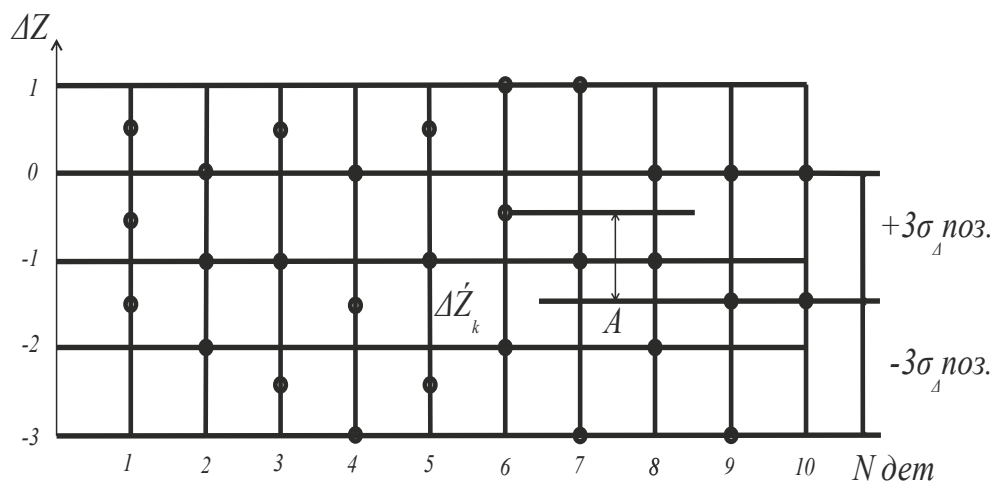


Рисунок 4 – Графік відхилень позиціонування супорта

Окрім накопиченого відхилення  $A$  (систематична похибка позиціонування) визначали й інші систематичні складові загальної похибки обробки в межах окремих реалізацій, які апроксимовано лінійною залежністю.

Для кожної реалізації отримано рівняння лінійної регресії:

$$X_k = a_k N + b_k \quad \text{і} \quad X'_k = a'_k N + b'_k. \quad (1)$$

Нахил прямих визначається впливом ряду похибок, основними з яких є: систематична складова похибки позиціонування  $A_k$ , розмірний знос інструмента та його теплові деформації.

Для встановлення зв'язку між сукупністю випадкових величин  $\varphi = 1/2(X - X')$  та  $Z$ , обчислено коефіцієнт кореляції та кореляційне відношення. Характер залежності випадкових величин визначався за точковою діаграмою розсіювання. Між спостережуваними випадковими величинами існує тісний зв'язок, а їх зміна наближена до лінійної залежності.

Про зміни спостережуваних випадкових величин у процесі виготовлення партії деталей, а також кількісні характеристики цієї зміни оцінювали за коефіцієнтом кореляції та рівнянням лінійної регресії.

Отриманий коефіцієнт кореляції  $Z = 0,92$  та рівняння лінійної регресії:

$$\varphi = 0,92X + 5,0 \quad (2)$$

підтверджують початкові припущення та свідчать про наявність лінійного зв'язку між точністю відпрацювання корекції та зміною розмірів у партії деталей.

За результатами експериментальних досліджень сформульовано такі висновки:

- між точністю корекції та зміною розмірів у партії деталей встановлено тісний зв'язок із коефіцієнтом кореляції  $Z = 0,92$ .
- розсіювання розмірів партії деталей однієї реалізації розмірної корекції відбувається через розмірний знос інструмента та температурні деформації, нестабільність позиціонування супорта;
- основним резервом підвищення точності обробки деталей є зменшення похибок, спричинених розмірним зносом інструмента, його тепловими деформаціями та похибками позиціонування супорта верстатом.

Отже, для забезпечення високої точності обробки деталей необхідно здійснювати систематичне підналаштування положення вершини ріжучого інструмента після обробки кожної деталі. Це дозволить контролювати ресурс зносостійкості інструмента, що дає змогу достовірно враховувати його ріжучі можливості під час розв'язання різних завдань автоматичного керування процесом різання – на основі створення безконтактної автоматичної системи підналаштування ріжучого інструмента на верстаті.

Для підвищення точності металообробки вершина ріжучого інструмента під час обробки чергової деталі повинна переміщатися по опорній траєкторії. Насправді цього не відбувається через зміщення вершини інструмента внаслідок різних умов обробки та похибок системи і верстата.

Випадкові похибки визначаються типом обраного технологічного обладнання й складні для зменшення через їх стохастичний характер. Систематичні похибки, що в кілька разів перевищують випадкові, необхідно компенсувати.

Основними причинами систематичних похибок є розмірний знос інструмента, температурні та інші деформації системи. З метою визначення цих величин на верстатах установлюють різного типу датчики – вимірювальні перетворювачі, на основі яких створюють автоматичні системи керування [12,13,14].

**Алгоритм підналаштування інструмента.** Запропонована система в загальному випадку містить: токарний верстат – як засіб керування; процес металообробки – як об'єкт керування; джерело інформації про процес – вимірювальний перетворювач; систему ЧПК із мікропроцесором та відповідні алгоритми цієї системи.

Загальний алгоритм роботи системи підналаштування ріжучого інструмента наведено на рисунку 5.



Рисунок 5 – Блок-схема алгоритма підналаштування інструмента

Система працює таким чином:

КРОК 1: введення вихідних даних процесу різання, керуючих програм і попередні розрахунки.

КРОК 2: позиціонування інструмента.

КРОК 3: калібрування вимірювального перетворювача та всієї системи в цілому.

КРОК 4: виконання керуючої програми – процес металообробки.

КРОК 5: контроль інструмента.

КРОК 6: розрахунок коригувальних значень траєкторії.

КРОК 7: перевірка обмежень; якщо вони не виконуються – зупинка.

КРОК 8: корекція й перехід до обробки наступної деталі.

Для підналаштування інструмента після обробки чергової деталі, необхідно перемістити супорт верстата таким чином, щоб вершина інструмента знову зайняла початкову точку, в системі координат верстата.

Для визначення величини підналаштування супорта запропоновано розробити безконтактний оптичний прилад, який має нерухому опорну напівплощину, розміщену на верстаті у вимірювальній позиції. Вона буде базовою для визначення положення вершини ріжучого інструмента (Рис. 6). Тому пропонується на станині верстата нерухомо встановити опорну напівплощину на рівні осі обертання деталі та винести її за межі зони заміни деталі – у поле переміщень вершини інструмента. Вершина інструмента 1 підводиться до опорної напівплощини 2 на відстань  $a_0$ , при цьому координати супорта верстата запам'ятовуються й приймаються за вихідну точку для програми обробки деталі. Ці координати супорта є початковими базовими для даного різального інструмента. Після обробки чергової деталі супорт повертається у вихідну точку, при цьому вершина різальної кромки інструмента утворює щілину розміром  $a_1$  з опорною базовою напівплощиною.

Різниця між початковою шириною щілини  $a_0$  і поточною  $a_1$  є зміщенням вершини інструмента в системі координат верстата внаслідок розмірного зносу інструмента і температурних деформацій  $h = a_0 - a_1$

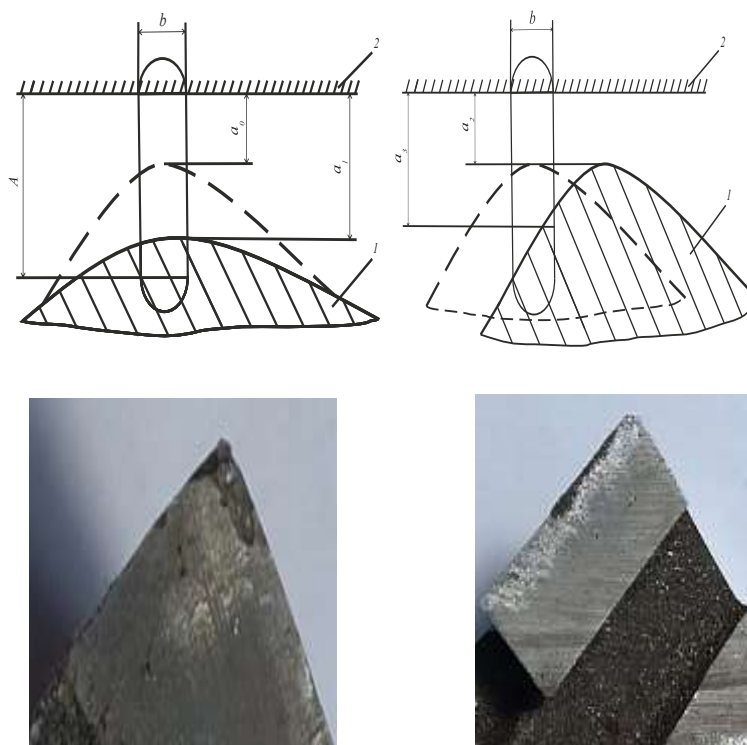


Рисунок 6 – До визначення положення вершини різального інструмента

На щілині, утвореній опорною вершиною 1 інструмента та напівплощиною 2, відбувається дифракція когерентного лазерного випромінювання. Дифракційна картина реєструється лінійкою приладів із зарядовим зв'язком (CCD). Вихідний відеосигнал через аналого-цифровий перетворювач (АЦП) і інтерфейс надходить у пристрій пам'яті мікропроцесора системи ЧПК верстата, де за відповідними алгоритмами обробляється й обчислюється величина ширини щілини  $a_0$ , яка запам'ятовується.

Далі виконують обробку деталі і повертають супорт у вихідну базову точку системи координат верстата. Система аналізу обробляє дифракційне зображення щілини, обчислює нове значення її ширини  $a_1$ , визначає різницю  $a_1 - a_0$  і виконує корекцію положення супорта верстата з метою компенсації зміщення вершини інструмента.

Перед початком металообробки положення вершини інструмента зазвичай точно не визначене, але завжди може бути встановлене з точністю до  $\pm 5$  мм. У цьому випадку система повинна визначити положення вершини інструмента до початку обробки, тобто здійснити початкове позиціонування інструмента. Для цього різальний інструмент 1 супортом верстата переміщують «вперед» спостерігаючи візуально до опорної напівплощини 2, доки одна з бічних граней не потрапить у поле лазерного випромінювання, як показано на рис. 6.

Потім виконують поперечне переміщення інструмента 1. Мінімальне значення ширини щілини відповідає центральному положенню вершини інструмента по лінії вимірювань. При цьому точність позиціонування за допоміжною координатою дорівнює половині ширини освітлювального пучка  $\Delta Z = b/2$ . Таким чином може бути виконане позиціонування різального інструмента 1, оскільки ширина щілини вимірюється та задається заздалегідь, а положення опорної напівплощини 2 на верстаті відоме з попередніх вимірювань.

Розглянутий варіант підналаштування прохідних різців може бути поширений і на інші типи різального інструмента за відповідного розташування опорної напівплощини.

**Висновки.** Похибки обробки на верстатах із ЧПК зумовлені зносом інструмента, тепловими деформаціями та неточністю позиціонування, і для їх мінімізації потрібне автоматичне підналаштування інструмента, особливо в умовах гнучких виробничих систем. Експериментальні дослідження підтвердили, що розсіювання розмірів деталей викликане нестабільністю руху супорта, поступовим зносом різця та температурними впливами, але точність корекції дозволяє отримувати 9-й квалітет точності.

Встановлено тісний лінійний зв'язок ( $r = 0,92$ ) між точністю відпрацювання корекції та розмірами виготовлених деталей, що підтверджує критичну роль своєчасної компенсації зміщення вершини інструмента.

Головні резерви підвищення точності – зменшення систематичних похибок: розмірного зносу інструмента, термічних деформацій та помилок позиціонування ЧПК. Для забезпечення стабільної точності запропоновано використовувати безконтактний оптичний дифракційний метод підналаштування: лазерне освітлення щілини між інструментом і опорною напівплощиною дозволяє точно визначити зміщення вершини різця та формувати корекцію.

Такий підхід дає змогу позиціонувати інструмент, контролювати його знос і стабілізувати геометричні параметри деталей, що робить його перспективною основою для автоматизованих систем керування процесом обробки деталей різанням.

### Інформаційні джерела

1. Попов С.В. Дослідження точності оброблення циліндра різцем із твердого сплаву. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету. 2025. Вип. 15, том 1. С.105-113. DOI: <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-25-1-12>.
2. Технологічне забезпечення якості продукції машинобудування: монографія/ Фролов Є.А., Кравченко С.І., Попов С.В., Гнітько С.М. Полтава: НУПП, 2019. 204 с.
3. Оптимізація режимів різання на важких верстатах/ Г.П.Клименко та ін. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. 2022. No2(6). С. 43-48. DOI: [https://doi.org/10.20998/2079-004X.2022.2\(6\).06](https://doi.org/10.20998/2079-004X.2022.2(6).06).
4. Influence of tool wear and workpiece diameter on surface quality and prediction of surface roughness in turning/ С. Li et al. Metals. 2024. Vol. 14, No. 11. Article 1205. DOI: <https://doi.org/10.3390/met14111205>.
5. Теоретичні основи механічної обробки високоточних деталей: монографія / Ф. В. Новіков, І. О. Рябенков. – Х. : Вид. ХНЕУ, 2013. – 352 с.
6. An experimental study on the effect of tool geometry on tool wear and surface roughness in hard turning /Pham M.D., Le H.G., Mai D.D., Do T.S. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2020. Vol.12(9).Pp. 1-11. DOI: <https://doi.org/10.1177/1687814020959885>.
7. Dimla E. Correlation of cutting force features with tool wear in a metal turning operation.Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2001. Vol. 215, no. 3. Pp.435-440. DOI: <https://doi.org/10.1243/0954405011515370>.
8. Hu C., Xiong W., Sun W., & Shuai Y. (2019). Research on the mechanism of improving hydrostatic spindle rotating accuracy with controllable restrictor. Journal of Mechanical Engineering, 55(11), 160-168.
9. Кучугуров М.В. Влияние износа режущего инструмента на особенности динамики процесса резания при токарной обработке. Різання і інструмент в технологічних системах. 2015. Вип. 85. С.163-170.
10. Шевченко О. В. Підвищення точності обробки на токарних автоматизованих верстатах шляхом мікрорегулювання положення різця /О. В. Шевченко, Т. Г. Гримуд. Вісник НТУУ "КПІ". Машинобудування. 2010. № 59. С. 59-64. [https://opac.kpi.ua/F/?func=direct&doc\\_number=000303381&local\\_base=KPI01](https://opac.kpi.ua/F/?func=direct&doc_number=000303381&local_base=KPI01).
11. Алтухов, В. М., Руднев, Є. С. Дослідження теплових явищ при різанні важкооброблюваних матеріалів в умовах точіння / В. М. Алтухов, Є. С. Руднев. 2022. – 8 с. <https://nvdu.snu.edu.ua/wp-content/uploads/2022/08/2022-23-10.pdf>.
12. Забезпечення надійності різального інструмента : навчальний посібник / Ю. О. Харламов, В. І. Соколов, О. С. Кроль та ін. – Северодонецьк : Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2019. – 212 с. <https://dspace.snu.edu.ua/handle/123456789/185>.
13. Gu, Guquan, et al. A review of the research on the variation of tool's motion trajectory and its influence on the formation mechanism of surface quality in ultrasonic vibration machining. /Journal of Manufacturing Processes 107 2023: pp. 294-319. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1526612523009702>.
14. Zhang, Zhiyu, Jiwang Yan, and Tsunemoto Kuriyagawa. Manufacturing technologies toward extreme precision. /International Journal of Extreme Manufacturing 1.2 2019: p. 23 <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2631-7990/ab1ff1/meta>.

UDC 531.1; 62-2

**Zashchepkina N., Tymchyk R.**

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

### CUTTING TOOL SETTING ON CNC MACHINE

*Dimensional wear of a cutting tool is a complex, complex phenomenon. There are several different wear mechanisms that act independently or in combination with each other. Four main types of wear are distinguished: abrasive, adhesive, diffusion and fatigue. However, so far none of the researchers has been able to accurately, exclusively theoretically, predict the intensity of wear of a cutting tool and its influence on the geometric dimensions of the machined parts.*

*Therefore, to determine the time characteristics of the reliable intensity of tool wear in the specific conditions of this technological system, it is necessary to resort to experimental studies. Among the processing modes, the cutting speed has the greatest impact on the stability period of the cutting tool, and therefore on its wear rate. The results of experimental studies using the approved method of determining the dimensional wear of the cutting tool and its influence on the accuracy of processing a batch of parts are presented.*

*The results obtained can be used in studies with other tools when processing other grades of materials and processing modes.*

**Keywords:** *dimensional wear, adjustment, information and measuring system, geometric dimensions, accuracy, error, measurement.*

---

Дата першого надходження  
статті до видання  
11.02.2026 р.

Дата прийняття статті  
до друку  
06.03.2026 р.

Дата  
оприлюднення  
30.05.2026 р.