

ЗАЩЕПКИНА Наталія

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

<https://orcid.org/0000-0001-9397-6632>

e-mail: [nanic1604@gmail.com](mailto:nanic1604@gmail.com)

ТИМЧИК Роман

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

e-mail: [tymchik88@gmail.com](mailto:tymchik88@gmail.com)

## СПОСОБИ ВИМІРЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЗНОСУ РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ

В сучасному приладобудуванні основним способом виготовлення деталей приладів є механообробка заготовок деталей на верстатах з числовим програмним керуванням (ЧПК), для яких висуваються високі вимоги до точності геометричних розмірів та форми поверхонь. Для вимірювання точності геометричних розмірів і форми поверхні тіла обертання є актуальним створення відповідних інформаційно-вимірювальних систем і аналітичних моделей оцінювання і прогнозування можливих змін параметрів інструментів. Такі системи та моделі мають бути основою для створення відповідного програмного забезпечення систем верстатів з ЧПК для виконання необхідних корекцій в траєкторії руху інструменту відносно поверхні заготовки в системі координат верстата. Це дозволить компенсувати можливі пружні деформації заготовки й теплові деформації геометричних розмірів інструмента, що в свою чергу, забезпечить необхідну ефективність роботи виробництва. Дослідження і розробки є актуальними і мають ознаки науково-практичної задачі в сучасному приладобудуванні, пов'язані з виробництвом приладів спеціального призначення.

Було розглянуто проблеми зношування ріжучого інструменту при обробці деталей. Проаналізовано види зношення інструменту, причини, методи та прилади визначення зношування. Визначено, що одним із способів скорочення часу налаштування є автоматичний облік фактичних розмірів інструментів у програмі керування. З підвищенням точності налаштування інструменту скорочується машинний час за рахунок зменшення: холостих переміщень тримача різців і «зон безпеки» — відстаней, передбачених програмістом для забезпечення безпечного підходу інструменту до оброблюваної поверхні та його врізання. Поєднання традиційних і передових методів моделювання дозволяє зменшити невизначеність вимірювань і покращити точність прогнозування відхилень форми, що особливо важливо в прецизійному виробництві деталей приладів, де точний контроль геометричних характеристик є ключовим. Створення прецизійних безконтактних засобів контролю розмірного зносу різального інструмента дозволить забезпечити виготовлення високоточних деталей приладів.

Ключові слова: вимірювання, контроль, інформаційно-вимірювальна система, невизначеність, геометричні розміри, точність.

ZASHCHEPKINA Nataliia, TYMCHYK Roman

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

## METHODS OF MEASURING GEOMETRIC PARAMETERS OF CUTTING TOOL WEAR

In modern instrument manufacturing, the main method of manufacturing instrument parts is the mechanical processing of parts blanks on NSC machines, which require high accuracy of geometric dimensions and surface shape. To measure the accuracy of the geometric dimensions and shape of the surface of the body of rotation, it is important to create relevant information and measurement systems and analytical models for evaluating and predicting possible changes in the parameters of the tools. Such systems and models should be the basis for creating appropriate software for NSC machine tool systems to perform the necessary corrections in the trajectory of the tool movement relative to the surface of the work piece in the machine coordinate system. This will make it possible to compensate for possible elastic deformations of the work piece and thermal deformations of the geometric dimensions of the tool, which, in turn, will ensure the necessary production efficiency. Research and development are relevant and have the characteristics of a scientific and practical task in modern instrument making, related to the production of special purpose devices.

The problems of wear of the cutting tool during the processing of parts were considered. Types of tool wear, causes, methods and devices for wear determination are analyzed. It has been determined that one way to reduce set-up time is to automatically account for actual tool sizes in the control program. With an increase in the accuracy of the tool setting, the machine time is reduced due to the reduction of: idle movements of the cutter holder and "safety zones" - distances provided by the programmer to ensure a safe approach of the tool to the processed surface and its indentation. The combination of traditional and advanced modeling methods allows to reduce the uncertainty of measurements and improve the accuracy of the prediction of shape deviations, which is especially important in the precision manufacturing of device parts, where precise control of geometric characteristics is key.

The creation of precision non-contact means of controlling the dimensional wear of the cutting tool will ensure the production of high-precision parts of the devices.

Keywords: measurement, control, information and measurement system, uncertainty, geometric dimensions, accuracy

Стаття надійшла до редакції / Received 16.04.2025

Прийнята до друку / Accepted 11.05.2025

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Вимірювання геометричних розмірів деталей є актуальним у багатьох сферах, від промислового виробництва до наукових досліджень. Це обумовлено необхідністю забезпечення якості та точності як в результаті обробки деталі, так і в результаті вимірювання та контролю їх параметрів. Саме тому, що точність вимірювання геометричних параметрів є ключовою для забезпечення високої якості деталей та виробів у цілому.

В сучасному прецизійному приладобудуванні основним способом виготовлення малогабаритних деталей приладів є лезвійна механообробка заготовок деталей на верстатах з числовим програмним керуванням (ЧПК). Одним з базових найбільш поширених способів обробки є токарна обробка асиметричних деталей і поверхонь у вигляді тіл обертання. Такі деталі мають самі високі вимоги, які висуваються до точності геометричних розмірів та форми поверхонь з причини утворення після обробки механічних пар для виконання складних операцій в виготовленні виробів. Саме тому, ці деталі повинні мати високу точність, довговічність, надійність при експлуатації при різних кліматичних умовах, особливо при виготовленні виробів військового призначення.

Для таких деталей вибирають матеріали, які мають високий рівень твердості, а тому при виготовленні потребують спеціального обладнання, інструментів і режимів обробки, що в свою чергу, повинно забезпечити високу точність обробки в отримання геометричних розмірів і форми поверхні деталі після виготовлення.

## СТАН ПРОБЛЕМИ ТА ЇЇ РОЗВ'ЯЗАННЯ

При токарній металообробці точність геометричних розмірів і форми поверхні тіла обертання в першу чергу забезпечують початкове виявлення інструмента в системі координат верстата, розмірний знос різального інструменту, а також його теплові деформації які впливають на довжину вильоту інструменту в процесі його роботи на верстаті. Тому для вимірювання цих параметрів є актуальним створення відповідних інформаційно-вимірювальних систем і аналітичних моделей оцінювання і прогнозування можливих змін параметрів інструмента.

Такі системи та моделі мають бути основою для створення відповідного програмного забезпечення систем верстатів з ЧПК для виконання необхідних корекцій в траєкторії руху інструменту відносно поверхні заготовки в системі координат верстата. Це дозволить компенсувати можливі пружні деформації заготовки й теплові деформації геометричних розмірів інструмента, що в свою чергу, забезпечить необхідну ефективність роботи виробництва. Такі дослідження і розробки є актуальними і мають ознаки науково-практичної задачі в сучасному приладобудуванні, пов'язані з виробництвом приладів спеціального призначення.

При розгляді основних вимірювальних геометричних параметрів різального інструменту, а саме різця розрізняють: головні, допоміжні кути і кути в плані (рис.1) [1,2].

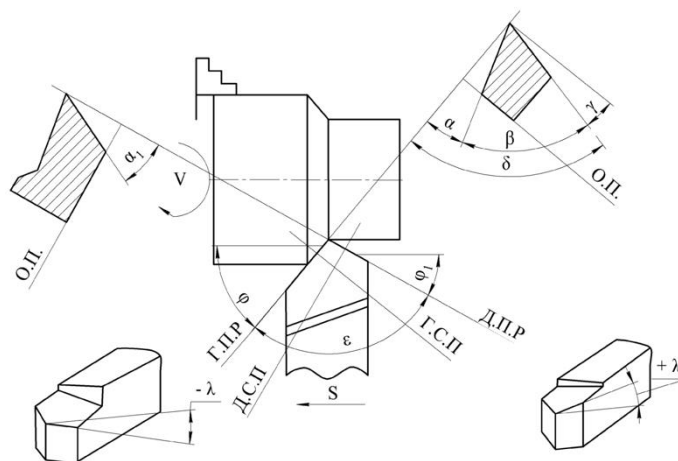


Рис. 1. Схема кутів прямого прохідного різця

Головні кути різця вимірюються в головній січній площині. До них відносяться: – головний задній кут ( $\alpha$ ) – це кут, укладений між головною площиною різання і головною задньою поверхнею різця (кут необхідний для зменшення тертя між оброблюваною деталлю і різцем, зазвичай  $\alpha = 6 \div 180$ ); – головний передній кут ( $\gamma$ ) – це кут, укладений між передньою поверхнею різця і площиною, що проходить через головну ріжучу крайку і перпендикулярно до головної площини різання (величина переднього кута впливає на процес стружкоутворення, значення цього кута можуть бути позитивним, дорівнювати нулю або негативним (зазвичай  $\gamma = +20 \div -100$ )).

– кут загострення ( $\beta$ ) – це кут, укладений між передньою поверхнею різця і головною задньою поверхнею різця; величина цього кута впливає на міцність ріжучої частини інструменту і на відвід тепла від ріжучої частини різця (чим більше кут, тим міцніше ріжуча частина інструмента і тим краще відведення тепла від ріжучої крайки:  $\beta = 90^\circ - (\alpha + \gamma)$ );

– кут різання ( $\delta$ ) – це кут, укладений між головною площиною різання і передньою поверхнею різця ( $\delta = 90^\circ - \gamma$ ,  $\delta = \alpha + \beta$ ).

Допоміжні кути різця вимірюють в допоміжній січній площині. З допоміжних кутів звичайно контролюють тільки допоміжний задній кут. Допоміжний задній кут ( $\alpha_1$ ) – це кут, укладений між допоміжною задньою поверхнею різця і допоміжною площиною різання. Кути в плані вимірюються в основній площині. До них відносяться:

– головний кут у плані ( $\varphi$ ) – це кут, укладений між проекцією головної ріжучої крайки на основну площину і напрямом робочої подачі;

– допоміжний кут в плані ( $\varphi_1$ ) – це кут, укладений між проекцією допоміжної ріжучої крайки на основну площину і напрямом робочої подачі;

– кут при вершині ( $\xi$ ) – це кут, укладений між проекціями головної і допоміжної ріжучих крайок на основну площину:  $\xi = 180^\circ - (\varphi + \varphi_1)$ .

Крім розглянутих кутів у різця є кут нахилу головної ріжучої крайки ( $\lambda$ ) – це кут, укладений між ріжучою кромкою і площиною, паралельною основній площині та проведеної через вершину різця. Значення цього кута може бути додатнім, рівним нулю або від'ємним.

Зносу інструменту при різанні різних матеріалів присвячені численні дослідження. В більшості публікацій питання розглядаються на емпіричному рівні, тобто режими різання та марка інструменту підбираються для конкретного матеріалу). Фізичні закономірності процесу різання інтенсивності зношування інструментів присвячені роботи багатьох вчених, практиків (розробки фірм по виробництву та експлуатації інструментів). В усіх роботах підкреслено, що головною причиною зносу інструменту при різанні та обробці матеріалів є висока температура різання. Тертя і пов'язане з ним зношування під час різання відрізняються від загального тертя поверхонь деталей машин. Під час різання виникає тертя між поверхнями, які постійно переробляються (оновлюються). Це тертя відбувається при високій температурі, високому тиску та відносно невеликих контактних площах[3].

Виділяють такі типи зносу: абразивне, адгезійне (молекулярне), дифузне та окислювальне. Абразивний знос виникає в результаті подряпин та відсікання мікроскопічного об'єму інструментального матеріалу з твердими структурними складовими металу, який підлягає обробці. Адгезійний (молекулярний) знос є результатом застосування значних сил молекулярної адгезії (склеювання, зварювання) між матеріалом заготовки (стружки) та інструментом. Дифузний знос – результат взаємного розчинення реагуючих пар оброблюваного металу та інструменту. Окислювальний знос – результат хімічної реакції кисню з твердим сплавом. [3].

У реальних умовах обробки можуть виникати всі види зносу, які залежать від умов обробки: фізико-механічних властивостей металу та інструменту, типу та фізико-хімічних властивостей теплоносія, елементів режиму різання та геометрії інструментальної частини тощо [3].

Знос інструменту можна виміряти звичайною лупою із збільшенням в 20 разів, а глибиною отвору лунки- індикатором (лінійний метод). Загальний знос спереду та ззаду можна визначити зважуванням на аналітичній вазі до і після випробування (метод зважування). Повний знос різального інструменту також може бути визначений методом радіоактивних ізотопів. Його суть полягає у формуванні в інструменті радіоактивних ізотопів шляхом опромінення ядерними частинками, які поглинаються стружкою у вигляді продуктів зносу. Радіоактивність мікросхем визначається за допомогою спеціального лічильника і кількості загального зносу. Залежність зносу інструменту від часу обробки наведено на рисунку 2.

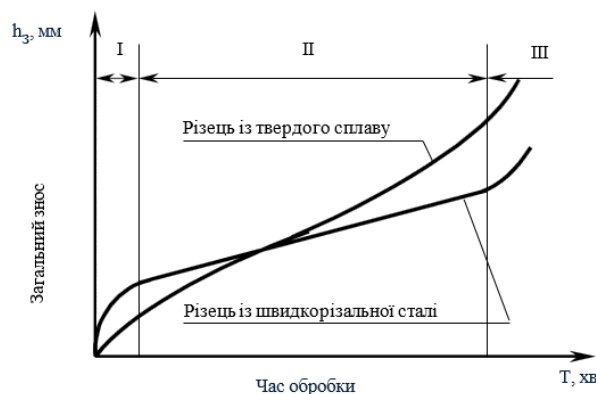


Рис. 2. Крива зношування різців

Де: I - період припрацювання, в який відбувається видалення виступаючих частин поверхні; чим

менший параметр шорсткості поверхонь тертя, тим менше різко знос збільшується при цьому; II- період нормального зносу; він характеризується тим, що з часом поступово збільшується знос; III- період посиленої (катастрофічної) ерозії; характеризується сильним збільшенням зносу через зміни умов тертя та різким підвищенням температури різання.

Об'єктивним кількісним показником зносу інструменту є швидкість зносу, виміряна в міліграмах на 1 метр рівномірного ходу  $dM/dL$ . Використовуючи концепцію інтенсивності зносу  $dM / dL$ , можна порівняти зносостійкість різних інструментальних матеріалів та оцінити вплив геометричних параметрів та факторів режиму різання на стійкість інструменту.

При точінні крихких матеріалів (чавун, бронза) леза в основному зношуються на задній частині, незалежно від матеріалу леза. Це пояснюється тим, що сипучі тріски стружки на передній частині різця мають невеликі стирання, тоді як тильна частина різця знаходиться в постійному контакті з заготовкою. І лише на високих швидкостях спостерігається знос на передній поверхні. Завдяки великому ефекту гасіння чавуну різак виходить з ладу при нижчій температурі різання, ніж температура різання під час обробки сталі [3].

При різанні пластичних металів зношування різця різне. При низькій швидкості різання зношується задня поверхня (швидкість тертя на зворотному боці більша за швидкість тертя стружки на передній стороні через її усадку). При товстій стружці утворюється лунка, коли тиск на лицьову сторону більший (при відсутності теплоносія знос в першу чергу протікає по передній поверхні різця. Зі збільшенням ширини отвору лунки і зменшення головної площадки нижче зростання наросту, нарост зменшується настільки, що він більше не захищає задню поверхню і тильна сторона починає зношуватись. При тонких стружках і при використанні теплоносія ріст наросту погіршується, так що знос в цій зоні швидкості також йде уздовж задньої поверхні [5].

Розглянемо чотири основних класи інструментів для моніторингу зносу ріжучих інструментів і поверхонь: оптичні, механічні, електронні та акустичні прилади (рис 3.)

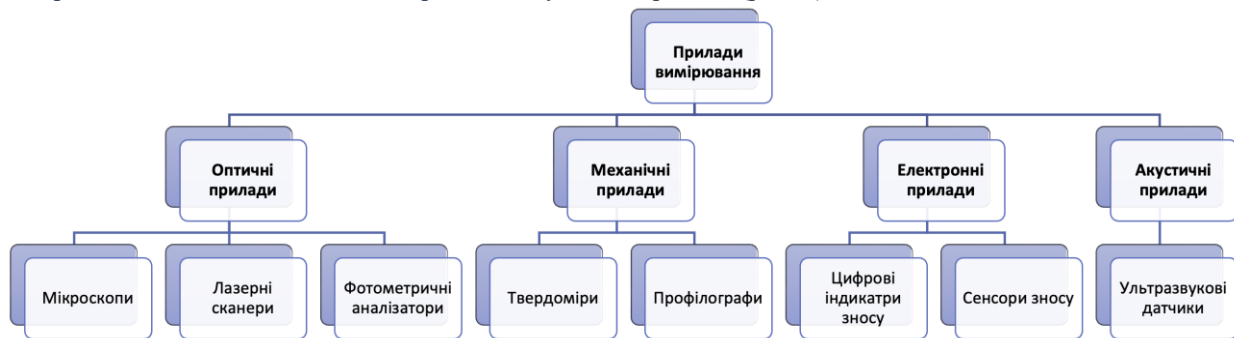


Рис. 3. Прилади для вимірювання зносу інструменту

Кожна група містить конкретні приклади обладнання та методів, що використовуються в сучасних технологічних процесах для забезпечення якості, точності та своєчасної заміни зношених елементів. Оптичні методи базуються на безконтактній оцінці форми та розмірів зони зносу [6]. Механічні прилади спираються на прямі механічні або фізичні взаємодії з інструментом [7]. Електронні системи поєднують інформацію з різних джерел для глибокого аналізу стану інструмента [8]. Серед акустичних приладів провідними є ультразвукові датчики, які дозволяють здійснювати інтегральний моніторинг без порушення технологічного процесу [9].

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. Дослідження похибок обробки дозволяє обґрунтовано призначити параметр управління та вибрати структуру автоматичного керування (САК). Таким чином, вивчення складових сумарної похибки чистової обробки на токарних верстатах з ЧПК є актуальною задачею.

Сумарна похибка  $\Delta$  механічної обробки є функцією пружних деформацій і зміщень  $\Delta_y$  у технологічній системі, похибок від розмірного зносу інструменту  $\Delta_i$ , похибок установки  $\epsilon$ , налаштування інструмента на розмір  $\Delta_n$ , суми похибок від теплових деформацій  $\Delta_t$ . Для отримання діаметральних розмірів маємо:

$$\Delta = 2 \sqrt{(K_1 * \Delta_y)^2 + (K_2 * \Delta_i)^2 + (K_3 * \Delta_n)^2 + (K_4 * \Delta_t)^2}$$

де:  $K_1 = K_2 = 1.0$ ;  $K_3 = K_4 = 1.73$  — коефіцієнти, що характеризують відхилення фактичного розподілу випадкової похибки від теоретичного значення. Похибка налаштування інструменту на розмір деталі, яка обробляється, використовується для оцінки або прогнозування точності обробки та розраховується

залежно від прийнятих методів налаштування інструменту на розмір (його позиціонування).

Похибка  $\Delta_n$  налаштування включає в себе похибку  $\Delta_p$  регулювання положення інструменту, похибку вимірювання  $\Delta_m$  та похибку миттєвого розсіювання розмірів  $\Delta_s$  через випадкові причини (нерівномірність припуску і твердості заготовок, нестабільність процесу різання, тощо).

$$\Delta = k \sqrt{\Delta_m^2 + \Delta_p^2 + \Delta_s^2}$$

де:  $k$  — коефіцієнт, що враховує відхилення щодо закону розподілу від нормального  $k = 1 - 1.2$ .

Похибки  $\Delta_p$  — регулювання і  $\Delta_s$  — розсіювання повністю визначаються типом обраного металорізального обладнання, його технічними характеристиками та способом налаштування інструменту.

Одним із завдань налаштування є розмірне налаштування інструменту — процес досягнення потрібної точності положення вершини ріжучого інструменту в системі координат верстата. Усі методи налаштування інструментів на розмір деталі яка обробляється поділяються на статичні та динамічні. До перших належать ті, при яких інструмент встановлюється на настроювальний розмір, визначений на неробочому верстаті.

Для статичного налаштування використовуються лімби, лінійки, індикатори, кінцеві міри, еталони, установи, спеціальні пристосування, датчики розміру, тощо. Динамічне налаштування передбачає досягнення настроювального розміру на основі результатів замірів у процесі обробки, оскільки теплові деформації та зношування елементів технологічної системи мають істотний вплив на похибку обробки, особливо під час чистових операцій.

При ручному способі момент підналаштування верстатник визначає за результатами періодичного вимірювання оброблюваних деталей. При автоматичному налаштуванні застосовується відносний метод досягнення точності заданого настроювального розміру виробу. За цим методом статичний настроювальний розмір порівнюється з заданим, встановленим при первинному налаштуванні технологічної системи. За результатами порівняння визначається величина відхилення, і настроювальний розмір встановлюється за допомогою спеціального механізму, який впливає на вибрану компенсуючу ланку протягом обробки всієї партії даного типорозміру.

Одним зі способів скорочення часу налаштування є автоматичний облік фактичних розмірів інструментів у програмі керування, а саме застосовують спеціальний прилад, щупи якого торкаються ріжучої кромки інструменту в радіальному та осьовому напрямках, цифрові індикатори вказують фактичні розміри інструменту в двох напрямках і оператор корегує програму обробки.

При використанні приладу з верстатом і системою ЧПК з мікроконтролером, інформація від електронної частини приладу безпосередньо надходить у пам'ять системи ЧПК, звідки автоматично здійснюється корекція програми під час використання інструменту. Скорочується час налаштування інструментів при автоматичному способі внесення корекцій у програму обробки.

Відомі розробки інших приладів, які реалізують прямий метод вимірювання на металорізальних верстатах, з використанням контактних та безконтактних датчиків положення ріжучих кромки інструменту, наприклад, пневматичних, гідравлічних, ємнісних тощо. Однак їх точність не перевищує 10 мкм.

Одним із недоліків цих систем є малий динамічний діапазон вимірювання положення ріжучої кромки (не більше 0,1 мм), що потребує попередньої установки ріжучого інструменту.

Досвід експлуатації верстатів з ЧПК у виробництві свідчить про економічну ефективність налаштування інструментів поза верстатом на спеціальних пристосуваннях. В результаті аналізу робіт [6, 7, 8] систематизовано витрати на підналаштування інструменту, представлено в таблиці 1.

Таблиця 1

Витрати на підналаштування інструменту

| № п/п | Спосіб внесення корекцій в положення інструмента          | Похибка |        |             | Тривалість           |                   |
|-------|-----------------------------------------------------------|---------|--------|-------------|----------------------|-------------------|
|       |                                                           | мін.    | серед. | один інстр. | за день<br>4-6 інст. | За рік<br>200 дн. |
|       |                                                           | мкм     | мкм    | мкм         | хвил.                | годин             |
| 1     | Ручний (під час контролю розміру інструмента на верстаті) | 5       | 15     | 5           | 120                  | 400               |
| 2     | Те саме (під час зміни інструмента поза верстатом)        | 10      | 20     | 1           | 24                   | 80                |
| 3     | Автоматичний (із використанням контактних щупів)          | 1       | 5      | 0,25        | 6                    | 20                |
| 4     | Напівавтоматичний (із використанням лазерних пристроїв)   | 1       | 5      | 1           | 24                   | 86                |
| 5     | Автоматичний (із використанням лазерних пристроїв)        | 0,5     | 2      | 0,05        | 1-2                  | 4                 |

Значним резервом підвищення продуктивності при обробці на верстатах з ЧПУ є скорочення простоїв під час їх підналаштування. Сума простоїв на налаштування кожного з інструментів займає значну частину в



загальній тривалості переналадження.

### Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Було розглянуто проблеми зношування ріжучого інструменту при обробці деталей. Проаналізовано види зношення інструменту, причини, методи та прилади визначення зношування.

Визначено, що одним із способів скорочення часу налаштування є автоматичний облік фактичних розмірів інструментів у програмі керування, а саме застосовують спеціальний прилад, щупи якого торкаються ріжучої кромки інструменту в радіальному та осьовому напрямках.

З підвищенням точності налаштування інструменту скорочується машинний час за рахунок зменшення: холостих переміщень тримача різців і «зон безпеки» — відстаней, передбачених програмістом для забезпечення безпечного підходу інструменту до оброблюваної поверхні та його врізання.

Поєднання традиційних і передових методів моделювання дозволяє зменшити невизначеність вимірювань і покращити точність прогнозування відхилень форми, що особливо важливо в прецизійному виробництві деталей приладів, де точний контроль геометричних характеристик є ключовим. Створення прецизійних безконтактних засобів контролю розмірного зносу різального інструмента дозволить забезпечити виготовлення високоточних деталей приладів.

### Література

1. Довгун В. А. Субін А.А. Характеристики зносу інструменту при токарній обробці загартованої сталі // Матеріали XV Міжнародної наукової практичної конференції «Перспективні дослідження в науці і техніці – 2019», Techniczne nauki // Przemysł Nauka i studia 2019 // с.51-55.
2. Різальний інструмент [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 131 «Прикладна механіка», спеціалізації «Технологія машинобудування» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Л.М. Данилова, С.В. Лапковський, В.П. Приходько – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – с. 147
3. Малюха П. Г. Теорія різання (конспект лекцій) – Донецьк, 2011. -233с.
4. Cuppini, D., D'Errico, G., & Rutelli, G. (1990). Tool wear monitoring based on cutting power measurement. Wear, 139, 303-311. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(90\)90052-C](https://doi.org/10.1016/0043-1648(90)90052-C).
5. Ruiz, A., Guinea, D., Barrios, L., & Betancourt, F. (1993). An empirical multi-sensor estimation of tool wear. Mechanical Systems and Signal Processing, 7, 105-119. <https://doi.org/10.1006/MSSP.1993.1001>.
6. Jeong, E., & Hwang, J. (2000). A study on the In-Process Monitoring of Tool Wear via Ultrasonic Sensor. Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 17, 94-100. <https://shorturl.at/PKvG0>
7. Катаева, М. О. Методи вимірювання геометричних параметрів авіаційних деталей: автореф. дис.. канд. техн. наук: спец. 05.11.01 «Прилади та методи вимірювання механічних величин» / Катаева Марія Олександрівна; КПІ. К., — 2017. — 20 с.
8. 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.
9. Алтухов, В. М., Руднев, С. С. Дослідження теплових явищ при різанні важкооброблюваних матеріалів в умовах точіння / В. М. Алтухов, С. С. Руднев. // Наукові вісті Дніпровського університету. — 2022. — № 23. — 8 с.
10. Теорія різання. Лабораторний практикум для студентів напрямку підготовки 6. 050502. / В.В. Зіль, В.А. Безрукава. – Д.: ДВНЗ «Національний гірничий університет», 2012. – 66с.

### References

1. Dovhun V. AND. Subin A.A. Characteristics of tool wear during turning of hardened steel // Матеріали XV Міжнародної наукової практичної конференції "Perspektywiczne opracowania są nauką i technikami - 2019", Techniczne nauki // Przemysł Nauka i studia 2019 // p.51-55.
2. Cutting tool [Electronic resource]: training. Manual for student's specialty 131 "Applied Mechanics", specialization "Mechanical Engineering Technology" / KPI named after Igor Sikorskyi; comp.: L.M. Danilova, S.V. Lapkovskyi, V.P. Prykhodko - Kyiv: KPI named after Igor Sikorskyi, 2023. - p. 147
3. Malyuha P. G. Cutting theory (lecture notes) - Donetsk, 2011. -233p.
4. Cuppini, D., D'Errico, G., & Rutelli, G. (1990). Tool wear monitoring based on cutting power measurement. Wear, 139, 303-311. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(90\)90052-C](https://doi.org/10.1016/0043-1648(90)90052-C).
5. Ruiz, A., Guinea, D., Barrios, L., & Betancourt, F. (1993). An empirical multi-sensor estimation of tool wear. Mechanical Systems and Signal Processing, 7, 105-119. <https://doi.org/10.1006/MSSP.1993.1001>.
6. Jeong, E., & Hwang, J. (2000). A study on the In-Process Monitoring of Tool Wear via Ultrasonic Sensor. Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 17, 94-100. <https://shorturl.at/PKvG0>
7. Kataeva, M. AT. Methods of measuring geometric parameters of aviation parts: autoref. dis.. candidate technical Sciences: specialist 05.11.01 "Devices and methods of measuring mechanical quantities" / Maria Oleksandrivna Kataeva; KPI K., — 2017. — 20 p.
8. Shevchenko, O.V. Increasing the accuracy of processing on automated turning machines by means of micro-adjustment of the position of the cutter / O. IN. Shevchenko, T. G. Grimud // Bulletin of NTUU "KPI". Engineering. — 2010. — No. 59. — p. 59-64.
9. Altukhov, V. M., Rudnev, E. WITH. Research of thermal phenomena during cutting of hard-to-machine materials under turning conditions / V. M. Altukhov, E. WITH. Rudnev. // Scientific news of Daliv University. — 2022. — No. 23. — 8 p.
10. Theory of cutting. Laboratory practicum for students of training direction 6. 050502. / V.V. Zill, V.A. Sleeveless - D.: National Mining University "National Mining University", 2012. - 66p.