АНАЛІЗ ПОХИБОК ПРИ СВЕРДЛІННІ ДЕТАЛЕЙ МАЛОГО ДІАМЕТРУ НА СУЧАСНИХ ВЕРСТАТАХ

Лахтадир Сергій Леонідович[1]

Опубліковано	Секція	УДК
30.08.2025	Економіка	621.91.05

DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.17167190

Анотація. Проведено огляд сучасних підходів до моделювання процесів свердління отворів малого діаметру, що становить критичний етап у технологічному ланцюжку обробки високоточного машинобудівного обладнання. Зазначено, що зменшення діаметра свердла призводить до суттєвого зростання вимог до точності верстатного обладнання, жорсткості системи кріплення та стабільності процесу. Розглянуто типові конструкції інструментів малого діаметру, їх геометричні параметри та особливості роботи з матеріалами, що мають підвищену твердість або низьку теплопровідність. Систематизовано основні типи похибок, які виникають при свердлінні, зокрема геометричні відхилення форми й розташування отвору (овальність, конусність, зміщення осі), похибки, пов'язані з вібраціями, термічними деформаціями та зносом ріжучої кромки. Проаналізовано динамічні аспекти процесу, пов'язані з автоколиваннями, нестабільністю подачі та резонансними явищами в зоні контакту інструмент–заготовка. Окреслено чинники, що впливають на точність свердління, серед яких ключовими є параметри режиму різання, тип інструмента, його покриття та конструкція каналу подачі охолоджуючої рідини. Визначено вплив точності позиціонування осі отвору та жорсткості інструментального вузла, зокрема при роботі на багатоосьових верстатах. Узагальнено сучасні методи контролю похибок, включаючи безконтактні вимірювальні системи, координатно-вимірювальні машини, а також інтелектуальні модулі моніторингу, що працюють на основі сигналів вібрації, температури, сили різання або акустичної емісії. Розглянуто інженерні рішення для зниження похибок, зокрема застосування інструментів з внутрішнім охолодженням, покриттів з підвищеною зносостійкістю, адаптивних систем компенсації похибок положення, а також оптимізацію режимів обробки на основі статистичного аналізу та методів машинного навчання. Показано ефективність комбінованого підходу, що поєднує математичне моделювання, емпіричну ідентифікацію параметрів процесу та реєстрацію змінних у реальному часі.

Ключові слова: процес свердління, похибки, мікроотвори, вібрації, рівень зносу, інтелектуальний контроль, числове програмне керування

[1] Старший науковий співробітник
Український науково-дослідний інститут
спеціальної техніки та судових експертиз
Служби безпеки України
https://orcid.org/0000-0002-2258-2625

ANALYSIS OF ERRORS IN DRILLING SMALL-DIAMETER HOLES ON MODERN CNC MACHINES

Annotation. This review presents current approaches to modeling drilling processes for small-diameter holes, which represent a critical stage in the technological chain of high-precision mechanical engineering. It is noted that the reduction in drill diameter significantly increases the requirements for machine tool accuracy, clamping system rigidity, and process stability. Typical designs of small-diameter drilling tools, their geometric parameters, and features of operation with materials of high hardness or low thermal conductivity are examined. The main types of errors arising during drilling are systematized, including geometric deviations in the shape and position of holes (ovality, taper, axis displacement), as well as errors associated with vibrations, thermal deformations, and tool wear. The dynamic aspects of the process are analyzed, particularly those related to self-excited vibrations, feed instability, and resonance phenomena in the tool–workpiece contact zone. Key factors affecting drilling accuracy are outlined, such as cutting regime parameters, tool type, coating, and coolant channel design. The influence of hole axis positioning accuracy and tool assembly stiffness is highlighted, especially for multi-axis machine tools. Modern error monitoring methods are summarized, including non-contact measurement systems, coordinate measuring machines, and intelligent monitoring modules based on vibration, temperature, cutting force, or acoustic emission signals. Engineering solutions for error reduction are discussed, including the use of tools with internal cooling, wear-resistant coatings, adaptive error compensation systems, and processing regime optimization based on statistical analysis and machine learning methods. The effectiveness of a combined approach is demonstrated, integrating mathematical modeling, empirical identification of process parameters, and real-time variable monitoring.

Keywords: drilling process, errors, micro-holes, vibrations, tool wear, intelligent monitoring, computer numerical control.

Вступ

На сучасному етапі розвитку високоточного машинобудування зростає попит на обробку мікродеталей, що використовуються у приладобудуванні, авіакосмічній техніці та мікромеханіці [1-3]. Особливої уваги набуває технологія свердління отворів субміліметрового діаметру, яка характеризується високою складністю реалізації через обмеженість геометричних і конструктивних параметрів інструмента, підвищену чутливість до вібрацій і теплових навантажень, а також значний вплив наявних мікродеформацій заготовки. Сучасні верстати з числовим програмним керуванням (Computer Numerical Control, CNC) дозволяють досягати високих показників точності, однак навіть незначні коливання параметрів режиму різання, зміни в системі кріплення або знос ріжучої кромки можуть спричинити критичні похибки при виготовленні отворів [4, 5]. Проблематика високоточного машинобудування полягає у необхідності проведення багатокритеріального аналізі джерел виникнення похибок, оцінці їхнього впливу на якість отворів та розробці комплексних методів компенсації і мінімізації відхилень. Наявні підходи до забезпечення точності мають фрагментарний характер і часто не враховують взаємодію між геометричними, динамічними та температурними факторами у зоні різання, що ускладнює побудову єдиної системи забезпечення стабільної якості мікроотворів. Це вказує на високу **актуальність** систематичного визначення факторів, що впливають на точність свердління, багаторівневої класифікації типів похибок і дослідження методів контролю та компенсації у рамках інженерно-технологічної практики.

Аналіз сучасних наукових публікацій і галузевих розробок, присвячених дослідженню точності процесів свердління, свідчить про формування міждисциплінарної методологічної основи, що поєднує механіку різання, динаміку технологічного обладнання, метрологію та цифрові методи моніторингу [1–5]. При

цьому у центрі уваги протягом останніх раків залишається специфіка обробки отворів малого діаметру, для яких типові загальні проблеми свердління мають значний прояв через знижену жорсткість інструмента, високий ризик перегріву та труднощі із забезпеченням ефективного виведення стружки [6, 7]. Окремо виділяються дослідження, що фокусуються на впливі вібрацій і мікроколивань при мікросвердлінні, зокрема в умовах високошвидкісної обробки й глибоких отворів [8, 9]. Водночас відзначається активний розвиток напрямів, пов'язаних із побудовою моделей похибок на основі емпіричних даних, а також застосування алгоритмів на основі методів машинного навчання для передбачення відхилень геометричних параметрів обробки в залежності від стану інструмента, параметрів верстата та умов охолодження [10, 11]. У практиці високоточного свердління поступово впроваджуються адаптивні стратегії подачі та регулювання частоти обертання, що базуються на вхідному наборі даних вібраційного та температурного контролю, або акустичної емісії [12, 13]. Суттєвий вплив на якість отвору мають також параметри мікрогеометрії свердел, що змінюються з часом унаслідок абразивного зношування та термохімічної деградації, які, однак, часто не враховуються у схемах оптимізації процесу [14, 15]. У більшості випадків методи контролю реалізуються після завершення свердління, що ускладнює корекцію похибок у режимі реального часу. Таким чином, **невирішеною частиною** загального дослідження залишається завдання формування уніфікованої методології аналізу похибок при свердлінні малого діаметру, яка поєднує у собі результати фізичного моделювання, експериментальної ідентифікації та сенсорного моніторингу із можливостями адаптивного керування та цифрових платформ підтримки прийняття рішень.

Таким чином, **метою дослідження** є формування уніфікованої методології аналізу похибок при свердлінні отворів субміліметрового діаметру, яка інтегрує результати фізичного моделювання процесів обробки, дані експериментальної ідентифікації похибок, а також сенсорні вимірювання параметрів у реальному часі. Особлива увага при цьому має бути приділена розробці принципів адаптивного керування технологічним процесом з урахуванням впливу вібрацій, теплових навантажень і зносу інструмента, що дозволяє створити основу для впровадження інтелектуальних цифрових рішень підтримки прийняття рішень у виробничому середовищі.

Результати

Як показав проведений аналіз, у високоточному виробництві отвори субміліметрового діаметру відіграють критичну роль, забезпечуючи функціональність і надійність мініатюрних компонентів. Забезпечення стабільної якості таких отворів вимагає точного врахування множини взаємопов'язаних факторів, від вибору інструмента й матеріалу заготовки до умов охолодження та параметрів режиму різання. У цьому контексті постає необхідність формального опису задачі оптимізації технологічного процесу, в межах якої враховуються як традиційні показники точності, так і специфічні вимоги до чистоти поверхні, мінімізації мікродефектів і стійкості інструмента при багаторазових операціях свердління.

З метою формалізації задачі оптимізації процесу свердління отворів субміліметрового діаметру пропонується виділити ключові фактори, що визначають технічну складність та значущість кожного виробничого етапу:

- вимоги до точності та якості процесу обробки, що встановлюються на основі нормативно-технічних документів та галузевих і включають не лише лінійні розміри та відхилення форми отворів, але й показники шорсткості, та стабільності геометричних параметрів у циклі обробки;

- конструктивні особливості інструмента для свердління малого діаметру, зумовлені обмеженнями на міцність і жорсткість інструменту, а також на ефективне відведення стружки та тепла з активної зони;
- характеристики оброблюваних матеріалів, які визначають не лише механічну оброблюваність, а й теплопровідність, абразивність, схильність до утворення мікротріщин і напливів.

Узагальнення наведених положень створює основу для побудови формалізованої моделі технологічного процесу, в якій врахування вказаних чинників дозволяє забезпечити збалансоване досягнення цільових параметрів точності, надійності та виробничої ефективності при обробці мікроотворів.

Рис. 1. Базова схема оптимізації технологічного процесу свердління субміліметрових отворів

Забезпечення високої точності при свердлінні отворів малого діаметру потребує дотримання ряду показників якості, що регламентуються відповідними нормативно-технічними документами, як то ISO 286 [16], ISO 1101 [17], ISO 4287 [18]. До основних критеріїв належать: допустимі відхилення діаметра Δd, відхилення осьової прямолінійності Δl, овальність OVL, конусність TPR, а також шорсткість поверхні Ra. В умовах багаторазової обробки критично важливо забезпечити стабільність цих показників у часі, що вимагає врахування похибок, пов'язаних із динамікою процесу, зносом інструмента та варіаціями в жорсткості системи кріплення (рис. 1).

Таблиця 1

Основні показники якості для субміліметрового отвору [16-18]

Показник якості	**Позначення**	**Типові межі**	**Вплив на функціональність**
відхилення діаметра	Δd	до 5 мкм	посадка та ущільнення
осьова прямолінійність	Δl	до 10 мкм	геометрична точність
коефіцієнт овальності	κ_{OVL}	до 5 мкм	симетрія та динамічний баланс
коефіцієнт конусності	κ_{TPR}	до 8 мкм	щільність при з'єднанні
шорсткість поверхні	Ra	до 400 нм	міцність з'єднань та тертя

Інтегральна функція якості отвору при цьому може бути обчислена як вагова сума добутків показників Δd, Δl, κ_{OVL}, κ_{TPR}, Ra, що наведені у табл. 1 і вагових коефіцієнтів $\{\omega_i\}$, що обчислюються емпірично.

У свою чергу, інструменти субміліметрового діаметру характеризуються надзвичайною чутливістю до механічних деформацій, а також мають обмеження щодо ефективного відведення тепла і стружки. Основними геометричними параметрами таких свердел є діаметр ріжучої частини D_{CE}, довжина ріжучої частини L_{CE}, кут при вершині α, гвинтовий кут спіралі β та ефективний діаметр каналу відведення стружки D_{SW}, що представлені у табл. 2. Критерієм конструктивної ефективності може виступати коефіцієнт жорсткості ріжучої частини інструмента κ_{RCE}, що розраховується як $\kappa_{RCE} = (E_{CE} \cdot I_{CE}) / L_{CE}^3$, де E_{CE} — модуль пружності матеріалу інструмента, I_{CE} — момент інерції.

Таблиця 2

Геометричні параметри інструментів малого діаметру [16-18]

Показник якості	**Позначення**	**Розмір**	**Вплив на функціональність**
діаметр ріжучої частини	D_{CE}	0,1 – 1 мкм	визначає тип обробки
довжина ріжучої частини	L_{CE}	3 – 15 мкм	жорсткість згинальна стабільність
кут при вершині	α	90° – 130°	формування отвору зусилля
кут спіралі	β	25° – 35°	відведення стружки
діаметр каналу охолодження	D_{SW}	0,2 – 0,6 мкм	відведення тепла

Властивості матеріалу заготовки визначають не лише рівень зусилля різання, а й чутливість процесу до перегріву, зношування інструмента, утворення мікродефектів.

Таблиця 3

Геометричні параметри інструментів малого діаметру [16-18]

Матеріал	**Твердість (HV)**	**Тепло-провідність**	**Коефіцієнт тертя**	**Коефіцієнт оброблюваності**
AISI 316L	~ 200	~ 15	0,35	середня складність
Ti6Al4V	~ 350	~ 7	0,4	висока складність
WC-Co	> 1000	~ 85	0,2	висока складність
Склокераміка	~ 600	~ 1,5	0,5	дуже висока складність

Найчастіше в мікрообробці використовуються твердосплави (WC-Co), нержавіючі сталі (AISI 316L), сплави на основі титану (Ti6Al4V), склокераміка та силіконові композити [19, 20], що представлені у табл. 3. При цьому інтегральний коефіцієнт складності обробки $C_м$ на математичному рівні можна формалізувати як функцію від показників твердості матеріалу $H_м$, теплопровідності матеріалу $\lambda_м$, коефіцієнт тертя $\mu_м$, питома теплота c_p^M і модуль пружності $E_м$. Високе значення $C_м \ f\left((H_м \cdot \mu_м)/(\lambda_м \cdot E_м)\right)$ вказує на зростання рівня технологічної складності забезпечення стабільної обробки при формуванні отвору субміліметрового розміру.

Стабільне забезпечення точності при формуванні отворів субміліметрового діаметру істотно ускладнюється через множинність чинників, які впливають на результат обробки, коли незначні відхилення від лінійних розмірів інструмента, коливання режимних параметрів або зміна теплового балансу можуть спричинити критичне зниження якості отвору. У процесі свердління отворів субміліметрового діаметру проявляється широкий спектр похибок, зумовлених як фізичними обмеженнями оброблюваної зони, так і складною багатофакторною взаємодією між інструментом, заготовкою, обладнанням і технологічними режимами. Особливості масштабів та точності у мікрообробці спричиняють ситуацію, коли навіть незначні відхилення або флуктуації параметрів можуть трансформуватись у суттєві дефекти кінцевого виробу. Для системного аналізу і моделювання технологічного процесу доцільним є виділення основних категорій похибок:

Геометричні похибки. Ця категорія похибок охоплює відхилення форми та розташування отвору від номінальної геометрії, зокрема неоднаковий діаметр отвору в перпендикулярних перерізах (овальність), поступова зміна діаметра вздовж осі отвору (конусність), відхилення від перпендикулярності як нахил осі отвору відносно площини базування. Причиною геометричних похибок можуть бути деформації інструмента, нестабільне зусилля подачі або похибки у розташуванні заготовки.

Динамічні похибки. Ця категорія похибок пов’язана з нестабільністю кінематичних і силових параметрів під час обробки, як то резонансні коливання, спричинені неврівноваженістю або гнучкістю інструментального вузла (вібрації інструмента), коливальні режими, що самозбуджуються внаслідок зворотного зв’язку між силою різання і деформацією (автоколивання), локальні сплески або зниження швидкості подачі через реакцію приводу або неузгодженість сервосистеми (флуктуації подачі).

Термодеформаційні похибки. Ця категорія похибок виникає внаслідок нерівномірного нагріву інструмента та заготовки, а також неефективного відведення тепла, що включає у себе зміну розмірів інструмента, локальне розширення заготовки, що змінює положення зони різання, появу термоупругих напружень, які викривлюють

зону контакту. Основними причинами є високе тепловиділення в мікрозоні різання, недостатня ефективність охолодження та низька теплопровідність оброблюваного матеріалу.

Похибки зносу інструмента. Поступове погіршення геометрії ріжучої кромки виникає внаслідок стирання задньої поверхні свердла (флангове зношування), ерозію передньої поверхні (кратерне зношування), локальні відриви на ріжучій кромці мікросколювання. Ці дефекти змінюють умови контакту, викликають зростання сили різання та впливають на точність отвору.

Системні похибки базування та фіксації. До цієї категорії похибок належать люфти та перекоси у затискних елементах, недостатня жорсткість кріплення, що призводить до мікрозсувів, а також невідповідне положення нульової точки, що призводить до систематичного зміщення осі отвору. Відповідні похибки часто мають систематичний характер і впливають на відтворюваність результату.

Геометричні похибки мають кумулятивний характер і потребують компенсації через попереднє калібрування або введення коригувальних коефіцієнтів, а динамічні похибки особливо критичні при високошвидкісному мікросвердлінні, коли відсутність демпфування може призвести до руйнування свердла. У свою чергу термодеформаціні похибки мають виражений нелінійний характер і залежать від часу обробки, що потребує моделювання нестаціонарного теплового поля, а зношування інструменту особливо небезпечне при обробці твердих і абразивних матеріалів, де ресурс свердла може бути вкрай обмеженим. Нарешті, компенсація системних похибок базування та фіксації можлива через підвищення точності фіксації, використання автоматизованих систем базування та реалізацію самокоригуючих алгоритмів.

Після ідентифікації основних типів похибок, що виникають у процесі свердління отворів субміліметрового діаметру, ключовим етапом є встановлення технологічних і конструктивних факторів, які безпосередньо впливають на величину та характер прояву цих похибок (рис. 2). Враховуючи складність мікрообробки та високий ступінь чутливості до будь-яких зовнішніх збурень, кожен із зазначених чинників має бути формалізований у вигляді функціональної залежності, що дозволяє інтегрувати їх до загальної моделі точності свердління та реалізувати адаптивне керування параметрами у реальному часі. Режими різання безпосередньо впливають на інтенсивність утворення стружки, температуру в зоні різання, зусилля подачі та знос інструмента. У загальному випадку похибка отвору δ зростає зі збільшенням подачі та глибини свердління внаслідок підвищення температури, деформації інструмента та зниження ефективності виведення стружки на великих глибинах. При формалізації на математичному рівні зв’язок між похибкою у геометрії отвору та технологічним режимом можна представити як суму функції впливу механічного навантаження і функції термічного навантаження.

Висока жорсткість оброблювального центру K_{mach} є критичною для забезпечення стабільності траєкторії інструмента, особливо в умовах мікросвердління. Недостатній рівень жорсткості призводить до появи пружних деформацій вузлів, які, своєю чергою, спричиняють зміщення осі отвору. У відповідності до цього фактору похибка у формуванні отвору може бути оцінена через зниження ефективної жорсткості системи δ_{stiff} F_{cut}/K_{mach}, де F_{cut} є силою різання, що залежить від параметрів обробки та матеріалу заготовки. Також при цьому необхідно враховувати клас точності сервоприводів, що визначає мінімальний крок подачі та впливають на дискретизацію положення свердла.

У свою чергу, надійність кріплення заготовки й інструмента запобігає мікрозсувам у процесі свердління. При порушенні відповідного режиму виникають системні похибки базування, що призводять до зміщення осі отвору, відхилення від перпендикулярності та нерівномірного навантаження на ріжучу кромку.

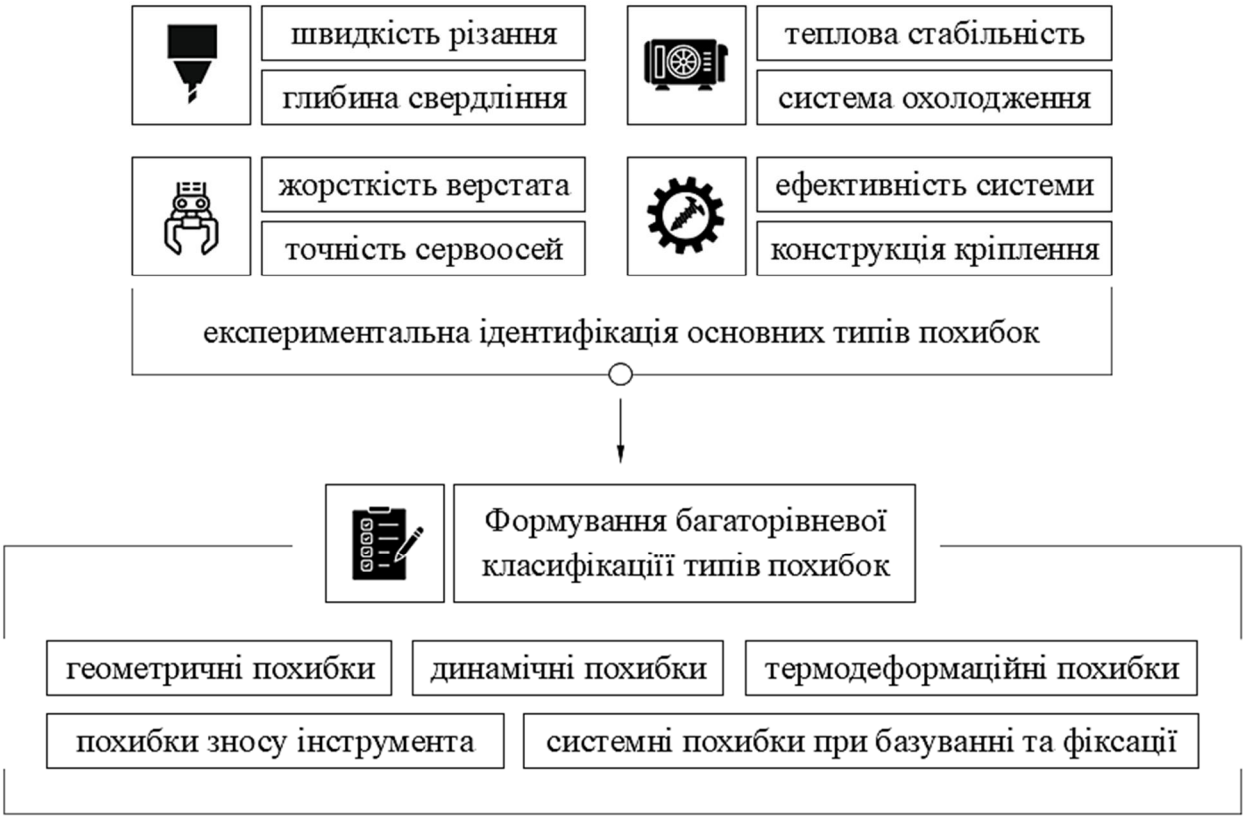

Рис. 2. Логічна модель впливу технологічних і конструктивних чинників на типізацію похибок свердління

Ключові параметри, що визначають якість кріплення поділяються на наступні категорії:

- тип затискача, як то механічний, пневматичний або гідравлічний;
- допуски на співвісність і паралельність базових поверхонь;
- коефіцієнт тертя на контактній площині.

Похибка кріплення δ_{fix} на математичному рівні визначається на основі початкового зміщення ε_{align}, реактивного моменту M_{RT} і жорсткості вузла фіксації K_{clamp} як $\delta_{fix} \ \varepsilon_{align} + M_{RT} / K_{clamp}$.

Наступним фактором, що підлягає визначенню у рамках дослідження є теплова стабільність та ефективність охолодження. В умовах високої частоти обертання та малого перерізу зони різання температура швидко досягає критичних значень. У рамках багатокритеріального аналізу можна вказати, що перегрів викликає внаслідок наступних факторів:

- термопружні деформації інструмента;
- утворення оксидних плівок на поверхні отвору;
- деградацію геометрії кромки.

Температура в зоні різання T_{cut} моделюється на основі температури середовища T_0, коефіцієнту теплоперетворення η, теплової потужності різання P_{cut}, теплопровідність матеріалу λ_M та ефективної площі теплообміну S_{eff}, що розраховується як $T_{cut} = T_0 + (\eta \cdot P_{cut}) / (\lambda_M \cdot S_{eff})$. При цьому недостатнє охолодження особливо критичне для свердел малого діаметру, де внутрішній канал обмежений.

Таким чином, у процесі обробки отворів малого діаметру ключові технологічні параметри формують складну систему взаємозалежних впливів, де кожен із чинників надалі може бути джерелом зниження точності при недотриманні відповідних умов вказаних у рамках технічного завдання. Режими різання безпосередньо впливають на

інтенсивність утворення стружки, температуру в зоні різання, зусилля подачі та знос інструмента. У загальному випадку похибка отвору зростає зі збільшенням подачі та глибини свердління внаслідок підвищення температури, деформації інструмента та зниження ефективності виведення стружки на великих глибинах. Інтеграція зазначених факторів у єдину оптимізаційну модель дозволяє сформувати умови для підвищення точності, зниження відмов і досягнення відтворюваності результатів у серійному виробництві.

Висновки

У результаті проведеного дослідження було здійснено комплексний аналіз факторів, що визначають точність процесу свердління отворів малого діаметра на сучасних верстатах з числовим програмним керуванням. Основну увагу приділено класифікації типів похибок, вивченню механізмів їх виникнення, а також впливу технологічних, конструктивних та експлуатаційних параметрів. У результаті були реалізовані наступні завдання:

Проаналізовано вимоги до точності свердління, які визначаються не лише лінійними розмірами, але й показниками шорсткості, стабільності геометричних параметрів і відповідності отворів нормативно-технічним стандартам, що особливо критично для отворів діаметром менше 1 мм.

Систематизовано конструктивні обмеження інструменту малого діаметру, пов’язані з недостатньою жорсткістю, складністю відведення стружки та тепла, а також високою чутливістю до зносу ріжучих кромок, що призводить до кумулятивного погіршення точності.

Визначено вплив характеристик оброблюваних матеріалів, як то теплопровідності, абразивності, схильності до утворення тріщин, на процес утворення похибок і деградації інструменту в умовах мікрообробки.

Сформовано багаторівневу класифікацію похибок, до якої включено: геометричні, динамічні, термодеформаційні похибки, похибки зносу інструменту та системні похибки при базуванні й фіксації. Для кожного з типів наведено характерні прояви, причинно-наслідкові зв’язки та можливості математичного опису.

Побудовано структурно-факторну модель, яка описує вплив основних технологічних параметрів, як то режимів різання, жорсткості системи, точності сервоприводів, системи охолодження та кріплення, на величину похибки, з наведенням формальних залежностей та критичних показників.

Запропоновано формалізовані співвідношення, що дозволяють оцінювати внесок окремих факторів у загальну похибку отвору, зокрема моделі для оцінки впливу жорсткості системи, параметрів теплового поля та умов кріплення заготовки.

Показано, що точність процесу мікросвердління визначається сукупною дією термомеханічних, динамічних і конструктивних факторів, і вимагає комплексного підходу до моделювання, прогнозування та компенсації похибок.

Представлені результати можуть бути використані для побудови адаптивних систем моніторингу точності в рамках концепції «Smart Manufacturing».

Список джерел

1. Smith, J., & Lee, Y. (2021). Advances in micro-milling: A critical review. International Journal of Precision Engineering, 28(3), p. 123-145.
2. Ugbine, O. F., Akhabue, O. B., Blessing, P. O., Adeniran-Bakare, S. M., Egbunu, J. O., Dauda, V. O., & Godwin, A. N. (2024). Laser and mechanical micro-drilling for aerospace applications. World Journal of Advanced Research and Reviews, 23(2), 744–753. https://doi.org/10.30574/wjarr.2024.23.2.2380.

3. Lee, Y. K., Lee, S., & Kim, S. H. (2024). Real-time defect monitoring of laser micro-drilling using reflective light and machine learning models. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 25(2), 155–164. https://doi.org/10. 1007/s12541-023-00849-w.
4. Yazar, M. K., Taşal, Ş., & Askerden, M. K. (2024). Effects of CNC tool run-out on drilling process. Engineering Perspective, 4(3), p. 119–124.
5. Li, L., & Chen, Y. (2025). Survey on machine learning applied to CNC milling processes. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 25(2), p. 155-164.
6. Liang, Z., Ma, Y., Zhang, S., & Wu, J. (2021). Novel micro-deep-hole drill with variable web thickness and flute width. Precision Engineering, 72, 340–355. https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2021.05.008
7. Saitou, S., Tanaka, Y., & Matsumoto, T. (2023). A critical review on mechanical micro-drilling of glass and carbon materials. Composites Part B: Engineering, 260, 110850. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.110850
8. Erkoc, P., & Marimuthu, B. (2024). Vibration-assisted deep hole micro-drilling: Experimental investigation. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 95(1), 145–157.
9. Kim, J., & Park, S. (2015). Dynamic analysis in micro-drilling process with ultrasonic vibration. Extreme Mechanics Letters, 4, 34–43. https://doi.org/10.1016/j.eml.2014.11.001
10. Smith, A., & Zhou, Q. (2024). Hybrid physics-machine learning models for predicting tool wear in micro-drilling. Scientific Reports, 14, 5957. https://doi.org/10.1038/s41598-024-56640-y
11. Tan, C., & Wong, K. (2020). Artificial intelligence–based hole quality prediction in micro-drilling. Sensors, 20(3), 885. https://doi.org/10.3390/s20030885.
12. Chen, L., & Wang, P. (2022). Investigation of acoustic emission signals for real-time monitoring of micro-drilling. Applied Sciences, 12(12), 6659. https://doi.org/10. 3390/app12126659.
13. Liu, M., & Kumar, S. (2022). Tool condition monitoring for micro-drilling processes using acoustic emission. Sensors, 22(6), 2206. https://doi.org/10.3390/s22062206
14. Hernández, J., & Torres, M. (2013). Effects of cutting-edge microgeometry on tool wear and thermo-mechanical load. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 76, 45–52. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2013.04.008.
15. Li, X., & Shen, Y. (2015). Characteristics of chip formation in the micro-drilling of multi-material sheets. Journal of Materials Processing Technology, 226, 14–22. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.04.010.
16. International Organization for Standardization. (2010). ISO 286-1:2010 – Geometrical product specifications (GPS) – ISO code system for tolerances on linear sizes – Part 1: Basis of tolerances, deviations and fits.
17. International Organization for Standardization. (2017). ISO 1101:2017 – Geometrical product specifications (GPS) – Geometrical tolerancing – Tolerances of form, orientation, location and run-out.
18. International Organization for Standardization. (1997). ISO 4287:1997 – Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Terms, definitions and surface texture parameters.
19. Shyha, I., Gariani, S., El-Sayed, M. A., & Huo, D. (2018). Analysis of microstructure and chip formation when machining Ti-6Al-4V. Metals, 8(3), 185. https://doi.org/10. 3390/met8030185.
20. Dutta Majumdar, U., Basak, A., & Pal, S. (2022). Micro-milling performance evaluation of 316L stainless steel and its surface characteristics. Journal of

Materials Processing Technology, 30(1), 100312. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2022.100312.