

**О.О. Томашевський, аспірант  
Н.О. Балицька, к.т.н., доц.***Державний університет «Житомирська політехніка»*

### **Процес мікрофрезерування металів і сплавів: аналітичний огляд**

*У багатьох галузях промисловості стрімко зростає попит на мініатюрні високоточні вироби, що стимулює потребу в ефективних технологіях їх виготовлення. Мікрофрезерування є найбільш універсальним процесом мікрорізання металів і сплавів. Тому дослідження процесів мікрофрезерування з метою забезпечення високої ефективності обробки мініатюрних конструктивних елементів виробів є актуальним питанням для сучасного рівня металообробних технологій. У статті представлено аналітичний огляд сучасних наукових досліджень процесу мікрофрезерування металів і сплавів.*

*Описуються основні вимоги до верстатів для мікрофрезерування, їх види та технічні характеристики. Розглядаються поширені конструкції мікрофрез, інструментальні матеріали для їх виготовлення та види застосовуваних зносостійких покриттів. У статті наводяться рекомендації виробників щодо призначення режимів мікрофрезерування різних матеріалів. Пояснюється взаємозв'язок ефекту мінімальної товщини зрізаного шару із значенням кінематичного переднього кута та масштабного ефекту із варіаціями сил різання. Обговорюються особливості стружкоутворення при мікрофрезеруванні, а саме механізм видалення стружки за різної товщини зрізаного шару.*

*В статті висвітлюються можливі технічні труднощі, що виникають у процесі різання, й узагальнюються рекомендації для їх вирішення й ефективного мікрофрезерування металів і сплавів.*

**Ключові слова:** мікрорізання; режими різання; масштабний ефект; механізм стружкоутворення.

**Актуальність теми.** Мікрофрезерування – це технологія мікрорізання, що дозволяє виготовляти деталі та їх найдрібніші елементи розміром менше за 1 мм, а часто і менше за 50 мкм. На сьогоднішній день мікрофрезерування залишається одним із основних методів отримання складнопрофільних, дрібно розмірних, високоточних деталей. Мікрофрезерування застосовують для виготовлення годинників та ювелірних виробів, імплантів, мікрохірургічного обладнання, вимірювальних приладів, деталей мікро машин, мікроштампів, пресформ, інструментів, оптичних виробів, деталей двигунів внутрішнього згорання, космічних апаратів тощо.

Проблеми, що виникають під час макро- і мікрофрезерування, відрізняються, а отже, потребують різних підходів до їх вирішення. Особливість мікрофрезерування може бути пояснена «масштабним ефектом», а саме ускладненим видаленням шару матеріалу під час мікрообробки. Це видозмінює механізм видалення матеріалу і ускладнює стружкоутворення, що призводить до підвищення питомих сил різання, температур та тертя в зоні різання, і значно знижує стійкість інструменту. Якість мікрофрезерування істотно залежить від зносостійкості та биття інструменту.

Технічні характеристики обладнання є важливим чинником ефективності мікрофрезерування. Висока частота обертання (20000–160000 об/хв), мінімальне биття шпинделя, збільшена жорсткість та температурна стабільність є невід'ємними вимогами до верстата для мікрофрезерування. Оскільки такий рівень вимог до металорізального обладнання був досягнутий відносно недавно, це стимулювало розвиток процесів мікрорізання, зокрема і мікрофрезерування. Останніми роками також було розроблено і впроваджено у виробництво значну кількість різних видів мікроінструментів та прецизійної технологічної оснастки. Все це мотивувало інтерес виробників та впровадження процесів мікрофрезерування у діяльність багатьох сучасних підприємств.

На сьогоднішній день накопичений деякий досвід реалізації технологій мікрорізання, проте потребують подальшого дослідження питання забезпечення ефективності процесів мікрофрезерування різних матеріалів. Тому аналіз характеристик процесу мікрофрезерування металів і сплавів на предмет пошуку шляхів підвищення ефективності оброблення є актуальним завданням сучасної промисловості.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спираються автори.** Значний внесок у дослідження процесів мікрофрезерування металів і сплавів був зроблений авторами робіт [1–6].

Дослідження впливу режимів та стратегій різання на характеристики процесу мікрофрезерування (сили різання, вібрації, утворення задирок, якість поверхні) експериментальними методами виконувалося в [5, 7]. Відомі також роботи з оптимізації геометричних параметрів мікроінструменту за допомогою методу скінченних елементів, наприклад, [8]. У [9] розроблено точну тривимірну модель сил різання для

мікрокінцевого фрезерування. Перевага розробленої моделі полягає в тому, що вона враховує комбінацію ефекту вибігу інструменту (ексцентриситет і нахил), точну трохойдальну траєкторію канавки інструменту, фактичні кути входу та виходу й відхилення інструменту.

У [10, 11] досліджено вплив масштабного ефекту на характеристики процесу мікрофрезерування. Як критичний параметр контролю визначено відношення товщини зрізу до радіуса різальної кромки. Автори [10] встановили, що масштабний ефект є значним, коли відношення товщини зрізу до радіуса різальної кромки є меншим за одиницю. Дослідження показали, що найкраща якість поверхні при мікрообробці загартованої інструментальної сталі досягається, коли товщина зрізу дорівнює радіусу різальної кромки інструменту. Автори [12] запропонували метод визначення мінімальної товщини зрізу шляхом аналізу сигналу сил різання при мікрофрезеруванні із одночасним врахуванням впливу радіального биття інструменту.

Процес мікрофрезерування супроводжується утворенням задилок, що вимагає досліджень у цьому напрямі. Так у [13] була розроблена тривимірна кінцево-елементна модель для аналізу утворення задилок у процесі мікрофрезерування алюмінієвого сплаву Al2024-T6 твердосплавною фрезою. Ця модель передбачає вплив радіуса різальної кромки інструменту та зношування на утворення задилок. Адекватність розробленої авторами моделі підтверджена експериментальними дослідженнями. Авторами [13] показано, що розроблена тривимірна кінцево-елементна модель підходить для прогнозування морфології обробленої поверхні та розмірів мікрозадилок.

Однією з важливих проблем під час мікрофрезерування є також вплив вібрацій. Автори [3] виявили, що вібрації значно впливають на знос інструменту, шорсткість обробленої поверхні та значення сил різання. Ступінь вібрацій суттєво впливає на форму та розмір стружки, що утворюється в процесі мікрообробки. Одним зі способів мінімізації вібрацій є раціональний вибір параметрів обробки. Оптимальні комбінації умов оброблення можна встановлювати за допомогою діаграм пелюсток стабільності, як було показано в [3]. Інші методи гасіння вібрацій передбачають використання антивібраційних прокладок, оправок тощо.

Інструментальні матеріали суттєво впливають на продуктивність мікрофрезерування. Сучасні мікрофрези виготовляються переважно із твердих сплавів з нанесенням зносостійких покриттів, що дозволяє підвищити їх стійкість та забезпечити ширший діапазон зміни режимів різання [4]. Критеріями ефективного покриття є рівномірність товщини покриття, висока твердість, висока в'язкість, низьке тертя, висока зносостійкість, гладкість поверхні, висока хімічна / дифузійна стійкість і висока теплостійкість. Роботи [5, 14, 15] присвячені розробці та застосуванню зносостійких покриттів твердосплавних мікрофрез для обробки матеріалів різних марок.

Відомо, що застосування мастильно-охолоджувальних технологічних середовищ (МОТС) в багатьох випадках значно підвищує ефективність мікрофрезерування. У [16] було оцінено вплив різних умов охолодження / змащування на знос інструменту, шорсткість обробленої поверхні та утворення задилок під час мікрофрезерування нікелевих сплавів. Авторами показано, що застосування технології мінімальної кількості змащування забезпечило зменшення шорсткості поверхні на 65 %, порівняно із сухим мікрофрезеруванням. Також авторами виявлено, що знос інструменту значно впливає на утворення задилок. Абразивний і адгезійний знос були основними видами зносу, при цьому МОТС не змінювали механізм зношування різальних інструментів.

Вплив мінімальної кількості змащення та криогенного попереднього охолодження на ефективність мікрофрезерування Inconel 718 вивчали автори [17]. Встановлено, що шорсткість поверхні у процесі різання з попереднім криогенним охолодженням заготовки менша приблизно на 25–60 %, порівняно із сухим фрезеруванням. Проте криогенне охолодження призводить до крихкості заготовки, збільшує твердість її поверхні, що негативно впливає на стійкість інструменту.

Незважаючи на наявну на сьогодні значну кількість досліджень процесу мікрофрезерування різних металів та сплавів, аналіз літератури свідчить про недостатність ґрунтовних та систематизованих робіт у цьому напрямі.

Інформаційну основу літературного огляду, представленого в цій роботі, становлять результати зазначених вище досліджень.

**Метою статті** є з'ясування основних чинників, які визначають ефективність процесу мікрофрезерування металів і сплавів, та формування рекомендацій щодо її підвищення.

**Викладення основного матеріалу.** Мікрофрезерування є одним із найбільш економічно ефективних і гнучких виробничих процесів для виробництва мікрокомпонентів, мікроелементів і мікроструктурованих поверхонь, оскільки менш вимогливе з точки зору енергоспоживання. Мікрофрезерування забезпечує високі швидкості видалення матеріалу, дозволяє працювати з різноманітними матеріалами та виготовляти складні тривимірні поверхні, включно з тими, які важко обробляти, зберігаючи при цьому високу точність і якість компонентів. Однак існують обмеження обробки, оскільки мікрофрези чутливі до биття, згину і відведення, які обмежують точність і якість оброблених поверхонь. Це пов'язано з тим, що ці інструменти мають менше відношення діаметра до

довжини вильоту, що призводить до зниження їх жорсткості. При мікрообробці утворюються задирки, що збільшує виробничі витрати, впливає на якість обробленої поверхні та знижує здатність деталі відповідати бажаним експлуатаційним характеристикам.

**Верстати для мікрофрезерування.** Якість мікропродукції залежить від технічних характеристик верстатів, які використовуються для її виготовлення, враховуючи їх загальну точність і динамічні характеристики.

До верстатного устаткування для мікрообробки висуваються спеціальні вимоги [1]. Виробники пристосовують існуючі верстати до виконання завдань мікрообробки, для чого зменшують розміри як самого устаткування, так і окремих його вузлів, і додають необхідні при мікрообробці функції. Іншим підходом є створення спеціально призначених верстатів для мікрообробки.

Серед виробників верстатів для мікрофрезерування лідерами є Німеччина (Primason, Kern і Kugler та ін.) і Японія (Makino, Fanuc та ін.). Сучасні верстати для мікрообробки мають такі характеристики: привід від лінійного двигуна по основних осях координат; гідростатичні напрямні; наявність пристроїв для компенсації або ліквідації впливу теплового джерела; високі частоти обертання шпинделів (понад 40000 об/хв); гранітні станина і стійка; лазерна система зворотного зв'язку при позиціюванні; пристрій ЧПК, який здатний обробляти і виводити на екран дисплея нанометричні одиниці виміру; безконтактне визначення стану інструмента або безконтактна вимірювальна система.

При мікрообробці швидкість обертання шпинделя має бути дуже високою, щоб підтримувати прийнятну продуктивність, оскільки малий діаметр інструменту обмежує швидкість видалення стружки [18]. Якщо вимоги до крутного моменту високі, використовуються електродвигуни з гібридними радіально-упорними підшипниками. Це обмежує максимальну швидкість приблизно до 60000 об/хв, оскільки тертя в контактному підшипнику призводить до теплового розширення шпинделя. Часто для досягнення більш високих швидкостей надточні верстати доосначують високошвидкісними шпинделями.

У надточних верстатах зазвичай використовуються лінійні приводні двигуни. Порівняно зі звичайними приводними механізмами, такими як кулькові гвинти, лінійні двигуни не мають накопичувальних похибок і не втрачають точності через зношування та не мають люфтів. Вони можуть забезпечувати дуже високі прискорення. Типова точність для надточних верстатів, що використовують лінійні приводи, становить  $\pm 1$  мкм [19].

Для ефективної обробки биття шпинделя верстата і точність позиціонування інструмента мають бути в межах до 1/100 діаметра мікроінструменту або менше [4]. Перевищення цих допусків може призвести до циклічного згинання інструмента та його поломки.

Прецизійні верстати (рис. 1) відрізняються високою жорсткістю, демпфуванням і можливістю точного керування. Однак великі масштаби і точно контрольоване середовище обробки можуть призвести до дуже високих витрат на виготовлення мініатюрних компонентів.



Рис. 1. Прецизійні верстати Hyper2j фірми Makino [18]

Модифікація великих верстатів для мікрообробки, як правило, передбачає зменшення масштабу деяких частин верстата та інструментів, щоб вони могли створювати мікроелементи як на великих, так і на мікродеталях. Однак таким верстатам бракує певних функцій, які запобігають або мінімізують

вібрацію. Загальновідомо, що вплив вібрації зростає зі зменшенням діаметра оброблюваних елементів. Таким чином, мікроелементи несуть на собі основний тягар навіть найдрібніших вібрацій.

Спеціально розроблені великі верстати мають датчики вібрації або інструменти для гасіння вібрацій. Вони містять механізми переміщення деталей і кріплення. Крім того, ці верстати можуть підтримувати комп'ютерне числове програмне керування (ЧПК), таким чином стаючи верстатами з ЧПК з можливостями мікрообробки, наприклад, компактний фрезерний верстат CM-1 компанії Haas.

Портативні мініатюрні фрезерні верстати мають низку переваг, серед яких зниження початкових та експлуатаційних витрат, економія місця та енергії. Наприклад, компактний фрезерний верстат (рис. 2) [20] має розмір корпусу – 414 x 450 x 470 мм, його можна використовувати як фрезерний, токарний або полірувальний верстат. Шпиндель має максимальну швидкість обертання  $20000 \text{ хв}^{-1}$ , а биття шпинделя менше за 2 мкм. Також можлива обробка важкооброблюваних матеріалів, таких як твердий сплав.



Рис. 2. Компактний фрезерний верстат MTS5R фірми NANOWAVE [20]

**Інструменти для мікрофрезерування.** Мікрофрези хоча і геометрично подібні до фрез звичайних розмірів за конструкцією, проте часто демонструють іншу поведінку в процесі різання [21–23]. На рисунку 3 представлено основні типи комерційно доступних мікрофрезерних різальних інструментів.

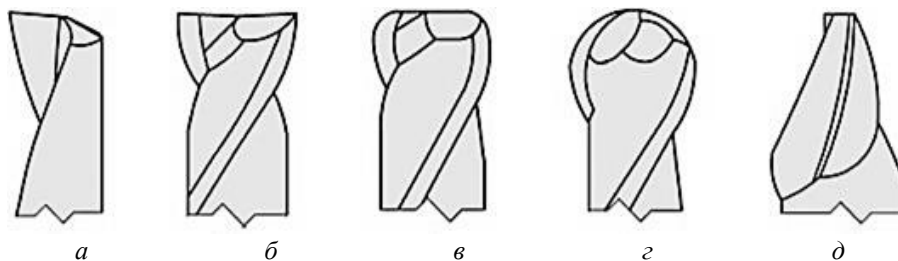


Рис. 3. Типи мікрофрез: однозуба (а), двозуба (б), кінцева з кутовим радіусом (в), сферична (г), конічна (д) [2]

Більша кількість різальних кромки може знижувати жорсткість мікроінструменту, тому для мікрофрезерування рекомендується менша кількість різальних кромки (рис. 3, а, б). Разом з тим збільшення кількості кромки інструменту може значно підвищити продуктивність оброблення. Однозахідні геометрії часто виготовляються зі штучного алмазу [8], що забезпечує високу гостроту різальної кромки, але часто спричиняє підвищені вібрації [24].

На рисунку 3, в показана схема твердосплавної кінцевої фрези з кутовим радіусом спіралі. Така конструкція є досить поширеною, оскільки забезпечує підвищену зносостійкість кромки. Крім того, ці фрези можуть обробляти складні криволінійні просторові поверхні. Ця конструкція може використовуватися зі збільшеними швидкостями подачі за менших значень глибини різання. Завдяки кутовому радіусу фрези збільшується осьова складова сили різання, що зменшує деформацію згину інструмента, і, як наслідок, вібрації в процесі різання [7].

На рисунку 3, г наведено схему сферичної мікрофрези, яка знайшла широке застосування [25]. Цей тип особливо підходить для виготовлення складних 3D-геометрій. Однак під час обробки плоских поверхонь швидкість різання поблизу центральної точки інструменту низька, і тому виникає явище критичного потоншення стружки. Ці труднощі можна частково вирішити за допомогою обробки із

нахилом інструменту в напрямку подачі, хоча це і вимагає застосування більш складного (4- або 5-осьового) обробного центру.

З метою зменшення утворення задирок широко застосовуються конічні мікрофрезерні інструменти (рис. 3, д) [24].

На продуктивність мікрообробки суттєво впливають властивості інструментального матеріалу. Переважна більшість сучасних мікрофрез виготовляється із твердих сплавів (табл. 1).

Таблиця 1

## Приклади твердих сплавів для мікрофрез [26]

| Сплав        | Co, % | Густина, г/см <sup>3</sup> | Твердість, HV <sub>30</sub> , кг/мм <sup>2</sup> | Розмір зерна WC, мкм |
|--------------|-------|----------------------------|--|----------------------|
| Sandvik H10F | 10    | 14,45                      | 1600 ±30   | 0,80                 |
| Konrad K40UF | 10    | 14,45                      | 1620 ±50   | 0,65                 |
| SpeAL X40UF  | 12,0  | 14,1                       | 1750 ±50   | 0,40                 |
| Konrad K44UF | 12,0  | 14,05                      | 1690 ±50   | 0,50                 |

Твердий сплав H10F фірми Sandvik являє собою сплав карбиду вольфраму з субмікронним розміром карбідного зерна, який точно контролюється спеціалізованим обладнанням. H10F пропонує відмінне поєднання міцності та стійкості, максимум корозійної стійкості без втрати міцності.

Твердий сплав K40UF фірми Konrad Friedrichs GmbH&Co призначений для широкої сфери застосувань: високопродуктивного фрезерування сплавів титану, жароміцних сплавів, сірих чавунів, нержавіючих сталей, скловолоконних композиційних матеріалів.

Сплав X40UF SpeAL фірми Sandvik призначений для обробки сплавів титану, загартованих сталей, сплавів алюмінію, нержавіючої сталі та композитів.

Сплав K44UF фірми Konrad Friedrichs GmbH&Co призначений для обробки сплавів титану, жароміцних сплавів, нержавіючих та загартованих сталей, сірих чавунів та композиційних матеріалів.

Для всіх зазначених вище марок сплавів характерне збереження властивостей за швидкісної обробки і змащення масляним туманом.

Як інструментальний матеріал для мікрофрез може застосовуватися також полікристалічний алмаз (PCD) (рис. 4). Частинки алмазу розміром 1–30 мкм спікаються разом у довільній орієнтації в присутності кобальту, утворюючи зрощену масу алмазних зерен [27].

PCD характеризується дуже високою твердістю, хорошою абразивною стійкістю, малим коефіцієнтом тертя та високою міцністю зв'язуючої фази полікристалічної структури. PCD-мікрофрези застосовують для обробки абразивних матеріалів, наприклад, алюмінієвих та магнієвих сплавів, армованих пластикових композитів, твердих сплавів, кераміки, скла, графітів тощо.



Рис. 4. PCD-мікрофрези від компанії MSK [28]

Нанесення зносостійких покриттів на мікроінструмент дозволяє підвищити його зносостійкість та забезпечити ширший діапазон зміни режимів різання [4]. Методи хімічного та фізичного осадження з газової фази (CVD та PVD) були розроблені для нанесення на різальні інструменти моно- або багат шарових покриттів. Критерії ефективного покриття: рівномірність товщини покриття, висока твердість, висока в'язкість, низьке тертя, висока зносостійкість, гладкість поверхні, висока хімічна / дифузійна стійкість, висока теплостійкість та ін. Як CVD-, так і PVD-методи збільшують радіус

округлення різальної кромки, що викликає несприятливий ефект пластичного деформування з від'ємним ефективним переднім кутом. Разом з тим дуже тонке покриття може спричинити його відшарування.

Ефективність застосування TiN-покриття при мікрофрезеруванні загартованої інструментальної сталі експериментально підтверджена в [14]. Авторами показано, що використання покриттів TiN призводить до зменшення відколів на робочих поверхнях та зносу на бічних поверхнях різального інструменту, а також покращення якості обробки. Широкого поширення набули також покриття TiAlN завдяки високій твердості, стійкості до окислення і корозійній стійкості при високих температурах. Вони, як доведено в роботі [29], показують найкращі результати щодо цілісності обробленої поверхні при мікрофрезеруванні аустенітної сталі.

У дослідженні [15] було доведено високу ефективність застосування DLC- (алмазоподібний вуглець) і TiAlN+WC/C-покриттів при фрезеруванні сплаву Inconel 718. Відомо також про застосування CBN-покриттів для твердосплавних мікрофрез [5], які забезпечують покращення шорсткості обробленої поверхні виробів з титанового сплаву Ti-6Al-4V. Разом з тим показано, що обробка мікрофрезами без покриття забезпечує меншу кількість верхніх задирок.

Поширені типи зносостійких покриттів для мікрофрез наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Поширені типи покриттів для твердосплавних мікрофрез [4]

| Покриття                             | Структура     | Твердість, ГПа | Коефіцієнт тертя | Товщина покриття, мкм | Максимальна робоча температура, °C | Оброблюваний матеріал   |
|--------------------------------------|---------------|----------------|------------------|-----------------------|------------------------------------|---|
| TiN                                  | Моношар       | 24             | 0,55             | 1–5                   | 600                                | Чорні та кольорові метали   |
| TiCN                                 | Градiєнт      | 37             | 0,20             | 1–4                   | 400                                | Чорні метали, чавуни, латунь, бронза, мідь, алюмінієві сплави з високим вмістом кремнію   |
| TiAlN                                | Багатошарові  | 28             | 0,60             | 1–4                   | 700                                | Алюміній, нержавіючі сталі, титан і нікелеві сплави   |
| TiAlN-X                              | Наномоношар   | 33             | 0,50             | 1–4                   | 800                                | Леговані сталі, нержавіючі сталі, інструментальні сталі, титан, жароміцні сплави  |
| AlTiN                                | Градiєнт      | 38             | 0,70             | 1–3                   | 900                                |   |
| AlTiN-X                              | Наномоношар   | 35             | 0,50             | 1–4                   | 900                                | Загартовані сталі, нержавіючі сталі, інструментальні сталі, сплави на основі нікелю, титанові сплави                                      |
| AlTiN/Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> | Наноккомпозит | 45             | 0,45             | 1–4                   | 1200                               |   |
| AlCrN/Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> | Наноккомпозит | 42             | 0,35             | 1–5                   | 1100                               |   |
| ZrN                                  | Моношар       | 20             | 0,40             | 1–4                   | 550                                | Алюміній, латунь, мідь, бронза, скловолокно та композити  |
| CrN                                  | Моношар       | 18             | 0,30             | 1–4                   | 700                                | Мідні сплави  |
| TiB <sub>2</sub>                     | Моношар       | 40             | 0,45             | 1–3                   | 850                                | Алюмінієві сплави з високим вмістом кремнію, титанові сплави, магнієві сплави та мідні сплави   |
| DLC (алмазоподібний вуглець)         | Градiєнт      | 20             | 0,15             | 0,5–1,5               | 400                                | Алюмінієві сплави   |
| DIA (аморфний алмаз)                 | Моношар       | 90             | 0,17             | 0,5–8                 | 600                                | Абразивні матеріали, пластмаси, графіт, вуглецеве волокно, сплави з високим вмістом кремнію, композити, зелені карбіди та зелена кераміка |
| CVD (кристалічний алмаз)             | Багатошарові  | 93             | 0,17             | 3–5                   | 600                                | Графіт, композити, зелений карбід, зелена кераміка  |

**Режими різання під час мікрофрезерування.** Правильно підібраний режим різання під час мікрофрезерування відіграє важливу роль для забезпечення ефективності процесу. При недотриманні вимог щодо оптимальності режимів різання може спостерігатися відмова різального інструменту та

пошкодження заготовки. Рекомендовані режими мікрофрезерування металів та сплавів вказані в таблицях 3, 5.

Таблиця 3

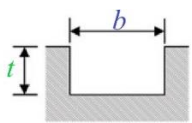
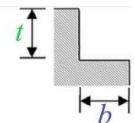
Рекомендовані режими мікрофрезерування металів та сплавів твердосплавним інструментом [26]

| Матеріал                                | Твердість оброблюваного матеріалу, НВ | Швидкість різання, м/хв | Подача на зуб, мм, для фрез діаметром, мм |               |             |
|---|---------------------------------------|-------------------------|---|---------------|-------------|
|   |                                       |                         | 0,1–0,5                                   | 0,6–0,8       | 1,0–1,6     |
| Вуглецева сталь                         | 80–150                                | 170                     | 0,0004–0,0022                             | 0,0030–0,0040 | 0,005–0,008 |
|   | 125–175                               | 150                     | 0,0004–0,0022                             | 0,0030–0,0040 | 0,005–0,008 |
|   | 200–280                               | 120                     | 0,0003–0,0015                             | 0,0020–0,0030 | 0,004–0,007 |
| Загартована сталь (~ 45 HRC)            | 300–400                               | 70                      | 0,0002–0,0013                             | 0,0017–0,0022 | 0,003–0,005 |
| Загартована сталь (~ 55 HRC)            | 470–600                               | 60                      | 0,0001–0,0008                             | 0,0012–0,0018 | 0,002–0,003 |
| Загартована сталь (~ 65 HRC)            | 600–700                               | 40                      | 0,0001–0,0007                             | 0,0011–0,0017 | 0,002–0,003 |
| Інструментальна та швидкорізальна сталь | 300–400                               | 70                      | 0,0002–0,0013                             | 0,0017–0,0022 | 0,003–0,005 |
| Чавуни                                  | 120–175                               | 150                     | 0,0003–0,0015                             | 0,0020–0,0030 | 0,004–0,007 |
| Аустенітні нержавіючі сталі             | 160–220                               | 115                     | 0,0003–0,0015                             | 0,0020–0,0030 | 0,004–0,007 |
| Аустенітно-феритні нержавіючі сталі     | 180–260                               | 60                      | 0,0002–0,0013                             | 0,0017–0,0022 | 0,003–0,005 |
| Феритні та мартенситні нержавіючі сталі | 160–200                               | 70                      | 0,0003–0,0015                             | 0,0020–0,0030 | 0,004–0,007 |
| Титан 6Al–4V                            | 320–380                               | 90                      | 0,0003–0,0015                             | 0,0020–0,0030 | 0,004–0,007 |
| Інконель 625, 718                       | 280–320                               | 20                      | 0,0001–0,0007                             | 0,0011–0,0017 | 0,002–0,003 |
| Мідь, бронза                            | 120–160                               | 120                     | 0,0004–0,0022                             | 0,0030–0,0040 | 0,005–0,008 |

В таблиці 4 наведено рекомендовану осьову глибину різання і ширину мікрофрезерування для випадків оброблення пазу і уступу.

Таблиця 4

Рекомендована осьова глибина різання і ширина мікрофрезерування [26]

| Обробка пазу  |                                   |                                   |                                    | Обробка уступу  |  |   |                                       |
|---|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|---|--|---|---------------------------------------|
| чавунний верстат  |                                   | алюмінієвий верстат               |                                    | чавунний верстат  |  | алюмінієвий верстат                             |                                       |
| Твердість НВ < 280  | Твердість НВ ≥ 280                | Твердість НВ < 280                | Твердість НВ ≥ 280                 | Твердість НВ < 280  | Твердість НВ ≥ 280                             | Твердість НВ < 280                              | Твердість НВ ≥ 280                    |
| $b = d^*$ ,<br>$t \leq 0,5 \cdot d$   | $b = d$ ,<br>$t \leq 0,2 \cdot d$ | $b = d$ ,<br>$t \leq 0,1 \cdot d$ | $b = d$ ,<br>$t \leq 0,05 \cdot d$ | $b \leq 0,25 \cdot d$ ,<br>$t \leq 2,0 \cdot d$                                       | $b \leq 0,2 \cdot d$ ,<br>$t \leq 1,5 \cdot d$ | $b \leq 0,05 \cdot d$ ,<br>$t \leq 1,5 \cdot d$ | $b \leq 0,03 \cdot d$ ,<br>$t \leq d$ |
|  |                                   |                                   |                                    |  |  |   |                                       |

\*d – діаметр фрези, мм

Рекомендовані режими різання конструкційних матеріалів PCD-мікрофрезами [28]

| Матеріал                  |                   | Швидкість різання, м/хв | Швидкість подачі, мм/об | Глибина різання, мм |
|---------------------------|-------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------|
| Алюмінієві сплави         | 4,8 % Si          | 100–5000                | 0,03–0,5                | 0,1–3,0             |
|                           | 9–13 % Si         | 100–3000                | 0,03–0,5                | 0,1–3,0             |
|                           | > 13 % Si         | 100–2500                | 0,03–0,4                | 0,1–2,5             |
| Мідні сплави              |                   | 100–000                 | 0,03–0,3                | 0,1–3,0             |
| Титанові сплави           |                   | 100–200                 | 0,05–0,2                | 0,1–2,0             |
| Карбіди вольфраму         | Co < 16 %         | 15–40                   | 0,1–0,25                | 0,1–1,0             |
|                           | Co > 16 %         | 10–30                   | 0,03–0,1                | 0,05–0,3            |
| Армовані пластики         |                   | 100–1000                | 0,05–0,3                | 0,1–2,0             |
| Графіти                   |                   | 100–600                 | 0,1–0,5                 | 0,05–2,0            |
| Метало-матричні композити | Al/10–20 % Si     | 300–600                 | 0,1–0,4                 | 0,2–1,5             |
| Композитні матеріали      | Вуглецеві волокна | 200–2000                | 0,05–0,3                | 0,1–3,0             |

**Особливості стружкоутворення при мікрофрезеруванні.** Оскільки процес мікрофрезерування [6] був розроблений на базі процесу звичайного фрезерування, вони мають багато спільних характеристик, однак принципово відрізняються механізмом стружкоутворення. Традиційне фрезерування в першу чергу враховує сили зсуву, що діють на передній поверхні інструмента, і набагато менші сили різання на бічних поверхнях. Режим з переважанням зсуву є бажаним механізмом видалення матеріалу під час будь-якого процесу різання, коли матеріал видаляється у вигляді чітко вираженої стружки вздовж передньої поверхні інструмента. Режим з переважанням пластичного деформування – це небажаний механізм зняття матеріалу, за якого матеріал стискається під боковою поверхнею і стружка не утворюється. Це призводить до надзвичайно низької якості поверхні і критичного зносу інструменту через високі питомі сили різання, тертя, високу температуру під час обробки тощо. На відміну від традиційного фрезерування, під час мікрофрезерування одночасно має місце як зсув, так і пластичне деформування оброблюваного матеріалу. Внесок кожного механізму сильно залежить від численних факторів, таких як товщина зрізу, масштабний ефект, геометричні похибки положення інструменту та стабільність процесу різання. Ці фактори можуть мати взаємозалежний комплексний характер, що призводить до більш складних ефектів під час мікрофрезерування.

При мікроемеханічній обробці товщина зрізу обмежена мінімальним значенням  $a_{\min}$ . Коли  $S_z < \rho$ , вплив явища пластичного деформування наявний протягом більш тривалого періоду часу на дузі контакту різальної кромки (рис. 5), а масштабний ефект є сильнішим. Виходячи з цього, мінімальна товщина зрізу приймається близькою до значення  $S_z$ . Якщо товщина зрізуваного шару  $a$  менша за  $a_{\min}$ , то різальний інструмент лише стискає верхню частину матеріалу, а не зрізає його. Це явище і викликає труднощі під час мікрофрезерування [2]. Саме радіус округлення різальної кромки інструмента визначає значення мінімальної товщини зрізу, що було підтверджено в [10, 11, 30, 31]. Мінімальну товщину зрізуваного шару можна досить точно оцінити за допомогою емпіричної моделі процесу мікрофрезерування сталей, розробленої в [32]. Низька подача та/або відносно великий вигин інструменту можуть призвести до того, що стружка в деяких випадках не утворюється, а матеріал деформується переважно пружно [30].

Під час мікрофрезерування пазів, в момент, коли інструмент входить в зону обробки, товщина зрізу дорівнює нулю і стружка не утворюється до тих пір, поки інструмент не повернеться до значення переднього кута (рис. 5). Коли товщина зрізуваного шару буде дорівнювати мінімально необхідному значенню, то лише тоді почнеться зрізання матеріалу (рис. 5) [33]. Під час фрезерування мікропазів менші значення подачі на зуб вимагають більших значень переднього кута для досягнення мінімальної товщини зрізу. В результаті за меншої подачі більша кількість матеріалу стискається з ефектом пластичного деформування та спостерігається більше пружне відновлення оброблюваного шару після проходження інструменту, а це збільшує питоме зусилля різання.



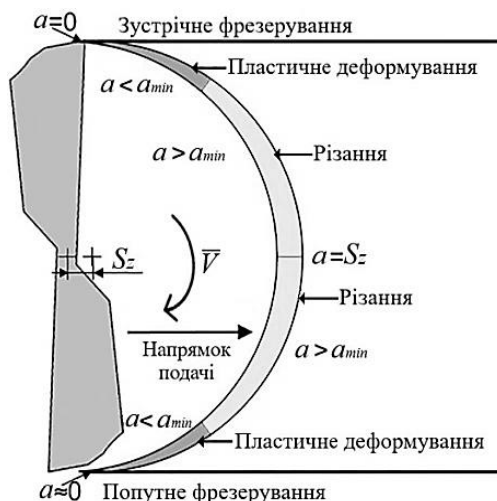


Рис. 5. Зміна товщини зрізаного шару під час мікрофрезерування [7]

На рисунку 6 проілюстровано зміну ефективного переднього кута  $\gamma_{eff}$  для різних значень товщини зрізу. Як було зазначено вище, на механізм видалення стружки під час мікробробки впливає ефект мінімальної товщини зрізу. Його причиною є від'ємний кінематичний передній кут різальної інструменту  $\gamma_{eff}$  (рис. 6, а, б), спричинений відносно високим радіусом різальної кромки порівняно з товщиною зрізу. Від'ємний ефективний передній кут різальної кромки стискає верхню частину матеріалу, і тому він пластично деформується без різання [2].

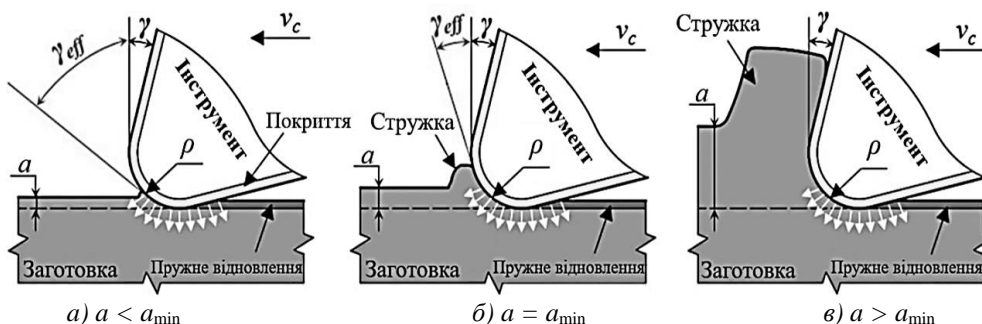


Рис. 6. Механізм видалення стружки під час мікрорізнання залежно від співвідношення товщини зрізаного шару  $a$  та радіуса округлення різальної кромки  $\rho$  [7]

Окрім «ефекту мінімальної товщини зрізу», процес мікробробки характеризується «масштабним ефектом». Масштабний ефект – це відхилення характеристик процесу від екстрапольованих значень, які виникають під час зміни розмірів заготовки, інструменту та/або параметрів процесу обробки. Масштабний ефект значною мірою пояснює варіації сил різання, товщини зрізу і утворення задирок на мікрорівні. На рисунку 7 показано графік залежності питомої сили різання від співвідношення товщини зрізу (привіреної до  $S_z$ ) до радіуса округлення різальної кромки  $\rho$  інструменту. Це співвідношення називають масштабним коефіцієнтом  $k_m$ . З рисунка 7 можна зробити висновок, що низькі значення  $k_m$  характеризуються високими питомими силами різання. Коли подача на зуб зменшується і стає меншою за радіус різальної кромки, спостерігається нелінійне зростання питомої сили різання. Це підтверджує спостереження про пластичну та пружну деформацію, коли товщина зрізаного шару стає меншою за радіус різальної кромки [10].

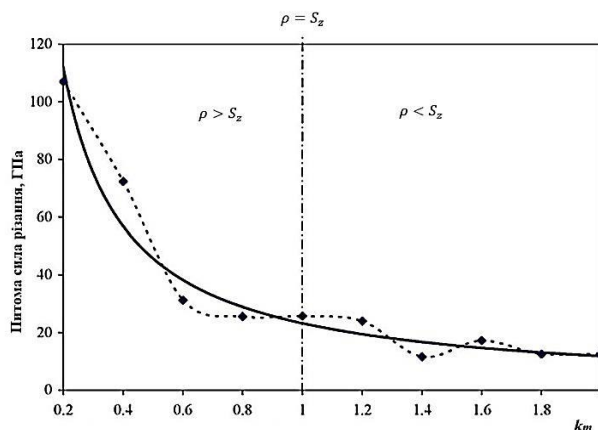


Рис. 7. Зміна питомої сили різання залежно від масштабного коефіцієнта  $k_m$  ( $S_z$  – подача на зуб,  $\rho$  – радіус округлення різальної кромки фрези) [10]

**Утворення задирок.** Процес мікрофрезерування зазвичай супроводжується утворенням задирок. Під час мікрообробки задирки вимагають особливо великої уваги через складність їх видалення. Час, необхідний для видалення задирок, може становити від 35 до 40 % всього часу обробки деталі. Крім того, геометрія мікрозадирок складно піддається оцінці.

Під час мікрообробки зазвичай спостерігаються три схеми утворення мікрозадирок: у момент врізання, усталеного процесу різання та виходу інструменту із зони різання (рис. 8).

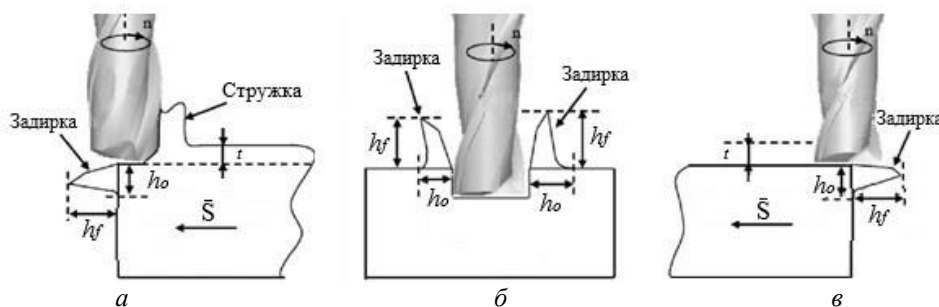


Рис. 8. Схема утворення задирок під час мікрофрезерування: в момент врізання інструменту (а), усталеного процесу різання (б), виходу інструменту із зони різання (в) ( $h_f$  – висота,  $h_o$  – ширина задирки) [13]

У [24] встановлено, що попутне фрезерування призводить до отримання більш якісної поверхні бічної стінки фрезерованого паза, однак у такому випадку утворюються більші верхні задирки порівняно зі схемою зустрічного фрезерування. Зменшення задирок спостерігалось під час застосування конусних мікрофрез із кутом конусності  $50^\circ$ , при цьому не утворювалися задирки на верхній поверхні заготовки і бічна стінка паза була гладкою.

**Биття і відведення мікрофрез.** Незадовільна геометрична точність оброблених поверхонь все ще є значною проблемою під час мікрофрезерування. Основною причиною похибок обробки є нестабільність процесу, що властива мікрофрезеруванню. Серед головних факторів, які викликають згадані похибки, можна виділити биття, відхилення інструменту та вібрації при обробці. Вони призводять до зростання та коливання сил різання, надмірного зносу інструменту та його відмови, а також до високих температур у зоні різання і, в результаті, до нестабільних умов обробки.

Оскільки операції мікрообробки здійснюються при високих швидкостях обертання, вібраційні явища суттєво впливають на знос інструменту, форму і розмір стружки, шорсткість обробленої поверхні та коливання сил різання. Основним способом мінімізації вібрацій при мікрофрезеруванні є вибір оптимальних умов обробки. Відомо, що оптимальні комбінації режимів різання можна визначити за допомогою діаграм пелюсток стабільності [3].

Биття інструменту є одним із найважливіших параметрів, що викликають вібрації інструменту. Воно визначається як розбіжність між віссю обертання інструменту та віссю обертання шпинделя верстата. У більшості випадків завжди існує певний ступінь неспіввідності, що призводить до вібрацій. Наслідком биття інструменту є підвищення інтенсивності коливання сил різання. Іншим явищем, яке виникає

внаслідок биття інструменту, є нерівномірний знос різальних кромки інструменту. Биття інструменту виникає через асиметричність геометрії інструменту, похибки встановлення, ексцентриситет підшипників шпинделя, дисбаланс мас тощо. Ступінь биття інструменту суттєво впливає на його стійкість та точність обробки. Вплив биття інструменту є більш вагомим при зменшенні діаметра інструменту. Разом з тим через технологічні обмеження, биття інструменту не може бути усунуте повністю. Тому мінімізація биття мікрофрез залишається однією з найважливіших проблем, з якою стикаються дослідники та виробники.

Для розробки точної механістичної моделі мікрокінцевої фрези необхідно вводити у розгляд биття інструменту, яке складається зі зміщення і нахилу осі (ексцентриситет і нахил). Автори [9] у модель радіального биття інструменту ввели чотири параметри: відстань зміщення  $\rho$ , кут напрямку зміщення  $\alpha$ , кут нахилу  $\tau$  та кут розташування кута нахилу  $\phi$  (рис. 9). На рисунку 9 наведена геометрична модель биття інструмента зі зміщенням та нахилом осі, де  $O'_s O_s$  – осьова лінія мікрофрези без врахування биття,  $O'_f O_f$  – осьова лінія мікрофрези зі зміщенням на величину биття, а  $O'_t O_t$  – осьова лінія мікрофрези з урахуванням зміщення і нахилу.

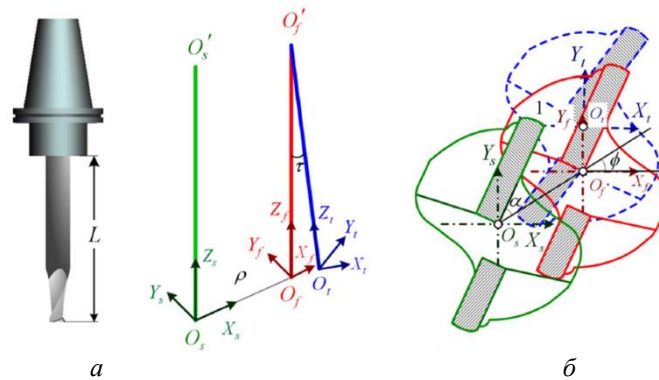


Рис. 9. Геометрична модель радіального биття мікрофрези зі зміщенням та нахилом осі в двох проєкціях [9]

У процесі кінцевого мікрофрезерування на положення інструменту впливає також деформація інструменту, викликана силами різання. Крім того, відведення інструменту достатньо впливає на якість та ефективність обробки. Схема відведення мікрокінцевої фрези від дії сили різання показана на рисунку 10 [9].

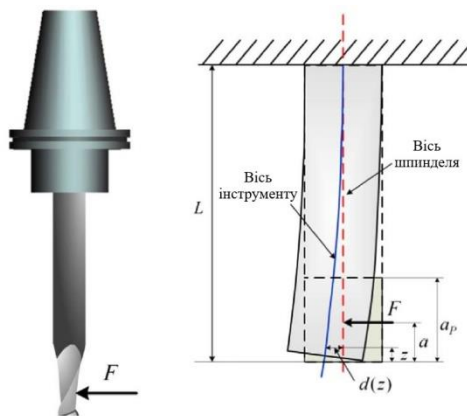


Рис. 10. Схема відведення мікрофрези від дії сили різання [9]

Биття, відведення інструменту і складна геометрія процесу мікрофрезерування призводять до зміни кутів входу і виходу фрези, які зокрема впливають на значення фактичної миттєвої товщини зрізаного шару  $i$ , відповідно, миттєвих значень сил різання.

**Масляно-охолоджувальні технологічні середовища при мікрофрезеруванні.** Зсув матеріалу заготовки та відносний рух між інструментом та стружкою генерують значну кількість тепла під час обробки. Ця теплова енергія може пластично деформувати оброблювану поверхню та змінювати її мікроструктуру, погіршувати якість обробки, а також викликати інтенсивне зношення різального

інструменту. Для ефективної мікрообробки варто застосовувати МОТС, як на масляній основі для змащування, так і на водній основі для охолодження, щоб видаляти стружку з оброблюваної поверхні [4]. Вдосконалені МОТС містять присадки та комплексні добавки, наприклад, лігнін, нанорозмірні алмазні частинки, графен тощо [16, 34, 35].

Недоцільність сухого мікрофрезерування доведена в [36], оскільки при цьому не відбувається зниження температури в зоні обробки, полегшення умов евакуації стружки та захисту інструменту від зношування.

При застосуванні охолодження поливом (flood cooling) велика кількість рідини покриває інструмент і заготовку, але це неефективно, оскільки в такому разі рідина не може проникнути через повітряний пограничний шар, що оточує мікрофрезу, яка обертається на дуже високих частотах [4]. Підвищення ж тиску охолоджувальної рідини може відхилити мікроінструмент і вплинути на якість обробки.

Охолодження з мінімальною кількістю мастила (MQL) за допомогою суміші масла та стисненого повітря є дуже ефективним для мікрообробки під час роботи під високим тиском (вище 4 бар). Краплі масла мікронного розміру можуть рухатися на високій швидкості, проникати крізь пограничний шар повітря, зчеплюватися із поверхнями заготовки та інструмента, поширюватися за рахунок поверхневого натягу для ефективного охолодження та змащування контактної зони [4]. Як показує практика, правильне застосування MQL підвищує ресурс інструменту, одночасно зменшуючи задирки.

Техніка криогенного охолодження, що полягає у швидкому заморожуванні заготовки при температурі рідкого азоту (-196 °C), підвищує крихкість матеріалу, зменшує необхідну енергію для механічної обробки та утворення задирок за рахунок зниження зносу інструменту [16]. Однак ця дороговартісна техніка вимагає належної ізоляції інструментів і пристосувань, а також є ефективною при обробці не всіх матеріалів. Так в [17] було досліджено вплив технологій MQL та попереднього криогенного охолодження заготовки на знос інструменту, шорсткість поверхні та утворення задирок під час мікрофрезерування Inconel 718. Авторами було встановлено, що криогенне охолодження призводить до надмірної крихкості заготовки, що збільшує твердість її поверхні і негативно впливає на стійкість інструменту.

Для сталого виробництва важливо зменшити використання МОТС, щоб зменшити забруднення навколишнього середовища, що пов'язане з їх утилізацією. Використання інструментів з покриттям підтримує суху обробку або обробку з мінімальною кількістю мастила, таким чином сприяючи більш екологічно стійкій промисловості.

**Основні рекомендації під час мікрофрезерування металів та сплавів.** На основі виконаного огляду літератури можна сформулювати зазначені далі рекомендації для ефективного мікрофрезерування конструкційних матеріалів.

Для отримання високої якості обробки верстат має реалізовувати високу швидкість обертання шпинделя (як правило, 20000–120000 об/хв), мати мінімальне контрольоване биття шпинделя, високу міцність, бути вібростійким та нечутливим до теплових деформацій. Верстати для мікрофрезерування повинні мати високу роздільну здатність механізмів позиціонування інструменту та подачі. Для ефективної обробки биття шпинделя верстата і точність позиціонування інструменту мають бути в межах до 1/100 діаметра мікроінструменту або менше. Перевищення цих допусків може призвести до циклічного згинання інструменту та його поломки.

Вибір відповідного різального інструменту для мікрофрезерування є принциповим питанням. Мікрофрези повинні мати високу жорсткість, мінімальний радіус округлення різальної кромки, раціональні геометричні параметри для обробки конкретного матеріалу, високу геометричну точність поверхонь, достатній об'єм стружкових канавок для виведення стружки, конструкція фрез має дозволяти здійснення автоматичної заміни інструменту тощо.

Для забезпечення необхідної ефективності обробки необхідно оцінювати сумісність інструментального матеріалу, зносостійкого покриття і геометрії фрези оброблюваного матеріалу. Варто ретельно контролювати знос інструменту, оскільки навіть найменший знос інструменту може вплинути на точність кінцевого продукту. Як було показано вище, геометричні параметри та конструкція мікрофрез впливають на параметри зрізаного шару та характеристики процесу різання, тому для мікрофрезерування необхідно використовувати інструменти із максимально гострими різальними кромками та високою геометричною точністю поверхонь.

Мікрофрезерні інструменти зазвичай виготовляються зі зносостійких і твердих матеріалів, таких як карбід вольфраму і полікристалічний алмаз. Найбільше застосування на сьогодні знайшли твердосплавні мікрофрези. РСД-мікрофрези застосовують переважно для обробки алюмінієвих та магнієвих сплавів, армованих пластикових композитів, твердих сплавів, кераміки, скла, графітів тощо.

В останні роки спостерігається помітне збільшення використання наноструктурованих покриттів, які не тільки збільшують ресурс інструменту, але також зменшують тертя та підвищують теплостійкість інструменту. Проте розмір мікрофрез ускладнює технологію нанесення покриттів. Найбільш популярні види моно-, багатшарових та градієнтних зносостійких покриттів для мікрофрез наведено в таблиці 2. Вимоги до покриттів для мікрообробних інструментів: висока твердість, висока в'язкість, висока

стійкість до всіх видів зношування, висока щільність та однорідність, гладкість поверхні, тонка мікроструктура, знижений коефіцієнт тертя із оброблюваним матеріалом та ін.

Важливим чинником ефективності мікрофрезерування є раціональний вибір режимів різання. Як було описано вище, товщина зрізаного шару, яка залежить від величини подачі, визначає інтенсивність явища пластичного деформування оброблюваного матеріалу. Низька подача та/або відносно великий вигин інструменту можуть призвести до того, що стружка в деяких випадках не утворюється взагалі, а матеріал заготовки деформується переважно пружно. Крім ефекту мінімальної товщини зрізу, важливою особливістю процесу мікрофрезерування є також масштабний ефект. Він виявляється у нелінійному зростанні питомої сили різання під час зменшення подачі на зуб, коли вона стає меншою за радіус округлення різальної кромки інструмента. Це і визначає важливість дотримання рекомендацій щодо призначення режимів різання при мікрофрезеруванні, які наведені в таблицях 3 і 5.

Задирки, що утворюються в процесі мікрофрезерування, є проблемою, яку необхідно ефективно вирішувати. Розміри задирок порівняні із розмірами елементів мікрофрезерування, що ускладнює їх видалення. Застосування конічних мікрофрез і схеми попутного фрезерування дозволяє суттєво зменшувати розмір задирок.

Нестабільність процесу мікрофрезерування (биття, відхилення інструменту, вібрації тощо) спричиняє похибки обробки, які викликають зростання та коливання сил різання, надмірне зношування інструменту, зростання температури різання тощо. Тому при мікрообробці необхідно забезпечувати мінімальний виліт фрези із цанги та максимальну жорсткість оброблюваної заготовки.

З метою запобігання виникненню вібрацій, спричинених великим вильотом фрези, рекомендовано за можливості обирати фрези з більшим діаметром та кутовим радіусом (рис. 3, *в*), збільшувати подачу на зуб та зменшувати ширину різання, використовувати фрези з меншою кількістю різальних кромок та схему зустрічного фрезерування на чистових проходах ( $b < 0,05 \cdot d$ ,  $d$  – діаметр фрези).

З метою запобігання виникненню вібрацій, спричинених нежорстким закріпленням заготовки, рекомендовано знижувати зусилля різання за рахунок зменшення глибини різання ( $t \leq 0,05 \cdot d$ ), за можливості використовувати фрези більшого діаметра, з кутовим радіусом, без покриття або із покриттями типу DLC та ZrN для зменшення тертя, уникати обробки нежорстких елементів, у деяких випадках зустрічне фрезерування може мати позитивний ефект.

За недостатньої потужності верстата (низьких обертів шпинделя) рекомендовано використовувати фрези меншого діаметра з меншою кількістю різальних кромок, без покриття або з покриттями типу DLC і ZrN для зменшення тертя, багатопрхідні стратегії обробки, зменшувати глибину різання ( $t \leq 0,05 \cdot d$ ).

Під час мікрофрезерування конструкційних сплавів зазвичай найбільшу ефективність під час роботи під високим тиском показує мастильно-охолоджувальна технологія MQL, яка передбачає використання суміші масла та стисненого повітря. Мікронні краплі масла, рухаючись із високою швидкістю, проникають через пограничний шар повітря, зчеплюються із поверхнями заготовки та інструмента, за рахунок поверхневого натягу поширюються і таким чином інтенсивно охолоджують та змашують зону різання. Як показує практика, правильне застосування MQL підвищує ресурс інструменту, одночасно покращуючи якість обробленої поверхні.

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** Технології мікрофрезерування набувають все більшого застосування у різних галузях промисловості, тому спостерігається великий інтерес до підвищення ефективності процесів мікрорізання.

На основі проведеного аналізу наукових досліджень можна виокремити такі особливості процесу мікрофрезерування конструкційних матеріалів:

- ефект мінімальної товщини зрізаного шару визначає особливості стружкоутворення під час мікрофрезерування;
- масштабний ефект описує нелінійне зростання питомої сили різання при зменшенні масштабного коефіцієнта (співвідношення товщини зрізу до радіуса округлення різальної кромки інструменту);
- проблема утворення задирок, розмір яких зіставний із розмірами оброблюваних мікрофрезами конструктивних елементів;
- мікророзміри різального інструменту, що визначає складність його виготовлення і високу вартість;
- високі частоти обертання мікрофрез, мінімальні значення подачі та глибини різання;
- чутливість мікрофрез до биття та відведення у процесі обробки;
- нестабільність процесу мікрофрезерування внаслідок чутливості до вібрацій;
- високі вимоги до точності технологічного обладнання та оснастки.

Характеристики процесу мікрофрезерування залежать від великої кількості факторів, які спричиняють комплексну дію. Серед таких факторів можна вирізнити режими різання, геометричні параметри інструменту, властивості інструментального матеріалу, матеріалу покриття та оброблюваного матеріалу, параметри зрізаного шару, стратегії обробки, МОТС, технічні характеристики та

геометричну точність технологічного обладнання та оснастки тощо. Дослідження впливу цих факторів на ефективність процесу мікрофрезерування є важливою науково-технічною задачею, яка потребує розв'язання. Незважаючи на велику кількість досліджень такого типу за останні 15 років, цей науковий напрям все ще потребує подальшого розвитку.

#### References:

1. *Mikroobrobka*, [Online], available at: [http://old.kafvp.kpi.ua/media/metodi/dop\\_materiali\\_nanotech\\_med\\_pb\\_3.pdf](http://old.kafvp.kpi.ua/media/metodi/dop_materiali_nanotech_med_pb_3.pdf)
2. Balázs, B.Z., Geier, N., Takács, M. et al. (2020), «A review on micro-milling: recent advances and future trends», *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 112, pp. 655–684, doi: 10.1007/s00170-020-06445-w.
3. Venkatesh, V. et al. (2016), «Review on the machining characteristics and research prospects of conventional microscale machining operations», *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 32, No. 3, pp. 235–262, doi: 10.1080/10426914.2016.1151045.
4. Wayne, N.P. Hung and Corliss, M. (2019), «Micromachining of Advanced Materials», *Micromachining*, doi: 10.5772/intechopen.89432.
5. Thepsonthi, T. (2014), «Modeling and optimization of micro-end milling process for micro-manufacturing», Ph.D. Thesis of dissertation, Rutgers University-New Brunswick, USA.
6. O'Toole, L. et al. (2020), «Precision micro-milling process: state of the art», *Advances in Manufacturing*, Vol. 9, pp. 173–205, doi: 10.1007/s40436-020-00323-0.
7. Balázs, B.Z. and Takács, M. (2020), «Experimental investigation and optimisation of the micro milling process of hardened hot-work tool steel», *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 106, No. 11–12, pp. 5289–5305, doi: 10.1007/s00170-020-04991-x.
8. Chen, N. et al. (2020), «Design, optimization and manufacturing of polycrystalline diamond micro-end-mill for micro-milling of GH4169», *Diamond and Related Materials*, Vol. 108, p. 107915, doi: 10.1016/j.diamond.2020.107915.
9. Zhang, X. et al. (2016), «Cutting forces in micro-end-milling processes», *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 107, pp. 21–40, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2016.04.012.
10. Aramcharoen, A. and Mativenga, P.T. (2009), «Size effect and tool geometry in micromilling of tool steel», *Precision Engineering*, Vol. 33, No. 4, pp. 402–407, doi: 10.1016/j.precisioneng.2008.11.002.
11. Vipindas, K. et al. (2018), «Effect of cutting edge radius on micro end milling: force analysis, surface roughness, and chip formation», *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 97, No. 1–4, pp. 711–722, doi: 10.1007/s00170-018-1877-1.
12. Dib M.H.M. et al. (2018), «Minimum chip thickness determination by means of cutting force signal in micro endmilling», *Precision Engineering*, Vol. 51, pp. 244–262, doi: 10.1016/j.precisioneng.2017.08.016.
13. Liang, Y.C. et al. (2009), «Modeling and experimental analysis of microburr formation considering tool edge radius and tool-tip breakage in microend milling», *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, Vol. 27, No. 3, pp. 1531–1535, doi: 10.1116/1.3046147.
14. Aramcharoen, A. et al. (2008), «Evaluation and selection of hard coatings for micro milling of hardened tool steel», *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 48, No. 14, pp. 1578–1584, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2008.05.011.
15. Uzun, İ. et al. (2013), «An experimental investigation of the effect of coating material on tool wear in micro milling of Inconel 718 super alloy», *Wear*, Vol. 300, No. 1–2, pp. 8–19, doi: 10.1016/j.wear.2013.01.103.
16. Danish, M. et al. (2022), «An Experimental Investigations on Effects of Cooling/Lubrication Conditions In Micro Milling Of Additively Manufactured Inconel 718», *Tribology International*, pp. 107620, doi: 10.1016/j.triboint.2022.107620.
17. Uzun, İ. et al. (2014), «The effect of minimum quantity lubrication and cryogenic pre-cooling on cutting performance in the micro milling of Inconel 718», *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B, Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 229, No. 12, pp. 2134–2143, doi: 10.1177/0954405414546144.
18. Chae, J. et al. (2006), «Investigation of micro-cutting operations», *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 46, No. 3–4, pp. 313–332, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2005.05.015.
19. *KERN Micro- und Feinwerktechnik*, [Online], available at: [www.kern-microtechnik.com](http://www.kern-microtechnik.com)
20. *NANOWAVE MTS5R*, [Online], available at: <http://www.nanowave.co.jp/product/mts5r.html>
21. Ma, L. et al. (2020), «Experimental Investigation of Cutting Vibration during Micro-End-Milling of the Straight Groove», *Micromachines*, Vol. 11, No. 5, pp. 494, doi: 10.3390/mi11050494.
22. Mokhtari, A. et al. (2019), «Size dependent vibration analysis of micro-milling operations with process damping and structural nonlinearities», *European Journal of Mechanics - A/Solids*, Vol. 76, pp. 57–69, doi: 10.1016/j.euromechsol.2019.03.009.
23. Jing, X. et al. (2020), «Modelling and experimental analysis of the effects of run out, minimum chip thickness and elastic recovery on the cutting force in micro-end-milling», *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 176, pp. 105540, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2020.105540.
24. Saptaji, K. and Subbiah, S. (2017), «Burr Reduction of Micro-milled Microfluidic Channels Mould Using a Tapered Tool», *Procedia Engineering*, Vol. 184, pp. 137–144, doi: 10.1016/j.proeng.2017.04.078.
25. Yang, M. et al. (2019), «Study on the surface damage mechanism of monocrystalline silicon in micro ball-end milling», *Precision Engineering*, Vol. 56, pp. 223–234, doi: 10.1016/j.precisioneng.2018.12.003.
26. *TOPINCITY*, [Online], available at: <http://www.topincity.com.ua>

27. Zhan, Z. et al. (2014), «An experimental study on grinding parameters for manufacturing PCD micro-milling tool», *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 73, No. 9–12, pp. 1799–1806, doi: 10.1007/s00170-014-5969-2.
28. *MSK Tools*, [Online], available at: <https://www.mskpcdtools.com/PCD-Tools-Half-Ball-Cutter-pd40806101.html>
29. Biermann, D. et al. (2013), «Investigation of Different Hard Coatings for Micromilling of Austenitic Stainless Steel», *Procedia CIRP*, Vol. 7, pp. 246–251, doi: 10.1016/j.procir.2013.05.042.
30. Wojciechowski, S. et al. (2019), «Prediction of cutting forces during micro end milling considering chip thickness accumulation», *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 147, pp. 103466, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2019.103466.
31. Sahoo, P. et al. (2020), «Determination of minimum uncut chip thickness and size effects in micro-milling of P-20 die steel using surface quality and process signal parameters», *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 106, No. 11–12, pp. 4675–4691, doi: 10.1007/s00170-020-04926-6.
32. Gao, S. et al. (2016), «Research on specific cutting energy and parameter optimization in micro-milling of heat-resistant stainless steel», *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 89, No. 1–4, pp. 191–205, doi: 10.1007/s00170-016-9062-x.
33. Weule, H., Hüntrup, V. and Tritschler, H. (2001), «Micro-Cutting of Steel to Meet New Requirements in Miniaturization», *CIRP Annals*, Vol. 50, No. 1, pp. 61–64, doi: 10.1016/s0007-8506(07)62071-x .
34. Mittal, R.K. et al. (2017), «Effect of lubrication on machining response and dynamic instability in high-speed micromilling of Ti-6Al-4V», *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 28, pp. 413–421, doi: 10.1016/j.jmapro.2017.04.007.
35. Saha, S. et al. (2020), «An analytical approach to assess the variation of lubricant supply to the cutting tool during MQL assisted high speed micromilling», *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 285, pp. 116783, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2020.116783.
36. Yang, X. et al. (2020), «Machinability investigation and sustainability analysis of minimum quantity lubrication-assisted micro-milling process», *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B, Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 234, No. 11, pp. 1388–1401, doi: 10.1177/0954405420921727.

**Томашевський Олег Олегович** – аспірант Державного університету «Житомирська політехніка».  
<https://orcid.org/0000-0003-2639-1866>.

Наукові інтереси:

- дослідження процесів мікрорізання конструкційних матеріалів;
- проектування різальних інструментів.

**Балицька Наталя Олександрівна** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри механічної інженерії Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0003-1363-8110>.

Наукові інтереси:

- дослідження процесів механічної обробки важкооброблюваних матеріалів;
- забезпечення експлуатаційних характеристик виробів формуванням періодичної текстурної поверхонь;
- проектування різальних інструментів.

**Tomashevskiy O.O., Balytska N.O.**

#### **The process of metal and alloy micro-milling: an analytical review**

The demand for miniature, high-precision products is growing rapidly in many industries, which is driving the need for efficient manufacturing technologies. Micromilling is the most universal process for micromachining of metals and alloys. Therefore, the study of micromilling processes to increase the efficiency of machining miniature structural elements of products is an important issue for the current level of manufacturing technologies. The article presents an analytical review of modern scientific research on the process of micromilling of metals and alloys. The basic requirements for micromilling machines, their types and technical parameters are described. Typical micromilling designs, tool materials for their manufacture, and types of wear-resistant coatings used are discussed. The article provides manufacturers' recommendations on the purpose of micromilling conditions for various materials. The article explains the relationship between the effect of the minimum thickness of undeformed chips and the value of the kinematic rake angle and the scale effect with variations in cutting forces. The article discusses the peculiarities of chip formation during micromilling, namely the mechanism of chip removal at different thicknesses of the undeformed chips. The article highlights possible technical difficulties encountered during the cutting process and summarises recommendations for their solution and efficient micromilling of metals and alloys.

**Keywords:** microcutting; cutting modes; scale effect; mechanism of chip formation.

Стаття надійшла до редакції 20.09.2023.