

© О.Л. Войчишен¹

¹Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ВИСОКОШВИДКІСНОЇ ОБРОБКИ ФРЕЗЕРУВАННЯМ НА ВЕРСТАТАХ З ПРОГРАМНИМ КЕРУВАННЯМ

О. Voichyshen¹ <https://orcid.org/0009-0004-2654-7335>

¹Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

RESEARCH OF HIGH-SPEED MILLING MACHINING ON PROGRAM-CONTROLLED MACHINES

Мета. Вирішення науково-технічної задачі, пов'язаної з високошвидкісним фрезеруванням деталі з обраного матеріалу шляхом оптимізації та управління її оброблюваністю інструментом з твердих сплавів на сучасних верстатах з програмним керуванням.

Методика. Методологія ґрунтується на використанні чисельного та графо-аналітичному методах дослідження з метою встановлення системного зв'язку параметрів лезвийної обробки з властивостями оброблюваного матеріалу, геометрією інструменту і відповідною інтеграцією до спеціалізованих інженерних програм.

Результати. Одержані чисельні результати досліджень для науково-обґрунтованого підходу у розв'язанні науково-технічної задачі продуктивної фрезерної обробки деталі з обраного матеріалу на верстаті, що містить сукупність скорегованих алгоритмів для прогнозування оброблюваності із забезпеченням надійності різального інструменту. Отримані результати порівнювалися з відомими роботами, пов'язаними з дослідженнями процесів механічного оброблення різних матеріалів, оцінкою надійності ріжучих інструментів, точності та шорсткості обробленої поверхні.

Наукова новизна. Встановлення повного і системного зв'язку параметрів оброблення з властивостями оброблюваного матеріалу, геометрією інструменту і конструкторсько-технологічних чинників деталі на розрахунок оптимізованої технології автоматизованого виробництва. У математико-статистичному опрацюванні експериментальних даних, що дало змогу вперше одержати комплексні залежності в зручному для розрахунку й аналізу вигляді, які дають наочне уявлення про вплив кожного параметра процесу фрезерування.

Практична значимість. Полягає у виборі й обґрунтуванні оптимальних геометричних параметрах різальних інструментів, установленні характеру впливу умов лезової обробки легированих сталей на основні показники процесу – час механічної обробки та режимні показники, в залежності від твердості матеріалу деталі і інструментального матеріалу. Надані практичні рекомендації щодо оптимального використання отриманих даних в САМ системах.

Ключові слова: високошвидкісне фрезерування, верстати, ЧПК, частота обертання, заготовка, ріжуча кромка, оптимізація режимів різання.

Вступ. Відомо, що фрезерування – один з важливих процесів при механічній обробці металів. Зазвичай час, витрачений на фрезерування, займає до 35% від загального часу обробки деталей, а в деяких випадках досягає і 100%. Це говорить про важливість цього виду обробки в технології отримання виробів.

Високошвидкісна обробка (High Speed Machining або ВШО) – одна з сучасних технологій, яка, в порівнянні зі звичайним різанням, дозволяє збільшити ефективність, точність і якість механічної обробки. Її відмінна риса – висока швидкість різання, при якій значно збільшується температура в зоні утворення стружки, матеріал оброблюваної деталі стає м'якше, а сили різання зменшуються, що дозволяє інструменту рухатися з великою робочою подачею [1–4]. У сучасному виробництві на процес різання покладено завдання підвищення продуктивності із забезпеченням необхідної точності розмірів деталі і заданих параметрів якості поверхневого шару [5–8]. Існує два типи управління цією якістю: регулюванням режимів різання в процесі механічної обробки і забезпеченням необхідних параметрів наступним впливом на деталь. Перший тип найбільш ефективний, оскільки дозволяє в багатьох випадках позбутися від фінішних операцій. Для отримання деталей з заданими властивостями поверхневого шару створюються різні моделі. Наприклад, в роботі [9–10] описуються адаптивні саме ті, яких навчають технологічні системи (АТС) управління технологічним обладнанням на базі верстатів з ЧПК.

Основна частина. Теоретичним обґрунтуванням високошвидкісної обробки є так звані криві Соломона, які показують зниження сил різання в деякому діапазоні швидкостей (рис. 1).

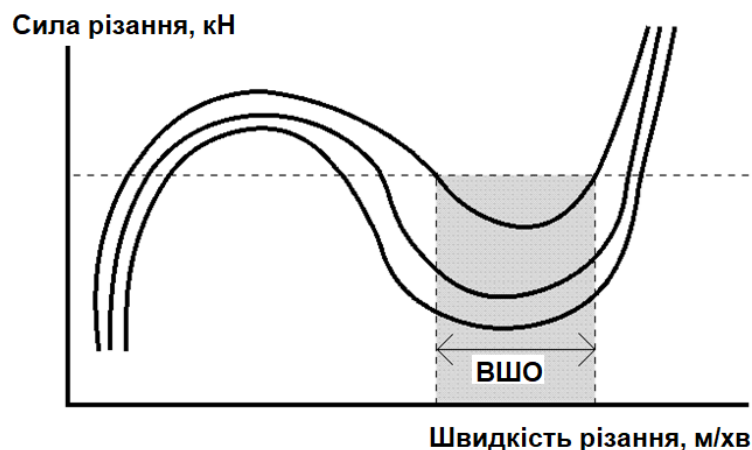


Рис. 1. Криві Соломона, залежність сил різання від швидкості різання

Верстати для ВШО повинні дозволяти проводити обробку на високих частотах обертання (до 40000 *об/хв*), великих робочих подач (до 20 *м/хв*) на досить маленьких глибинах і ширині різання, що призводить до збільшення обсягу видається металу в кілька разів у порівнянні з звичайною обробкою (рис. 2).

При проведенні ВШО, під час формування стружки, 80% тепла утворюється в зоні механічної деформації матеріалу, 18% – в зоні контакту стружка-інструмент, і 2% – в зоні тертя ріжучої кромки-матеріал.

Дослідження, проведені під час ВШО обробки з правильно підібраними параметрами, показали, що 75% виробленого тепла відводиться зі стружкою, 20% – через інструмент, і 5% – через оброблювану деталь. Температура стружки в зоні різання може досягати 600°C [5–6].

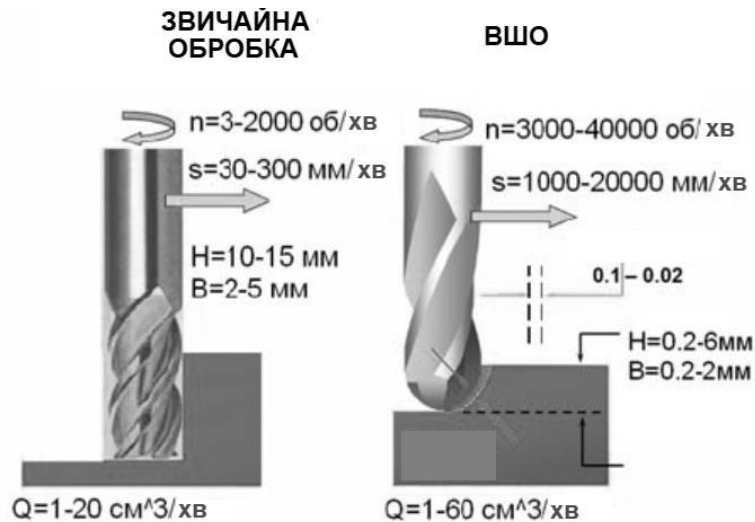


Рис. 2. Режимні параметри ВШО в порівнянні зі звичайною обробкою

Є навіть така рекомендація, що глибина різання не повинна перевищувати 10% діаметра фрези. Маючи можливість вести лезову обробку загартованих сталей можна забезпечити якість поверхні порівнянне з електроерозійної обробкою. Головний ефект ВШО не зменшення машинного часу за рахунок інтенсифікації режимів різання, а підвищення якості обробки і ефективного використання сучасних верстатів з ЧПК.

Дослідження в області високошвидкісного різання показали ряд його переваг у порівнянні з традиційною обробкою. Дослідженнями Соломона в 1931 році було доведено, що залежність температури від швидкості різання практично для всіх матеріалів має екстремальний характер (рис. 3) [7].

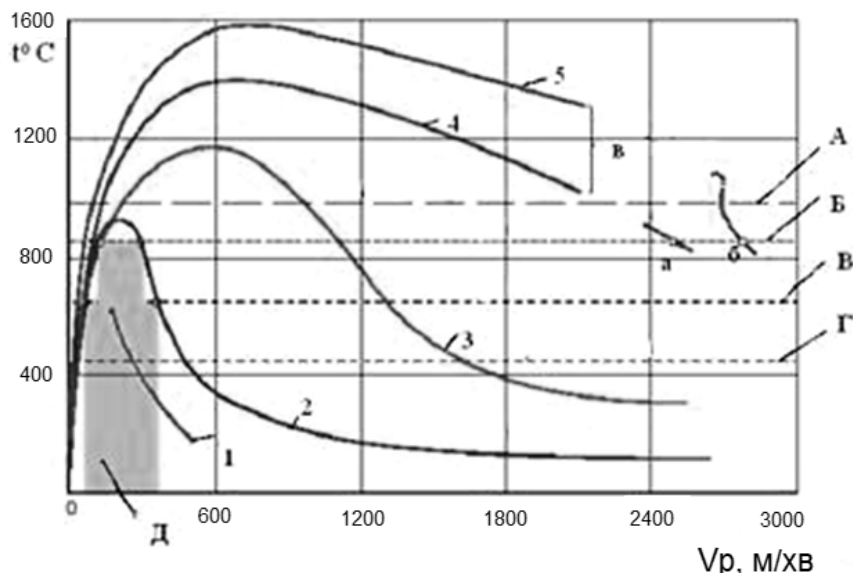


Рис. 3. Залежність температури від швидкості різання:
 1 – алюміній; 2 – кольорові метали; 3 – бронза; 4 – ливарні чавуни; 5 – сталі.
 Інструмент: А – карбід вольфраму: 980 °С; Б – вольфрамо-кобальтові сплави: 850 °С;
 В – вольфрамові сталі: 650 °С; Г – вуглецева сталь: 450 °С;
 Д – не рекомендується обробка; а – 39000 м/хв; б – вище 45000 м/хв;
 в – сплави залізо-вуглець

У порівнянні з традиційною обробкою високошвидкісне фрезерування забезпечує [8]:

- зниження сил різання на 30% і більше, що зменшує деформацію оброблюваної деталі і дозволяє обробляти тонкостінні деталі до точності, форми яких пред'являються високі вимоги;
- зменшення температури оброблюваної деталі;
- отримання шорсткості оброблюваної поверхні за якістю аналогічної абразивної обробки;
- збереження точності обробки протягом тривалого часу в результаті зниження напруги в верстаті і інструменті за рахунок зменшення сил різання;
- збільшення подачі в 5–10 разів;
- зростання продуктивності знімання металу в 3–5 разів;
- зменшення вібрацій інструменту та деталі;
- зниження вартості інструмента;
- зниження часу обробки на 40–70% і вартості на 20–50%.

Порівняння параметрів традиційного і високошвидкісного фрезерування пальцевою фрезою зі сферичною формою різальних крайок (таблиця 1) показує незаперечну перевагу останнього.

Таблиця 1

Порівняння параметрів фрезерування

Параметрів фрезерування	Традиційна обробка	Високошвидкісне фрезерування
Частота обертання, $n \text{ хв}^{-1}$	2000	15–40000
Подача, $f \text{ м/хв}$	0,2–0,8	1,5–5
Глибина різання, $t \text{ мм}$	1-5	0,02-0,5
Твердість HRC	< 36	< 62
Сила різання	висока	низька
Тепловиділення	високе	низьке

У вимогах до верстатів для високошвидкісної обробки з'явилися пункти, пов'язані з швидкодією механічних систем і систем керування (виділено курсивом): частота обертання шпинделя до 40000 об/хв, потужність головного приводу більше 22 кВт, швидкість програмованих подач – від 40 до 60 м/хв, швидкість швидких ходів – до 90 м / хв, дискретність – від 5 до 20 мкм; осьовий прискорення / уповільнення > 1g, швидкодія ЧПК – від 1 до 20 мс швидкість обміну даних -250 Кбіт/с (1мс), висока жорсткість і термостійкість шпинделя, великий попередній натяг і гарне охолодження підшипників шпинделя, обдув шпинделя повітрям або рідинне охолодження, жорстка рама верстата зі здатністю поглинати вібрації, компенсація різних похибок – температурних, ходового гвинта, – можливість установки досконаліших і перспективних систем ЧПК.

В механообробці існують деякі основні визначення та формули для обчислення робочої подачі і швидкості обертання шпинделя. Крім того, фірми-виробники ріжучого інструменту для HSM в своїх каталогах обов'язково вказують рекомендовані режими різання.

На сьогодні параметри різання для HSM варіюються в залежності від оброблюваного матеріалу і виду обробки досить широко. Невеликі глибини різання характерні тільки для важкооброблюваних матеріалів. За даними опитування шести провідних німецьких експертів в області різання та фахівців авіаційної промисловості щодо порівняння високошвидкісної (HSM) і високопродуктивної (HPM - High Performance Machining) обробки, HPM (обробка з великими глибинами різання) має істотно більший потенціал для економії часу обробки. Дослідження наведені у таблицях 2–4.

Таблиця 2

Швидкість різання різних матеріалів за стандартом ISO

Матеріал (відповідно до класифікації)	Швидкість різання (м/хв)			
	Твердість	Звичайна обробка	HSM – чорнова	HSM – фінішна
Сталь 01.2	150 HB	<300	>400	<900
Сталь 02.1/2	330 HB	<200	>250	<600
Сталь 03.11	300 HB	<100	>200	<400
Сталь 03.11	39÷48 HRC	<80	>150	<350
Сталь 04	48÷58 HRC	<40	>100	<250
GCI 08.1	180 HB	<300	>500	<3000
Алюміній	60÷75 HB	<1000	>2000	<5000
Кольорові сплави	100 HB	<300	>1000	<2000

Таблиця 3

Типові параметри різання загартованої сталі

Вид обробки	Швидкість різання v_c (м/хв)	Глибина різання a_p (%)*	Ширина різання a_e (%)*	Подача на зуб f_z (мм/зуб)
Чорнова	50÷100	30÷150	10÷40	0.01÷0.1
Получистова	150÷200	5÷20	5÷30	0.015÷0.15
Фінішна і суперфінішна	200÷250	1÷3	1÷2	0.01÷0.2

*У відсотках від діаметра фрези.
Для обробки загартованої сталі (54÷58 HRC) були використані монолітні твердосплавні кінцеві фрези з покриттям *TiAlN*.

Швидкість різання при обробці різних матеріалів

Матеріал	Швидкість різання (м/хв)	Охолодження
Алюміній	1000÷5000	ЗОР або масляний туман
Латунь	1000÷2500	ЗОР або масляний туман
Мідь	600÷1500	ЗОР або масляний туман
Титановий сплав	50÷150	ЗОР або масляний туман
Графіт	1000÷4000	Стисле повітря
Вуглецеві волокна	250÷500	Стисле повітря
Пластмаси	300÷1000	Стисле повітря
Сталі	300÷700	ЗОР або масляний туман
Чавун	500÷750	ЗОР або масляний туман
Жароміцна сталь (інконель)	75÷100	ЗОР або масляний туман
При використанні монолітних твердосплавних кінцевих фрез подовженої серії (2L) значення повинні бути зменшені на 30÷50%. При обробці графіту, доволі розповсюдженого матеріалу для електроерозійної обробки, найбільш ефективні фрези з алмазним напиленням.		

Керуючі програми для поверхонь вільної форми створюються, як правило, в САМ-системі і складаються з простих прямолінійних відрізків. Системи управління HEIDENHAIN автоматично згладжують переходи між відрізками, завдяки чому інструмент безперервно переміщається по поверхні заготовки. Автоматичним згладжуванням управляє внутрішня функція контролю похибок контуру. Ця функція (Цикл 32) дає оператору можливість довільно встановлювати допустимі похибки контуру. Встановленим є значення, яке виробник верстата закладає в машинних параметрах системи ЧПУ (типове значення від 0,01 до 0,02 мм). Додатково допуск діє також при переміщеннях по запрограмованим дуг окружності [9].

Показаний на рисунку 6 кут заготовки вимагає кругової траєкторії центру кульової фрези (TCP = Tool Center Point - точка центру інструменту). Без згладжування заданих характеристик траєкторії вісь Y верстата повинна була б різко прискоритися в перехідній крапці. До того ж звичайні приводи не можуть генерувати нескінченний ривок, що обумовлено межами їх фізичних властивостей. Тому без додаткових заходів управління траєкторією переміщення неминуче виникають похибки траєкторії, які, в залежності від змін кривизни траєкторії і швидкості руху по траєкторії, можуть досягати значних величин.

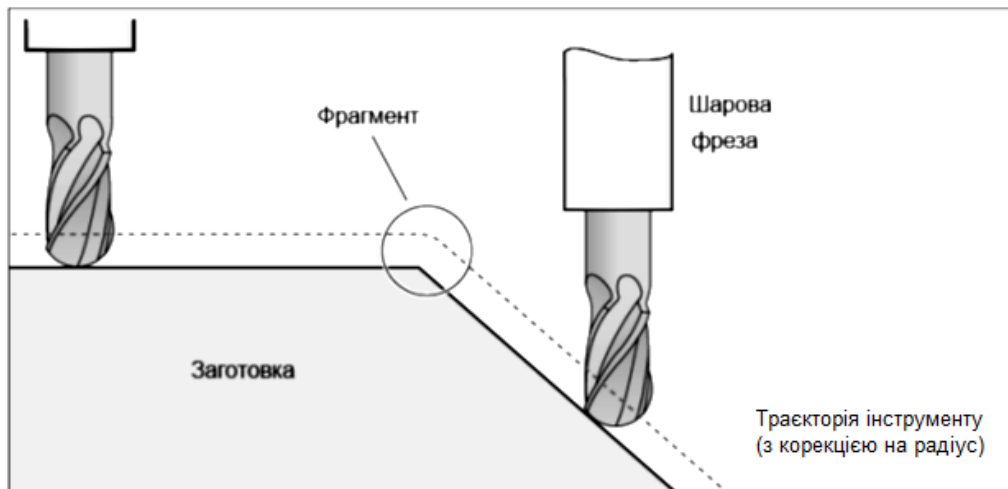


Рис.6. Траєкторія ТСР (точка центру інструменту) кульової фрези

На рисунку 7 показана збільшена похибка переміщення інструменту в порівнянні з запрограмованим контуром. Похибки відносяться до ідеального переходу пряма-окружність, в той час як керуюча програма складається з лінійних відрізків з хордовою похибкою 3 мкм щодо моделі. Хордова похибка діє тільки в зонах вигинів і перекриває заданий в системі ЧПУ допуск контуру. Системи управління HEIDENHAIN досягають дуже високої повторюваності рухів рядкового фрезерування з реверсом напрямки (рис. 8). Похибки контуру між прямими і зворотними траєкторіями практично відсутні, завдяки чому можна добитися дуже високої якості обробленої поверхні.

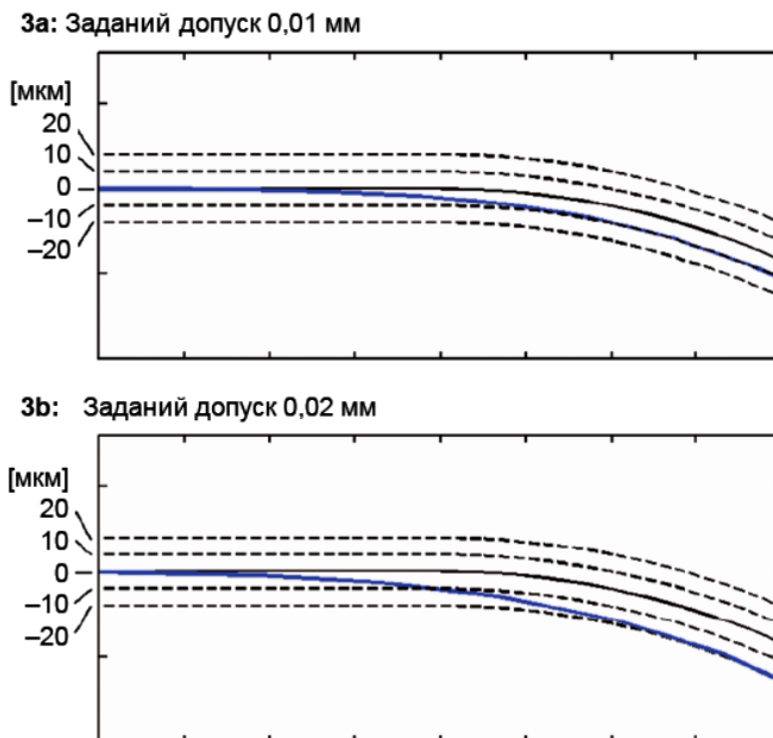


Рис.7. Збільшене зображення заданої траєкторії ТСР по контрольованому контуру

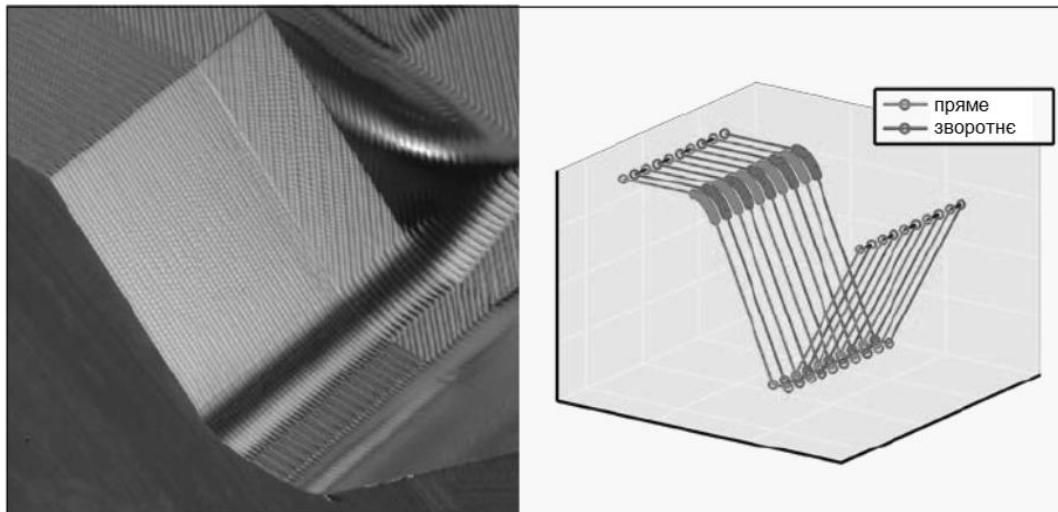


Рис. 8. Контур заготовки і відповідні лінійні відрізки з прямим і реверсивним переміщенням

На фото заготовки на рисунку 9 показані відмінності, що досягаються за допомогою оптимізованого управління траєкторією переміщення. Показання поверхні вільної форми отримані шляхом сатиричного фрезерування з реверсом переміщень (запрограмована подача 10 м / хв, припуск на чистову обробку 0,1 мм). Якість поверхні показаної на рис. 9 (6a) заготовки неприйнятно. У показаному на рис. 9 (6b) результаті обробки за допомогою iTNC 530 чітко видна висока повторюваність сусідніх траєкторій.

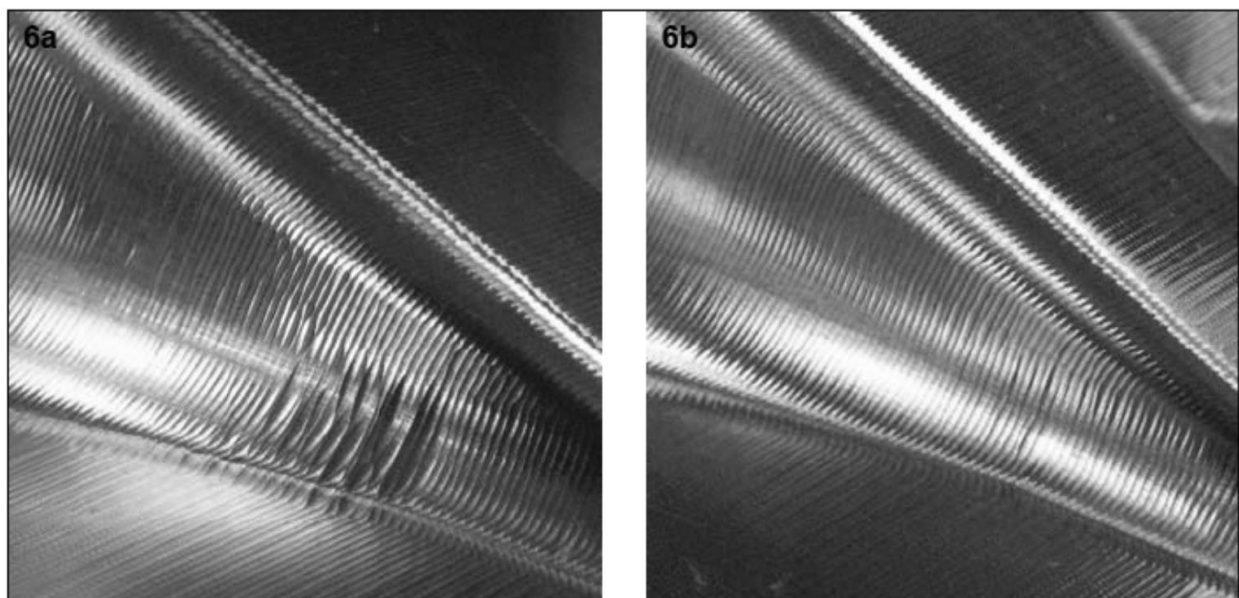


Рис. 9. Процес рядкового фрезерування з реверсом: повторюваність сусідніх траєкторій фрезерування 6a: Відмінності між сусідніми траєкторіями призводять до поганої якості обробленої Поверхні 6b: Результат фрезерування за допомогою iTNC 530: рівномірна поверхня при прямих і реверсивних переміщеннях

Щоб домогтися максимальної продуктивності і в той же час отримати задані значення параметрів якості поверхневого шару деталі, необхідно шукати компромісне рішення щодо призначення режимів різання.

Під оптимальним режимом високошвидкісного торцевого фрезерування розуміють режим, при якому досягаються необхідні шорсткість, глибина і ступінь зміцнення, величина і глибина залишкових напруг, структурно-фазовий склад поверхневого шару, а поряд з цим задана стійкість різального інструмента і максимальна продуктивність. Для реалізації даного підходу на процес ВСФ накладаються технічні обмеження у вигляді лінійних функцій виду:

$$a_1 X_1 + a_2 X_2 + \dots + a_n X_n + b = 0. \quad (1)$$

До даного виду функцій шляхом логарифмування можна привести статичні формули, якими виражаються зазвичай режими різання.

Основою для завдання характеристик режимів ВСФ є сукупність (система) процесів і параметрів якості поверхневого шару деталі.

Уявімо приклад оптимізації високошвидкісного чистового фрезерування загартованої сталі 9XC (55 HRC) торцевої фрезою оригінальної конструкції ($\varnothing 250$ мм, матеріал ріжучої частини T15K6), глибина різання 0,1 мм, ширина різу $B = 30$ мм. До числа технологічних обмежень відносяться:

Обмеження 1 – по залишковим напруженням σ , МПа.

У поверхневому шарі обробленої деталі повинно бути поле залишкових напружень, що не сприяє утворенню мікротріщин і викривлення деталі, що призводять після релаксації до виходу її розмірів за межі поля допуску. Експериментальним шляхом встановлено, що викривлення деталі не відбувається при величині залишкових напругах в поверхневому шарі $-200 \leq \sigma \leq -100$ МПа.

Звідси обмеження має вигляд:

$$-200 \leq \sigma(V, S, t) \leq -100, \quad (2)$$

де: V – швидкість різання, м / хв, S – подача, мм / хв, t – глибина різання, мм.

Розрахунок величини залишкових напруг виробляємо на підставі розробленої авторами теоретичної моделі [34] за формулою:

$$\sigma = \sigma_{\text{сил}} + \sigma_{\text{теп}} + \sigma_{\text{с-ф}} + \sigma_{\text{поч}}, \quad (3)$$

де: $\sigma_{\text{сил}}$ – залишкові напруги від силового фактора, $\sigma_{\text{тем}}$ – остаточні напруги від дії теплового фактора, $\sigma_{\text{с-ф}}$ – залишкові напруги від дії структурно-фазових перетворень, $\sigma_{\text{поч}}$ – залишкові напруги, наявні в деталі до обробки.

Обмеження 2 – за величиною шорсткості обробленої поверхні Rz , мкм.

Визначимо величину параметрів різання, які забезпечують необхідну шорсткість поверхні обробки.

$$Rz = 3,55 \cdot 10^{-26} \cdot V^{1,11} \cdot S^{17,61} \cdot t^{0,29} \cdot [S^{-7,37}]^{lg V}. \quad (4)$$

Приймаємо $Rz \leq 6,3$ мкм. Отже, друге обмеження можна записати в вигляді:

$$Rz(V, S, t) \leq 6,3 \text{ мкм}. \quad (5)$$

Обмеження 3 – по зміцненню (наклепу) H , МПа.

Приймаємо, що величина наклепу поверхневого шару повинна лежати в діапазоні від 35 МПа до 60 МПа. Дане обмеження має наступний вигляд:

$$35 \leq H(V, S, t) \leq 60. \quad (6)$$

Залежність величини наклепу поверхневого шару від режимів різання обчислюється за такою формулою:

$$H = 1559,5 \cdot V^{-0,621} \cdot S^{0,219} \cdot T^{1,49} \cdot [S^{-0,443}]^{lg t}. \quad (7)$$

Обмеження 4 – по структурно-фазовим складом поверхневого шару (температурі нагріву).

Від дії високих температур не повинно відбуватися структурні зміни. Приймаємо, що при обробці не повинно виникати кольорів мінливості. Експериментально встановлено, що кольори мінливості виникають при температурі різання від 230°C . Тому основне обмеження задамо в наступному вигляді:

$$\Theta(V, S, t) \leq 230^\circ \text{C}. \quad (8)$$

Температуру в поверхневому шарі деталі визначимо за формулою:

$$\Theta = 0,004 \cdot V^{1,47} \cdot S^{7,16} \cdot t^{0,33} \cdot [S^{2,63}]^{lg V}, \quad (9)$$

де: Θ - температура, $^\circ \text{C}$.

Обмеження 5 – по частоті обертання шпинделя різання.

Значення чисел оборотів шпинделя n не повинно перевищувати паспортних даних верстата:

$$\begin{aligned} n &\leq n_{max} \\ n &\geq n_{min} \end{aligned} \quad (10)$$

Обмеження 6 – по відхиленню від настроєчного розміру $\Sigma \Delta z$, мм.

Величина відхилення від настроєчного розміру не повинна бути більше 0,03 мм, тому задаємо наступне обмеження:

$$\Delta z \leq 0,03. \quad (11)$$

Розрахункова формула для визначення $\Sigma \Delta z$ має вигляд:

$$\Delta z = 586,14 \cdot V^{-0,68} \cdot S^{0,228} \cdot t^{0,268}. \quad (12)$$

Обмеження 7 – з подачі.

Значення поздовжньої подачі верстата не повинно виходити за діапазон регламентованих подач для даного обладнання.

$$\begin{aligned} S &\leq S_{max} \\ S &\geq S_{min} \end{aligned} \quad (13)$$

Параметри подачі для ріжучої пластини не повинні виходити за значення, рекомендовані фірмою виробником даного інструменту. Значення подачі S повинні знаходитися в діапазоні, рекомендованому виробником. Для 4-х гранних твердосплавних пластин Т15К6 рекомендуються наступні значення подачі: $S_{min} = 0,05$ мм / зуб; $S_{max} = 0,3$ мм/зуб [10].

Отже, дане обмеження має вигляд:

$$0,05 \text{ мм/об} \leq Sz \leq 0,3 \text{ мм/об.} \quad (14)$$

Цільовою функцією для моделі оптимізації режимів різання є продуктивність. Для вирішення завдання оптимізації процесу високошвидкісного торцевого фрезерування загартованих сталей була створена комп'ютерна програма в EXCEL, яка дозволяє знайти оптимальні значення швидкості різання V і поздовжньої подачі S , в залежності від механічних властивостей матеріалу, параметрів ріжучого інструменту і глибини різання. Математичне визначення оптимального режиму обробки оброблялося на ПЕОМ з використанням алгоритму нелінійної оптимізації Generalized Reduced Gradient (GRG2). Спільна дія перерахованих вище обмежень, що накладаються на процес різання, визначає область допустимих режимів обробки. Оптимальний режим відповідає точці,

$$Sn \rightarrow \max. \quad (15)$$

Графічне представлення зазначених технологічних обмежень і області оптимальних параметрів високошвидкісного торцевого фрезерування наведено на рисунку 10.

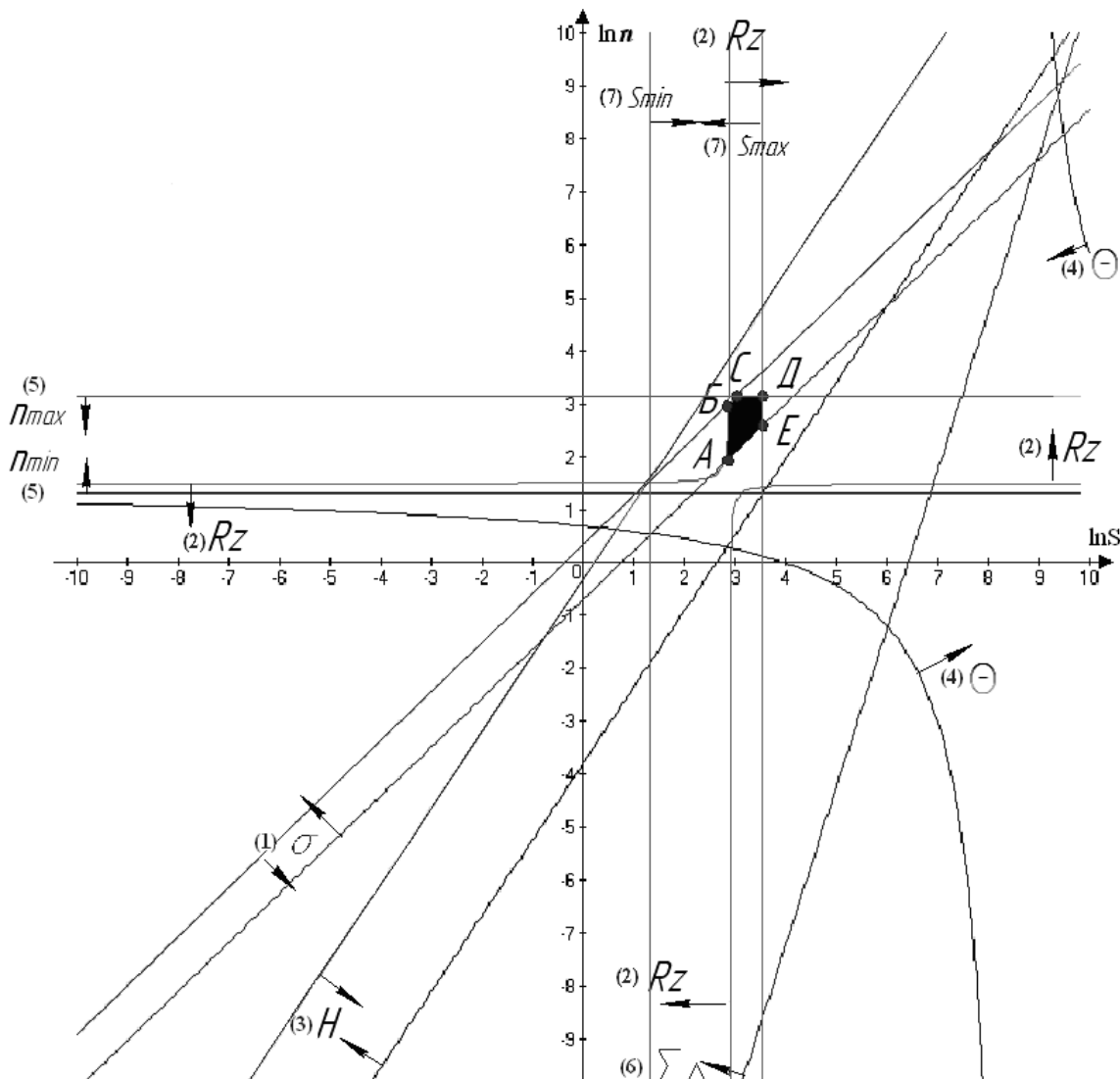


Рис.10. Математичне представлення технологічних обмежень процесу ВСФ

Тут $y = \ln n$, $x = \ln 10Sz$. Областю допустимих значень є фігура *ABCDE*. При ВСФ загартованих сталей з наступними параметрами: 9ХС; торцева фреза оригінальної конструкції; ширина різу $B = 30$ мм; глибина різання $t = 0,1$ мм оптимальним є рішення, вказане на рисунку точкою Д, якої відповідають такі режими різання: $n = 1\ 585$ об / хв ($V = 498$ м/хв); $S = 0,2$ мм /об.

Отриманого оптимального рішення відповідають наступні значення параметрів високошвидкісного торцевого фрезерування загартованих сталей: залишкові напруги $\sigma = -132$ МПа (стискають); шорсткість поверхні $Rz = 0,29$ мкм; величина наклепу поверхневого шару $H = 38$ МПа; температура різання до $\theta = 21$ °С вище температури навколишнього повітря.

Висновки. На підставі теоретичних і експериментальних досліджень обґрунтована можливість отримання поверхневого шару деталі з заданими величинами залишкових напруг, шорсткості, мікро-твердості, структурно-фазового складу і неоднорідності властивостей.

Визначено область допустимих режимів високошвидкісного торцевого фрезерування і знайдені їх оптимальні значення режимних параметрів.

Виконана програмна реалізація технологічних операцій фрезерування за допомогою САМ-системи, що дало змогу графічно візуалізувати процес високошвидкісної обробки, задіяв оптимізовані режимні параметри обробки.

Складені практичні рекомендації щодо оптимального використання сучасних САД-САМ систем, коригування результатів технології та режимних параметрів для отримання оптимальних результатів на стадії підготовки виробництва.

Проведене дослідження дозволяє моделювати абсолютно всі механічні операції за рахунок застосування комп'ютерних програм в умовах дефіциту виробництва натурних експериментів та дистанційного навчання; індивіалізувати процес навчання та підвищити ефективність самостійної роботи учня або студента; надає змогу проводити дослідження в таких областях змінення параметрів, які неможливо або небезпечно реалізувати на реальному коштовному обладнанні.

Перелік посилань

1. Петраков, Ю.В. & Мацківський, О.С. (2015). Моделювання фрезерування кінцевими фрезами. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування №1, 73, 78–83.*
2. Петраков, Ю.В. (2017). Методи управління процесами різання. *Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія : Технічні науки, (2). 124–134.*
3. Дербаба, В.А., Пацера, С.Т. & Григоренко, В.У. (2022). Особливості механічної обробки зносостійких чавунів. *Збірник наукових праць НГУ, (71), 217-230.* <https://doi.org/10.33271/crpnmu/71.217>
4. Петраков, Ю.В. & Мацківський, О.С. (2015). Моделювання системи адаптивного управління фрезеруванням на верстаті з ЧПК. *Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Серія : Машинобудування, 2, 146–152.*
5. Войчишен, О.Л. (2025). Визначення кута зсуву при стружкоутворенні через складові сили різання. *Збірник наукових праць НГУ, 80, 123–130* <https://doi.org/10.33271/crpnmu/80.123>
6. Кравченко, Ю.Г., Дербаба, В.А. & Смагін, Д.В. (2020). Визначення і взаємозв'язок кутів зсуву і тертя при стружкоутворенні. *Збірник наукових праць НГУ, 61, 193–201.* <https://doi.org/10.33271/crpnmu/61.193>
7. Дербаба, В.А., & Войчишен, О.Л. (2025). Програмна реалізація алгоритмічної моделі розрахунку кутів стружкоутворення. *Збірник наукових праць НГУ, 81, 177–187.* <https://doi.org/10.33271/crpnmu/81.177>

8. Kravchenko, Yu., & Derbaba, V. (2020). Empirical definition of the shearing angle and chip-edge contact length when cutting. *Збірник наукових праць НГУ*, 63, 123–133. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/63.123>.
9. Щербина Є.Ю, Дербабa В.А & Козечко В.А (2022) Критерії стійкості ріжучого інструменту для висошвидкісної обробки. *Збірник наукових праць НГУ*, 67, 77–95. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/67.077>
10. Ruban, V., Derbaba, V., Bohdanov, O., & Shcherbyna, Y. (2023). Optimization of product processing modes in modeling and programming of machining on machine tools with program control. *Collection of Research Papers of the National Mining University*, 72, 222–238. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/72.222>

ABSTRACT

Purpose. To solve a scientific and technical problem related to high-speed milling of a part from a selected material by optimizing and controlling its machinability with a hard alloy tool on modern CNC machines.

Methods. The methodology is based on the use of numerical and grapho-analytical research methods to establish a systematic relationship between cutting parameters and the properties of the material being processed, tool geometry, and corresponding integration into specialized engineering programs.

Findings. Numerical research results were obtained for a scientifically based approach to solving the scientific and technical problem of productive milling of a part from a selected material on a machine tool, containing a set of adjusted algorithms for predicting machinability while ensuring the reliability of the cutting tool. The results obtained were compared with known works related to the study of mechanical processing of various materials, assessment of the reliability of cutting tools, accuracy, and roughness of the machined surface.

The originality. Establishing a complete and systematic relationship between processing parameters and the properties of the material being processed, tool geometry, and design and technological factors of the part to calculate the optimized technology for automated production. Mathematical and statistical processing of experimental data, which made it possible for the first time to obtain comprehensive dependencies in a form convenient for calculation and analysis, providing a clear picture of the influence of each parameter of the milling process.

Practical implementation. It consists in selecting and justifying the optimal geometric parameters of cutting tools, establishing the nature of the influence of alloy steel blade processing conditions on the main process indicators – machining time and operating parameters, depending on the hardness of the part material and tool material. Practical recommendations are provided for the optimal use of the obtained data in CAM systems.

Keywords: *high-speed milling, machine tools, CNC, rotation frequency, workpiece, cutting edge, optimization of cutting modes.*

дата першого надходження статті до видання	10.10.2025
дата прийняття до друку статті після рецензування	11.11.2025
дата публікації (оприлюднення)	29.12.2025

© 2025. O. Voichyshen

Published by the Dnipro University of Technology on behalf of Collection of Research Papers of the National Mining University. ISSN 2521-6635 (Online) | ISSN 2071-1859 (Print). This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits unrestricted reuse, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.