

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1\(43\)-57-68](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-57-68)

УДК 621.91:621.941:534.1

**Андрій Сергійович Манохін¹, Сергій Анатолійович Клименко²,
Марина Юрївна Копейкіна³, Сергій Анатолійович Клименко⁴,
Анатолій Олександрович Чумак⁵, Катерина Валеріївна Камчатна-Степанова⁶**

¹кандидат технічних наук, старший дослідник,
старший науковий співробітник відділу «Технологічного управління якістю обробки інструментами із НТМ»
Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України (Київ, Україна)
E-mail: the.manokhin@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1479-8482>. Researcher ID: [DGN-4506-2022](https://orcid.org/0000-0003-1479-8482)
SCOPUS Author ID: [37059129600](https://orcid.org/0000-0003-1479-8482)

²доктор технічних наук, професор, член-кореспондент НАН України, заступник директора з наукової роботи
Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України (Київ, Україна)
E-mail: atmu@meta.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1464-3771>. Researcher ID: [Q-8928-2019](https://orcid.org/0000-0003-1464-3771)
SCOPUS Author ID: [57221904325](https://orcid.org/0000-0003-1464-3771)

³кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник відділу
«Технологічного управління якістю обробки інструментами із НТМ»
Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України (Київ, Україна)
E-mail: atmu1@meta.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5956-5503>. Researcher ID: [FZY-5450-2022](https://orcid.org/0000-0002-5956-5503)
SCOPUS Author ID: [36337661400](https://orcid.org/0000-0002-5956-5503)

⁴кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
відділу «Технологічного управління якістю обробки інструментами із НТМ»
Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України (Київ, Україна)
E-mail: alcon1202@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7913-5519>. Researcher ID: [FFQ-3675-2022](https://orcid.org/0000-0002-7913-5519)
SCOPUS Author ID: [57197629303](https://orcid.org/0000-0002-7913-5519)

⁵кандидат технічних наук,
науковий співробітник відділу «Технологічного управління якістю обробки інструментами із НТМ»
Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України (Київ, Україна)
E-mail: chumak1826ar@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9054-3196>. Researcher ID: [АЕК-3163-2022](https://orcid.org/0000-0001-9054-3196)
SCOPUS Author ID: [58162161100](https://orcid.org/0000-0001-9054-3196)

⁶кандидат технічних наук, старший викладач кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів
Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (Харків, Україна)
E-mail: katerina.ks@i.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7825-1238>. SCOPUS Author ID: [57363551500](https://orcid.org/0000-0001-7825-1238)

МОДЕЛЮВАННЯ ВІБРОПЕРЕМІЩЕНЬ ТА ОЦІНКА ВІБРОСТІЙКОСТІ ІНСТРУМЕНТІВ ПРИ РІЗАННІ З УДАРАМИ

У роботі представлено результати математичного моделювання вібропереміщень різального інструменту та оцінки вібростійкості процесу різання в умовах ударних імпульсних навантажень. Розглянуто динамічну модель пружної системи «інструмент-різцетримач-заготовка» з урахуванням зворотного зв'язку між миттєвою глибиною різання та складовими сили різання. На основі чисельного розв'язання диференційного рівняння другого порядку проведено аналіз впливу геометричних параметрів інструменту, зокрема кута нахилу різальної кромки, на амплітуду вібропереміщень та максимальні значення радіальної складової сили різання. Показано, що збільшення кута нахилу різальної кромки призводить до зниження амплітуди коливань інструменту та підвищення вібростійкості процесу різання. Встановлено, що інструменти з косокутною радіальною різальною кромкою при кутах $\lambda = 50-60^\circ$ забезпечують максимальну стабільність обробки в умовах імпульсних ударних навантажень.

Ключові слова: вібростійкість; вібрації при різанні; різальний інструмент; ударні навантаження; динаміка різання; сила різання; косокутне різання; моделювання процесу різання; пружна система.

Рис.: 7. Бібл.: 18.

Актуальність теми досліджень. У реальному виробництві більшість операцій механічної обробки (наприклад, точіння та фрезерування по корці литих деталей, виробів з перемінним профілем або переривчастими поверхнями) пов'язана з необхідністю видалення нерівномірного припуску і, як наслідок, нестаціонарним термобаричним навантаженням на різальний інструмент. Обробка таких деталей різанням, особливо у випадках, коли вони виготовляються з важкооброблюваних матеріалів, пов'язана з прискореним виходом інструменту з ладу в результаті інтенсивного зносу або руйнування.

Вібростійкість є однією з найважливіших характеристик технологічної системи, яка обумовлює здатність до опору виникненню вібрацій у зоні різання. Забезпечення вібростійкості пов'язано з визначенням режимів різання та геометричних параметрів інструментів, при яких мінімізуються вібраційні явища, та є актуальним науковим та прикладним завданням.

Постановка проблеми. Однією з основних проблем, які обмежують ефективність механообробки, є поява в зоні різання вібрації, що призводить до погіршення якості обробленої поверхні, точності, а також знижує продуктивність технології та стійкість інструменту. Тому розв'язання завдання з вивчення причин появи вібрацій та визначення підходів до підвищення вібростійкості системи різання, особливо в умовах з динамічними імпульсними навантаженнями, набуває суттєвого значення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У наукових публікаціях достатньо широко висвітлені дослідження з вивчення сил різання, температурних явищ та механізмів руйнування інструменту під час різання з динамічними навантаженнями. При цьому, зважаючи на складність проведення експериментальних досліджень з динаміки процесу різання, значну увагу присвячено розробці методів моделювання процесу обробки.

Важливим етапом процесу різання, що супроводжується ударним навантаженням інструмента, є його врізання в оброблюваний матеріал у початковий момент різання. За певних умов, цей етап супроводжується руйнуванням інструменту, що оснащений різальними пластинами з різних композитів – твердих сплавів, кераміки або надтвердих композитів на основі алмазу та кубічного нітриду бору. Таке руйнування інструменту досліджувалося авторами [1–3].

Для моделювання безпосереднього процесу врізання інструменту в роботі [4] було розроблено спеціальний пристрій, створений на основі преса Хопкінсона-Кольського. На торці верхнього стрижня преса закріплювалася пластина з матеріалу інструменту, а на нижньому – пластина з матеріалу, що обробляється. Верхній стрижень із заданою швидкістю ударявся по нижньому та по сигналу, отриманому від встановлених на стрижнях тензодатчиків, визначався вплив ударного навантаження на властивості матеріалу інструменту. Як приклад, автори роботи визначили величину енергії, яка витрачається на пластичну деформацію в зоні зсуву при врізанні зразка композиту на основі алмазу в алюміній.

У роботі [5] вивчався вплив нестационарного навантаження під час фрезерування на температурний режим в зоні різання: тепловий потік на контактній поверхні та коливання температури різання. Створена комбінована аналітично-чисельна модель розрахунку теплового потоку дозволила враховувати різні умови контактної взаємодії у зоні різання – швидкість та температуру різання і тиск на контактній ділянці, що використано для визначення коефіцієнта тертя на передній поверхні інструменту.

При обробці в умовах динамічного навантаження досить часто спостерігається руйнування різального інструменту, яке має вигляд мікровикришування у зоні різальної кромки та сколів макрооб'ємів робочої ділянки інструменту. У таких випадках встановити величину зносу інструменту, яка найбільш часто використовується як критерій його працездатності, досить важко, адже характеристика досліджуваного параметра в цьому випадку стає не кількісною (величина фаски зносу по задній поверхні інструменту h_z), а якісною з погляду руйнування інструменту (ϵ або ni). Але для вирішення завдань підвищення стійкості інструменту й оптимізації умов обробки із застосуванням математичних методів все ж необхідно мати для контрольованого параметра певні чисельні величини. Такою величиною може слугувати параметр, який характеризує стабільність процесу обробки, ознакою якого є сталість деякого параметра, що безпосередньо характеризує миттєвий стан системи «інструмент-різцетримач-заготовка» та контактну взає-

модію інструменту з виробом в зоні різання. До таких характеристик, значення яких можна фіксувати від приладів в кожен момент часу за допомогою АЦП, відносяться акустична емісія, віброприскорення, сила різання та деякі ін.

В роботі [6] розглянуто ряд конструктивних факторів, що впливають на ударостійкість різальних інструментів, серед них особливу увагу приділено радіусу різальної кромки та на основі отриманих експериментальних даних сили різання при фрезеруванні загартованої сталі AISI 4340 розроблено модель прогнозування сили різання, засновану на теорії Окслі та конститутивній моделі J-C, з урахуванням впливу радіуса різальної кромки ($r = 25\text{--}45$ мкм). Автори встановили, що радіус різальної кромки має значний вплив на стійкість та стабільність процесу різання. Збільшення радіуса різальної кромки призводить до збільшення сил різання та зносу задньої поверхні, проте і до збільшення жорсткості та ударної стійкості різальної кромки. Розроблена модель дозволила встановити оптимальне значення радіуса різальної кромки.

Прогнозування сили різання під час обробки із динамічними навантаженнями має суттєве значення для оптимізації обробки, забезпечення стабільності процесу різання, підвищення якості поверхні та збільшення терміну служби інструменту [7].

Сьогодні розроблено широкий спектр методів та підходів для оцінки сили різання шляхом моделювання, серед яких найбільш часто використовують аналітичні, емпіричні, числові та гібридні методи. Так, у роботі [8] було застосовано алгоритми машинного навчання та метод скінченних елементів для прогнозування сил різання при обробці з ударними навантаженнями сталі AISI 4140. Встановлено, що регресія опорних векторів та моделі машинного навчання «Random Forest» дозволяє точно оцінювати складові сили різання на основі параметрів обробки, що дозволяє інтегрувати даний метод у САМ-системи.

Зазвичай в моделях доволі складно врахувати величину зносу контактних поверхонь інструменту, що впливає на точність розрахунків та можливість інтегрування в САМ-системи, проте в роботі [9] розроблена модель оцінки сили різання при фрезеруванні Ti-6Al-4V, яка враховує знос задньої поверхні інструменту та вплив вібрації.

В роботі [10] розроблено модель для оцінки сили різання on-line, яку інтегровано в систему керування оброблюваного центру. Модель базується на обчисленні коефіцієнтів питомої сили різання (SFC) за допомогою алгоритмів рекурсивного методу найменших квадратів (RLS) та фільтра Калмана (KF). Крім того, в [11] створено модель для оцінки сили різання при фрезеруванні, яка враховує вплив радіального биття інструменту на різних глибинах.

Моделювання процесу різання напряму залежить від результатів експериментальних досліджень з визначення складових сили різання для різних умов обробки, що змушує розробляти нові методи та методики проведення експериментальних досліджень. Так у роботі [12] запропоновано нову концепцію динамометра, що поєднує датчики навантаження та акселерометри з універсальним фільтром. Це нововведення усунуло необхідність калібрування для конкретного верстата і забезпечило точне відтворення сили різання із широкою пропускну здатністю.

Широке розповсюдження, при моделюванні процесу різання, набули нейронні мережі. У [13] розроблено нейронну мережеву модель, яка поєднує фізичні принципи з зображеннями взаємодії різця та оброблюваного матеріалу. Цей підхід покращив точність прогнозування сили, одночасно зменшуючи потребу у великих наборах експериментальних даних. У роботі [14] представлена нейронна мережа, яка здатна прогнозувати силу різання на основі аналізу потужності спожитого струму шпинделем, що дало можливість ефективно фіксувати нелінійні залежності сили різання за різних умов обробки.

Розглянуті дослідження показують різноманітність та спеціалізацію моделей для прогнозування динамічних показників процесу обробки. Проте слід зауважити, що кожна модель орієнтована на конкретні матеріали, геометричні параметри інструменту або умови процесу різання, що підкреслює постійну потребу в гнучких, експериментально перевірених моделях, придатних для реальних середовищ обробки. Водночас наявні моделі процесу різання з ударними навантаженнями, як правило, зосереджені на аналізі окремих параметрів (сил або температури різання, параметрів акустичної емісії або вібрацій) без урахування їх взаємного впливу та зворотного зв'язку між коливаннями інструменту і миттєвими змінами товщини зрізаного шару. Недостатньо дослідженим залишається вплив геометричних параметрів різального інструменту, зокрема кута нахилу різальної кромки та її форми, на вібростійкість процесу різання в умовах імпульсного навантаження інструменту.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Таким чином, однією із недостатньо вирішених науково-технічних проблем є створення та експериментальна перевірка математичної моделі, яка б дозволяла проводити оцінку вібростійкості процесу різання при наявності ударних навантажень. Ця модель повинна враховувати імпульсний характер сили різання, а також зв'язок між вібраційними процесами та геометричними параметрами різального інструменту.

Розв'язання цієї проблеми є необхідним для обґрунтованого вибору геометричних параметрів інструменту та режимів різання, що забезпечують підвищення стабільності й надійності механічної обробки в умовах динамічних навантажень.

Метою роботи є математичне моделювання вібропереміщень різального інструменту при різанні з ударними навантаженнями та оцінка впливу геометричних параметрів інструменту, зокрема кута нахилу різальної кромки, на вібростійкість процесу обробки.

Методика досліджень. З метою оцінки впливу умов обробки на основний показник вібростійкості процесу – амплітуду коливань інструменту проведено відповідні розрахунки з урахуванням геометричних параметрів інструменту та режимів різання. При цьому, береться до уваги наявність в системі зворотного зв'язку: збільшення миттєвого значення глибини різання t призводить до росту складових сили різання, що своєю чергою за рахунок впливу на пружну систему «інструмент-різцетримач-заготовка» змінює положення вершини інструменту та значення t .

Колівання різального інструменту вздовж осі OY під дією радіальної складової сили різання за схемою, зображеною на рис. 1, описуються неоднорідним диференціальним рівнянням другого ступеню:

$$m\ddot{y} + b\dot{y} + cy = Py(t, y),$$

$$\ddot{y} + 2n\dot{y} + \omega_c^2 y = \frac{1}{m} Py(t, y),$$

де для верстата типу 16К20 потрібні коефіцієнти приймемо в першому наближенні таким чином [15]:

$$m = \frac{c \cdot 10^6}{\omega_c^2} - \text{коефіцієнт енергії (приведена маса);}$$

$$\omega_c = 2\pi f = 2\pi \cdot 400,1 = 2512 \text{ рад/с} - \text{кругова частота власних коливань;}$$

$$c = 5 \text{ Н/мкм} - \text{жорсткість вузла різець-різцетримач;}$$

$$m = 0,79 \text{ Н} \cdot \text{с}^2/\text{м} - \text{приведена маса;}$$

$b = 2mf\lambda_d$ – коефіцієнт демпфування, де f – частота власних коливань системи, λ_d – логарифмічний декремент затухання коливань (0,18 для випадку чистої та напівчистої обробки сталей та чавунів на токарних верстатах [16]).

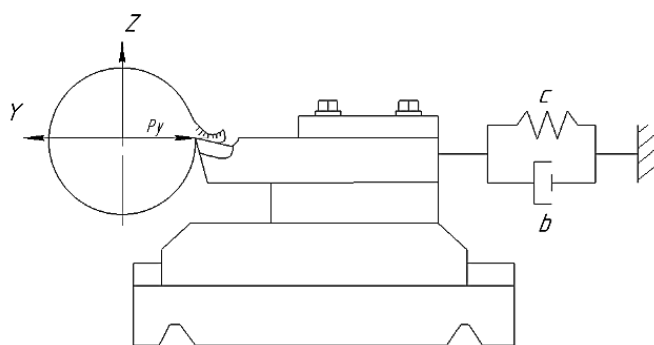


Рис. 1. Схема пружної системи «інструмент-різцетримач-заготовка» з одним ступенем свободи **джерело?**

Якщо $b = 114,1$ кг/с, тоді $n = \frac{b}{2m} = 114,1/2 \cdot 0,88 = 50,2$; початкові умови $y(0) = 0$, $\dot{y}(0) = 0$.

Блок-схема вирішення наведеного вище диференційного рівняння, яке описує коливання в пружній системі «інструмент-різцетримач-заготовка», шляхом моделювання в Simulink Matlab зображена на рис. 2.

Структура алгоритму складається з суматора (Add), на входні канали якого подаються складові сигналу переміщення, швидкості та сили, величина якої залежить від миттєвого значення товщини зрізу (площі перетину зрізу) як функція від y ; інтеграторів ($1/s$) для інтегрування сигналів прискорення і визначення швидкості \dot{y} та переміщення y ; генератора імпульсної характеристики вхідного сигналу сили різання (Pulse Generator) – $P_{y0}(t)$, яка своєю чергою має змінну складову $k \cdot y(t)$, що визначається переміщенням y з відповідним коефіцієнтом і сумується зі значенням сигналу з Pulse Generator, і, таким чином, сумарний сигнал сили на вході системи становить $P(y,t) = P_{y0}(t) + k \cdot y(t)$.

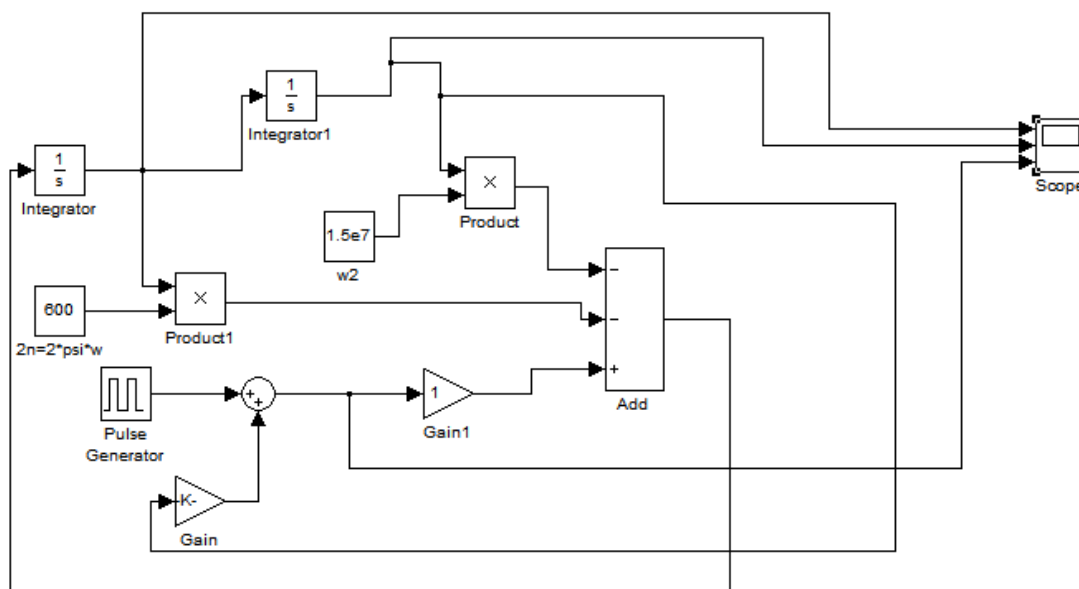


Рис. 2. Блок-схема моделювання коливань в пружній системі «інструмент-різцетримач-заготовка» **джерело?**

Експериментальні дослідження виконувалися на токарно-гвинторізному верстаті ФТ11 під час точіння інструментом, оснащеним різальними пластинами RNUN-1204000, SNUN-0904000 з композиту на основі полікристалічного нітриду бору (ПКНБ) Борсинит,

заготовки зі сталі ШХ15 Ø 80 мм із шістьма повздовжніми пазами шириною 10 мм. Режими різання: $t = 0,2$ мм, $S = 0,2$ мм/об, $v = 120$ м/хв.

При частоті обертів заготовки 500 об/хв період виникнення дії сили приймемо таким, що дорівнює 0,025 с, а тривалість кожного імпульсу 0,019 с при скважності 0,006 с.

Використано інструменти з радіусною різальною кромкою ($\lambda = 0-60^\circ$) та з прямолінійною різальною кромкою з кутом нахилу $\lambda = (30-60)^\circ$.

Виклад основного матеріалу. Радіальна складова сили різання має імпульсний характер та змінюється від 0 до номінального значення, обумовленого товщиною зрізу. Крім того, коливання різця змінюють миттєве значення товщини зрізу, що також впливає на величину вимушеної сили. Приклад моделі імпульсного навантаження на інструмент наведено на рис. 3.

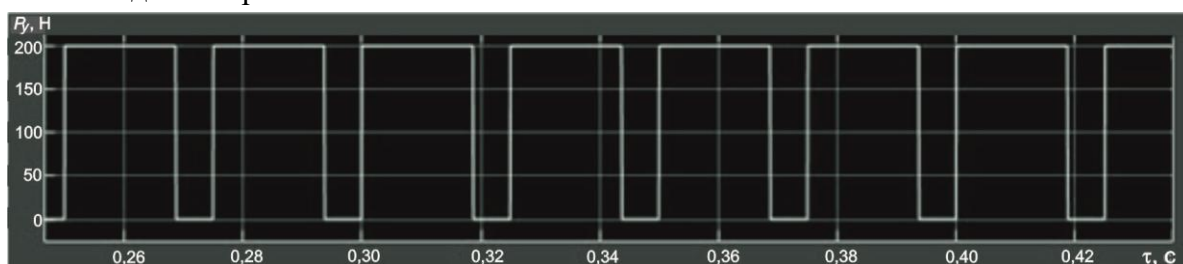


Рис. 3. Приклад моделі імпульсного навантаження на інструмент з радіусною різальною кромкою ($\lambda = 50^\circ$) **джерело?**

Визначимо амплітуду вібрацій інструменту для випадків його використання з радіусною різальною кромкою з $\lambda = 0^\circ$ та і косокутних різців як з радіусною, так і з прямолінійною різальною кромками. Приймаючи, що характеристики жорсткості та демпфування системи не залежать від використаного інструменту, необхідно задати величини імпульсного навантаження – складової P_{y0} та коефіцієнту k . На основі даних [17; 18] щодо впливу глибини різання та кута нахилу різальної кромки косокутних інструментів на сили різання встановимо в першому наближенні залежності радіальної складової P_y від глибини різання та кута λ для інструментів з радіусною та прямолінійною різальною кромкою. Використавши наведені на графіку рис. 4, а дані та враховуючи лінійну залежність сили від глибини різання, приймемо для радіусного різця $k = 0,8 \cdot 10^6$ Н/м, а для косокутного інструменту з прямолінійною різальною кромкою $k = 2,9 \cdot 10^6$ Н/м.

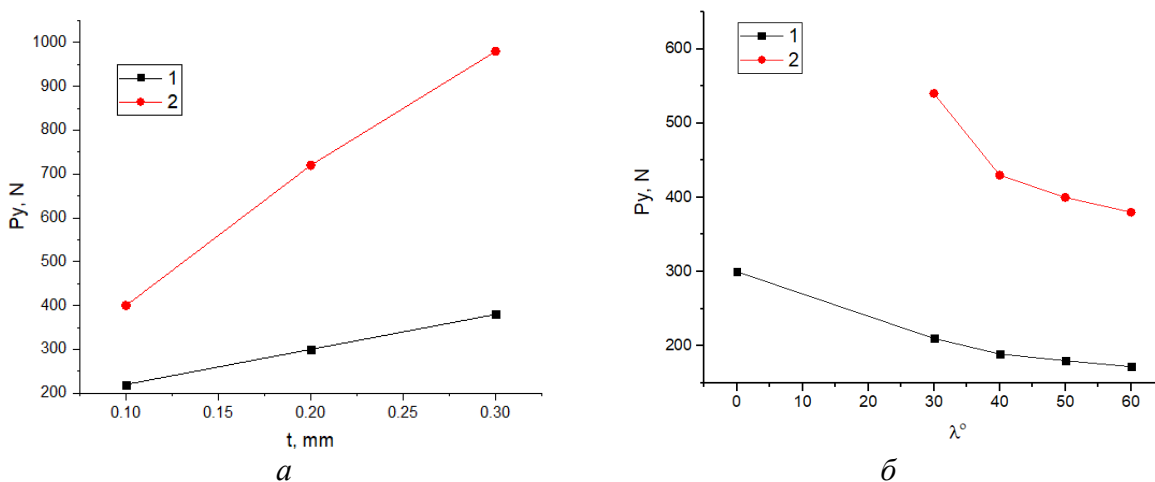
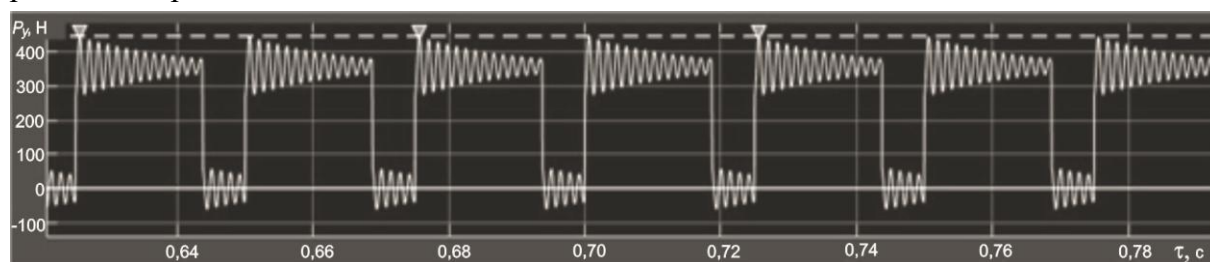


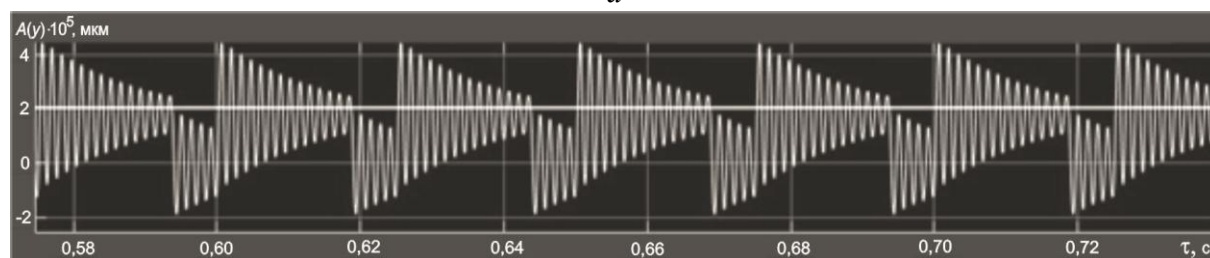
Рис. 4. Залежність складової P_y для радіусного (1) та з прямолінійною різальною кромкою (2) різців:

а – від глибини різання (1 – $\lambda = 0^\circ$; 2 – $\lambda = 50^\circ$); б – від кута λ при $t = 0,2$ мм

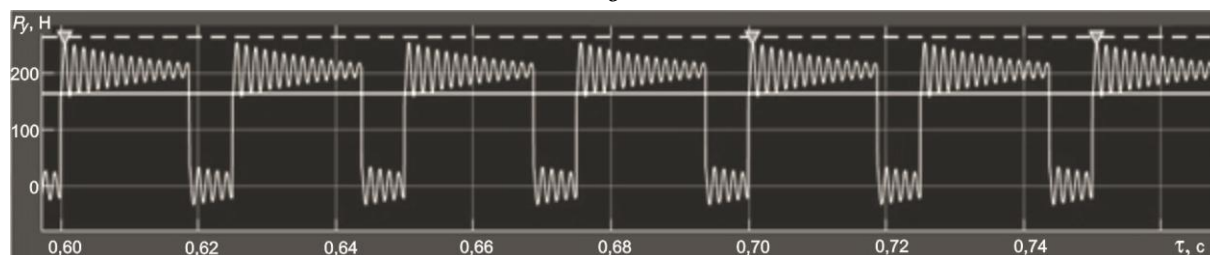
На діаграмах (рис. 5) наведено приклади розрахунків віброколивань інструменту та коливань сили P_y як функції часу, отримані при вирішенні наведеного у методиці диференційного рівняння.



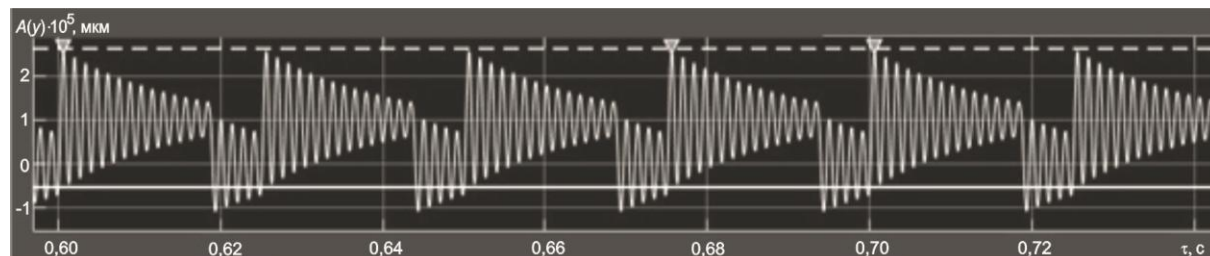
а



б



в



г

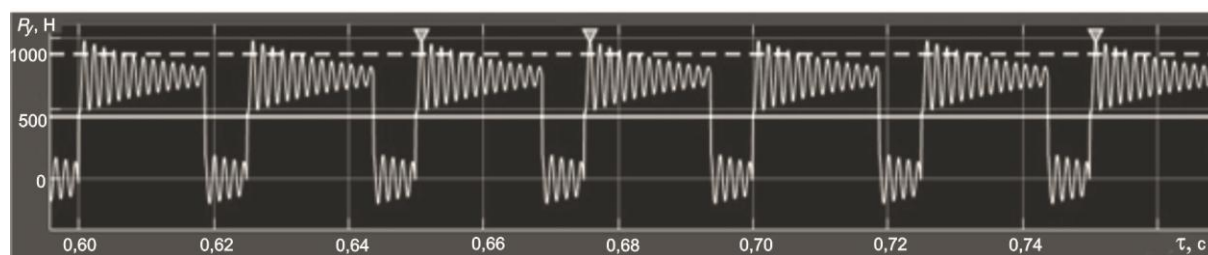
Рис. 5. Зміна сили P_y (а, в) та амплітуди вібропереміщень $A(y)$ різця (б, г) при обробці інструментами з радіусною різальною кромкою: $\lambda = 0^\circ$ (а, б); $\lambda = 60^\circ$ (в, г)

Аналіз динамічних характеристик процесу обробки свідчить про значні величини переміщень вершини різального інструменту вздовж осі OY внаслідок дії вимушеної імпульсної сили, яка інтенсивно зростає зі збільшенням миттєвого значення глибини різання.

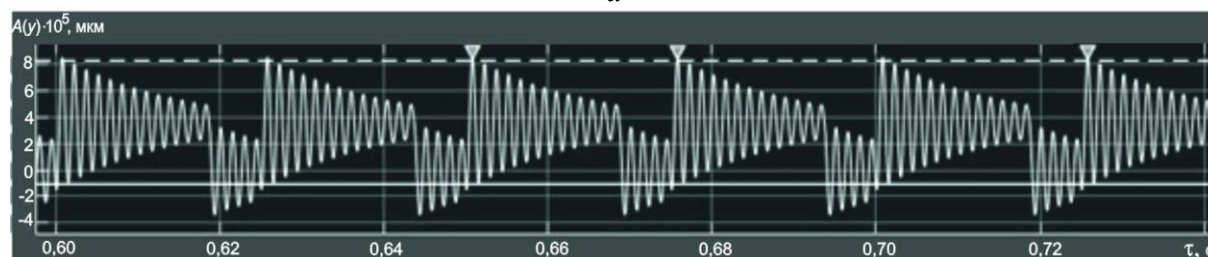
Слід зауважити, що середнє значення сили, що діє на інструмент під час різання, вище величини періодичної вимушеної сили: $P_{ycp} = 360$ Н та 200 Н при величинах $P_{y0} = 300$ та 180 Н. Наявність демпфування в системі різець-різцетримач-заготовка обумовлює інтенсивне зниження амплітуди вібропереміщень та коливань сили P_y в кожному з підперіодів різання.

Для порівняння на рис. 6 наведено аналогічні діаграми для косокутного різця з прямолінійною різальною кромкою, для якого характерним є суттєво вищі, у порівнянні із

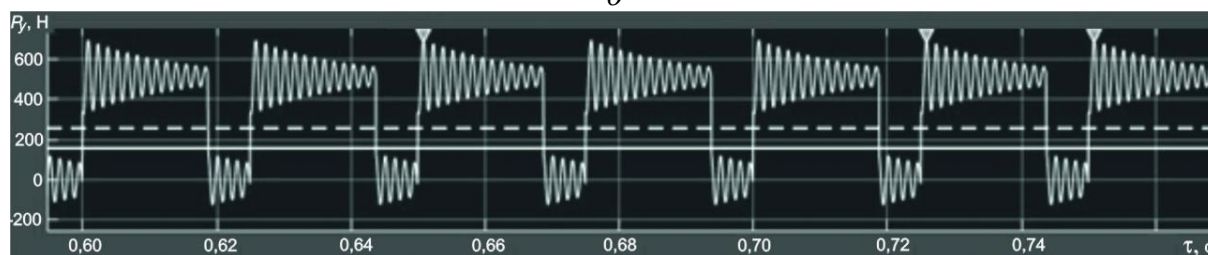
радіусним інструментом, величини ширини зрізу та відношення ширини до середньої товщини зрізу. Як видно, величини сил, вібропереміщень та амплітуди їхніх коливань в такому випадку є суттєво вищими.



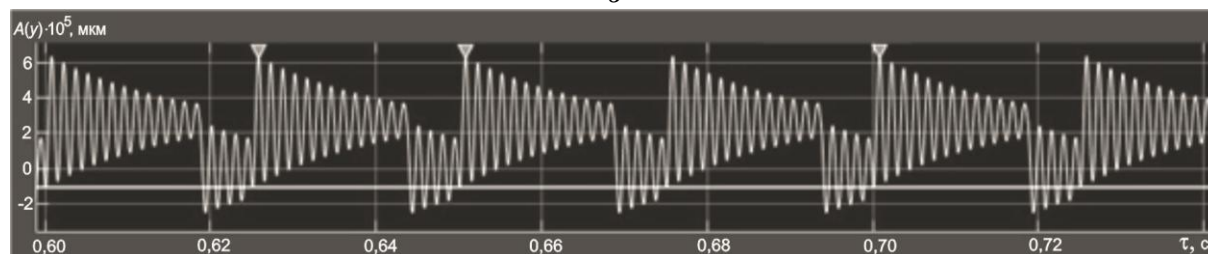
а



б



в



г

Рис. 6. Зміна сили P_y (а, в) та амплітуди вібропереміщень $A(y)$ різця (в, г) при обробці косокутним інструментом з прямолінійною різальною кромкою: а, б – $\lambda = 30^\circ$; в, г – $\lambda = 60^\circ$

На рис. 7 наведено залежності максимальних величин сили $A(P_{y\max})$ (а) та амплітуди вібропереміщень в напрямку OY (б) від величини кута нахилу різальної кромки.

Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити висновок про значний вплив кута нахилу різальної кромки інструмента на дані характеристики – зі зростанням λ величини амплітуди вібропереміщень $A(P_y)$ та $A(y)$ знижуються. Зменшення амплітуди вібропереміщень при зміні кута λ від 30° до 60° становить 1,3 та 1,6 раза для інструментів з радіусною та прямолінійною різальними кромками відповідно. У порівнянні з інструментом з радіусною різальною кромкою з $\lambda = 0^\circ$ цей показник для радіусного різця з $\lambda = 60^\circ$ зменшується в 1,75 раза.

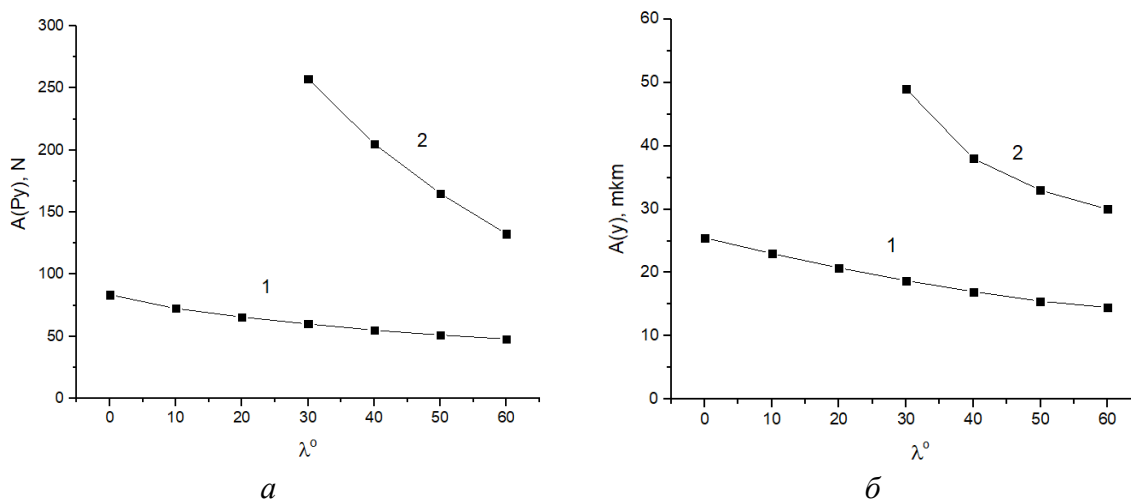


Рис. 7. Вплив кута нахилу різальної кромки λ на максимальну амплітуду сили різання $A(P_{\text{ymax}})$ (а) та амплітуду вібропереміщень $A(y)$ (б) для інструменту з радіусною різальною кромкою (1) та косокутного інструменту з прямолінійною різальною кромкою (2)

Вказане свідчить про збільшення вібростійкості системи різання – вібростійкість інструмента з радіусною різальною кромкою суттєво (у 2,1 раза) вища у порівнянні з різцем з прямолінійною різальною кромкою. Як висновок, з огляду на забезпечення максимальної стабільності обробки різанням, в умовах імпульсних ударних навантажень доцільним є використання косокутного інструменту з радіусною кромкою при кутах $\lambda = (50\text{--}60)^\circ$. Аналіз динамічних характеристик процесу обробки свідчить про значні величини переміщень вершини різального інструменту вздовж осі OY внаслідок дії вимушеної імпульсної сили, яка інтенсивно зростає зі збільшенням миттєвого значення глибини різання.

Висновки. Запропоновано динамічну математичну модель пружної системи «інструмент-різцетримач-заготовка», яка враховує імпульсний характер радіальної складової сили різання та наявність зворотного зв'язку між миттєвою глибиною різання і коливаннями інструменту.

Показано, що в умовах ударних навантажень амплітуда вібропереміщень вершини різального інструменту суттєво залежить від геометрії різальної кромки та величини кута її нахилу.

Встановлено, що зі збільшенням кута нахилу різальної кромки λ спостерігається зниження максимальних значень радіальної складової сили різання та амплітуди вібропереміщень інструменту, що свідчить про підвищення вібростійкості процесу різання.

Порівняльний аналіз показав, що інструмент з косокутною радіусною різальною кромкою має вищу вібростійкість у порівнянні з косокутним інструментом з прямолінійною різальною кромкою, зменшуючи амплітуду коливань до 2,1 раза.

Для забезпечення максимальної стабільності процесу різання в умовах імпульсних ударних навантажень доцільним є використання косокутного інструменту з радіусною різальною кромкою при кутах нахилу $\lambda = (50\text{--}60)^\circ$.

Джерело фінансування. Роботу виконано в рамках бюджетної теми НАН України «Дослідження процесів обробки високо твердих сталей та сплавів інструментами з ПНТМ на основі КНБ в умовах динамічного навантаження» (№ держреєстрації 0122U000403).

Список використаних джерел

1. Мазур, М. П., Внуков, Ю. М., Грабченко, А. І., Доброскок, В. Л., & Залога, В. О. (2025). *Основи теорії різання матеріалів: Підручник (5-те вид., перероб. і доп.)*. Львів: Новий Світ-2000
2. Манохін, А. С., Клименко, С. Ан., Клименко, С. А., Копейкіна, М. Ю., Мельнійчук, Ю. О., Чумак, А. О., & Найдено, А. Г. (2025). Визначення стабільності процесу різання в умовах динамічного навантаження. *Технічна інженерія*, (1(95)), 67–75.
3. Залога, В. О., & Шаповал, Ю. В. (2024). *Методологічні основи підвищення ефективності оброблення деталей шляхом керування динамікою процесу високошвидкісного точіння з високими частотами обертання шпинделя*. Сумський державний університет
4. Devin, L. M., Lytvyn, P. M., Ivakhnenko, S. O., & Zanevskiy, O. O. (2024). Methodology for studying brittle fracture of HTHP diamond single crystals by crack propagation analysis under shock load. *Journal of Superhard Materials*, 46(1), 14–22.
5. Karaguzel, U. (2021). Transient multi-domain thermal modeling of interrupted cutting with coated tools. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 116, 345–361.
6. Hopkins, C., Clarke, T., Yusefian, N. Z., & Hosseini, A. (2023). On modelling the cutting forces and impact resistance of honed milling tools. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 48(1), 53–67.
7. Nguyen, T. A., & Tran, T. T. (2025). Cutting force prediction in end milling processes: Analytical models and applications. *Applications in Engineering Science*, 23, 100250.
8. Charalampous, P. (2021). Prediction of cutting forces in milling using machine learning algorithms and finite element analysis. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30(3), 2002–2013.
9. Gao, G., Xia, Z., Su, T., Xiang, D., & Zhao, B. (2021). Cutting force model of longitudinal-torsional ultrasonic-assisted milling Ti-6Al-4V based on tool flank wear. *Journal of Materials Processing Technology*, 291, 117042.
10. Farhadmanesh, M., & Ahmadi, K. (2021). Online identification of mechanistic milling force models. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 149, 107318.
11. Chen, Y., Lu, J., Deng, Q., Ma, J., & Liao, X. (2022). Modeling study of milling force considering tool runout at different types of radial cutting depth. *Journal of Manufacturing Processes*, 76, 486–503.
12. Totis, G., Bortoluzzi, D., & Sortino, M. (2024). Development of a universal, machine tool independent dynamometer for accurate cutting force estimation in milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 104151.
13. Xu, K., Yingguang, L., Jiachen, Z., & Gengxiang, C. (2021). ForceNet: An offline cutting force prediction model based on neuro-physical learning approach. *Journal of Manufacturing Systems*, 61, 1–15.
14. Peng, D., Li, H., Dai, Y., Wang, Z., & Ou, J. (2022). Prediction of milling force based on spindle current signal by neural networks. *Measurement*, 205, 112153.
15. Хорошайло, В. В. (2016). Підвищення ефективності розточування отворів на токарних верстатах шляхом створення вібростійкої інструментальної системи (Автореф. дис. канд. техн. наук). ДДМА, Краматорськ.
16. Ткаченко, Я. Є. (2021). *Усунення вібрацій при багатолезовій обробці* (Магістерська дисертація). НТУ України «КПІ імені Ігоря Сікорського».
17. Манохін, А. С. (2009). *Підвищення продуктивності чистового точіння загартованих сталей косокутним однокромочним інструментом з ПНТМ на основі КНБ* (Автореф. дис. канд. техн. наук). ІНМ ім. В. М. Бакуля НАН України.
18. Клименко, С. А. (2015). *Підвищення стійкості інструментів із полікристалічного кубічного нітриду бору при точінні загартованих сталей застосуванням покриття* (Автореф. дис. канд. техн. наук). ІНМ ім. В. М. Бакуля НАН України.

References

1. Mazur, M.P., Vnukov, Yu.M., Grabchenko, A.I., Dobroskok, V.L., Zaloga, V.O. (2025). *Osnovy teorii rezaniya materialov. [Fundamentals of the Theory of Material Cutting: A Textbook (5th ed., revised and expanded).]* Lviv: Novyi Svit-2000. 457.

2. Manokhin, A. S., Klymenko, S. An., Klymenko, S. A., Kopeikina, M. Yu., Melniychuk, Yu. O., Chumak, A.O., Naidenko, A.G. (2025). Vyznachennja stabilnosti protsessu rizannja v umavah dynamichnogo navantazhennja [Determining the stability of the cutting process under dynamic loading conditions]. *Tekhnichna inzheneriia - Technical Engineering*, 1(95). 67–75.
3. Zaloga, V.O., Shapoval, Y.V. (2024). Metodologichni osnovy pidvystchennja efektyvnosti obroblennja detaley shljahom keruvannja dynamikoyu protsessu vysokoshvydkisnogo tochinnja z vysokymy hastotamy obertannja shpindelja [Methodological foundations for improving the efficiency of part machining by controlling the dynamics of the high-speed turning process at high spindle speeds]. Sumy State University.
4. Devin, L. M., Lytvyn, P. M., Ivakhnenko, S. O., & Zanevskyi, O. O. (2024). Methodology for studying brittle fracture of HTHP diamond single crystals by crack propagation analysis under shock load. *Journal of Superhard Materials*, 46(1), 14–22.
5. Karaguzel, U. (2021). Transient multi-domain thermal modeling of interrupted cutting with coated tools. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 116, 345–361.
6. Hopkins, C., Clarke, T., Yusefian, N. Z., & Hosseini, A. (2023). On modelling the cutting forces and impact resistance of honed milling tools. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 48(1), 53–67.
7. Nguyen, T. A., & Tran, T. T. (2025). Cutting force prediction in end milling processes: Analytical models and applications. *Applications in Engineering Science*, 23, 100250.
8. Charalampous, P. (2021). Prediction of cutting forces in milling using machine learning algorithms and finite element analysis. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30(3), 2002–2013.
9. Gao, G., Xia, Z., Su, T., Xiang, D., & Zhao, B. (2021). Cutting force model of longitudinal-torsional ultrasonic-assisted milling Ti-6Al-4V based on tool flank wear. *Journal of Materials Processing Technology*, 291, 117042.
10. Farhadmanesh, M., & Ahmadi, K. (2021). Online identification of mechanistic milling force models. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 149, 107318.
11. Chen, Y., Lu, J., Deng, Q., Ma, J., & Liao, X. (2022). Modeling study of milling force considering tool runout at different types of radial cutting depth. *Journal of Manufacturing Processes*, 76, 486–503.
12. Totis, G., Bortoluzzi, D., & Sortino, M. (2024). Development of a universal, machine tool independent dynamometer for accurate cutting force estimation in milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 104151.
13. Xu, K., Yingguang, L., Jiachen, Z., & Gengxiang, C. (2021). ForceNet: An offline cutting force prediction model based on neuro-physical learning approach. *Journal of Manufacturing Systems*, 61, 1–15.
14. Peng, D., Li, H., Dai, Y., Wang, Z., & Ou, J. (2022). Prediction of milling force based on spindle current signal by neural networks. *Measurement*, 205, 112153.
15. Khoroshailo, V. V. (2016). *Pidvystchennja efektyvnosti roztochuvannja otvoriv na tokarnyh verstatah shljahom stvorenja vibrostiykoy instrumental'noy systemy [Improving the efficiency of bore boring on lathes by developing a vibration-resistant tooling system]* [Abstract of a PhD thesis in Engineering; DDMA].
16. Tkachenko, Ya. E. (2021). *Usunennja vibratsiy pry bagatolezovoy obrobtisy [Vibration suppression in multi-blade machining]* [Master's thesis; NTU Ukraine "KPI named after Igor Sikorskyi"].
17. Manohin, A.S. (2009). *Pidvystchennja produktivnosti chistovogo tohinna zagartovanyh staley kosokutnym odnokromochnym instrumentom z PNTM na osnovi KNB [Improving the productivity of finish turning of hardened steels using a single-edge, oblique-cut tool made from PNTM based on KNB]* [Abstract of a PhD thesis in Engineering; INM named after V.M. Bakul NAN Ukraine].
18. Klymenko, S.A. (2015). *Pidvystchennja stiykosti instrumentiv is polikrystalichnogo kubichnogo nistrydu boru pry tochinni sagartovanyh staley zastosovannjam pokryttiv [Improving the wear resistance of polycrystalline cubic boron nitride tools during the turning of hardened steels through the application of coatings]* [Abstract of a PhD thesis in Engineering; INM named V. M. Bakul NAN Ukraine].

Дата першого надходження статті до видання: 12.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 02.01.2026

**Andrii Manokhin¹, Sergii Klymenko², Maryna Kopieikina³, Serhii Klymenko⁴,
Anatolii Chumak⁵, Kateryna Kamchatna-Stepanjva⁶**

¹ Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher,
Senior Researcher of the Department of Technological Management of Quality of Processing with SHM Tools
V. Bakul Institute of Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)
E-mail: the.manokhin@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1479-8482>. **Researcher ID:** [DGN-4506-2022](https://orcid.org/0000-0003-1479-8482)
SCOPUS Author ID: [37059129600](https://orcid.org/0000-0003-1479-8482)

² Doctor of Technical Sciences, Professor,
Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Deputy Director for Research
V. Bakul Institute of Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)
E-mail: atmu@meta.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1464-3771>. **Researcher ID:** [Q-8928-2019](https://orcid.org/0000-0003-1464-3771)
SCOPUS Author ID: [57221904325](https://orcid.org/0000-0003-1464-3771)

³ Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher,
Senior Researcher of the Department of Technological Management of Quality of Processing with SHM Tools
V. Bakul Institute of Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine),
E-mail: atmu1@meta.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-5956-5503>. **Researcher ID:** [FZY-5450-2022](https://orcid.org/0000-0002-5956-5503)
SCOPUS Author ID: [36337661400](https://orcid.org/0000-0002-5956-5503)

⁴ Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher,
Senior Researcher of the Department of Technological Management of Quality of Processing with SHM Tools
V. Bakul Institute of Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine),
E-mail: alcon1202@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7913-5519>. **Researcher ID:** [FFQ-3675-2022](https://orcid.org/0000-0002-7913-5519)
SCOPUS Author ID: [57197629303](https://orcid.org/0000-0002-7913-5519)

⁵ Candidate of Technical Sciences,
Researcher of the Department of Technological Management of Quality of Processing with SHM Tools
V. Bakul Institute of Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine),
E-mail: chumak1826ar@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-9054-3196>. **Researcher ID:** [AEK-3163-2022](https://orcid.org/0000-0001-9054-3196)
SCOPUS Author ID: [58162161100](https://orcid.org/0000-0001-9054-3196)

⁶ Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer, Department of Mechanical Engineering and Metal-Cutting Machine Tools
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" (Kharkiv, Ukraine),
E-mail: katerina.ks@i.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-7825-1238>. **SCOPUS Author ID:** [57363551500](https://orcid.org/0000-0001-7825-1238)

MODELING OF VIBRATION TRANSFER AND EVALUATION OF VIBRATION RESISTANCE OF TOOLS DURING IMPACT CUTTING

The paper presents the results of mathematical modeling of vibration displacements of the cutting tool and assessment of vibration resistance of the cutting process under shock impulse loads. The dynamic model of the elastic system "tool-tool holder- workpiece" is considered, taking into account the feedback between the instantaneous cutting depth and the components of the cutting force. Based on the numerical solution of the second-order differential equation, an analysis of the influence of the geometry of the tool, in particular the angle of inclination of the cutting edge, on the amplitude of vibration displacements and the maximum values of the radial component of the cutting force is carried out. It is shown that an increase in the angle of inclination of the cutting edge leads to a decrease in the amplitude of tool oscillations and an increase in the vibration resistance of the cutting process. It is established that tools with an oblique radius cutting edge at angles $\lambda = 50-60^\circ$ provide maximum machining stability under conditions of impulse shock loads.

Keywords: vibration resistance; vibrations during cutting; cutting tool; impact loads; cutting dynamics; cutting force; bevel cutting; modeling of the cutting process; elastic system.

Fig.: 7. References: 18.