

С. А. КЛИМЕНКО, А. С. МАНОХІН, А. О. ЧУМАК, М. Ю. КОПЕЙКІНА, С. А. КЛИМЕНКО

МОДЕЛЮВАННЯ СИЛ КОСОКУТНОГО РІЗАННЯ ІНСТРУМЕНТОМ З КРУГЛОЮ ПЛАСТИНОЮ З ПКНБ ПРИ ОБРОБЦІ ЗАГАРТОВАНОЇ СТАЛІ З УДАРОМ

У роботі виконано чисельне моделювання процесів різання загартованої сталі інструментами з різними кутами нахилу різальної кромки, оснащених пластинами з ПКНБ. За допомогою пакета DEFORM-3D досліджено напружено-деформований стан у зоні первинної та вторинної деформації під час точіння з ударом. Показано, що при застосуванні інструментів з косим кутом врізання значно зменшується ударне навантаження, середня сила різання та варіація її сигналу, що свідчить про підвищену стабільність процесу. Встановлено, що збільшення кута нахилу різальної кромки до 60° призводить до зниження нормальних складових сили різання та інтенсивності деформації. Результати моделювання підтверджено експериментально, що дозволяє рекомендувати косокутне різання як ефективний підхід до обробки загартованих сталей в умовах динамічних навантажень.

Ключові слова: косокутне різання, різальний інструмент, режими різання, загартована сталь, моделювання, напружено-деформований стан.

S. KLYMENKO, A. MANOKHIN, A. CHUMAK, M. KOREPKINA, S. KLYMENKO
MODELING OF OBLIQUE CUTTING FORCES USING A ROUND PCBN INSERT TOOL DURING INTERRUPTED TURNING OF HARDENED STEEL

This study presents a numerical simulation of the cutting process of hardened steel using tools with varying rake angles, equipped with polycrystalline cubic boron nitride (PcBN) inserts. The DEFORM-3D finite element software was used to analyze the stress-strain state in the primary and secondary deformation zones during turning under impact loading. The results demonstrate that using tools with an inclined cutting edge significantly reduces impact load, cutting force, and signal variation, indicating improved process stability. It was established that increasing the rake angle up to 60° leads to a reduction in the normal components of the cutting force and the intensity of material deformation. The simulation results are confirmed by experimental data, supporting the recommendation of oblique cutting as an effective method for machining hardened steels under dynamic loading conditions.

Keywords: oblique cutting, cutting tool, cutting conditions, hardened steel, modeling, stress-strain state

Вступ. Розвиток сучасного машинобудування багато в чому обумовлено підвищенням вимог до експлуатаційних характеристик деталей машин та механізмів і, відповідно, застосуванням їх виготовлення конструкційних матеріалів з високими фізико-механічними характеристиками. До таких конструкційних матеріалів відносяться загартовані сталі. Обробка цих матеріалів характеризується порівняно низькою продуктивністю різання, що з інтенсивним зносом ріжучого інструменту. Найбільшу ефективність при обробці загартованих сталей проявляють різці, оснащені полікристалічним надтвердим матеріалом на основі кубічного нітриду бору (ПКНБ) [1].

Для підвищення ефективності обробки заготовок із загартованих сталей запропоновані спеціальні різальні інструменти, що оснащені ПКНБ. Принципові особливості роботи цих інструментів обумовлені мінімізацією напруженого деформованого стану у зоні стружкоутворення. До вищевказаних різальних інструментів відносяться різці з нахиленою ріжучою кромкою. Напружено-деформований стан у зоні стружкоутворення визначається механічними характеристиками матеріалу заготовки та умовами різання. Зрештою, напружено-деформований стан відповідає за ефективність обробки, зокрема, за енерговитрати в процесі різання, контактне навантаження робочих поверхонь ріжучого інструменту та ККД інструменту. Модельні дослідження, особливо з використанням методу кінцевих елементів, є перспективними для аналізу явищ, що відбуваються в процесі різання. В даний час є велика кількість робіт, наприклад [2-4], що описують моделювання обробки методом кінцевих елементів. В [5] проведено чисельне моделювання жорсткого точіння сталі AISI 52100, H13, D2, 4340, досліджено вплив геометрії інструмента та твердості заготовки на силу різання. Виявлено, що найбільший вплив має подача, а також геометрія інструмента, особливо негативний кут нахилу.

У роботі [6] представлені моделі скінченних елементів для прогнозування залишкових напружень, що виникають у заготовці з нержавіючої сталі 16MnCr5, обробленій твердим точінням з постійною швидкістю різання, подачею та глибиною різання різальними інструментами PcBN, які мають кути переднього нахилу в діапазоні від 15° до -30° з кроком 5° . Результати показують, що існує певна кореляція між кутом переднього нахилу інструменту та залишковими напруженнями. Чим негативніший кут переднього нахилу, тим вищі прогнозуються стискальні напруження в заготовці.

В роботі [7] досліджено вплив змінних процесу обробки (швидкості подачі) на складові сили різання, вібрації та шорсткість обробленої поверхні під час токарної обробки загартованої сталі ХВГ (60–62 HRC) з використанням круглих пластин cBN-Si₃N₄.

Однак у цих роботах, у основаному, аналізувалися характеристики процесу ортогонального різання, а закономірності різання інструментами, які працюють за косокутною схемою вивчені меншою мірою.

Метою роботи є дослідження впливу величини кута нахилу різальної кромки на сили різання при точінні з ударом загартованої сталі.

Методика досліджень. При моделюванні використовувався багатоцільовий пакет кінцево-елементних розрахунків DEFORM-3D. Для оцінки впливу геометрії інструменту на силові параметри при ударі виникненням якого супроводжується врізання інструменту в заготовку та напруження в зоні стружкоутворення завдання вирішувалося в тривимірній постановці.

Радіус заокруглення різальної кромки $\rho = 10$ мкм, фаска зносу приймалася рівною нулю. Таке спрощення допустиме, оскільки метою моделювання є визначення напружено-деформованого стану в зоні первинних деформацій під час обробки гострозаточеним різцем. Різальний інструмент моделювався як абсолютно тверде тіло. Параметри фрагмента заготівлі: довжина $L = 1,2$ мм, ширина $b = 0,6$ мм, товщина $a = 0,2$ мм. При вирішенні механічного завдання граничні умови полягали в жорсткому закріпленні опорної поверхні заготовки та переміщенні абсолютно жорсткого інструменту вздовж осі X заготовки з постійною швидкістю $v = 2$ мм/мс, глибина різання (в даному випадку дорівнює товщині різі) $t = 0,1$ мм. Кут нахилу різця при моделюванні косокутного різання становив λ до 60° .

Дослідження закономірностей процесу різання проводилось при точінні зразків з загартованої сталі ХВГ (50–55 HRC).

Отримані результати. Суттєві відмінності у стружкоутворенні для випадків моделюванні різання з ударом за ортогональною та косокутною схемами потребують детального аналізу напружено-деформованого стану оброблюваного матеріалу та характеристик динаміки врізання інструменту.

Проаналізуємо момент врізання для обох типів інструменту.

При обробці з динамічними навантаженнями важливою відмінністю ортогонального різання за ортогональною від косокутного є те, що контактна пляма на інструменті утворюється при врізанні не поступово з наростанням товщини зрізу, а миттєво.

При врізанні інструментів (рис. 1) в момент контакту та початку пластичної деформації матеріалу сила різання P_z становить: для різця з $\lambda = 0^\circ$ – 150 Н ($2,7e-5$ с контакту), для різця з $\lambda = 45^\circ$ – 55 Н ($2,65e-5$ с контакту). Для моменту повного врізання інструментів ці характеристики становить 176 Н ($7,5e-5$ с) та 137 Н ($7,84e-5$ с), а інтенсивність наростання сили різання становить $5,56e6$ Н/с та $2,01e6$ Н/с відповідно, тобто моделювання демонструє суттєво менше (до 3-х разів) значення імпульсу сили різання в момент врізання інструменту, що працює за косокутною схемою різання.

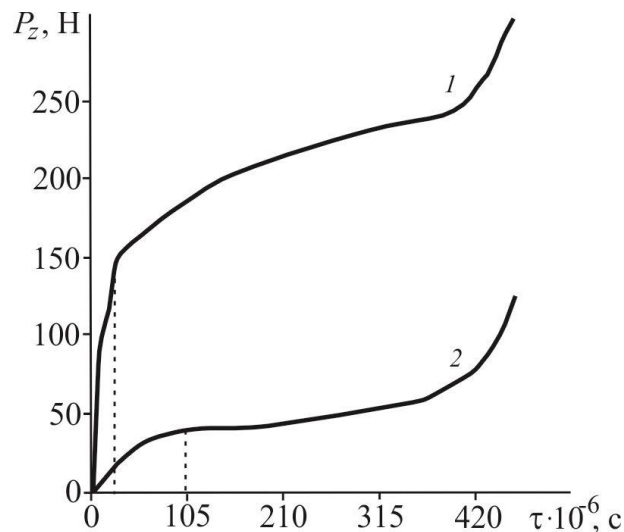


Рис. 1 – Величини тангенційної складової P_z сили різання для початкового моменту обробки: 1– $\lambda=0^\circ$; 2– $\lambda=45^\circ$

Порівняльна оцінка ефективних напружень демонструє, що для зони первинних деформацій характерним значенням цього показника є 1420–1720 МПа (ортогональне різання) та 1270–1590 МПа (косокутне різання). Величини ефективної деформації також мають суттєві відмінності і в зоні вторинних деформацій вони за рахунок тангенційної складової переміщень оброблюваного матеріалу є вищими для інструменту, що працює за косокутною схемою різця ($\epsilon = 2,50$ – $3,15$), у порівнянні з інструментом, що працює за ортогональною семою різання ($\epsilon = 2$).

При врізанні інструмента в заготовку ударний імпульс призводить до виникнення автоколивань в системі різець-динамометр. При реєстрації сигналів від динамометра відповідно спостерігається не лише складові сили різання, а й додаткові компоненти сигналу, пов'язані з пружною деформацією вимірювальної системи при її коливаннях. Приклад такої суперпозиції сигналів наведено на рис. 2.

З метою визначення частини сигналу, що відображає безпосередньо дію сили різання було проведено додаткові дослідження.

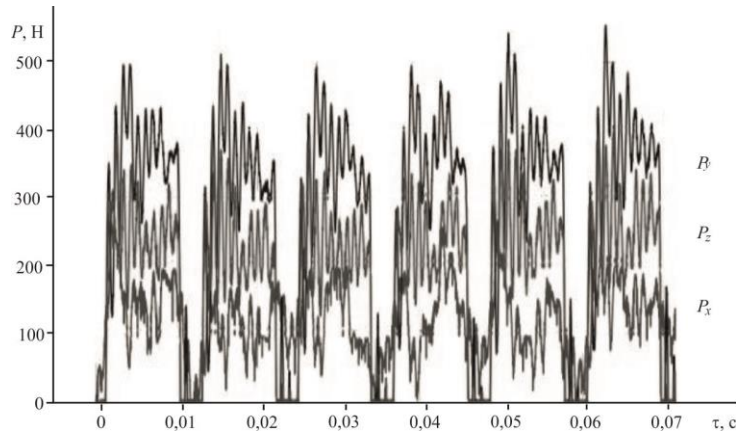


Рис. 2 – Складові сили різання при обробці з ударом ($v = 220$ м/хв, $t = 0,2$ мм, $S = 0,38$ мм/об, $h_z = 0$ мм)

Як відомо, ударом по матеріальній точці називається фізичний процес, що відбувається за досить малий час τ , в результаті якого швидкість точки змінюється на кінцеву величину та напрямком. При цьому сила $F_{уд}$, що діє на матеріальну точку за малий час удару і досягає досить великих значень, називається ударною силою. За час удару τ миттєва сила змінюється від нульового до максимального значення точки, а потім знову до нульового, тобто ця сила є змінною за часом. Графічно ударна сила представляється у вигляді імпульсного гребеня, пік якого відповідає максимальному значенню цієї сили (рис. 3, а).

Інтеграл від ударної сили $F_{уд}$ на малому проміжку часу τ (часу удару) називається ударним імпульсом і позначається як $S_{уд} = \int_0^{\tau} F_{уд}(t) dt$.

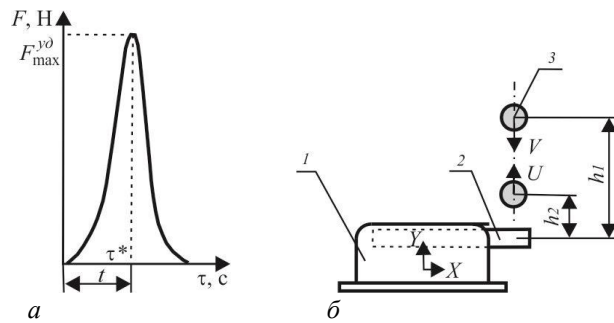


Рис. 3 – Графічне представлення дії ударної сили (а), схема імітації ударного імпульсу при врізанні інструменту (б)

Визначимо величину ударного імпульсу при імітації врізання різця. Даний ефект реалізовано при падінні на інструмент вантажу (кульки) вагою 0,05 кг з висоти 0,5 м. Схему дослідів наведено на рис. 3, б, де 1 – динамометр УДМ-600, 2 – державка різця, 3 – кулька. Розрахункове значення визначається виразом (1), де v , u та $h_1 = 0,5$ м, $h_2 = 0,14$ – швидкості в момент падіння і пружного відскоку кульки та висота її падіння і відскоку:

$$F\Delta t = \Delta p = mv = m(v + u) = m(\sqrt{2gh_1} + \sqrt{2gh_2}), \quad (1)$$

$$S_{уд} = 0,05 (\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 0,5} + \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 0,14}) = 0,24 \text{ Н} \cdot \text{с} \quad (2)$$

Одночасно величину $S_{уд}$ можна визначити з експериментальних даних, шляхом чисельного інтегрування залежності сили від часу, зареєстрованих при фіксації сигналу з динамометру за допомогою АЦП ADA-1406 на частоті 350 кГц. Аналіз графіка (рис. 4) дозволяє встановити, що час дії сили (першого піку на графіку) становив 0,84 мс, а максимальне значення сили удару становило 512 Н. Таким чином величина ударного імпульсу сили, визначена експериментально дорівнює $S_{уд} = 0,215$ Н·с.

Враховуючи, що різниця між експериментальним та розрахованим значенням імпульсу сили складає біля 10%, можна зробити висновок, що безпосередньо явищу удара відповідає лише перший пік на графіку залежності сили різання від часу, а інші гармоніки сигналу відображають затухаючі коливання в системі різець-динамометр після дії ударної сили.

Оскільки при різанні після врізання і удару на різець продовжує діяти сила різання, можна прийняти у якості моделі сигналу діаграму на рис. 5 [8] і в подальшому аналізувати результати вимірювань у відповідності з цією моделлю.

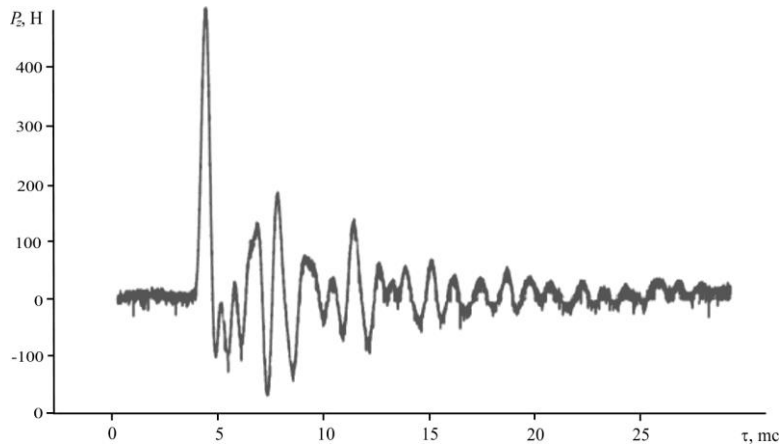


Рис. 4–Сигнал динамометру, отриманий при фіксації ударного імпульсу

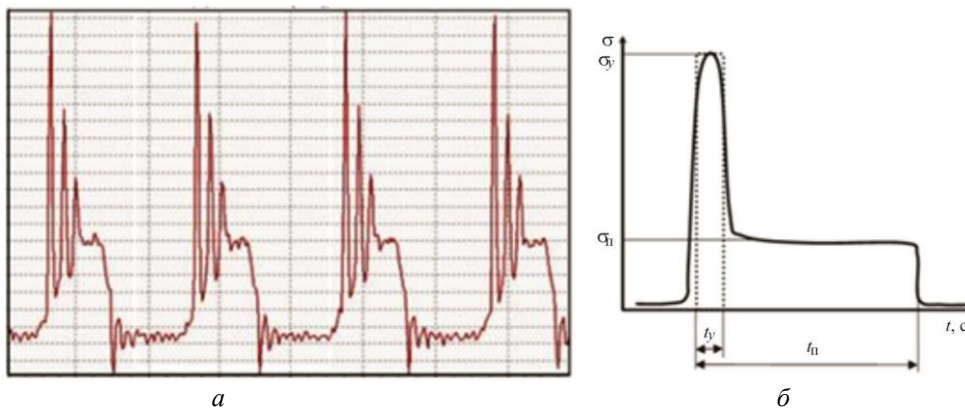


Рис. 5 –. Реальна діаграма отримана при визначенні сили різання (а) та її ідеалізоване відображення (б)

Проаналізуємо у відповідності з наведеною вище методикою сигнал складової сили різання P_z , отриманий при різанні інструментом з пластиною RNUN-120400 з ПКНБ Vorsinit за умов $\lambda = 0^\circ$, $v = 120$ м/мин, $t = 0,2$ мм, $S = 0,19$ мм/об, $h_z = 0$ мм. На рис. 6, а зображено сигнал, зафіксований при проходженні інструменту скрізь масив оброблюваного матеріалу в проміжку між двома пазами. Величина першого імпульсу на графіку становить $P_{зуд} = 400$ Н при середньому значенні сигналу і, відповідно, складової P_z на ділянці $t = 0,010-0,024$ с $P_{зср} = 248$ Н та середньоквадратичному відхиленні $\sigma_{Pz} = 70$ Н. Ударний коефіцієнт становить $K_y = 400/248 = 1,61$.

Для порівняння наведемо аналогічну діаграму для випадку обробки за косокутного різання інструментом, оснащеним пластиною того ж типу-розміру (рис. 6, б).

Відразу ж помітно, що завдяки кінематиці врізання такого інструменту відсутній ударний імпульс, а величина складової P_z та дисперсія значень сигналу, яка характеризує стабільність процесу різання, суттєво нижча – $P_{зср} = 181$ Н при середньоквадратичному відхиленні $\sigma_{Pz} = 13$ Н. Наглядне порівняння типів сигналів сили різання при обробці досліджуваними інструментами наведено на рис. 7.

Оскільки обробка за косокутною схемою характеризується значними перевагами, розглянемо більш детально силові параметри саме такого процесу. Залежність складових сили різання від кута нахилу різальної кромки наведена на рис. 8 [1]. Слід відзначити, що зростання кута нахилу різальної кромки λ приводить до інтенсивного зниження складових P_y та P_z при зростанні складової P_x . Перші дві складові знижуються внаслідок зменшення ширини зрізу та ступеню деформації оброблюваного матеріалу в зоні первинних деформації, що є важливою перевагою косокутної схеми різання у порівнянні з ортогональною.

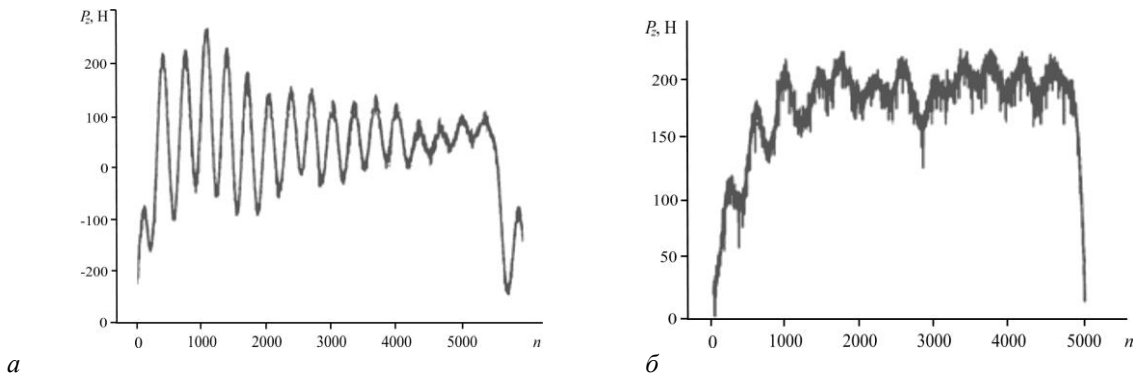


Рис. 6 – Сигнал сили різання при обробці інструментами з $\lambda = 0^\circ$ (а) та $\lambda = 50^\circ$ (б)

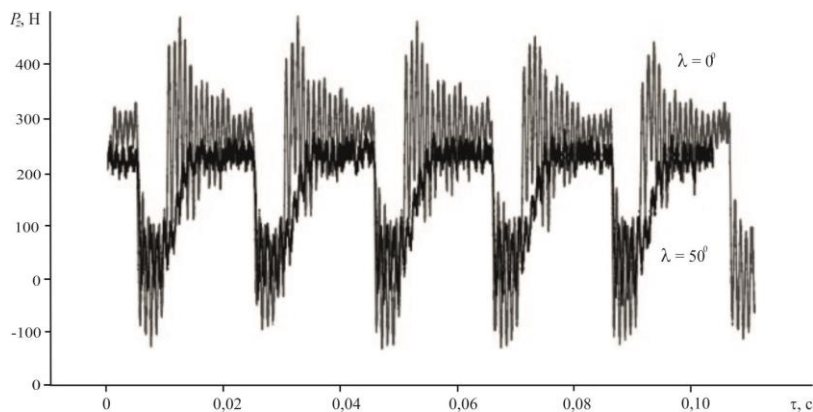


Рис. 7. – Сигнали сили різання при обробці інструментами з кутами нахилу різальної кромки $\lambda = 0^\circ$ (а) та $\lambda = 50^\circ$ (б)

Розроблена в [1] модель дозволяє оцінити вплив кута нахилу різальної кромки інструменту на ступінь пластичної деформації оброблюваного матеріалу. Зростання кута λ викликає зменшення відносного зсуву в нормальному напрямку ϵ_N , що пов'язано з відхиленням напрямку сходу стружки від нормалі до різальної кромки, зменшення нормальної складової сили тертя на передній поверхні інструменту, що призводить до збільшення кута дії ω і відповідного зростання кута зсуву в нормальній до різальної кромки площин. У міру збільшення кута λ , зростання кута тертя η призводить до більш інтенсивної деформації матеріалу при його переміщенні вздовж різальної кромки і, відповідно, до зростання дотичної складової відносного зсуву ϵ_T .

Ступінь деформації матеріалу, що визначається сумарним відносним зсувом ϵ_Σ також знижується, хоча і меншою мірою, ніж ϵ_N і усадка стружки в нормальному напрямку ζ . Розрахунок показує, що для зазначених умов зі збільшенням λ від 20° до 60° величини ϵ_N , ϵ_Σ та ζ зменшуються відповідно у 1,6, 1,4, 2,67, а ϵ_T зростає у 1,63 рази.

Діаграми складових сили різання для різних кутів нахилу різальної кромки наведено на рис. 9.

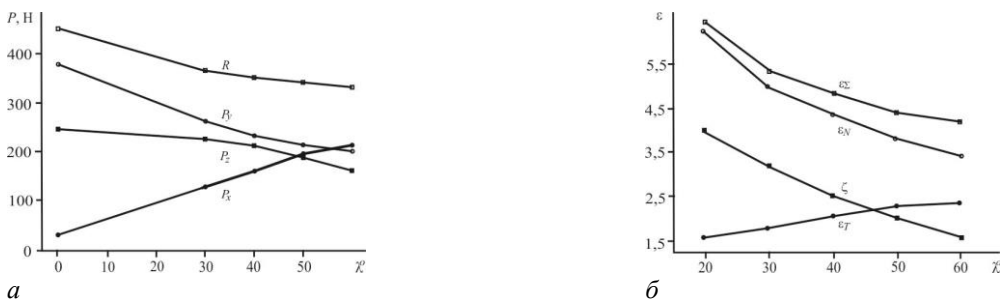


Рис. 8–Експериментальна залежність впливу кута нахилу різальної кромки λ на складові сили різання ($S = 0,19$ мм/об, $t = 0,2$ мм, $v = 120$ м/хв) (а), розрахункова залежність ступеню пластичної деформації оброблюваного матеріалу від кута нахилу різальної кромки λ (б)

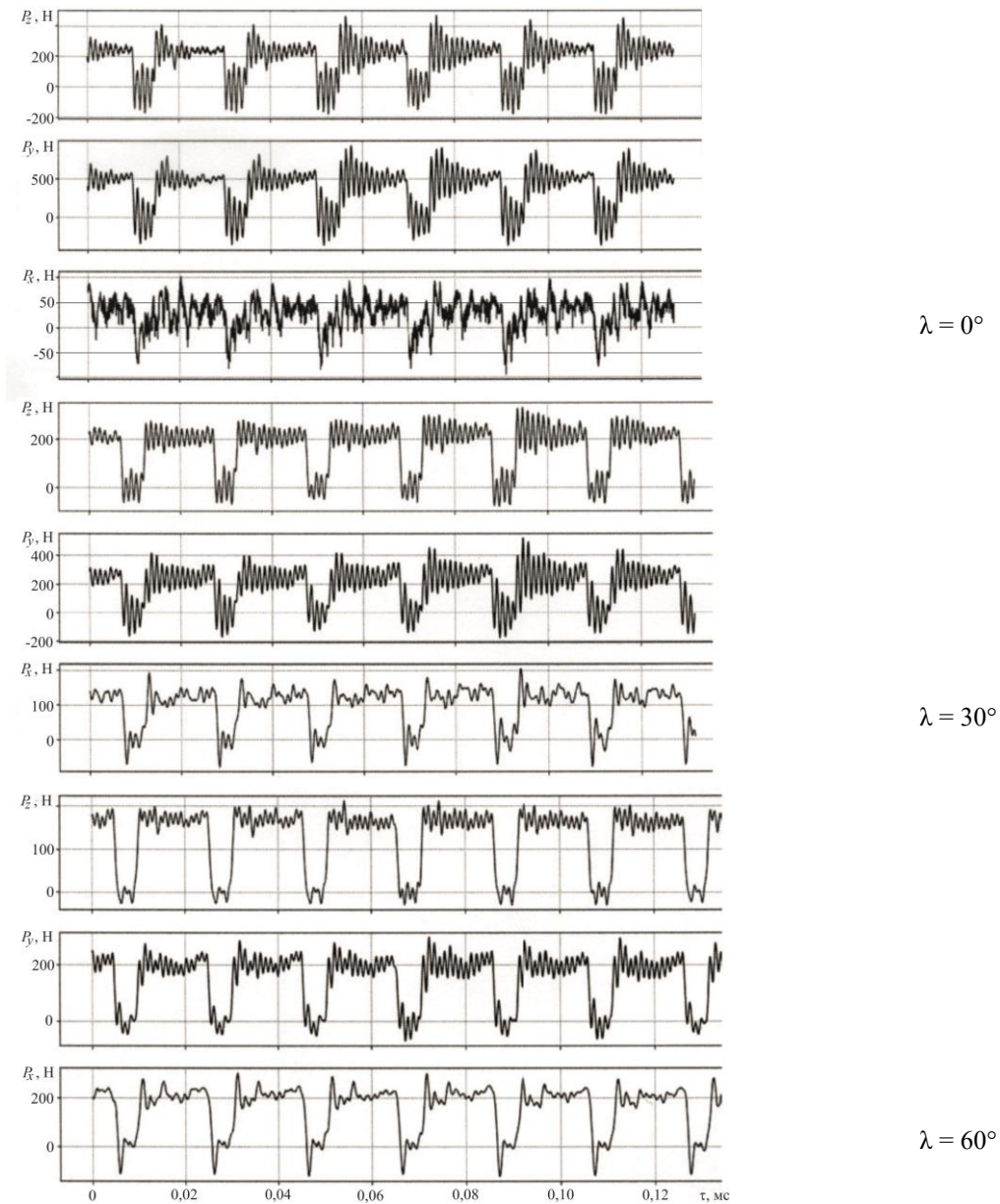


Рис. 9–Змодельовані складові сили різання для інструментів з кутами нахилу різальної кромки ($S = 0,19$ мм/об, $t = 0,2$ мм, $v = 120$ м/хв)

Результати моделювання показали, що середні значення сили, що діє на інструмент під час різання, вище величини періодичної сили, що обурює.

Збільшення кута нахилу різальної кромки різця у діапазоні до 60° при переході від ортогонального різання до косокутного призводить до зменшення складових P_z , P_y орієнтовно у 1,4 та 2,4 рази, відповідно, а також до зростання складової сили різання P_x у 7 разів. Отримані модельні результати близькі до експериментальних. Потрібно вказати, що найбільш значимо змінюється складова сили різання P_x , що обумовлено зростанням ступеню пластичної деформації оброблюваного матеріалу у зоні різання, та відповідно сили тертя у напрямку подачі при збільшенні кута нахилу різальної кромки різця.

Висновок.

З використанням багатоцільового пакету кінцево-елементних розрахунків DEFORM-3D проаналізовано процес врізання для інструментів, оснащених різальними пластинами RNUN-120400 з ПКНБ Borsinit, які працюють за ортогональною та косокутною схемами різання, при точінні загартованої сталі динамічними навантаженнями: – в момент контакту та початку пластичної деформації матеріалу сила різання P_z становить для різця з 0° – 150 Н, для різця з 5° – 55 Н; – для моменту повного врізання інструментів ці характеристики становить 176 Н та 137 Н, а інтенсивність наростання сили різання становить $5,56e6$ Н/с та $2,01e6$ Н/с відповідно. Таким чином, значення імпульсу сили різання в момент врізання інструменту, що

працює за косокутною схемою різання, суттєво менше ніж для інструменту, що працює за ортогональною схемою різання.

Для зони первинних деформацій характерні значення ефективних напружень: – для ортогонального різання 1420–1720 МПа; – для косокутного різання 1270–1590 МПа. В зоні вторинних деформацій ефективні деформації є вищими для інструменту, що працює за косокутною схемою ($\epsilon = 2,50-3,15$), у порівнянні з інструментом, що працює за ортогональною схемою різання ($\epsilon = 2$), за рахунок тангенційної складової переміщень оброблюваного матеріалу.

Встановлено, що завдяки кінематиці врізання інструменту, що працює за косокутною схемою різання, відсутній ударний імпульс, а величина складової P_z та дисперсія значень сигналу, яка характеризує стабільність процесу різання, суттєво нижча, ніж для випадку використання інструмента, що працює за ортогональною схемою різання.

Зростання кута нахилу різальної кромки у діапазоні $(0-60)^\circ$ викликає: – зменшення відносного зсуву в нормальному напрямку, що пов'язано з відхиленням напрямку сходу стружки від нормалі до різальної кромки, зменшення нормальної складової сили тертя на передній поверхні інструменту, що призводить до збільшення кута дії і відповідного зростання кута зсуву в нормальній до різальної кромки площині; – зростання кута тертя, що призводить до більш інтенсивної деформації матеріалу при його переміщенні вздовж різальної кромки і, відповідно, до зростання дотичної складової відносного зсуву; – зниження ступеню деформації матеріалу, що визначається сумарним відносним зсувом; – зменшення складових P_z , P_y у 1,4 та 2,4 рази відповідно, а також до зростання складової сили різання P_x у 7 разів.

Список літератури:

1. Манохін, А.С. Підвищення продуктивності чистового точіння загартованих сталей косокутним однокромочним інструментом з ПНТМ на основі КНБ : автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.С. Манохін. – К. : ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України, 2009. – 21 с.
2. Qian, L., & Hossan, M. R. (2007). Effect on cutting force in turning hardened tool steels with cubic boron nitride inserts. *Journal of Materials Processing Technology*, 191(1-3), 274–278.
3. Kundrák, J., Szabó, G., & Markopoulos, A. P. (2016). Numerical Investigation of the Influence of Tool Rake Angle on Residual Stresses in Precision Hard Turning. *Key Engineering Materials*, 686, 68–73.
4. Stakhniv, N. E., Devin, L. N., Petrusha, I. A., & Osipov, A. S. (2009). Dynamic phenomena in finish turning of hardened steels with cBN-based tools. *Journal of Superhard Materials*, 31(3), 196–202.
5. Манохін, А. С. Інструмент, виготовлений із порошків кубічного нітриду бору з CVD покриттям / А. С. Манохін, Ю. О. Мельничук, С. А. Клименко, М. П. Семенко, Г. А. Петасюк, А. Г. Филипович, С. Ан. Клименко, Ю. Е. Рижов // Інструментальне матеріалознавство : зб. наук. праць. – К. : ІНМ НАН України, 2023. – Вип. 26. – С. 305–314.
6. Манохін, А. С. Вплив коефіцієнту тертя на параметри механіки контактної взаємодії у зоні різання загартованої сталі інструментом із PcBN / А. С. Манохін, С. А. Клименко, А. О. Чумак, Ю. Е. Рижов // Сучасні питання виробництва і ремонту в промисловості та на транспорті : мат. 24-го Міжнарод. наук.-техн. семінару, 26–27 березня 2024 р., м. Київ. – К. : АТМ України, 2024. – С.
7. Manokhin, A. S. Tribology of cutting by tools equipped with cBN-based PSHM /A. S. Manokhin, S. A. Klimenko, M. Yu. Kopeikina, S. An. Klimenko, V. V. Poshchupkin, M. M. Lyakhovitskii // *J. Superhard Mat.* – 2014. – Vol. 36, № 2. – P. 124–135

References (transliterated):

1. Manokhin, A.S. Pidvyshchennia produktyvnosti chystovoho tochinnia zahartovanykh stalei kosokutnym odnokromochnym instrumentom z PNTM na osnovi KNB : avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk / A.S. Manokhin. – K. : INM im. V.M. Bakulia NAN Ukrainy, 2009. – 21 s.
2. Qian, L., & Hossan, M. R. (2007). Effect on cutting force in turning hardened tool steels with cubic boron nitride inserts. *Journal of Materials Processing Technology*, 191(1-3), 274–278.
3. Kundrák, J., Szabó, G., & Markopoulos, A. P. (2016). Numerical Investigation of the Influence of Tool Rake Angle on Residual Stresses in Precision Hard Turning. *Key Engineering Materials*, 686, 68–73.
4. Stakhniv, N. E., Devin, L. N., Petrusha, I. A., & Osipov, A. S. (2009). Dynamic phenomena in finish turning of hardened steels with cBN-based tools. *Journal of Superhard Materials*, 31(3), 196–202.
5. Manokhin, A.S., Melniichuk, Yu.O., Klymenko, S.A., Semenko, M.P., Petasiuk, H.A., Filipovych, A.H., Klymenko, S.An., Ryzhov, Yu.E. Instrument, vyhotovleni iz poroshkiv kubichnoho nitridu boru z CVD pokryttiam / A.S. Manokhin, Yu.O. Melniichuk, S.A. Klymenko, M.P. Semenko, H.A. Petasiuk, A.H. Filipovych, S.An. Klymenko, Yu.E. Ryzhov // *Instrumentalne materialoznavstvo : zb. nauk. prats.* – K. : INM NAN Ukrainy, 2023. – Vyp. 26. – S. 305–314.
6. Manokhin, A.S., Klymenko, S.A., Chumak, A.O., Ryzhov, Yu.E. Vplyv koefitsientu tertia na parametry mekhaniky kontaktnoi vzaiedodii u zoni rizannia zahartovanoi stali instrumentom iz PcBN / A.S. Manokhin, S.A. Klymenko, A.O.

Chumak, Yu.E. Ryzhov // Suchasni pytannia vyrobnytstva i remontu v promyslovosti ta na transporte : mat. 24-ho Mizhnarod. nauk.-tekh. seminaru, 26–27 bereznia 2024 r., m. Kyiv. – K. : ATM Ukrainy, 2024. – S.

7. Manokhin, A. S. Tribology of cutting by tools equipped with cBN-based PSHM /A. S. Manokhin, S. A. Klimenko, M. Yu. Kopeikina, S. An. Klimenko, V. V. Poshchupkin, M. M. Lyakhovitskii // J. Superhard Mat. – 2014. – Vol. 36, № 2. – P. 124–135

Надійшла (received) 06.10.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Клименко Сергій Анатолійович (Klymenko Sergii) – член-кореспондент НАН України, доктор технічних наук, професор, заступник директора Інституту надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України з наукової роботи, м. Київ, вул. Автозаводська, 2, Україна. <https://orcid.org/0000-0003-1464-3771>. E-mail: atmu@meta.ua.

Манохін Андрій Сергійович (Manokhin Andrii) – кандидат технічних наук, старший дослідник, старший науковий співробітник Інституту надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, м. Київ, вул. Автозаводська, 2, Україна. <https://orcid.org/0000-0003-1479-8482>. E-mail: the.manokhin@gmail.com

Чумак Анатолій Олександрович (Chumak Anatolii) – кандидат технічних наук, науковий співробітник Інституту надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, м. Київ, вул. Автозаводська, 2, Україна. <https://orcid.org/0000-0001-9054-3196>. E-mail: chumak1826ar@gmail.com

Копейкіна Марина Юріївна (Kopeikina Maryna) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник Інституту надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, м. Київ, вул. Автозаводська, 2, Україна. <https://orcid.org/0000-0002-5956-5503>. E-mail: atmu1@meta.ua

Клименко Сергій Анатолійович (Klymenko Serhii) – кандидат технічних наук, старший дослідник, старший науковий співробітник Інституту надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, м. Київ, пр. Перемоги, 37, Україна. <https://orcid.org/0000-0002-7913-5519>. E-mail: alcon1202@ukr.net