

**МАНОХІН А.С., МЕЛЬНИЙЧУК Ю.О., КЛИМЕНКО С.Ан., КЛИМЕНКО С.А., ЧУМАК А.О., РИЖОВ Ю.Е., КАМЧАТНА-СТЕПАНОВА К.В.**

## **ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ КОНТАКТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТВЕРДОГО ТОЧІННЯ**

**Анотація.** При обробці загартованої сталі інструментом з ПНТМ на основі КНБ в умовах близьких до ортогонального різання визначені сили різання в залежності від величини подачі та швидкості різання. Встановлено величину контактних напружень, коефіцієнту тертя та довжину контакту стружки з передньою поверхнею різця для швидкості різання 100 м/хв та отримано шліфи стружки, які демонструють морфологію стружки. Експериментально встановлено, що при обробці загартованої підшипникової сталі величина тангенційної та радіальної складових сили різання, що діють на передній поверхні інструменту при подачі 0,05 мм/об та швидкості різання 100 м/хв становить 125 Н/мм та 42 Н/мм відповідно. Середній коефіцієнт тертя при цьому становить 0,33. Показано, що для вимірювання довжини контакту стружки з передньою поверхнею різця доцільно використовувати тонкі металеві PVD покриття товщиною ~ 0,1 мкм, що дозволяє підвищити точність визначення даного параметру. Зразки стружки, отримані у досліджуваному діапазоні умов обробки свідчать про сегментний тип стружкоутворення. Вимірювання товщини стружки отриманої при подачі 0,05 мм/об та швидкості різання 100 м/хв мають товщину від 40 до 80 мкм.

**Ключові слова:** обробка різанням, сили різання, стружкоутворення, надтверді матеріали, загартована сталь, коефіцієнт тертя.

**MANOKHIN A.S., MELNIYCHUK Y.O., KLIMENKO S.An., KLIMENKO S.A., CHUMAK A.O., RYZHOV Y.E., KAMCHATNA-STEPANOVA K. V.**  
**EXPERIMENTAL ESTIMATION OF HARD TURNING CONTACT CHARACTERISTICS**

**Annotation.** When processing hardened steel with a PcBN cutting tool in conditions close to orthogonal cutting, the cutting forces are determined depending on the amount of feed and cutting speed. The value of contact stresses, friction coefficient and the length of contact of the chip with the front surface of the cutter for a cutting speed of 100 m/min were determined, and the sections of the chip were obtained, which demonstrate the morphology of the chip. It was experimentally established that when processing hardened bearing steel, the magnitude of the tangential and radial components of the cutting force acting on the front surface of the tool at a feed of 0.05 mm/rev and a cutting speed of 100 m/min is 125 N/mm and 42 N/mm, respectively. The average coefficient of friction is 0.33. It is shown that to measure the contact length of the chip with the front surface of the cutter, it is advisable to use thin metal PVD coatings with a thickness of ~ 0.1 μm, which allows to increase the accuracy of determining this parameter. Chip samples obtained in the investigated range of processing conditions indicate a segmental type of chip formation. Chip thickness measurements obtained at a feed of 0.05 mm/rev and a cutting speed of 100 m/min range from 40 to 80 μm in thickness.

**Key words:** machining, cutting forces, chip formation, superhard materials, hardened steel, friction coefficient.

**Вступ.** Величина сил різання є однією з головних показників процесу різання, через яку можна судити про трибологічні процеси, які протікають в зоні контакту стружки із поверхнями інструменту. Розрахунок даних характеристик є важливим елементом проектування технологічних процесів, що дає можливість заздалегідь визначити рівень навантажень на обладнання, точність обробки, ймовірність руйнування різців. Для визначення сили різання необхідно експериментально знайти усадку стружки, коефіцієнт тертя та довжину контакту стружки з різцем [1-3] або проводити моделювання методом скінчених елементів [4, 5]. В останньому випадку, який безперечно має ряд переваг, в якості граничних умов розрахунку також необхідно знати параметри моделі, що описує процеси тертя [6] на контактних площадках та, що особливо важливо, модель оброблюваного матеріалу [4,5,10]. Інші аспекти контактної взаємодії інструменту з ПНТМ на основі КНБ з загартованою сталлю під час обробки різанням такі як усадка стружки, довжина контакту стружки з передньою поверхнею також досліджувались у літературі, хоча дані наведені у різних джерелах мають розбіжності [8-13]. Проведення експериментальних досліджень параметрів, що характеризують процес обробки надає можливість провести калібрування аналітичних та числових моделей з метою підвищення точності розрахунків та наближення фізичних параметрів моделей до реальних процесів, що мають місце під час обробки різанням.

**Мета дослідження.** Дане дослідження спрямоване на встановлення основних параметрів механіки контактної взаємодії інструмента з оброблюваним матеріалом які в подальшому можуть бути використані для аналітичних розрахунків при оптимізації процесу різання виробів з загартованої сталі інструментом з PcBN.

**Методика.** Використано державки TRDNN 2525M07 та TRDNN 2525M09 з різальними пластинами PcBN Borsinit RNMN 070300 з покриттями (при визначенні довжини контакту стружки з передньою поверхнею інструменту) та RNMN 090400 при вимірюванні сил різання. Кріплення пластин здійснювали механічним способом. Геометричні параметри інструмента: передній кут  $\gamma = -10^\circ$ , задній кут  $\alpha = 10^\circ$ . Схема обробки була близькою до ортогонального різання: кільця діаметром 80 мм та товщиною стінки 2,2 мм зі сталі ШХ15 твердістю 60-62 HRC оброблювалися з торця з подачею вздовж осі заготовки, перпендикулярно торцю деталі.

Під час експериментів величина подачі та швидкості різання варіювалась у відповідності з даними в таблиці 1. Обробка проводилася без використання СОЖ.

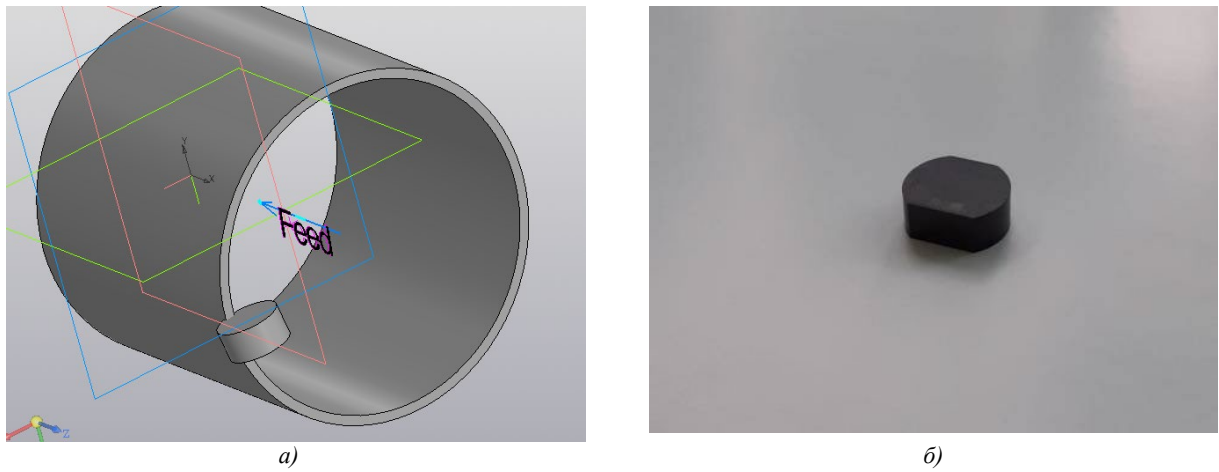


Рис. 1 – Схема розташування та подачі різального інструменту (а) та різальна пластина з прямолінійною кромкою (б)

Таблиця 1 – Умови проведення експериментів

V = 100 м/хв			S = 0,05 мм/об		
S = 0,05 мм/об	S = 0,10 мм/об	S = 0,17 мм/об	V = 62,8 м/хв	V = 100,5 м/хв	V = 158,3 м/хв

Вимірювання сил різання проводили із застосуванням динамометра УДМ-600 з АЦП та підсилювачами. В даному випадку фіксували сигнал по двом каналам з частотою 100 Гц. Приклад зафіксованих діаграм з сигналами головної складової сили різання показано на рис. 2.

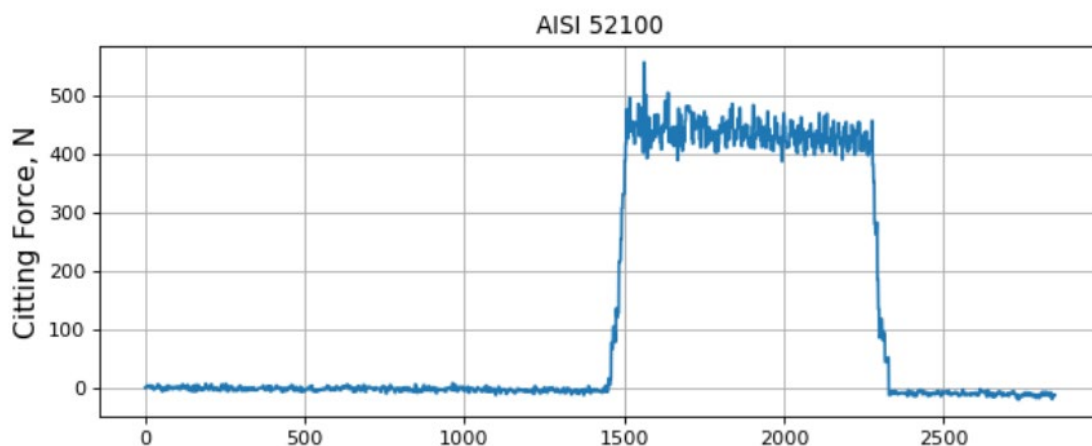
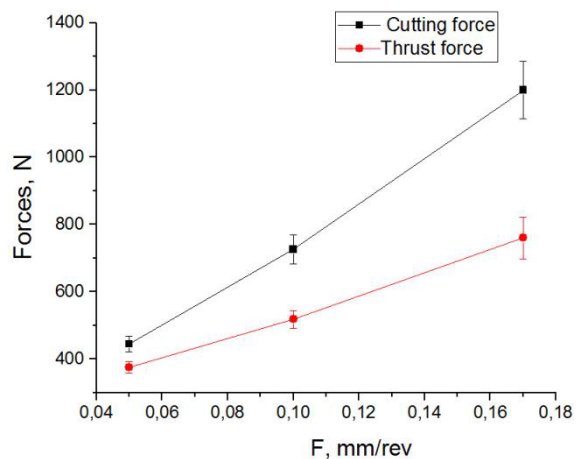


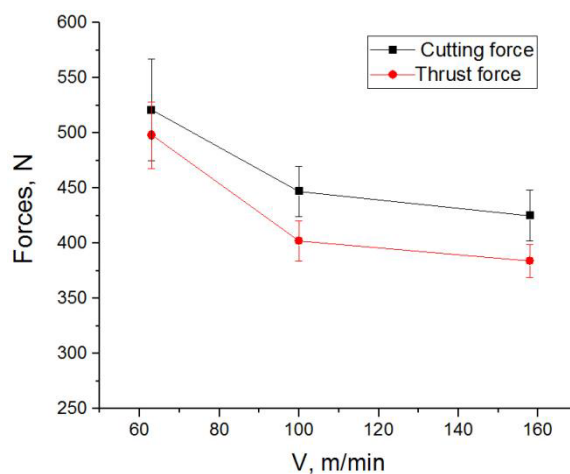
Рис. 2 – Діаграма сили різання

**Експериментальні результати.** Обробка експериментальних даних, отриманих при вимірюванні сигналів сили різання дозволила отримати залежності складових  $P_z$  та  $P_y$  від подачі та швидкості різання, діаграми яких приведено на рис. 3. Відзначимо швидке зниження сили різання в діапазоні швидкостей 60-100 м/хв у порівнянні із зоною високих швидкостей (100 – 160 м/хв) та зростання величини відношення складових  $P_z/P_y$  із зростанням подачі і як наслідок товщини зрізу.

**Стружкоутворення.** На рис. 4 показані шліфи стружок утворених при різанні. Як видно в усьому діапазоні швидкостей різання відбувається формування пилоподібної сегментної стружки. Як зазначається в [14] подібні явища також спостерігаються з деякими м'якими матеріалами при високих швидкостях різання і помірними або великими подачами. У цих випадках концентрація теплової енергії у вузьких смугах зсуву пояснюється недостатнім часом для розсіювання тепла від цих смуг в умовах високої швидкості деформації. Місцеві високі температури та розм'якшення матеріалу таким чином генерується в концентрованій смузі вздовж якої і відбувається формування сегментів стружки. Співпадіння форми та розмірних параметрів стружки отриманої при обробці та при моделюванні методом скінчених елементів зазвичай вважається додатковим критерієм, який дозволяє зробити висновок про відповідність умов моделювання реальним умовам тертя в контактній зоні. Хоча даний аспект і не є превалюючим у порівнянні з контактними характеристиками процесу різання: силами різання, напруженнями, температурою різання та розмірними характеристиками зони контакту.

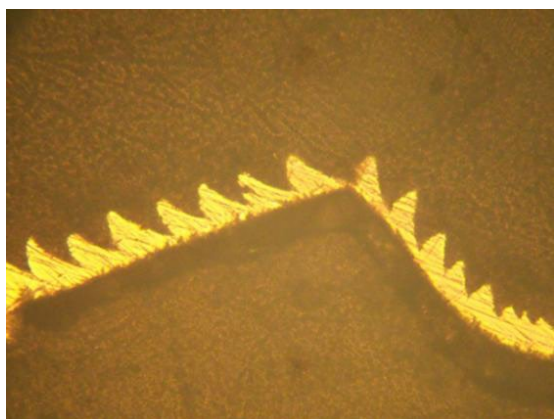


a)



б)

Рис. 3 – Експериментальні значення сил різання в залежності від подачі (а) та швидкості різання (б)



a)



б)

Рис. 4 – Шліфи стружки, отриманої за умов  $S = 0,05$  мм/об та  $v = 100$  м/хв. Збільшення: а -  $\times 250$ , б -  $\times 500$

Під розмірними характеристиками зони контакту розуміється довжина контакту передньої поверхні інструменту зі стружкою ( $L$ ), площа контакту ( $A$ ) та активна довжина різальної кромки ( $b$ ), визначення величини яких безпосередньо в процесі різання достатньо складно.

Визначення величини довжини контакту стружки ( $L$ ) з передньою поверхнею інструментів із ПНТМ на основі КНБ є важливою задачею, оскільки дана величина є одним з найважливіших параметрів, що чинить вплив на сили різання, стійкісні характеристики інструменту, крім того точне визначення цієї величини відіграє значну роль при аналітичних розрахунках та комп'ютерному моделюванні процесу різання.

Найбільш часто довжину контакту стружки з передньою поверхнею визначають аналітично, використовуючи емпіричні формули, отримані за допомогою теоретичного аналізу зони стружкоутворення. Аналіз результатів розрахунків, виконаних з використанням цих формул, показує істотне відмінність один від одного. Тому найбільш достовірними даними будуть експериментальні дані, отримані для кожного окремого випадку обробки.

Для більш кращої візуалізації зони контакту на передню було проведено дві серії випробувань з інструментами, на поверхню інструментів яких, методом вакуум-плазмового магнетронного напилення, наносилися покриття з титану товщиною  $0,12$  мкм та міді товщиною  $2$  мкм. Точіння для отримання слідів контакту проводили на протязі  $5$  сек з подачами  $0,05$ ,  $0,12$  та  $0,17$  мм/об. Порівняння зображень слідів на контактних ділянках дозволяє зробити висновок, що довжина контакту обмежена зоною, де покриття повністю стерте стружкою, а світла зона на мідному покритті виникла внаслідок ковзання стружки яка вже відділилась від передньої поверхні по відносно товстому покритті. Підстава для такого твердження – близькі значення довжин контакту виміряного на повністю стертих ділянках на інструментах з мідним та титановим покриттями (рис. 5).

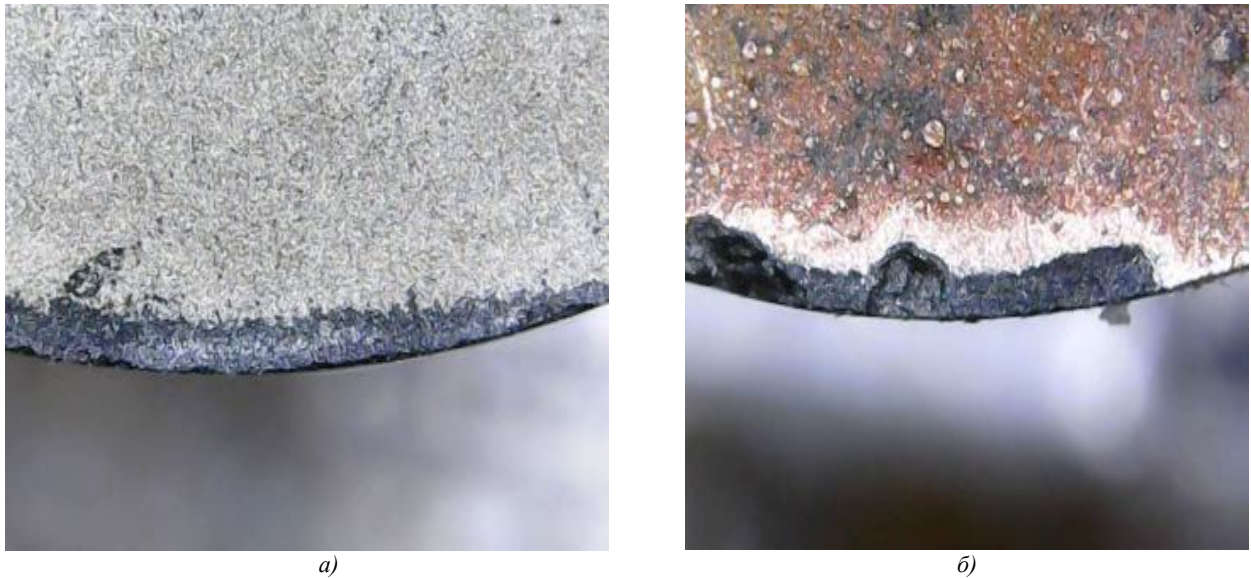


Рис. 5 – Сліди контакту стружки з передньою поверхнею на інструментах з титановим (а) та мідним (б) покриттями при  $S = 0,05$  мм/об.

Якщо ж вимірювати довжину контакту з урахуванням слідів на покритті, то в цьому випадку на мідному покритті цей параметр буде майже в 2 рази вищим. Враховуючи, що умови тестів однакові малоймовірно що покриття товщиною 2 мкм здатне в 2 рази збільшити довжину контакту. Аналіз зображень також дозволяє зробити припущення, що пластичний контакт був обмежений ділянками, на яких спостерігається металевий блиск пов'язаний з адгезією металу до поверхні інструменту. Результати вимірювань повної довжини контакту а також її пластичної ділянки приведені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Вимірювання повної довжини контакту та пластичної ділянки

Тип		$S = 0,05$ мм/об	$S = 0,12$ мм/об	$S = 0,17$ мм/об
Мідне покриття	Довжина пластичної ділянки, мм	-	0,157	0,20
	Повна довжина контакту, мм	0,098	0,234	0,289
Титанове покриття	Довжина пластичної ділянки, мм	0,08	0,165	-
	Повна довжина контакту, мм	0,118	0,227	0,277

Екстраполяція сил різання на нульову товщину зрізу дозволяє визначити складові сили на передній поверхні різця. Для випадку подачі 0,05 мм/об дані величини нормальної та тангенціальної компонент дорівнюють  $Pz_p = 275$  Н та  $Pу_p = 92$  Н. При ширині контакту 2,2 мм та довжині 0,118 мм, середній тиск та тангенціальні напруження в зоні контакту становлять  $p = 1,06$  ГПа та  $\tau = 0,34$  ГПа, а середній коефіцієнт тертя дорівнює 0,33. Питомі (на одиницю ширини різальної кромки) значення компонент на передній поверхні інструменту -  $Pz_p = 125$  Н/мм та  $Pу_p = 42$  Н/мм. Отже отримані дані достатні для верифікації результатів моделювання методом кінцевих елементів.

**Висновки.** Експериментально встановлено, що при обробці загартованої підшипникової сталі величина тангенційної та радіальної складових сили різання, що діють на передній поверхні інструменту при подачі 0,05 мм/об та швидкості різання 100 м/хв становить 125 Н/мм та 42 Н/мм відповідно. Середній коефіцієнт тертя при цьому становить 0,33. Показано, що для вимірювання довжини контакту стружки з передньою поверхнею різця доцільно використовувати тонкі металеві PVD покриття товщиною  $\sim 0,12$  мкм, що дозволяє підвищити точність визначення даного параметру.

Зразки стружки, отримані у досліджуваному діапазоні умов обробки свідчать про сегментний тип стружкоутворення. Вимірювання товщини стружки отриманої при подачі 0,05 мм/об та швидкості різання 100 м/хв мають товщину сегментів від 40 до 80 мкм.

### Список літератури:

1. Мазур М.П. Основи теорії різання матеріалів : підручник [для вищ. навч. закладів] / М.П. Мазур, Ю.М. Внуков, А.І. Грабченко, В.Л. Доброскок, В.О. Залога, Ю.К. Новосолов, Ф.Я. Якубов ; під заг. ред. М.П. Мазура. – 3-е вид. перероб. і доп. – Львів : Новий Світ-2000, 2020. – 471 с.
2. Експериментальні дослідження ефективності інструментів оснащених новими типами композитів з КНБ. Клименко С.А., Клименко С.Ан., Мельничук Ю.О., Манохін А.С., Найденко А.Г. XI Всеукраїнська науково-технічна конференція з міжнародною участю “Процеси механічної обробки, верстати та інструмент” м. Житомир, 5–6 листопада 2021 р.
3. Зорев Н. Н. Развитие науки о резании металлов / Н. Н. Зорев, В. Ф. Бобров, Г. И. Грановский. – М. : Машиностроение, 1967. – 416 с.
4. Ramesh, Anand, 2002, “Prediction of Process-Induced Microstructural Changes and Residual Stresses in Orthogonal Hard Machining,” Ph.D. Dissertation, School of Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology.
5. Huang, Y., 2002, “Predictive Modeling of Tool Wear Rate with Applications to CBN Hard Turning,” PhD Dissertation, Georgia Institute of Technology, Georgia.
6. Криворучко, Д. В. Основи 3D-модельовання процесів механічної обробки методом скінченних елементів: навчальний посібник / Д. В. Криворучко, В.О. Залога, В.Г. Корбач. -Суми: Вид-во СумДУ, 2010. – 208 с.
7. Ghulam Hussain, Mohammed Alkahtani, Marwan Alsultan, Johannes Buhl, Munish Kumar Gupta, Chip formation, cutting temperature and forces measurements in hard turning of Gcr15 under the influence of PcBN chamfering parameters. Measurement, Volume 204, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.112130>.
8. B. Denkena, A. Krödel, A. Heckemeyer. Numerical and experimental analysis of thermal and mechanical tool load when turning AISI 52100 with ground cutting edge microgeometries. CIRP J. Manuf. Sci. Technol., 35 (2021), pp. 494-501.
9. T. Chen, X.L. Liu, G.T. Luo. Numerical simulation and experimental study on hard turning of hardened steel using PCBN cutting tools. Xitong Fangzhen Xuebao / J. Syst. Simul (2009).
10. Domenico Umbrello, Jiang Hua, Rajiv Shivpuri, Hardness-based flow stress and fracture models for numerical simulation of hard machining AISI 52100 bearing steel, Materials Science and Engineering: A, Volume 374, Issues 1–2, 2004, Pages 90-100, ISSN 0921-5093, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2004.01.012>.
11. Tzotzis A, Tapoglou N, Verma RK, Kyratsis P. 3D-FEM Approach of AISI-52100 Hard Turning: Modelling of Cutting Forces and Cutting Condition Optimization. Machines. 2022; 10(2):74. <https://doi.org/10.3390/machines10020074>
12. Ramesh A, Melkote SN (2008) Modeling of white layer formation under thermally dominant conditions in orthogonal machining of hardened AISI 52100 steel. Int J Mach Tools Manuf 48:402–414. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2007.09.007>
13. Thiele JD, Melkote SN, Peascoe RA, Watkins TR (2000) Effect of cutting-edge geometry and workpiece hardness on surface residual stresses in finish hard turning of AISI 52100. J Manuf Sci Eng 122:642–649.
14. Finite Element Modeling of Hard Turning. A Al-Zkeri, I.A. 2007, Ohio State University, 221 p., <https://books.google.com.ua/books?id=cbUTuQAACA AJ>.

### References (transliterated):

1. Mazur M.P. Osnovy teorii rizannia materialiv : pidruchnyk [dlia vyshch. navch. zakladiv] / M.P. Mazur, Yu.M. Vnukov, A.I. Hrabchenko, V.L. Dobroskok, V.O. Zaloha, Yu.K. Novosolov, F.Ia. Yakubov ; pid zah. red. M.P. Mazura. – 3-e vyd. pererob. i dop. – Lviv : Novyi Svit-2000, 2020. – 471 s.
2. Eksperymentalni doslidzhennia efektyvnosti instrumentiv osnashchenykh novymy typamy kompozytiv z KNB. Klymenko S.A., Klymenko S.An., Melniichuk Yu.O., Manokhin A.S., Naidenko A.H. KhI Vseukrainska naukovo-tekhnichna konferentsiia z mizhnarodnoiu uchastiu “Protsey mekhanichnoi obrobky, verstaty ta instrument” m. Zhytomyr, 5–6 lystopada 2021 r.
3. Zorev N. N. Razvytye nauky o rezanyu metallov / N. N. Zorev, V. F. Bobrov, H. Y. Hranovskiy. – M. : Mashynostroenye, 1967. – 416 s.
4. Ramesh, Anand, 2002, “Prediction of Process-Induced Microstructural Changes and Residual Stresses in Orthogonal Hard Machining,” Ph.D. Dissertation, School of Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology.
5. Huang, Y., 2002, “Predictive Modeling of Tool Wear Rate with Applications to CBN Hard Turning,” PhD Dissertation, Georgia Institute of Technology, Georgia.
6. Криворучко, Д. В. Основи 3D-модельовання процесів механічної обробки методом скінченних елементів: навчальний посібник / Д. В. Криворучко, В.О. Залога, В.Г. Корбач. -Суми: Вид-во СумДУ, 2010. – 208 с.
7. Ghulam Hussain, Mohammed Alkahtani, Marwan Alsultan, Johannes Buhl, Munish Kumar Gupta, Chip formation, cutting temperature and forces measurements in hard turning of Gcr15 under the influence of PcBN chamfering parameters. Measurement, Volume 204, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.112130>.
8. B. Denkena, A. Krödel, A. Heckemeyer. Numerical and experimental analysis of thermal and mechanical tool load when turning AISI 52100 with ground cutting edge microgeometries. CIRP J. Manuf. Sci. Technol., 35 (2021), pp. 494-501.

9. T. Chen, X.L. Liu, G.T. Luo. Numerical simulation and experimental study on hard turning of hardened steel using PCBN cutting tools. *Xitong Fangzhen Xuebao / J. Syst, Simul* (2009).
10. Domenico Umbrello, Jiang Hua, Rajiv Shivpuri, Hardness-based flow stress and fracture models for numerical simulation of hard machining AISI 52100 bearing steel, *Materials Science and Engineering: A*, Volume 374, Issues 1–2, 2004, Pages 90-100, ISSN 0921-5093, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2004.01.012>.
11. Tzotzis A, Tapoglou N, Verma RK, Kyratsis P. 3D-FEM Approach of AISI-52100 Hard Turning: Modelling of Cutting Forces and Cutting Condition Optimization. *Machines*. 2022; 10(2):74. <https://doi.org/10.3390/machines10020074>
12. Ramesh A, Melkote SN (2008) Modeling of white layer formation under thermally dominant conditions in orthogonal machining of hardened AISI 52100 steel. *Int J Mach Tools Manuf* 48:402–414. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2007.09.007>
13. Thiele JD, Melkote SN, Peascoe RA, Watkins TR (2000) Effect of cutting-edge geometry and workpiece hardness on surface residual stresses in finish hard turning of AISI 52100. *J Manuf Sci Eng* 122:642–649.
14. Finite Element Modeling of Hard Turning. A Al-Zkeri, I.A. 2007, Ohio State University, 221 p., <https://books.google.com.ua/books?id=cbUTuQAACAAJ>.

Поступила (received) 18.02.2023

#### Відомості про авторів / Information About the Authors

**Манохін Андрій Сергійович (Manokhin Andrey)** – 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](mailto:the.manokhin@gmail.com)

**Мельничук Юрій Олексійович (Melnychuk Yuriy)** – 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/0000-0003-4529-2775>. E-mail: [en22@i.ua](mailto:en22@i.ua)

**Клименко Сергій Анатолійович (Klimenko Sergey)** – 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](mailto:atmu@meta.ua).

**Клименко Сергій Анатолійович (Klimenko Sergey)** – 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](mailto:alcon1202@ukr.net)

**Чумак Анатолій Олександрович (Chumak Anatoliy)** – кандидат технічних наук, молодший 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](mailto:chumak1826ar@gmail.com)

**Рижов Юрій Едуардович (Ryzhov Yuriy)** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, м. Київ, вул. Автозаводська, 2, Україна. <https://orcid.org/0000-0003-1479-9876>. E-mail: [ryzovyr@gmail.com](mailto:ryzovyr@gmail.com)

**Камчатна-Степанова Катерина Валеріївна (Kamchatna-Stepanova Kateryna)** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, вул. Кирпичова, 2, Україна. <https://orcid.org/0000-0001-7825-1238>. E-mail: [katerina.ks@i.ua](mailto:katerina.ks@i.ua)