



На здобуття щорічної премії Президента України  
для молодих вчених 2024 року

**Технологічне забезпечення високопродуктивної  
якісної лезової обробки виробів із  
важкооброблюваних конструкційних сталей  
інноваційними інструментами  
з надтвердих композитів**



Автори роботи:

**Чумак Анатолій Олександрович** – кандидат технічних наук, науковий співробітник  
Інституту надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України

**Коваленко Яна Павлівна** – аспірантка кафедри механічної інженерії Державного університету  
«Житомирська політехніка» МОН України



Одним з визначальних факторів технічного прогресу і, відповідно, економічного розвитку будь-якої країни є стан і рівень розвитку технології обробки матеріалів. Інструментальні надтверді матеріали завдяки високому рівню фізико-механічних та експлуатаційних властивостей, сприяють значному підвищенню продуктивності праці й покращенню якості металообробки. Однією з сучасних світових тенденцій розвитку технологій лезової обробки є високошвидкісна обробка на швидкостях різання від 200 м/хв. Однак зі збільшенням швидкості обробки має місце суттєва інтенсифікація зношування різального інструменту, обумовленого складним механо-хімічним механізмом контактної взаємодії в зоні різання. Полікристалічний кубічний нітрид бору (ПКНБ) є одним з найперспективніших інструментальних матеріалів. Від його властивостей залежать надійність і економічність роботи інструменту в умовах високих навантажень, температур, швидкостей, хімічної взаємодії з оброблюваним матеріалом, а також висока точність геометрії обробки і якість оброблених поверхонь. Розвиток машинобудування ставить нові, більш високі вимоги до інструментальних матеріалів бо на сьогодні ~ 80% деталей сучасної техніки отримуються методами механічної обробки.

У представленій роботі розглянуто дослідження направлені на підвищення стійкості інструментів із ПКНБ при високопродуктивній обробці важкооброблюваних конструкційних сталей за рахунок формування робочих поверхонь різальних інструментів та зміною умов контактної взаємодії інструменту з оброблюваним матеріалом являється актуальною задачею проведення досліджень для подальшого розвитку машинобудування.

Концепція підвищення працездатності інструментів із ПКНБ в залежності від умов експлуатації інструменти із ПКНБ груп ВН та VL полягає в розробці окремих підходів для формування робочих поверхонь, що дозволить суттєво підвищити стійкість інструменту під час високопродуктивної обробки в тому числі в умовах ударних навантажень.



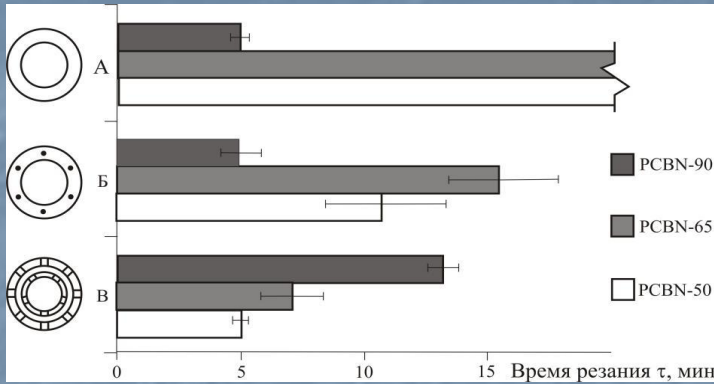
**Метою роботи** є створення сучасного високоефективного різального інструменту із полікристалічних надтвердих матеріалів на основі кубічного нітриду бору за рахунок формування робочих поверхонь різальних інструментів та зміною умов контактної взаємодії інструменту з оброблюваним матеріалом.

**Для досягнення зазначеної мети необхідно було вирішити такі основні завдання:**

1. визначити механізми контактної взаємодії в зоні різання при обробці загартованих сталей інструментами із ПКНБ
2. дослідити напружено-деформований стан в зоні стружкоутворення під час різання загартованих сталей
3. дослідити обробку різанням в контрольованому газовому середовищі.  
розробити додаткові методи фінішної обробки інструментів із ПКНБ груп ВН та VL в залежності від умов експлуатації
4. встановити оптимальні умови обробки загартованих сталей та сплавів та провести промислову перевірку модифікованих інструментів із ПКНБ.

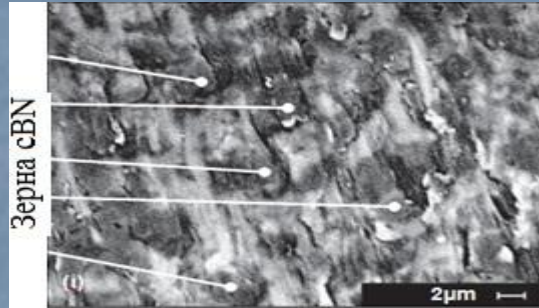


## Використання різальних інструментів із ПКНБ для обробки загартованих сталей

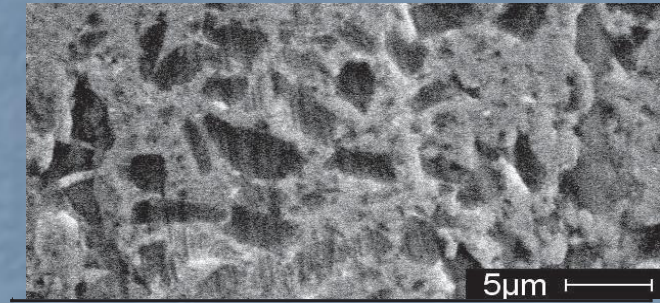


Тривалість роботи інструменту за різних умов різання сталі

Yang, L., Gong, J., Yue, Z., & Chu, X. (2016). Preparation and characterization of cBN-based composites from cBN-Ti 3 AlC 2 mixtures. *Diamond and Related Materials*, 66, 183–187.



Переважає зношування зв'язуючих матеріалів та зерна cBN при обробці з ударними інструментом PCBN-65



Переважає зношування зерен cBN при безперервній високошвидкісній обробці інструментом PCBN-65

### Фізико-механічні властивості інструментальних композитів на основі ПКНБ

Механізми зношування інструментів із ПКНБ групи ВН та ВЛ визначаються комбінацією різних явищ: абразивним стиранням, механічним руйнуванням, протіканням адгезійних, дифузійних та хімічних реакцій взаємодії в контактній зоні різання. В кожному окремому випадку визначення превалюючого механізму зносу інструментів із ПКНБ буде залежати від режимів різання, які визначають термосилове навантаження інструменту в зоні різання, геометричних параметрів інструменту, а також хімічного складу оброблюваного матеріалу. Концепція підвищення працездатності інструментів із ПКНБ в залежності від умов експлуатації інструменти із ПКНБ груп ВН та ВЛ полягає в розробці окремих підходів для формування робочих поверхонь, що дозволить суттєво підвищити стійкість інструменту під час високопродуктивної обробки в тому числі в умовах ударних навантажень.

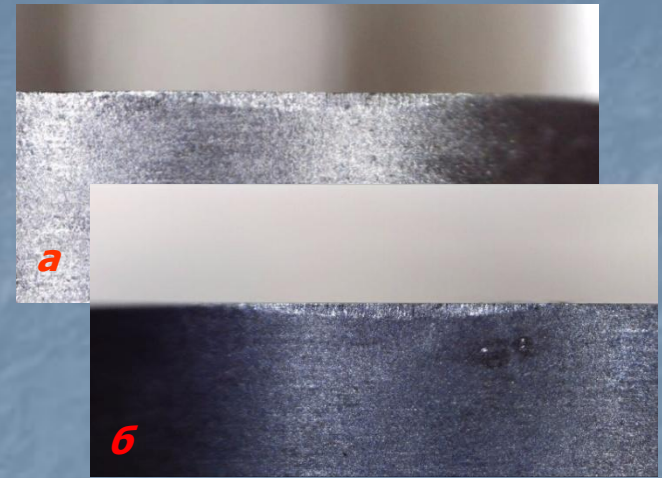
Властивості	ПКНБ групи	
	ВН	ВЛ
Твердість (HV), ГПа	38-42	31-36
Коефіцієнт тріщиностійкості МПа·м <sup>1/2</sup>	9,8-11,6	4,2-5,2
Модуль Юнга, ГПа	820-860	515-620



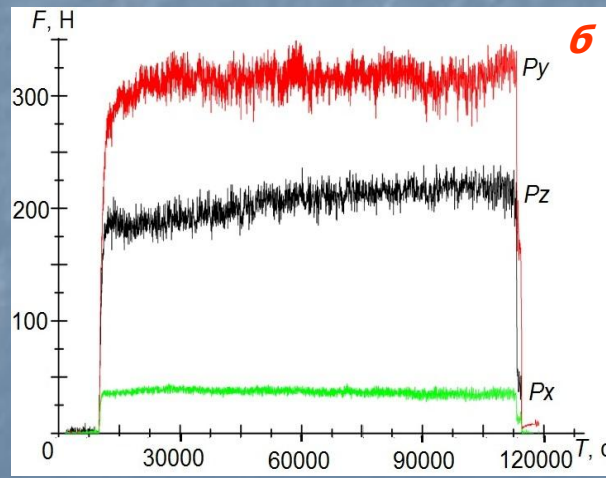
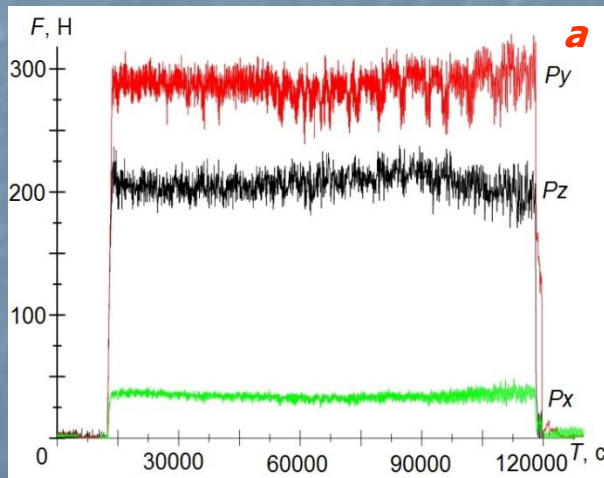
## Особливості обробки різанням в контрольованому газовому середовищі інструментом із ПКНБ групи VL



Загальний вигляд обладнання при обробці різанням в газових середовищах



Фаска зносу інструментів із ПКНБ після точіння сталі ШХ15 (53 HRC) на повітрі (а) та в середовищі азоту (б) ( $v = 215$  м/хв,  $S = 0,1$  мм/об,  $t = 0,2$  мм)



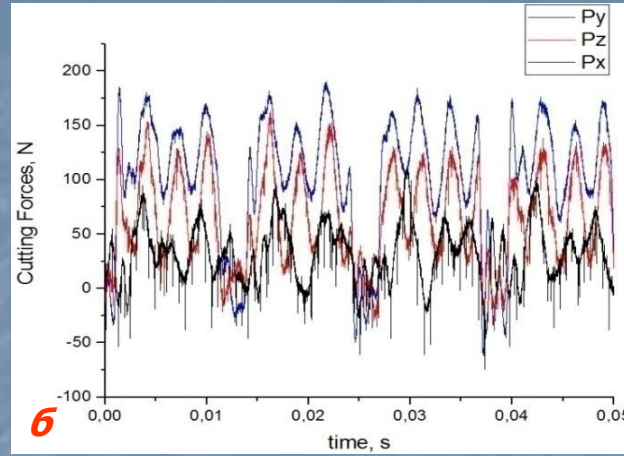
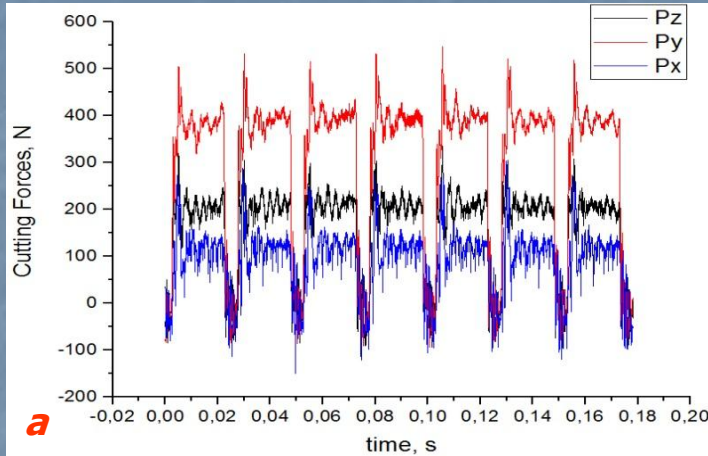
Складові сили різання при обробці сталі ШХ15 (53 HRC) на повітрі (а) та середовищі азоту (б) ( $v = 215$  м/хв.,  $S = 0,1$  мм/об,  $t = 0,2$  мм)

З метою визначення фактору зносу за рахунок окислення контактних ділянок інструментів із ПКНБ під впливом кисню навколишнього середовища проводилася обробка загартованої сталі ШХ15 (53 HRC) в захисному середовищі азоту.

Встановлено, що на швидкості різання 95 м/хв та із зниженням тиску азоту чи повітря до 0,4 атм, зміни величини фаски зносу, у порівнянні з обробкою у стандартних умовах не виявлено, що вказує на те, що при даних умовах обробки хімічна взаємодія відбувається безпосередньо між cBN-Fe.

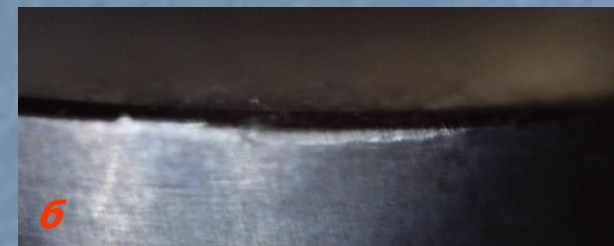


## Дослідження сил різання та контактних напружень при обробці з ударом інструментами з ПКНБ

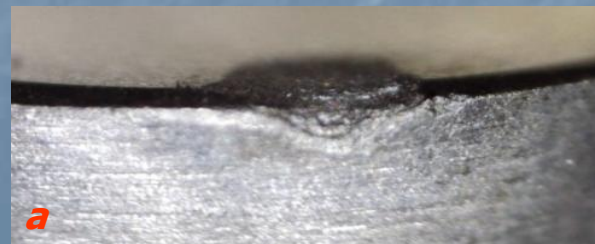


Сили різання при обробці загартованої сталі ХВГ (56–58 HRC) інструментом з ПКНБ  
 $a - v = 120 \text{ м/хв}, t = 0,4 \text{ мм}, S = 0,1 \text{ мм/об},$   
 $h_z = 0,15 \text{ мм};$   
 $b - v = 210 \text{ м/хв}, t = 0,2 \text{ мм}, S = 0,1 \text{ мм/об},$   
 $h_z = 0,15 \text{ мм}$

Дослідження складових сили різання при обробці з ударом проводилися при точінні загартованої сталі ХВГ інструментами з ПКНБ групи ВН та ВЛ. Типовий графік складових сил різання при обробці з ударом інструментом із ПКНБ представлений на даному слайді, слід відмітити наявність динамічного сплеску при врізанні, який проявляється у піковому зростанні величини складових сили різання  $P_z$  і  $P_y$  на величину до 20%. Фаска зносу інструментів із ПКНБ групи ВН та ВЛ при обробці з динамічними навантаженнями.



Контактні поверхні інструменту з ПКНБ «Борсиніт» після обробки загартованої сталі ХВГ (HRC 56–58) при  $v = 120 \text{ м/хв}$  (a) і  $v = 210 \text{ м/хв}$  (б) ( $t = 0,2 \text{ мм}, S = 0,1 \text{ мм/об}$ )



Зруйновані ділянки різальної кромки інструменту з ПКНБ-ВЛ після обробки загартованої сталі ХВГ (56–58 HRC) при  $v = 120 \text{ м/хв}$  (a) і  $v = 210 \text{ м/хв}$  (б) ( $t = 0,2 \text{ мм}, S = 0,1 \text{ мм/об}$ )



## Фінішна обробка різальних пластин із ПКНБ методом ВіМАО



Пристрій для ВіМАО різальних пластин із ПКНБ

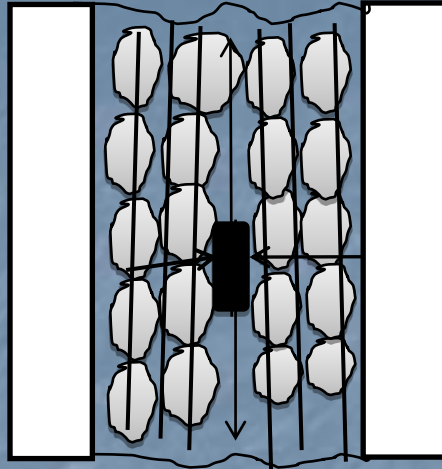
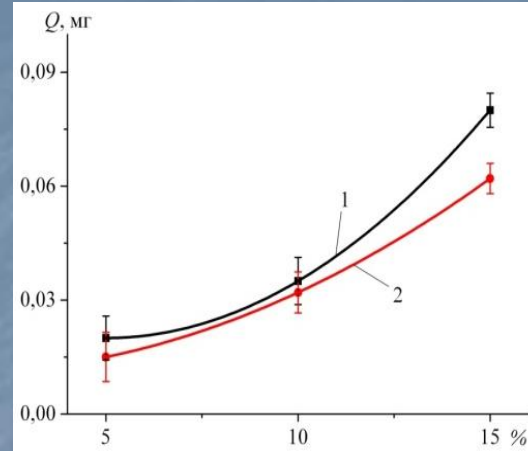
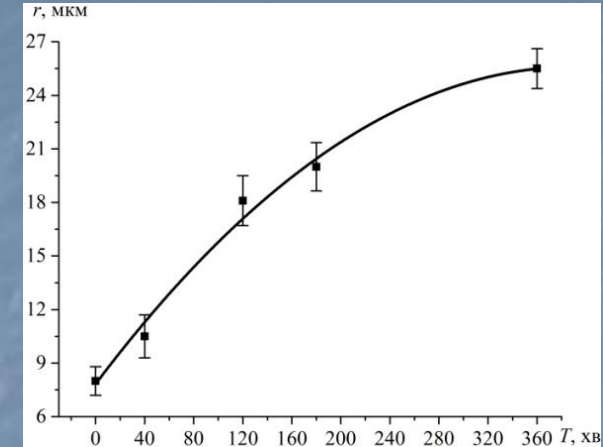


Схема обробки різальних пластин із ПКНБ методом ВіМАО



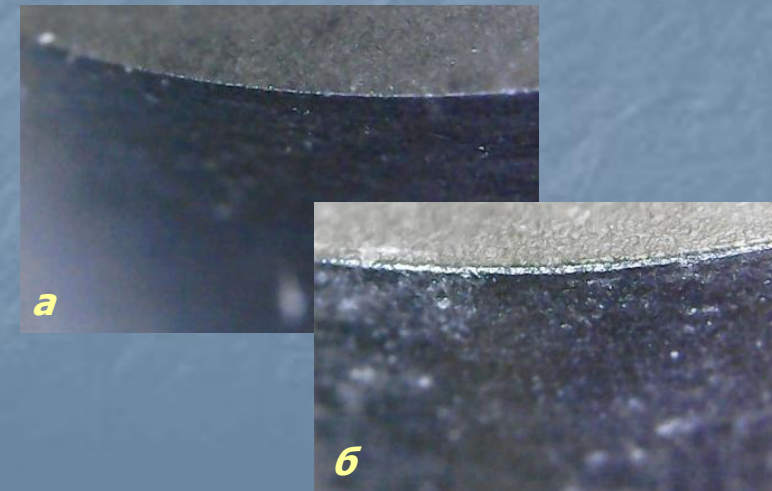
Вплив концентрації порошку алмазу в робочому середовищі на величину знімання матеріалу.

1 – ACM 28/20; 2 – ACM 60/40



Залежність величини радіусу округлення різальної кромки пластин із ПКНБ від часу обробки методом ВіМАО

Додаткова фінішна обробка різальних пластин із ПКНБ групи VL здійснювалася за допомогою спеціально розробленого вібро-магнітно-абразивного пристрою у якому у ролі зв'язки абразивного середовища виступає магнітне поле, що створює пружні абразивні стовпчики – ланцюги з окремих зерен, а вібраційної дії при русі деталі через робочу зону абразивне середовище призводить до знімання матеріалу і згладжування мікронерівностей на оброблюваній поверхні. Аналіз отриманих результатів показує, що найбільш інтенсивно процес ВіМАО впливає на вершину різальної кромки, можна отримати радіусну кромку від 10 до 30 мкм, величина радіусу якої буде залежати від часу обробки та типу абразивного середовища.

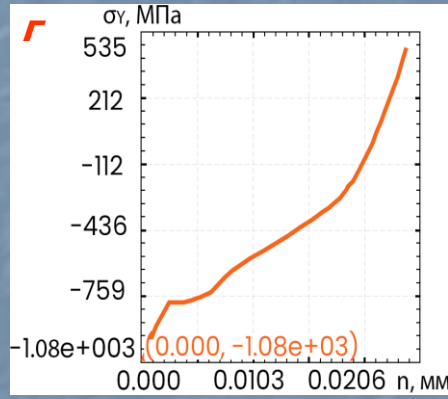
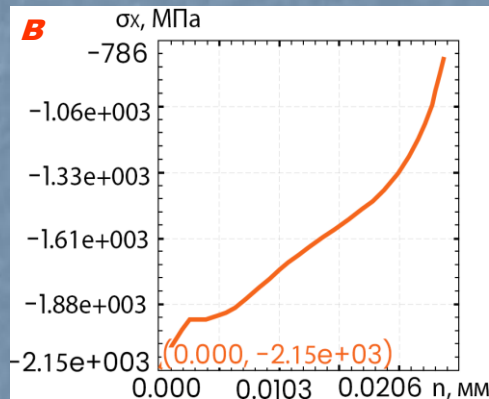
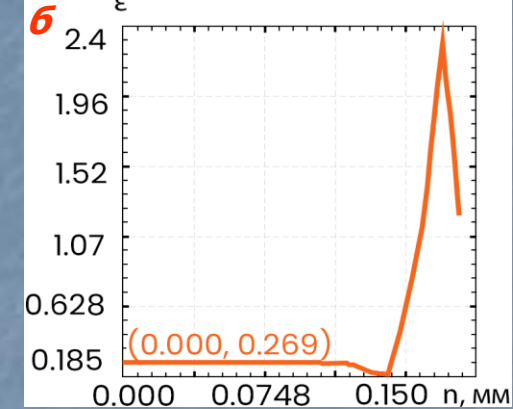
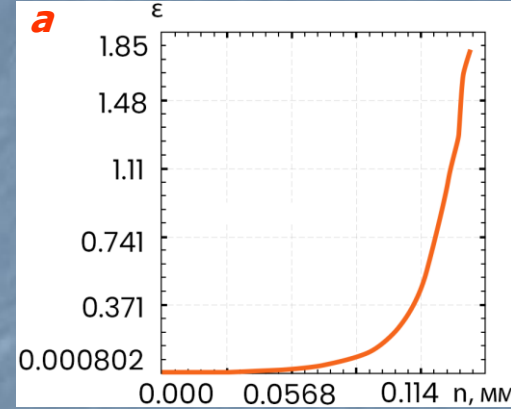
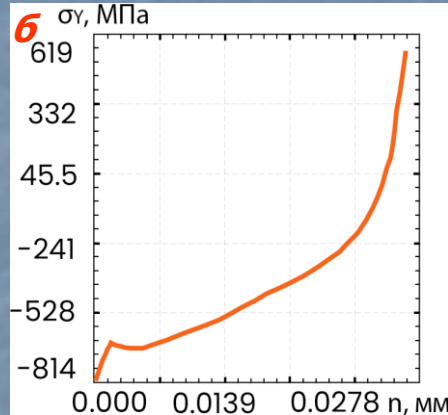
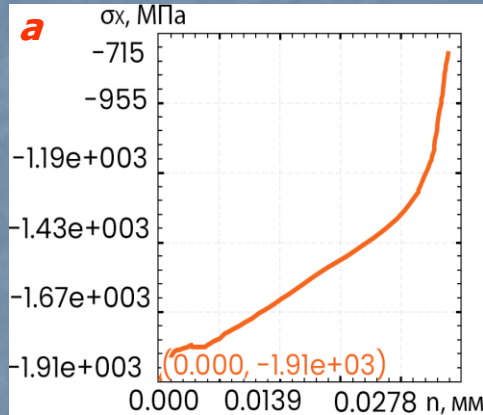


Зображення кромки різальних композитів із ПКНБ до обробки (а) та після обробки методом ВіМАО 360 хв (б)





## Дослідження напружено-деформованого стану контактних поверхонь інструменту із ПКНБ групи VL при точінні загартованих сталей



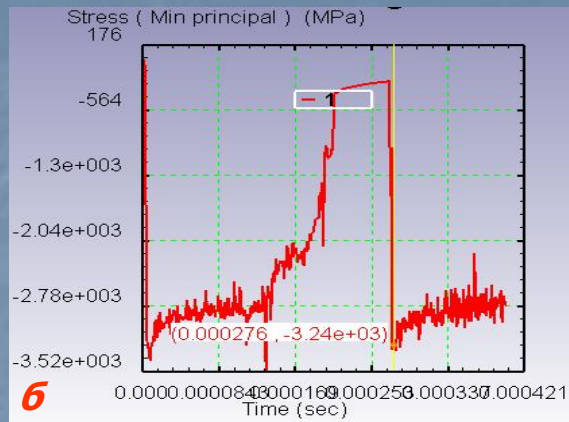
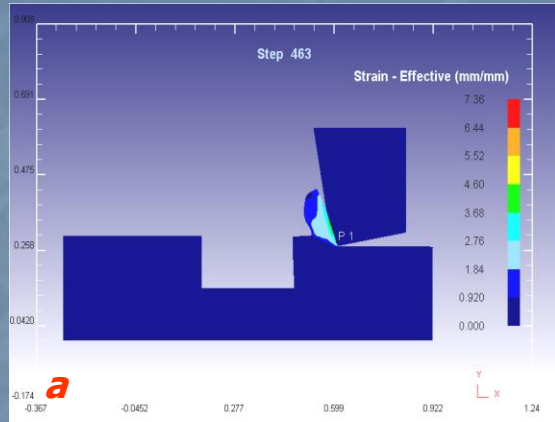
Контактні нормальні (*a*, *в*) та тангенціальні (*б*, *г*) напруження в залежності від координати на передній поверхні різця для:  
*a*, *б* – першого проходу,  
*в*, *г* – третього проходу

Залежність ступеня деформації матеріалу від відстані від передньої поверхні різця у напрямку швидкості різання:  
*a* – ступінь деформації оброблюваного матеріалу у напрямку різання після першого проходу;  
*б* – ступінь деформації оброблюваного матеріалу у напрямку різання після третього проходу

При обробці виробів із загартованих сталей інструментами із ПКНБ можливе зміцнення поверхневого шару на ділянках врізання. Методом скінченних елементів було проведено дослідження механіки контактної взаємодії при врізанні різального інструменту із ПКНБ групи VL. Встановлено, що в залежності від кількості проходів відбувається збільшення рівня нормальних на 12% та тангенціальних на 25% напружень після третього проходу, що пов'язано із зміцненням поверхневого шару обробленого матеріалу на попередніх проходах.



## Розрахунок ймовірності руйнування інструментів із ПКНБ групи VL при обробці загартованої сталі з динамічним навантаженням



На основі отриманих даних розраховані ймовірності руйнування інструментів із ПКНБ групи VL при обробці з ударом. Встановлено, що ймовірність руйнування для інструментів групи VL cBN-TiC (55–45 об. %) під час обробки загартованої сталі ШХ 15 з ударом до фінішної обробки методом ВіМАО становить 68,9 %.

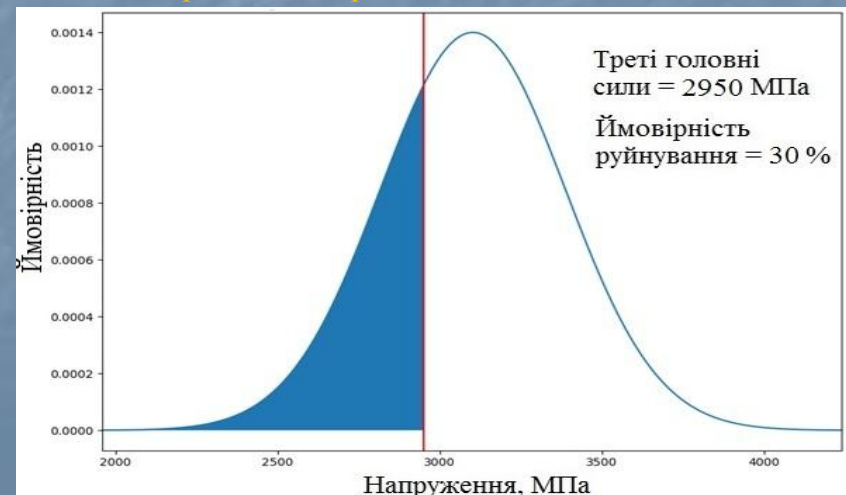
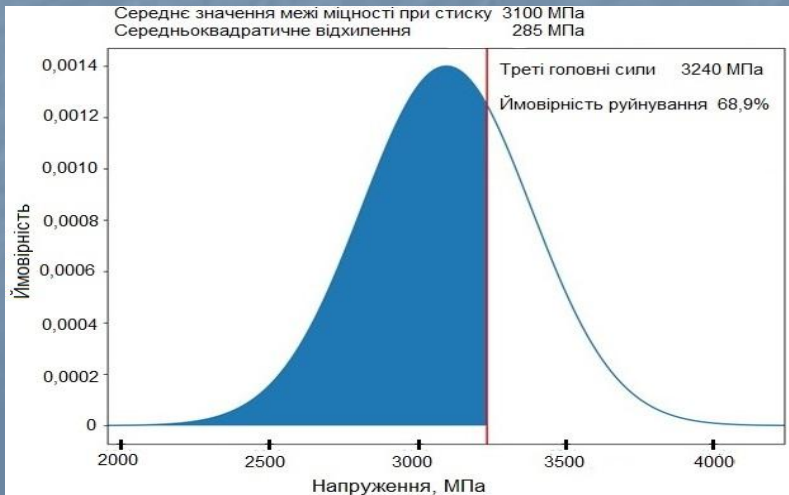
Для зменшення ймовірності руйнування інструментів із ПКНБ групи VL проводилася додаткова фінішна обробка методом ВіМАО, що дозволило отримати на різальних пластинах радіусну зміцнюючу фаску. Для максимального радіуса округлення різальної кромки, якій можна отримати при фінішній обробці методом ВіМАО проведено розрахунок методом КЕ ймовірності руйнування. Встановлено, що для радіуса заокруглення різальної кромки 30 мкм ймовірність руйнування інструменту складає 30%. Що у два рази нижча в порівнянні з інструментами після стандартної фінішної обробки..

Моделювання процесу різання сталі ШХ15 (53 HRC) ( $v = 215$  м/хв,  $S = 0,1$  мм/об,  $t = 0,2$  мм)

з ударом ( $v = 120$  м/хв,  $t = 0,4$  мм,  $S = 0,1$  мм/об) при коефіцієнті тертя 0,8:

*a* – загальний вигляд моделі обробки з ударом;

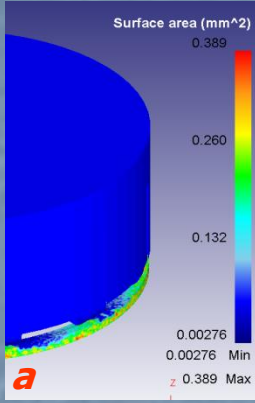
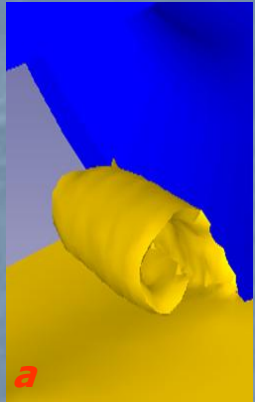
*б* – величина третіх головних напружень у залежності від часу різання (зліва направо від моменту початку обробки до виходу з контакту)



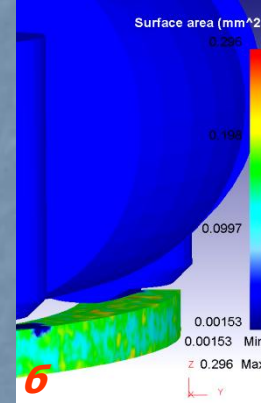
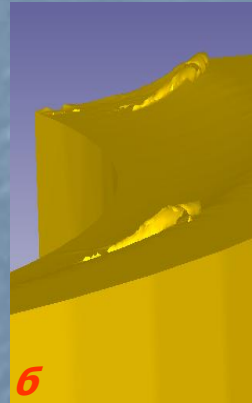
Визначення ймовірності руйнування інструментів із ПКНБ групи VL до обробки методом ВіМАО (*a*) та після фінішної обробки методом ВіМАО (*б*) при точінні сталі ШХ15 (53 HRC) з ударом ( $v = 215$  м/хв,  $S = 0,1$  мм/об,  $t = 0,2$  мм)

## Комп'ютерне моделювання впливу форми передньої поверхні ножів торцевої фрези на силові характеристики процесу оброблення

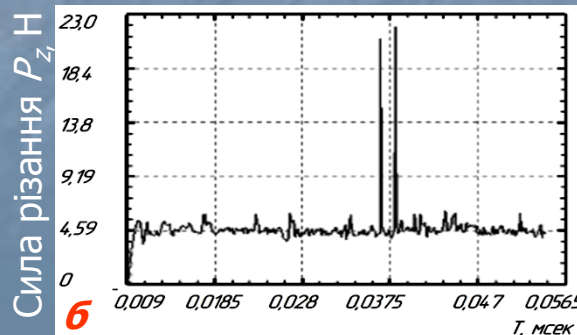
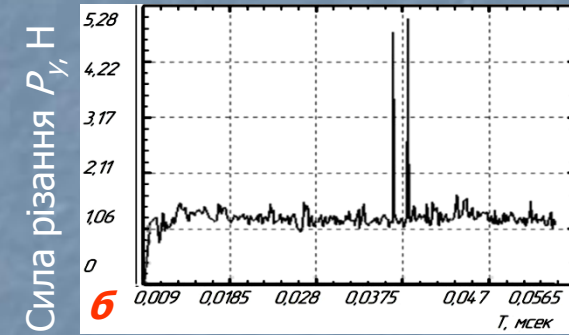
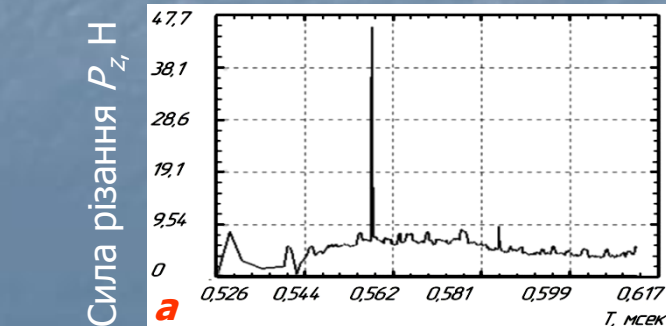
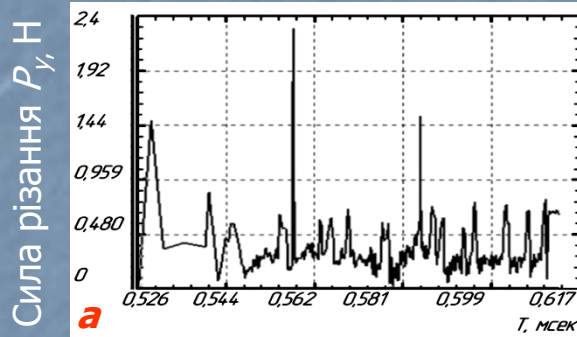
Порівняння особливостей пластичної деформації та силових характеристик процесу обробки при використанні інструментів із стандартним інструментом (а) та інструментом з циліндричною передньою поверхнею (б)



Схід стружки та площа контакту стружки з плоскою передньою поверхнею



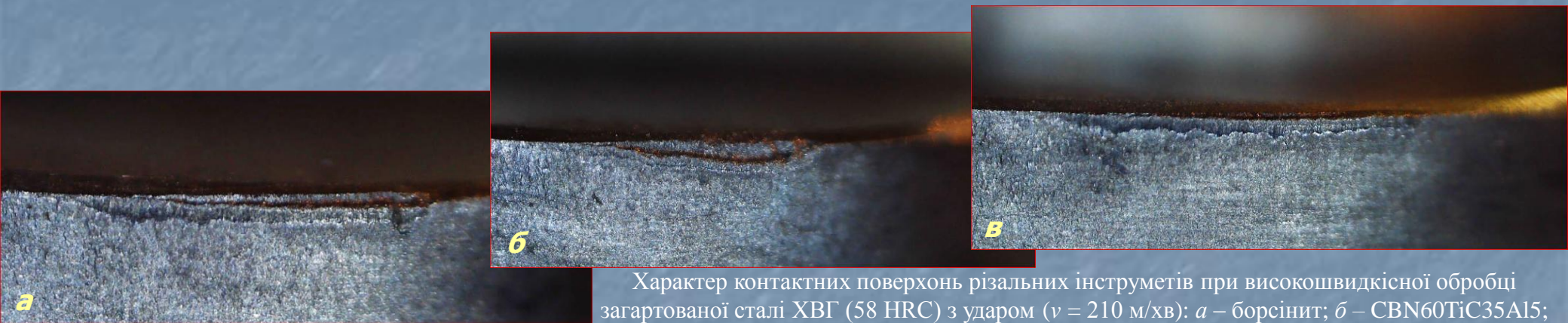
Схід стружки та площа контакту стружки з циліндричною передньою поверхнею



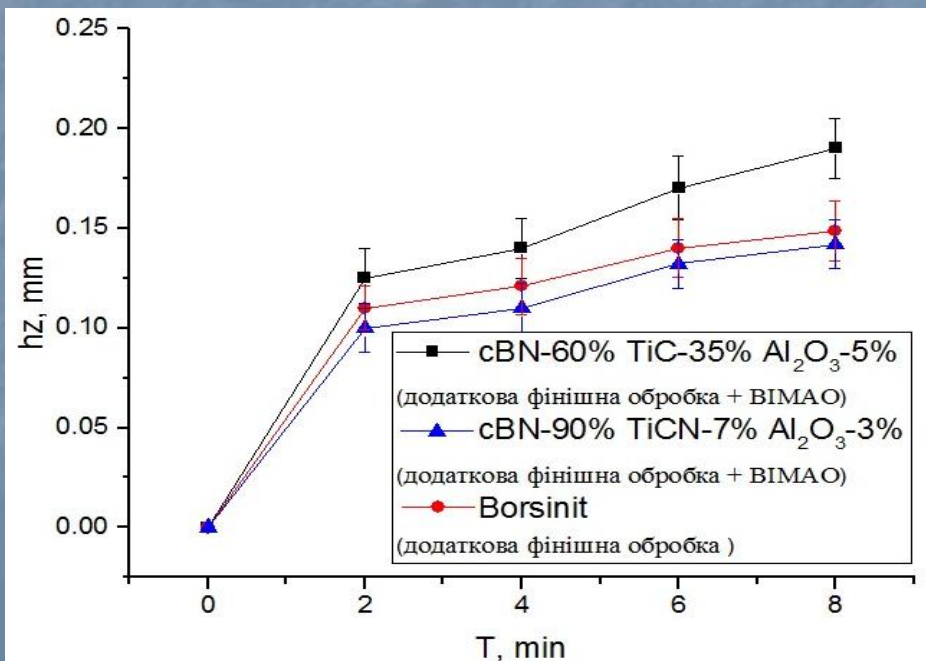
Отримані результати підтверджують, що при обробці інструментом з циліндричною передньою поверхнею стружка сходить у напрямку зростання кута нахилу різальної кромки. Встановлено, що для зазначених умов обробки максімальна площа контакту стружки з передньою поверхнею для фрези з різальними елементами з циліндричною передньою поверхнею на 31,42% менше, ніж для фрези з круглими різальними елементами з плоскою передньою поверхнею.



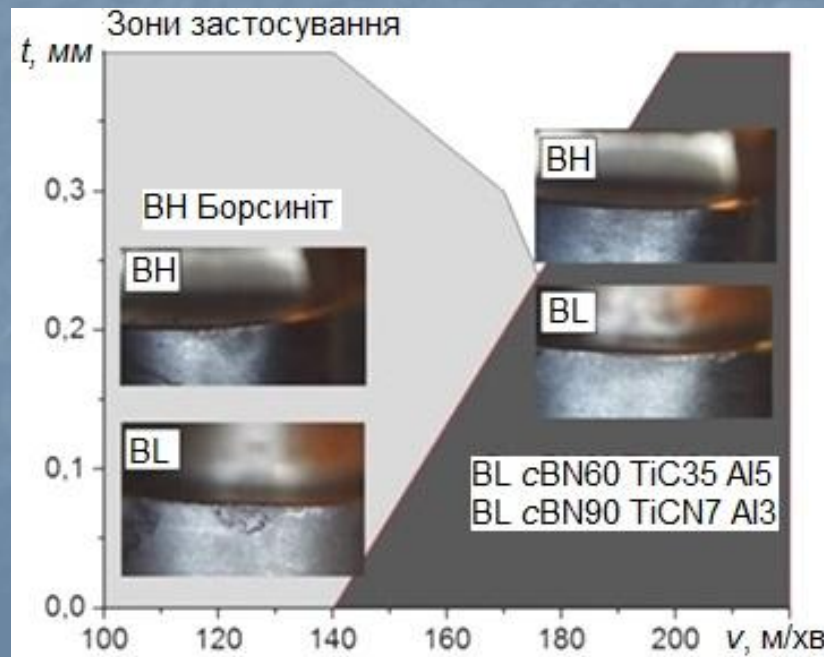
# Дослідження зношення різальних інструментів із ПКНБ групи ВН та ВL при обробці загартованої сталі ХВГ з ударом



Характер контактних поверхонь різальних інструментів при високошвидкісній обробці загартованої сталі ХВГ (58 HRC) з ударом ( $v = 210$  м/хв): *a* – борсиніт; *б* – CBN60TiC35Al5; *в* – CBN90TiCN7Al3



Кінетика зношування інструментів при високошвидкісній обробці загартованої сталі ХВГ (58 HRC) з ударом ( $v = 210$  м/хв,  $t = 0,4$  мм,  $S = 0,1$  мм)



Діаграма умов ефективного використання полікристалів ВН і ВL типів при обробці загартованої сталі ХВГ



## Дослідно-промислові випробування інструментів із пластинами із ПКНБ



Фрезерний верстат Comec RP 1400 для фрезерування роз'ємних частин блоків циліндрів (ТОВ «Ерідон Тех», м. Полтава)



ГБЦ комбайну John Deere із чавуну на якій проводилися випробування розроблених різальних композитів із ПКНБ

(«Немирів-Авто», м. Немирів)



Оброблювана площа блоку циліндрів комбайна "Case" після фрезерування інструментом з модифікованим ПКНБ



Процес точіння прокатного валка інструментом із ПКНБ (а); прокатні валки, які використовуються підприємством (б); матеріал – загартована нержавіюча сталь X12 (60–64 HRC) (ПрАТ «Трубосталь», м. Коростень)



а

Шорсткість поверхні до обробки (а) та після обробки різцями з пластинами із ПКНБ (б)



б



## НАУКОВА НОВИЗНА ОДЕРЖАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

1. Вперше встановлено, що керування напруженим станом інструменту із ПКНБ групи VL відбувається за рахунок зміни умов контактної взаємодії в зоні різання та формування різальної кромки з радіусом округлення до 30 мкм, що забезпечує ефективне проведення обробки загартованих сталей із динамічним навантаженням на швидкостях різання до 210 м/хв.
2. Набули подальшого розвитку уявлення щодо механіки контактної взаємодії при врізанні різального інструменту із ПКНБ групи VL в загартовану сталь: встановлено пікове зростання сили різання (20%), різна інтенсивність зростання нормальних (12%) та тангенціальних (25%) напружень вздовж робочої ділянки інструменту та відповідне до цього зниження коефіцієнту тертя у контактній зоні, значне збільшення ступеню деформації оброблюваного матеріалу (1,8 – у зоні зсуву).
3. Встановлено, що збільшення радіуса округлення різальної кромки інструменту із ПКНБ групи VL від 10 до 30 мкм приводить до зменшення пікового значення головних напружень на робочих ділянках інструменту з  $-3,24$  до  $-2,8$  ГПа, що обумовлює зниження ймовірності крихкого руйнування інструменту до 2-х разів.



## ПРАКТИЧНЕ ЗНАЧЕННЯ ОДЕРЖАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

- Визначено умови фінішної обробки різальних пластин із ПКНБ групи ВН та ВL – вібро-магнітно-абразивна обробка (ViMAO) ;
- Вдосконалено пристрій для практичної реалізації процесу ViMAO, що складається з контейнера з карбіду кремнію SiC, електродвигуна з ексцентриком і пристроєм для створення електромагнітного поля; пристрій забезпечує оптимальні робочі характеристики для процесу ViMAO – магнітне поле з індукцією 0,3–0,35 Тл, амплітуду вібрацій 5 мм;
- Встановлено, що для досягнення необхідної шорсткості та бездефектної поверхні потрібно проводити додаткову обробку різальних пластин із ПКНБ групи ВL мікропорошками алмазу АСМ 2/1 та групи ВН – мікропорошками АСМ 14/10.
- встановлені області ефективного використання інструментів із ПКНБ групи ВН та ВL при обробці загартованих сталей з ударом в залежності від методів фінішного формування робочих поверхонь інструментів;
- результати дисертаційної роботи пройшли дослідну перевірку в умовах підприємства ПрАТ "Трубосталь" (м. Коростень) при чистовому безударному точінні прокатних валків із загартованої інструментальної сталі Х12 та встановлено, що розроблені за вдосконаленою технологією різальні пластини із ПКНБ дозволяють проводити обробку зі збільшенням стійкості інструменту в порівнянні із вставками із ПНТМ Композит 01 «Ельбор» у три рази із забезпеченням відповідної якості обробленої поверхні; для розширення області використання модифікованих інструментів також була проведена обробка фрезеруванням блоків циліндрів із сірого чавуну СЧ21-40 на швидкостях різання 515–620 м/хв в умовах ТОВ "Ерідон Тех" (м. Полтава) та "Немирів-Авто" (м. Немирів) та встановлено, що розроблені інструменти дозволяють виконувати обробку сірого чавуну із підвищенням стійкості інструмента в порівнянні із ТС ВК8 з покриттям TiN в 6 разів та ПКНБ виробництва КНР – на 44%.



## ВИСНОВКИ

- 1. Найбільш оптимальними інструментальними матеріалами, що забезпечують обробку загартованих сталей твердістю 55–60 HRC при швидкостях різання до 3,0 м/с із заданою якістю обробленої поверхні є інструменти оснащені ПКНБ.
- 2. Механізм зношування інструментів із ПКНБ визначається комбінацією різних явищ: абразивним стиранням, механічним руйнуванням, протіканням адгезійних, дифузійних та хімічних процесів в зоні контакту. В кожному окремому випадку визначення превалюючого механізму зношування інструментів із ПКНБ буде залежати від режимів різання, які визначають напруження та температуру в зоні різання, геометричних параметрів інструменту, а також хімічного складу оброблюваного матеріалу.
- 3. При чистовому точінні загартованих сталей зменшення вмісту cBN приводить до збільшення стійкості інструменту за рахунок зменшення хімічної взаємодії між інструментальним та оброблюваним матеріалом.
- 4. В залежності від умов експлуатації інструменти із ПКНБ груп VH та VL вимагають розробки окремих підходів для формування робочих поверхонь. Це дозволить суттєво підвищити стійкість інструменту в умовах високошвидкісного фінішного різання в тому числі в умовах ударних навантажень.
- 5. Встановлено, що інструменти, оснащені ПКНБ групи VL дозволяють ефективно проводити чистове точіння залізовуглецевих сплавів високої твердості при високих швидкостях різання, при цьому інтенсивність зношування інструментів у 1,5–2,0 рази нижче у порівнянні із інструментами, оснащеними ПКНБ з високим вмістом cBN (95–97%), що обумовлено зменшенням теплопровідності матеріалу інструмента та зміною у механізмі зношування.





- 6. З метою оцінки впливу навколишнього середовища на параметри контактної взаємодії інструментів із ПКНБ та оброблюваним матеріалом, проведено дослідження обробки загартованої сталі ШХ15 (58HRC) в захисному газовому середовищі, встановлено, що кисень навколишнього середовища не чинить значного впливу на контактну взаємодію інструментів із ПКНБ з оброблюваним матеріалом та на величину зносу. Мікрорентгеноспектральний аналіз ділянок зносу демонструє наявність кисню при обробці на повітрі та його відсутність при точінні у середовищі азоту, що підтверджує наявність у кисневому середовищі безпосередньої хімічної взаємодії cBN-Fe, як основного фактору, що обумовлює зношування інструменту на високих швидкостях різання.
- 7. Набули подальшого розвитку уявлення щодо механіки контактної взаємодії при врізанні різального інструменту із ПКНБ групи BL в загартовану сталь: встановлено пікове зростання сили різання (20%), різна інтенсивність зростання нормальних (12%) та тангенціальних (25%) напружень вздовж робочої ділянки інструменту та відповідне до цього зниження коефіцієнту тертя у контактній зоні, значне збільшення ступеню деформації оброблюваного матеріалу (1,8 – у зоні зсуву).
- 8. Встановлено, що ВіМАО чинить вплив на радіус округлення різальних кромки композитів із ПКНБ групи BL, округлення різальної кромки після обробки ВіМАО має правильну геометричну форму по всій довжині різальної кромки з плавним сполученням як з передньою так і з задньою поверхнями; отримано залежність радіусу заокруглення різальної кромки від часу обробки, що дає можливість формувати радіус заокруглення різальної кромки для конкретних умов застосування інструменту.
- 9. Встановлені області ефективного використання інструментів із ПКНБ групи ВН та BL при обробці загартованих сталей з ударом в залежності від методів фінішного формування робочих поверхонь інструментів.
- 10. На основі результатів дослідження кінетики зносу модифікованих різальних інструментів із ПКНБ групи ВН та BL при обробці загартованої сталі ХВГ з ударом отримано діаграму діапазонів режимів різання в координатах «швидкість різання–глибина різання», яка дозволила визначити зони ефективного застосування модифікованих інструментів із ПКНБ груп BL і ВН.
- 11. Результати дисертаційної роботи пройшли дослідну перевірку в умовах підприємств: ТОВ "Ерідон Тех" м. Полтава, ПП "Немирів Авто" м. Немирів, ПРАТ "Трубосталь" м. Коростень, ТОВ «ЛРЗ «МОТОР» м. Луцьк.

**ДЯКУЮ ЗА УВАГУ!**