

РЕФЕРАТ

науково-технічної роботи на здобуття щорічної премії Президента України для молодих вчених

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

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

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

Загальна характеристика роботи

Актуальність роботи. 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. Характерними особливостями процесів високошвидкісної обробки є зменшення інтенсивності росту температури різання, зниження сил різання, шорсткості обробленої поверхні та підвищення якості поверхневого шару виробів. Однак зі збільшенням швидкості обробки має місце суттєва інтенсифікація зношування різального інструменту, обумовленого складним механо-хімічним механізмом контактної взаємодії в зоні різання. До матеріалу лезового інструменту висуваються високі вимоги з механічних та хімічних властивостей. Це вирішуються за рахунок формування робочих поверхонь різальних інструментів та зміною умов контактної взаємодії інструменту з оброблюваним матеріалом.

Полікристалічний кубічний нітрид бору (ПКНБ) є одними 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. Тому дослідження направлені на підвищення стійкості інструментів із ПКНБ при високопродуктивній обробці загартованих 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.

Композити із ПКНБ поділяються на дві групи – з високим вмістом (ВН) – 90–95 об.% cBN та низьким (ВЛ) – 40–65 об.% cBN. Відмінність в хімічному складі і фізико-механічних властивостях композитів обумовлює особливості їх ефективного використання. Композити групи ВЛ дозволяють проводити ефективну обробку важкооброблюваних матеріалів на швидкостях різання 200–300 м/хв., що суттєво вище ніж при використанні інструментів з композитами групи ВН. Однак слід відмітити, що при обробці з динамічними навантаженнями інструментами із ПКНБ групи ВЛ призводить до підвищення інтенсивності зношування різального інструменту в порівнянні із інструментами групи ВН.

Враховуючи постійно зростаючі вимоги виробництва, значну вартість інструменту, оснащеного композитами із ПКНБ, існуючу потребу і перспективи у використанні такого інструменту, підвищення його зносостійкості при високошвидкісному точінні важкооброблюваних сплавів є актуальним науково-технічним завданням.

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**:

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

Короткий зміст роботи. Представлені результати досліджень направлених на розробку сучасного високоефективного різального інструменту із ПКНБ для обробки виробів із загартованих сталей та сплавів високої міцності (загартованих сталей, відбілених чавунів). Авторами науково-технічної роботи Чумаком А. О. та Коваленко Я. П. проведено наступне: розроблено сучасні високоефективні різальні інструменти із ПКНБ; розроблено додаткові методи фінішної обробки інструментів із ПКНБ груп ВН та ВL в залежності від умов експлуатації; визначено силові закономірності процесу різання та закономірності на стійкість інструментами із ПКНБ груп ВН та ВL; досліджено працездатність інструментів із ПКНБ у процесах високопродуктивної обробки загартованих сталей та сплавів в тому числі в умовах динамічних навантажень.

Основний досягнутий результат полягає в тому, що модифіковані інструменти із ПКНБ групи ВL дозволяють ефективно проводити чистову обробку залізобетонних сплавів високої твердості на високих швидкостях різання в тому числі із динамічними навантаженнями, при цьому інтенсивність зношування інструментів у 1,5–2,0 рази нижче у порівнянні із інструментами, оснащеними ПНТМ з високим вмістом сVN (95–97%), що обумовлено зменшенням теплопровідності матеріалу інструмента та зміною у механізмі зношування.

Усі основні результати цієї групи робіт одержані вперше, є оригінальними, надруковані в провідних наукових виданнях та доповідались на вітчизняних і міжнародних наукових конференціях. Результати роботи опубліковані в 39 наукових працях.

Структура роботи. Науково-технічна робота виконувалась протягом 2016–2023 рр. в Інституті надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України та в Державному університеті «Житомирська політехніка» МОН України. Робота викладена на 141 друкованих аркушах основного тексту. Кількість публікацій по роботі за останні 5 років: 1 розділ у колективній монографії (підручник), 1 стаття в журналі, включених до категорії "А" (у т.ч. 1 у зарубіжних виданнях) та 9 статей у журналах включених до категорії "Б", 27 тез доповідей. Загальна кількість посилань на публікації авторів/h-індекс за роботи згідно з базою даних складає відповідно: Google Scholar – 24/2.

Науково-технічна робота «Технологічне забезпечення високопродуктивної якісної лезової обробки виробів із важкооброблюваних конструкційних сталей інноваційними інструментами з надтвердих композитів» на здобуття щорічної премії Президента України для молодих вчених подається на конкурс **вперше**.

Новизна одержаних результатів:

- Розглянуто та розроблено методи підвищення стійкості інструментів із ПКНБ при обробці виробів із загартованих сталей та сплавів.

- Створено сучасний різальний інструмент із ПКНБ з модифікованими робочими поверхнями, що дозволяє підвищити стійкість інструменту під час обробки важкооброблюваних конструкційних сталей в умовах динамічних навантажень.

- Виконано цикл комплексних досліджень, результати яких містять наступну **наукову новизну**:

1. Вперше встановлено, що керування напруженим станом інструменту із ПКНБ групи ВL відбувається за рахунок зміни умов контактної взаємодії в зоні різання та формування різальної кромки з радіусом заокруглення 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 ВL 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 заокруглення різальної кромки інструменту із ПКНБ групи ВL 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:

1. Визначено умови фінішної обробки різальних пластин із ПКНБ групи VN та VL – вібро-магнітно-абразивна обробка (ViMAO).

2. Вдосконалено пристрій для практичної реалізації процесу ViMAO, що складається з контейнера з карбиду 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.

3. Встановлено, що для досягнення необхідної шорсткості та бездефектної поверхні потрібно проводити додаткову обробку різальних пластин із ПКНБ групи VL мікропорошками алмазу АСМ 2/1 та групи VN – мікропорошками АСМ 14/10.

4. Встановлені області ефективного використання інструментів із ПКНБ групи VN та VL при обробці загартованих сталей з ударом в залежності від методів фінішного формування робочих поверхонь інструментів.

5. Результати роботи пройшли досліду перевірку в умовах підприємства ПрАТ "Трубосталь" (м. Коростень) при чистовому безударному точінні прокатних валків із загартованої інструментальної сталі X12 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%.

ЗМІСТ ТА ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

1. Концепція підвищення працездатності інструментів із ПКНБ

Найбільш ефективними інструментальними матеріалами, що забезпечують обробку виробів із загартованих сталей та сплавів твердістю 45–60 HRC при швидкостях різання до 3,0 м/с із заданою якістю обробленої поверхні є інструменти із полікристалічного кубічного нітриду бору (ПКНБ). Збільшення в промисловості долі використання загартованих сталей та сплавів, а також вартості інструментів закордонного виробництва, обумовлює актуальність проведення досліджень направлених на підвищення стійкості та продуктивності обробки інструментами із ПКНБ.

Відповідно до ISO 513:2014 виготовляють наступні групи ПКНБ: група VN – з високим вмістом cBN до 95% і група VL з низьким вмістом cBN до 65%. При чистовому точінні загартованих сталей зменшення вмісту cBN в інструменті приводить до збільшення стійкості інструменту за рахунок зменшення інтенсивності хімічної взаємодії між інструментальним та оброблюваним матеріалом, група VL демонструє найбільшу стійкість при чистовому безударному точінні, наявність ударних навантажень призводить до швидкого та катастрофічного руйнування інструменту.

Механізми зношування інструментів із ПКНБ групи VN та VL 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 VN 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.

2. Шляхи підвищення працездатності інструментів із ПКНБ

Одним із основних механізмів зносу інструментів із ПКНБ при обробці матеріалів на основі Fe, Ni є хімічна взаємодія між інструментальним та оброблюваним матеріалами та киснем навколишнього середовища. Результатом такої взаємодії являється утворення на контактних ділянках інструменту легкоплавких боридів типу Me_xB .

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. Дослідження проводились в спеціально розробленій камері (рис. 1). Азотне середовище створювалося шляхом подачі надлишкового тиску азоту (0,4–2,5 МПа). Встановлено, що при швидкості різання 215 м/хв. і тиску азоту або повітря до 2,5 атм, за інших рівних умов, наявність газового середовища сприяє зниженню розміру фаски зносу інструменту по задній поверхні з 0,18 до 0,14 мм, що пов'язано із ефектом охолодження зони різання за рахунок конвекційного механізму тепловідведення. 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.

Встановлено, що при фінішному формуванні робочих поверхонь інструментів із ПКНБ утворюються шліфувальні риски, які являються осередками зародження ділянок зношування інструменту в процесі експлуатації, що вимагає проведення додаткової фінішної обробки робочих поверхонь інструментів із ПКНБ. Крім того при використанні інструментів із ПКНБ групи VL в умовах динамічних навантажень необхідною умовою підвищення стійкості є формування зміцнюючої радіусної фаски на різальній кромці.

Додаткова фінішна обробка різальних пластин із ПКНБ групи VL здійснювалася за допомогою спеціально розробленого вібро-магнітно-абразивного пристрою (рис. 2), 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.

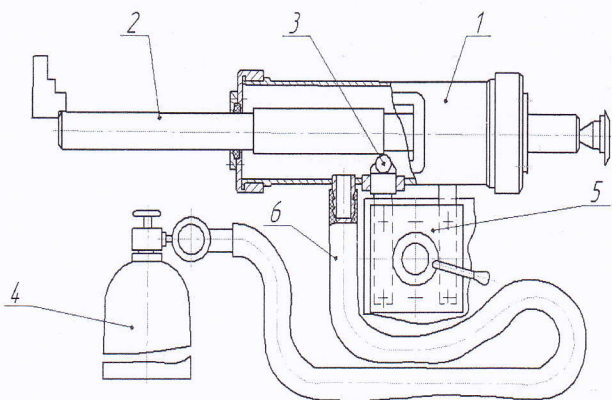


Рис. 1 – Схема різання в газоподібних середовищах: 1 – камера; 2 – деталь; 3 – різець; 4 – балон з газом; 5 – верстат (різцетримач); 6 – шланг

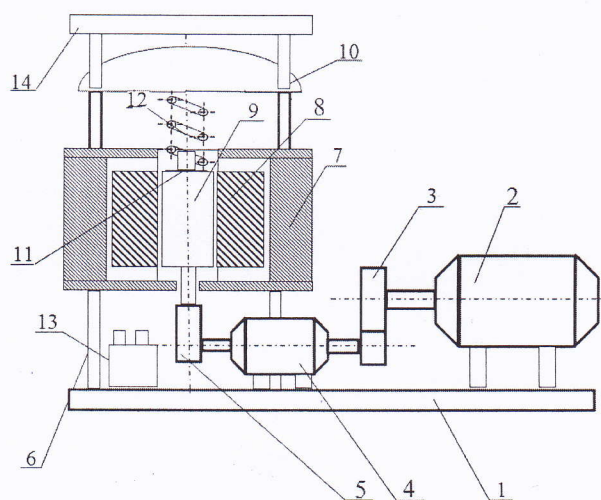


Рис. 2 – Схема пристрою для вібро-магнітно-абразивної обробки різальних пластин із ПКНБ

3. Дослідження працездатності інструментів із ПКНБ при обробці виробів із загартованих сталей та сплавів

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.

Аналіз епюри розподілу нормальних напруг по передній поверхні інструменту (рис. 3), оснащеного ПКНБ, показав, що на ділянці передньої поверхні інструменту, на якому має місце пластична деформація стружки, обумовлює близько 70% всієї прикладеної нормальної сили, відповідно, на пружну ділянку контакту припадає 30%. У той же час площа ділянки пластичного контакту становить 60% загальної площі контакту інструменту зі стружкою.

Дослідження складових сили різання при обробці з ударом проводилися при точінні загартованої сталі ХВГ інструментами з ПКНБ групи ВН та VL. Типовий графік складових сил різання при обробці з ударом інструментом із ПКНБ представлений на (рис. 4), 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%.

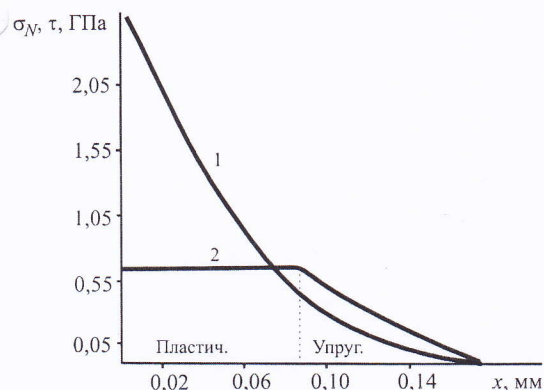


Рис. 3 – Епюри розподілу напруги вздовж ділянки контакту стружки з передньою поверхнею інструменту із ПКНБ при точінні сталі ШХ15, 60–62 HRC; ($v = 90$ м/хв, $S = 0,12$ мм/об, $t = 0,2$ мм):
1 – нормальні напруження; 2 – дотичні напруги

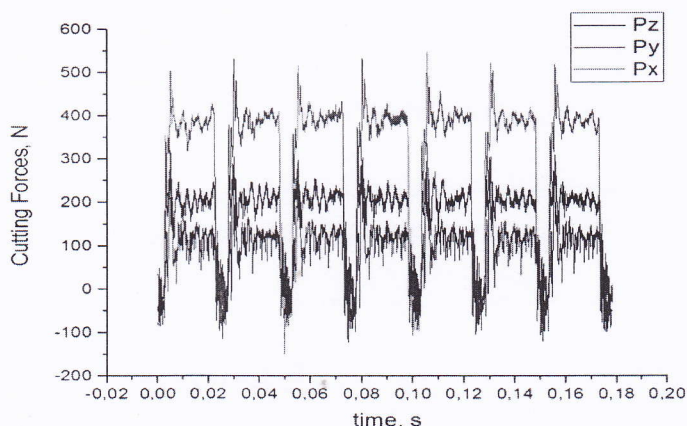


Рис. 4 – Сили різання при обробці загартованої сталі ХВГ (56–58 HRC) інструментом з ПКНБ ($v = 120$ м/хв, $t = 0,4$ мм, $S = 0,1$ мм/об, $h_z = 0,15$ мм)

Збільшення швидкості різання до 210 м/хв. призводить до суттєвого зменшення складових сил різання при обробці з ударом на швидкості різання 120 м/хв різальна кромка інструментів із ПКНБ групи ВН піддається не рівномірному руйнуванню, збільшення швидкості різання до 210 м/хв призводить до більш рівномірного зношування інструменту. Руйнування різальної кромки інструментів із ПКНБ групи VL на швидкостях різання $v = 120-210$ м/хв відбувається шляхом об'ємного макровикришування по задній та сколювання по передній поверхні інструменту. Сколювання різальної кромки проявляється у різкому зниженні сили різання. Причина руйнування інструментів із ПКНБ групи VL полягає в піковому зростанні напружень в різальному клині інструменту в момент врізання. моделювання переривчастої обробки сталі ШХ15 методом КЕ при $v = 120$ м/хв, $t = 0,4$ мм, $S = 0,1$ мм/об показує, що в момент врізання різальної кромки в оброблювану поверхню відбувається пікове зростання головних напружень до $-3,5$ ГПа (рис. 5), що перевищує середній рівень стискаючих напружень при різанні в 1,2 рази.

На основі отриманих даних розраховані ймовірності руйнування інструментів із ПКНБ групи ВН та VL при обробці з ударом. Встановлено, що ймовірність руйнування для інструментів групи ВН "Борсиніт" становить 0,1%, для інструментів групи VL cBN-TiC (55–

45 об.%), – 68,9%, зважаючи на дисперсію властивостей композиту групи VL, ймовірність їх руйнування в розглянутих умовах досить висока.

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, який 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.

Для інструментів із ПКНБ групи VL, після додаткової фінішної обробки та інструментів групи ВН у стандартному виконанні, було проведено дослідження кінетики зносу при обробці загартованої сталі ХВГ. Встановлено, що в діапазоні швидкостей різання до ($v = 210$ м/хв) модифіковані інструменти із ПКНБ групи VL в порівнянні із інструментами групи ВН характеризується стабільною роботою полікристалів (рис. 6) при невеликому навантаженні (глибина різання до $t = 0,2$).

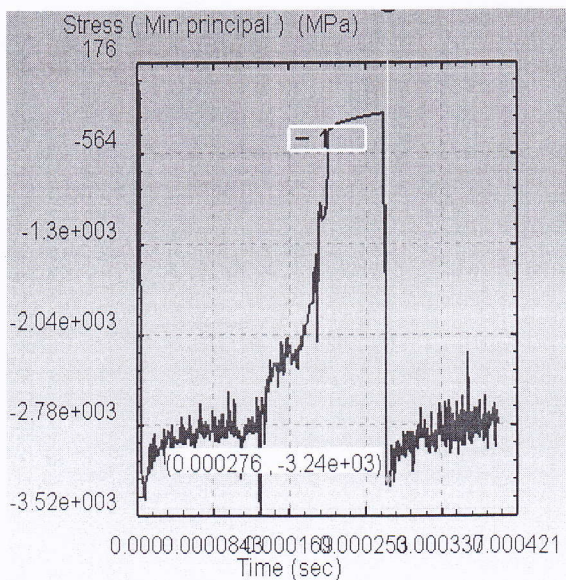


Рис. 5 – Величина третіх головних напружень у залежності від часу різання (зліва направо від моменту початку обробки до виходу з контакту)

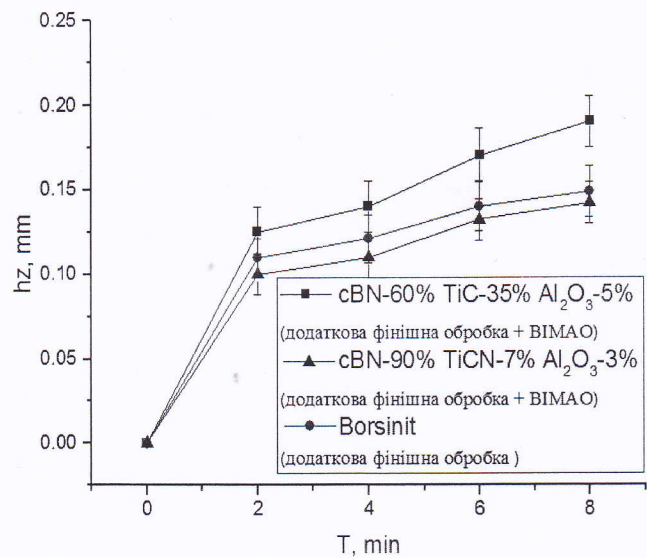


Рис. 6 – Кінетика зношування інструментів при високошвидкісній обробці загартованої сталі ХВГ (58 HRC) з ударом ($v = 210$ м/хв, $t = 0,4$ мм, $S = 0,1$ мм)

Узагальнено дані, що характеризують умови, за яких спостерігалось руйнування інструменту, дозволило скласти діаграму (рис. 7) діапазонів режимів різання в координатах «швидкість різання – глибина різання» коли можливе ефективне застосування VL і ВН модифікацій ПКНБ.

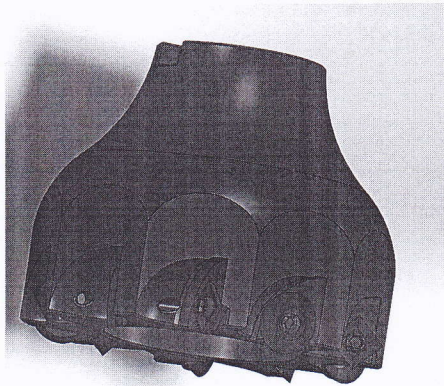


Рис. 8 – 3D модель торцевої фрези зі змінними регульованими пластинами із ПКНБ ромбічної та круглої форм

форми.

Запропоновано багатфункціональний інструмент з можливістю регулювання положень різальних елементів ромбічної та круглої форм, які розташовані по різних осях для забезпечення напівчистої та чистої обробки. 3D модель торцевої фрези зі змінними пластинами ромбічної та круглої форм представлена на (рис. 8).

Проведене комп'ютерне моделювання передньої поверхні ножів торцевої фрези на силові характеристики процесу обробки, що дозволило визначити силові навантаження при обробленні плоских поверхонь деталей торцевими фрезами з плоскою передньою поверхнею ножів та з циліндричною передньою поверхнею ножів, а також визначити вплив форми передньої поверхні циліндричних ножів торцевої фрези на величину ударного навантаження на ніж при вході у заготовку при однакових умовах обробки.

Встановлено, що використання ножів з циліндричною передньою поверхнею в конструкції торцевих фрез, призводить до зменшення площі контакту стружки з передньою поверхнею ножа та покращення умов стружководведення, в результаті чого, забезпечується зменшення динамічного силового навантаження на ножі, як в момент врізання в заготовку, так і під час різання.

Змінні регульовані пластини ромбічної та круглої форм дозволяють здійснювати напівчистову та чистову обробку, що значно збільшує продуктивність процесу фрезерування та якість оброблюваної поверхні. При можливості регулювання положення ножів процес зношування відбувається не так швидко, що дає значний економічний ефект.

5. Шляхи подальшого підвищення технологічних можливостей інструментів із ПКНБ

Розроблено системний підхід до створення захисних покриттів з дискретною топографією поверхні, що дозволяє мінімізувати напружений стан в системі «покриття-основа» при експлуатаційному навантаженні.

Розглянуто тенденції розвитку нових типів зносостійких покриттів, у тому числі наноструктурних, стосовно інструментів з ПКНБ (полікристалічного кубічного нітриду бору). Наведено основні підходи до створення наноструктурних покриттів високої твердості, що розвиваються в даний час. На основі аналізу особливостей зношування інструментів з ПКНБ

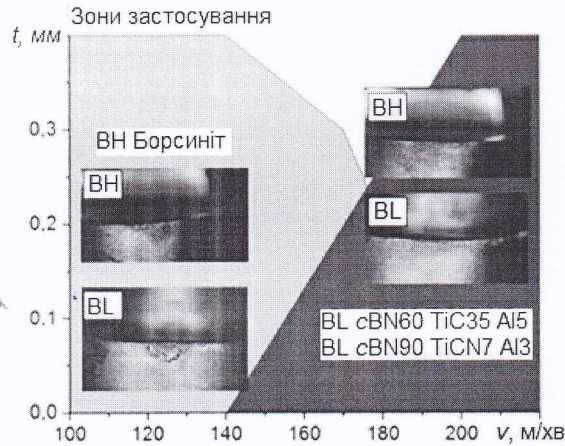


Рис. 7 – Діаграма умов ефективного використання полікристалів VN і VL типів при обробці загартованої сталі ХВГ

4. Практичне застосування модифікованих інструментів із ПКНБ груп VN, VL

Для розширення області використання модифікованих інструментів із ПКНБ групи VN та VL розглянуто стандартні конструкції торцевих фрез з різальними елементами циліндричної або конічної

виділено нові підходи до створення перспективних систем зносостійких покриттів: вибір структурних складових покриття, що виконують роль твердого мастила, що ефективно знижує інтенсивність зношування інструменту; введення до складу покриття з'єднань, що є інгібіторами реакцій хімічної взаємодії в зоні обробки; зниження коефіцієнта тертя та контактних навантажень на майданчиках контакту за рахунок твердих мастил та припрацьованих шарів покриття; забезпечення структурного стану покриття.

На основі великої кількості досліджень механізму впливу різних покриттів на закономірності зношування інструментів з ПКНБ, можна виділити кілька взаємопов'язаних підходів, які є теоретичним обґрунтуванням для створення різних перспективних систем покриттів:

- вибір структурних складових покриття, які в процесі обробки різанням на повітрі забезпечують утворення на робочих поверхнях інструментів із ПКНБ високотемпературних поліоксидних трибоплівків, що грають роль твердого мастила, що ефективно знижує інтенсивність зношування інструменту;

- введення до складу покриття сполук, що є інгібіторами реакцій хімічної взаємодії, що дозволяє змістити початок активної хімічної взаємодії в зоні обробки в діапазон вищих швидкостей різання;

- зниження коефіцієнта тертя та контактних навантажень на ділянках контакту за рахунок твердих мастил та припрацьованих шарів покриття;

- забезпечення необхідного структурного стану (аморфно-кристалічні або наноструктуровані) покриття.

Висновки

У роботі вирішена актуальна науково-технічна задача створення сучасного, вітчизняного різального інструменту із ПКНБ групи VN та VL, що забезпечує високопродуктивну якісну лезову обробку виробів із важкооброблюваних конструкційних сталей та сплавів. В результаті виконання комплексу досліджень отримані наступні основні результати:

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 VN 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 залізобуглецевих 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 VL в загартовану сталь: встановлено пікове зростання сили різання (20%), різна інтенсивність зростання нормальних (12%) та тангенційних (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 VL, 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 VH та VL 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 VH та VL 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 VL і VH.

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).

Підсумовуючи основні результати досліджень за проблематикою **створення сучасних різальних інструментів із полікристалічних надтвердих матеріалів на основі кубічного нітриду бору**, відзначимо, що на основі визначених явищ контактної взаємодії в зоні різання інструментів із ПКНБ групи VH та VL, а також розроблених методів додаткової фінішної обробки робочих поверхонь було створено прогресивний інструмент із ПКНБ та технологія його застосування при механічній обробці виробів із загартованих сталей та сплавів. Це дозволило ефективно проводити чистову обробку залізвуглецевих сплавів високої твердості на високих швидкостях різання в тому числі із динамічними навантаженнями, 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.

Приведені в роботі напрацювання, дозволяють досягнути значної загальної економії при впровадженні на машинобудівних підприємствах України.

Перелік наукових публікацій, висунутих на присудження Премії

№ з/п	Назва публікації	Вихідні дані/ реквізити публікації	Авторський доробок (кількісні показники)
1	2	3	4
I. Монографії/ підручники/ посібники/ методики			
в стовпчику 4 вказується кількість друкованих аркушів**, що належать претендентам			
** друкований аркуш – одиниця вимірювання натурального обсягу видання, що дорівнює друкованому відбитку на одній стороні паперового аркуша, що сприймає фарбу з друкарської форми, стандартного формату			
1	Высокопроизводительная чистовая лезвийная обработка деталей из сталей высокой твердости	Киев : ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2018. – 304 с.	48

№ з/п	Назва	Вихідні дані/ реквізити публікації	Співавтори
II. Статті в журналах, включених до категорії "А" Переліку наукових фахових видань України, та у закордонних виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus			
1	Application of chemography method to study surface damage phenomena	FME Transactions. – 2022. – Vol. 50, № 3. – P. 484–490.	A. F. Salenko, S. A. Klymenko, M. A. Elizarov, D. Tanovic, P. P. Melnychuk
III. Статті у наукових виданнях, включених до категорії "Б" Переліку наукових фахових видань України			
1	Обработка закаленных сталей инструментом, оснащенным композитами с пониженным содержанием кубического нитрида бора	Журнал «Оборудование и инструмент для профессионалов», 2017– № 5м.	А.С. Манохін, С.А. Клименко,
2	Технологические возможности инструментов, оснащенных композитами на основе кубического нитрида бора	Сучасні технології у машинобудуванні : зб. наук. праць. – Харків : НТУ «ХП», 2017. – Вип. 12. – С. 54–60.	С. А. Клименко, М. Ю. Копейкина,
3	Contact stresses on the rake face of cutting tools with PCBN in turning of hardened steel	Journal of engineering sciences. – 2017. – Vol. 4, Iss. 1. – С. F8–F14.	S. A. Klimenko, A. S. Manokhin, Y. A. Mel' nichuk,
4	Влияние особенностей топографии контактных поверхностей на износ режущих инструментов (обзор)	Резание и инструменты в технологических системах : зб. наук. праць. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2018. – Вып. 89. – С. 69–77.	С. Ан. Клименко, А. Г. Найдено, Н. Н. Белоусова

5	Finish machining of the cutting inserts from cubic borine nitride BL group composite	Cutting & Tools in Technological System : зб. наук. праць. – Харків : НТУ України, 2021. – № 94. – Р. 102–114.	S. A. Klimenko, S. An. Klimenko, A. S. Manokhin, A. G. Naydenko, M. Y. Kopiekina, M. O. Bondarenko, V. V. Burikin, V. I. Burlakov
6	Практика використання різального інструменту з ПКНБ групи VL при обробці загартованих сталей	Вісник Державного університету "Житомирська політехніка". Серія: Технічна інженерія. 2021. Вип. 87. С. 21-27.	П.П. Мельничук
7	Термобаричне спікання композиту алмаз–Fe ₃ C та його структурні особливості	Інструментальне матеріалознавство: Збірник наукових праць. – Вип. 25. – Київ: ІНМ ім. В. М. Бакуля НАН України, 2022. – 364 с.	Д.Л. Коростишевський, О.І. Биков, Ю.О. Мельнійчук, Д.А. Стратійчук, О.С. Осіпов
8	Моделювання стану зони стружкоутворення при торцевому фрезеруванні загартованої сталі	Вісник Національного технічного університету Харківський політехнічний університет. Серія "Технології в машинобудуванні". – Харків : НТУ «ХПІ», 2022. – № 5. – С. 3–9.	С. А. Клименко, А. С. Манохин, С. Ан. Клименко, М. Ю. Копейкіна, О. Ф. Саленко
9	Особливості фінішної обробки робочих елементів різальних інструментів із полікристалічного кубічного нітриду бору групи VL	Технічна інженерія. – 2022. – №1. – С. 55–61.	Ю. О. Мельнійчук, С. Ан. Клименко, С. А. Клименко
10	Оцінка технологічних та термобаричних особливостей механічної обробки загартованих сталей: опис явищ у контактній зоні різанням лезовими інструментами із ПКНБ групи VL	Вісник Державного університету "Житомирська політехніка". Серія: Технічна інженерія. 2022. Вип. 89. С. 27-31.	В.А. Кирилович, Я. П. Коваленко, П.П. Мельничук
11	Застосування методу скінчених елементів для пошуку шляхів оптимізації температурного поля при різанні інструментами із ПКНБ групи VL	Вісник Державного університету "Житомирська політехніка". Серія: Технічна інженерія. Прикладна механіка. 2022. Вип. 2(90). С. 22-29.	П.П. Мельничук, І.А. Бойко
12	Технологічне забезпечене лезової обробки виробів із важкооброблюваних конструкційних сталей	Журнал «Оборудование и инструмент для профессионалов», 2023– № 1 – С. 62–63.	А.О. Чумак, Я.П. Коваленко

13	Працездатність різального інструменту, оснащеного ПКНБ групи VL, при швидкісній обробці загартованої сталі	Вісник Державного університету "Житомирська політехніка". Серія: Технічна інженерія. 2023. Вип. № 1 (91). С. 17-26.	Ю. О. Мельничук, С. А. Клименко, А. С. Манохін, С. Ан. Клименко, М. Ю. Копейкіна, О. С. Осіпов, А. Г. Найденко, Л. Г. Полонський
V. Тези доповідей (одноосібні)			
1	Застосування лезових інструментів із синтетичних надтвердих матеріалів	Тези Всеукраїнської науково-практичної on-line конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених, присвяченої Дню науки, 26 травня 2022 року. Житомир : "Житомирська політехніка", 2022. – 18 с.	
2	Особливості обробки загартованих сталей та оцінка режимів різання інструментом із ПКНБ групи VL	Тези III Міжнародної науково-практичної конференції «Авіація, промисловість, суспільство», 12 травня 2022 року. Кременчук : Кременчуцький льотний коледж Харківського національного університету внутрішніх справ, 2022. - 215 с. Електронне видання.	
3	Ефективність процесів механічної обробки плоских поверхонь загартованих сталей інструментами із ПКНБ групи VL	Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XX Міжнародної науково-технічної конференції. Краматорськ-Тернопіль. 1-3 вересня 2022. 100 с.	
4	Особливості використання інструментів із ПКНБ групи VL при обробці загартованих сталей /	XVIII Міжнародна науково-практична конференція. Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції 31 жовтня – 2 листопада 2019 року / Під заг. Ред. В. Д. Колвальова. – Краматорськ: ДДМА, 2019. – С. 193–194.	
5	Математичне моделювання процесу торцевого фрезерування інструментом з пластинами із ПКНБ групи VL.	Сучасні питання виробництва та ремонту в промисловості і на транспорті: Матеріали 23-го Міжнародного науково-технічного семінару, 15–16 березня 2023 р. – Київ: АТМ України, 2023. – 36-38 с.	
6	Працездатність різального інструменту, оснащеного ПКНБ групи VL, при швидкісній обробці загартованої сталі	Вісник Державного університету "Житомирська політехніка". Серія: Технічна інженерія. 2023. Вип. 91. С. 17-26.	
7	Трибологічні особливості процесу різання інструментами із надтвердих матеріалів на основі кубічного нітриду бору.	Тези Всеукраїнської науково-практичної on-line конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених, присвяченої Дню науки "Перспективи розвитку машинобудівної інженерії та транспортних технологій", 16 травня 2023 року. Житомир: "Житомирська політехніка", 2023. С.63.	
8	Вплив трибологічних властивостей інструменту із ПКНБ групи VL на якість обробки загартованих сталей.	Тези III-ї Міжнародної науково-технічної конференції «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту – 2023», 1-3 червня 2023 року. Вінниця: ВНТУ, 2023. С.97-98.	
9	Використання інструменту із надтвердих матеріалів для обробки загартованих сталей.	Тези доповідей Дванадцятій конференції молодих вчених та спеціалістів, 19-20 жовтня 2023 року. Київ: ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України, 2023. С.53.	

Кількість вітчизняних наукових проектів та грантів, за якими працював претендент	як науковий керівник	як виконавець
		2
Кількість закордонних наукових проектів та грантів, за якими працював претендент	як науковий керівник	як виконавець
		1