Національна академія наук України Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля

Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису

# ЧУМАК АНАТОЛІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 621.9.02

### **ДИСЕРТАЦІЯ**

# «Підвищення стійкості інструментів з надтвердих композитів кубічного нітриду бору групи BL при фінішній лезовій обробці загартованих сталей»

#### Спеціальність

## 05.03.01 – Процеси механічної обробки, верстати та інструменти

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Yu

Чумак А.О.

Науковий керівник: **Клименко Сергій Анатолійович**, доктор технічних наук, професор, член-кореспондент НАН України,

Київ – 2022

#### АНОТАЦІЯ

**Чумак А. О.** Підвищення стійкості інструментів з надтвердих композитів кубічного нітриду бору групи ВL при фінішній лезовій обробці загартованих сталей. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.03.01 – Процеси механічної обробки, верстати та інструменти. – Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля Національної академії наук України, Київ, 2022.

Робота виконувалась впродовж 2016-2022 рр. в Інституті надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля Національної академія наук України. відповідно України: відомчої тематики HAH «Створення багатолезового ЛО оснащеного ΠΗΤΜ, для якісної обробки виробів інструменту, 3 важкооброблюваних матеріалів високої твердості та полімерних композицій» (ДР № 0117U000393); «Дослідження особливостей формування робочих поверхонь різальних інструментів, оснащених ПНТМ з різним вмістом бору» (ДР № 0118U003293); кубічного нітриду грант HAH України дослідницьким групам молодих вчених НАН України, договір № 11/01-2022(4) (ДР № 0122U002232) на виконання наукового проєкту «Розробка та дослідження нових композитів на основі кубічного нітриду бору для оснащення різальних інструментів, які застосовуються в умовах ударних навантажень».

*Мета* дисертаційної роботи полягає у підвищенні стійкості інструментів із надтвердих композитів кубічного нітриду бору групи BL при фінішній обробці загартованих сталей за рахунок формування робочих поверхонь різальних інструментів та зміною умов контактної взаємодії інструменту з оброблюваним матеріалом.

*Об'єкт дослідження* – процес обробки загартованих сталей різальним інструментом оснащеним ПКНБ груп BL.

Предмет дослідження – підвищення ефективності фінішної лезової обробки загартованих сталей інструментами з надтвердих композитів групи BL за рахунок зміни умов контактної взаємодії між інструментальним та оброблюваним матеріалом.

Для досягнення поставленої мети в роботі використано наступні *методи дослідження:* скануюча електронна мікроскопія, методи оптичної мікроскпії, метод мікроіндентування, хемографії, високошвидкісне точіння (ударне та безударне), точіння в газовому середовищі.

В дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-технічну задачу, що полягає у підвищенні стійкості інструментів із КНБ групи BL при фінішній обробці загартованих сталей за рахунок формування робочих поверхонь різальних інструментів та зміною умов контактної взаємодії інструменту з оброблюваним матеріалом, вивченні закономірностей формування структури та властивостей матеріалів інструментального призначення. Основні висновки та результати роботи полягають у наступному:

Проведений комплекс досліджень із взаємодії інструментів, оснащених ПКНБ групи ВН та BL із загартованими сталями у зоні різання, довів, що ефективність використання інструментів зумовлена станом поверхневого шару робочих елементів інструментів.

На основі проведених стійкісних досліджень інструментів із ПКНБ групи ВL на базі основних компонентів: cBN, TaN, TiC, TiN при точінні загартованих сталей ШХ15 (56–62 HRC) та ХВГ (56–64 HRC) на швидкостях різання до 215 м/хв встановлено, що найбільш перспективним для застосування є композити з вмістом cBN 55–45 об.% та зв'язкою на основі ТіC, за рахунок більш однорідного структурного стану матеріалу.

Методом склерометрування встановлено, що за сукупністю механічних властивостей поверхневого шару найкращим є матеріал, який має склад *c*BN (55 об.%)-ТіС. Однорідність механічних властивостей даного матеріалу, яка визначена за величиною СКВ сили тертя-мікрорізання, перевищує показники зразку cBN (75 об.%)-ТіС і значно перевищує властивості ПКНБ складу *c*BN (55 об.%)-ТаN.

Методом кінцевих елементів проведено дослідження напруженодеформованго стану в зоні стружкоутворення під час різання загартованих сталей інструментами з ПКНБ групи ВН та ВL за умов зміни коефіцієнта тертя µ від 0,1 до 0,3 та встановлено, що зміна коефіцієнта тертя в даному діапазоні не впливає на значення напружено-деформованого стану для інструментів. Збільшення сили тертя на передній поверхні інструментів в основному впливає на збільшення температури в зоні різання.

Проведено дослідження зміни складових сили різання при обробці загартованої сталі ШХ 15 з ударом, інструментами з ПКНБ групи BL та BH в діапазоні швидкостей різання 120–210 м/хв та встановлено, що обробка супроводжується динамічним ударним ефектом, що проявляється у вигляді пікових навантажень в момент врізання інструменту та досягає величини до 20% складових сили різання  $P_z$  та  $P_y$ .

Моделювання переривчастої обробки при v = 120 м/хв, t = 0,4 мм, S = 0,1 мм/об методом КЕ показує, що на поверхні різця в області різальної кромки можливе зростання третіх головних напружень до значень -3,24 ГПа, що перевищує середній рівень стискаючих напружень при різанні в межах ділянки, на якій реалізується різання, в 1,2 рази що обумовлює ймовірність руйнування різця в розглянутих умовах до 68,9%.

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 i3 ПКНБ оброблюваним 3 матеріалом та величину зносу. на 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.

Показано, що при чорновому шліфуванні пластини із ПКНБ групи BL розмір зерен алмазу, якими проводиться обробка, здійснює більший вплив на якість оброблюваної поверхні у порівнянні виконанням оброблення пластин із ПКНБ з високим (90–95 об.%) вмістом КНБ, що призводить до збільшення в 1,4 рази висоти мікронерівностей.

Методом хемографії встановлено, що на різальних елементах із ПКНБ є дефектні зони, особливо поряд з різальною кромкою, які в основному представлені мікротріщинами різної форми та розмірів, що утворюються ще на етапі виготовлення інструментів та є потенційними зонами руйнування різальної кромки.

Встановлено, що BiMAO чинить вплив на радіус округлення різальних кромок композитів із ПКНБ групи BL, округлення різальної кромки після обробки BiMAO 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 від кромки для конкретних умов застосування інструменту.

На основі результатів дослідження кінетики зносу модифікованих різальних інструментів із ПКНБ групи ВН та ВL 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 BH.

Розроблені інструменти пройшли дослідну перевірку в умовах підприємств: ТОВ "Ерідон Тех" м. Полтава, ПП "Немирів Авто" м. Немирів, ПРаТ "Трубосталь" м. Коростень.

Результати дисертації опубліковано в 15 наукових працях, серед яких: 1 монографія, 1 стаття у виданні, яке входить до міжнародної наукометричної

бази «Scopus», 6 статей у спеціалізованих фахових виданнях України, 7 тез доповідей на міжнародних конференціях.

Дисертаційна робота складається зі вступу, 6 розділів, загальних висновків, переліку використаних джерел та додатків. Дисертація викладена на 159 друкованих аркушах основного тексту. Повний обсяг дисертації, анотації, списку публікацій за темою дисертації українською та англійською мовами, додатків становить 232 сторінки які містять 28 таблиць, 138 рисунків, 115 найменувань використаних джерел, 5 додатків на 12 аркушах.

**Ключові слова:** полікристалічний кубічний нітрид бору, BL, BH, лезова обробка, стійкості інструментів, загартовані сталі

#### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

#### Монографія

1. Клименко С.А. Високопродуктивна чистова лезова обробка деталей із сталей високої твердості / С. А. Клименко, А. С. Манохин, М. Ю. Копейкина, С. Ан. Клименко, Ю. А. Мельнийчук, А. О. Чумак – Киев : ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2018. – 304 с. (Здобувачем вивчене питання підвищення швидкості різання інструментом із ПКНБ (п. 4.2)).

#### Стаття у міжнародній наукометричній базі «Scopus»

2. Salenko A. F. Application of chemography method to study surface damage phenomena / A. F. Salenko, S. A. Klymenko, A. A. Chumak, M. A. Elizarov, D. Tanovic, P. P. Melnychuk // FME Transactions. – 2022. – Vol. 50, № 3. – P. 484–490. (Здобувачем проведено дослідження фізико-механічних властивостей та випробування різальної здатності інструменту з ПКНБ). https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57889822000&origin=recordpage

Статті у фахових виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз.

3. Клименко С. А. Технологические возможности инструментов, оснащенных композитами на основе кубического нитрида бора / С. А. Клименко, М. Ю. Копейкина, А. О. Чумак // Сучасні технології у машинобудуванні : зб. наук. праць. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – Вип. 12. – С. 54–60. (Здобувач прийняв участь в дослідженнях з визначення стійкості інструментів із ПКНБ, дослідження зразків, аналізу вихідних даних).

4. Клименко С. А. Контактные напряжения на передней поверхности инструментов, оснащеннях композитами на основе кубического нитрида бора, при точении закаленной стали / С. А. Клименко, С. Ан. Клименко, А. С. Манохин, Ю. А. Мельнийчук, М. Ю. Копейкина, А. О. Чумак // Journal of engineering sciences. – 2017. – Vol. 4, Iss. 1. – С. F8–F14. (Здобувачем

проведене дослідження зразків інструментів на основі КНБ та виконаний аналіз контактних напружень).

5. Клименко С. Ан. Влияние особенностей топографии контактных поверхностей на износ режущих инструментов (обзор) / С Ан. Клименко, А. Г. Найденко, А. О. Чумак, Н. Н. Белоусова // Резание и инструменты в технологических системах : зб. наук. праць. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2018. – Вып. 89. – С. 69–77. (Здобувачем проведено дослідження літератури з фізико-механічних властивостей та випробування різальної здатності інструментів).

6. Chumak A. O. Finish machining of the cutting inserts from cubic borine nitride BL group composite / A. O. Chumak, S. A. Klimenko, S. An. Klimenko, A. S. Manokhin, A. G. Naydenko, M. Y. Kopiekina, M. O. Bondarenko, V. V. Burikin, V. I. Burlakov // Cutting & Tools in Technological System : зб. наук. праць. – Харків : НТУ України, 2021. – № 94. – Р. 102–114. (Здобувачем виконані експерименти фінішної обробки інструментів із КНБ групи BL).

7. Клименко С. А. Моделювання стану зони стружкоутворення при торцевому фрезеруванні загартованої сталі / С. А. Клименко, А. С. Манохин, А. О. Чумак, С. Ан. Клименко, М. Ю. Копєйкіна, О. Ф. Саленко // Вісник Національного технічного університету Харківський політехнічний університет. Серія "Технології в машинобудуванні". – Харків : НТУ «ХПІ»,. 2022. – № 5. – С. 3–9. (Здобувач прийняв участь в обговоренні, виконав аналіз даних).

8. Чумак А. О. Особливості фінішної обробки робочих елементів різальних інструментів із полікристалічного кубічного нітриду бору групи ВL / А. О. Чумак, Ю. О. Мельнійчук, С. Ан. Клименко, С. А. Клименко // Технічна інженерія. – 2022. – №1. – С. 55–61. (Здобувачем виконані дослідження з фінішної обробки інструментів групи BL).

#### Стаття у науковому періодичному виданню України

9. Клименко С. А. Обработка закаленных сталей инструментом, оснащенным композитами с пониженным содержание кубического нитрида бора / Ю. А. Мельнийчук, М. Ю. Копейкина, С. Ан. Клименко, А. О. Чумак // Журнал «Оборудование и инструмент для профессионалов», 2017– № 5м. (Здобувачем здійснено випробування різальної здатності композитів з невисоким вмістом КНБ).

#### Праці апробаційного характеру

10. Манохін А. С. Контактна взаємодія в зоні різання при точінні загартованої сталі інструментами з ПНТМ на основі сВN груп ВН і ВL / А. С. Манохін, С. А. Клименко, М. Ю. Копейкіна, А. О. Чумак // Инженерия поверхности и реновація изделия : мат. 17-й Международ. науч.-техн. конф., 29 мая-02 июня 2017 г., г. Одесса. – Киев : АТМ Украины, 2017. – С. 120–122. (Здобувачем прведена участь в експериментах з точіння, виконаний аналіз даних).

11. Клименко С. А. Режущие инструменты, оснащенные сверхтвердыми композитами на основе кубического нитрида бора / С. А. Клименко, М. Ю. Копейкина, Ю. А. Мельнийчук, С. Ан. Клименко, А. С. Манохин, А. О. Чумак // Новые и нетрадиционные технологи в ресурсо- и энергосбережении : мат. Международ. науч.-техн. конф., 16–18 сентября 2019 г., г. Одесса. – Одесса : ОНПУ, 2019. – С. 69–70. (Здобувачем прведена участь в експериментах, виконаний аналіз даних).

12. Клименко С. А. Моделювання стану зони стружкоутворення при торцевому фрезеруваннії загартованої сталі / С. А. Клименко, А. С. Манохін, С. Ан. Клименко, М. Ю. Копєйкіна, А. О. Чумак // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем : тез доп. XII міжнарод. наук.-практ. конф., 26–27 травня 2022 р., м. Чернігів.. В 2-х т.– Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2022. – Т. 1. – С. 37–39. (Здобувачем проведена участь в обговоренні результатів досліджень та написанні публікації).

13. Клименко С. Ан. Дослідження контактних напружень та розрахунок йомвірності руйнування інструментів із ПКНБ групи ВL при ударних навантаженнях / С. Ан. Клименко, А. О. Чумак, А. С. Манохін, С. А. Клименко, Ю. Ю. Румянцева. Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку : мат. XX Міжнародної науково-технічної конференції, 01–03 вересня 2022 р., м. Тернопіль.– Краматорськ-Тернопіль : ДДМА, 2022. – 93–94 с. (Здобувачем проведено дослідження структури та складу зразків інструментів із ПКНБ).

14. Чумак А. О. Особливості використання інструментів із ПКНБ групи ВL при обробці загартованих сталей / С. Ан. Клименко // 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. (Здобувачем проведена участь у дослідженнях та написанні публікації).

15. Клименко С. А. Вібро-магнітна-абразивна обробка різальних пластин із ПКНБ / А. О. Чумак // Надтверді, композиційні матеріали та покриття: отримання, властивості, застосування: Тези доповідей Одинадцятої конференції молодих вчених та спеціалістів, 28–29 травня 2020 р., м. Київ. – Київ: ІНМ НАНУ, 2020 – С. 7–8. (Здобувачем прведена участь в експериментах фінішної обробки інструментів із ПКНБ, проведений аналіз даних).

#### ABSRTACT

**Chumak A.O.** Increasing the stability of tools made of superhard composites of cubic boron nitride of the BL group during the final blade processing of hardened steels. – Qualifying scientific work on manuscript rights. Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences (Doctor of Philosophy) on the specialty 05.03.01 – Mechanical processing processes, machines and tools. – Institute of Superhard Materials named after V.M. Bakulya of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2022. The work was carried out during 2016–2022 at the Institute of Superhard Materials named after V. M. Bakulya of the National Academy of Sciences of Ukraine. according to the departmental topic of the National Academy of Sciences of Ukraine: "Creation of a multi-blade tool equipped with PNTM for high-quality processing of products from difficult-to-process materials of high hardness and polymer compositions" (DR No. 0117U000393); "Investigation of the peculiarities of the formation of the working surfaces of cutting tools equipped with PNTM with different content of cubic boron nitride" (DR No. 0118U003293); grant of the National Academy of Sciences of Ukraine to research groups of young scientists of the National Academy of Sciences of Ukraine, contract No. 11/01-2022(4) (DR No. 0122U002232) for the implementation of the scientific project "Development and research of new composites based on cubic boron nitride for equipping cutting tools used in impact conditions loads".

*The aim* of the dissertation work is to increase the stability of tools made of superhard composites of cubic boron nitride of the BL group during the finishing treatment of hardened steels due to the formation of the working surfaces of cutting tools and changing the conditions of contact interaction of the tool with the processed material.

*The object* of research is the process of processing hardened steels with a cutting tool equipped with PKNB of BL groups.

*The subject* of the study is to improve the efficiency of the finishing blade processing of hardened steels with tools made of superhard composites of the BL group due to changing the contact interaction conditions between the tool and the processed material.

To achieve the goal, the following *research methods* were used in the work: scanning electron microscopy, optical microscopy methods, microindentation method, chemography, high-speed turning (impact and non-impact), turning in a gas environment.

In this dissertation an actual scientific and technical problem is solved, which consists in increasing the stability of tools from KNB of the BL group during the finishing treatment of hardened steels due to the formation of the working surfaces of cutting tools and changing the conditions of contact interaction of the tool with the processed material, studying the patterns of formation of the structure and properties of tool materials appointment. The main conclusions and results of the work are as follows.

The conducted set of studies on the interaction of tools equipped with PKNB of the VN and BL groups with hardened steels in the cutting zone proved that the effectiveness of the use of tools is determined by the state of the surface layer of the working elements of the tools.

On the basis of the durability studies of tools from PKNB of the BL group based on the main components: cBN, TaN, TiC, TiN when turning hardened steels ShX15 (56–62 HRC) and KhVG (56–64 HRC) at cutting speeds of up to 215 m/min, it was established , that the most promising for use are composites with cBN content of 55–45 vol.% and a bond based on TiC, due to the more homogeneous structural state of the material.

Using the sclerometer method, it was established that the material with the cBN (55 vol.%)-TiC composition is the best in terms of the overall mechanical properties of the surface layer. The homogeneity of the mechanical properties of this material, which is determined by the magnitude of the friction-microcutting force SKV, exceeds the parameters of the cBN (75 vol.%)-TiC sample and

significantly exceeds the properties of the PCNB of the cBN (55 vol.%)-TaN composition.

The finite element method was used to study the stress-strain state in the chip formation zone during cutting of hardened steels with tools from PKNB of the VN and BL groups under the conditions of changing the coefficient of friction  $\mu$  from 0.1 to 0.3, and it was established that the change in the coefficient of friction in this range does not affect on the value of the stress-strain state for tools. An increase in the friction force on the front surface of the tools mainly affects an increase in the temperature in the cutting zone.

A study of the changes in the components of the cutting force during the processing of hardened steel ShKH 15 with impact, tools from PKNB of the BL and VN groups in the range of cutting speeds of 120–210 m/min was conducted, and it was established that the processing is accompanied by a dynamic impact effect, which manifests itself in the form of peak loads at the moment cutting tool and reaches a value of up to 40% of the components of the cutting force Pz and Py. Simulation of intermittent processing at v = 120 m/min, t = 0.4 mm, S =0.1 mm/rev using the KE method shows that on the surface of the cutter in the area of the cutting edge, the third principal stresses may increase to values of -3.24 GPa, which is 1.2 times higher than the average level of compressive stresses during cutting within the area where the cutting is performed, which causes the probability of the cutter to break in the considered conditions up to 68.9%. In order to assess the influence of the environment on the parameters of the contact interaction of tools with PCNB and the processed material, a study of the processing of hardened steel SHX15 (58 HRC) in a protective gas environment was carried out, it was found that the oxygen of the environment does not have a significant effect on the contact interaction of tools with PCNB with the processed material and on the amount of wear. X-ray microspectral analysis of wear areas demonstrates the presence of oxygen during processing in air and its absence during turning in a nitrogen environment, which confirms the presence of a direct

chemical interaction of cBN-Fe in an oxygen environment as the main factor causing tool wear at high cutting speeds.

It is shown that during rough grinding of a plate made of PCNB of the BL group, the size of the diamond grains used for processing has a greater influence on the quality of the machined surface in comparison with the processing of plates made of PCNB with a high (90–95 vol.%) content of KNB, which leads to an increase in 1.4 times the height of micro irregularities.

Using the chemography method, it was established that there are defective zones on PCNB cutting elements, especially near the cutting edge, which are mainly represented by microcracks of various shapes and sizes, which are formed at the stage of tool manufacturing and are potential zones of cutting edge destruction. It was established that ViMAO affects the radius of rounding of the cutting edges of composites made from PCNB of the BL group, the rounding of the cutting edge after treatment with ViMAO has the correct geometric shape along the entire length of the cutting edge with a smooth connection to both the front and back surfaces; the dependence of the radius of rounding of the cutting edge on the processing time was obtained, which makes it possible to form the radius of rounding of the cutting edge for specific conditions of use of the tool. Based on the results of the study of the kinetics of wear of modified cutting tools from PCNB of the VN and BL groups during the processing of hardened XBF steel with impact, a diagram of the ranges of cutting modes in the coordinates "cutting speed-cutting depth" was obtained, which made it possible to determine the zones of effective application of modified tools from PKNB of the BL groups and BH. The results of the dissertation were tested in the conditions of enterprises: LLC "Eridon Tech" in Poltava, PE "Nemyriv Avto" in Nemyriv, PRAT "Trubostal" in Korosten.

The results of the dissertation were published in 15 scientific works, including: 1 monograph, 1 article in the Scopus International scientific database, 6 articles in specialized technical publications of Ukraine, 7 abstracts of reports at international conferences.

The dissertation consists of an introduction, 6 chapters, conclusions, a list of used sources and appendices. The thesis is presented on 159 printed sheets of the main text. The full volume of the dissertation, abstract and list of publications on the topic of the dissertation in Ukrainian and English is 232 pages, 28 tables, 138 figures, used sources – 115 names, 5 appendices on 12 pages.

**Key words:** polycrystalline cubic boron nitride, BL, BH, blade processing, tool resistance, hardened steel

#### Publications certifying the testing of the dissertation

#### Monograph

Klymenko S.A. Vysokoproduktyvna chystova lezova obrobka detaley iz staley vysokoyi tverdosti / S. A. Klymenko, A. S. Manokhyn, M. YU. Kopeykyna, S. An. Klymenko, YU. A. Mel'nyychuk, A. O. Chumak – Kyev : YSM ym. V. N. Bakulya NAN Ukrayny, 2018. – 304 s.

Article in the scientific databases "Scopus"

Salenko A. F. Application of chemography method to study surface damage phenomena / A. F. Salenko, S. A. Klymenko, A. A. Chumak, M. A. Elizarov, D. Tanovic, P. P. Melnychuk // FME Transactions. – 2022. – Vol. 50, № 3. – P. 484–490.

https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57889822000&origin=recordpage Articles in the scientific publishing companies of Ukraine which are included into international scientific databases.

Klymenko S. A. Tekhnolohycheskye vozmozhnosty ynstrumentov, osnashchennykh kompozytamy na osnove kubycheskoho nytryda bora / S. A. Klymenko, M. YU. Kopeykyna, A. O. Chumak // Suchasni tekhnolohiyi u mashynobuduvanni : zb. nauk. prats'. – Kharkiv : NTU «KHPI», 2017. – Vyp. 12. – S. 54–60.

4. Klimenko S. A. Kontaktnyye napryazheniya na peredney poverkhnosti instrumentov, osnashchennyakh kompozitami na osnove kubicheskogo nitrida bora, pri tochenii zakalennoy stali / S. A. Klimenko, S. An. Klimenko, A. S. Manokhin, YU. A. Mel'niychuk, M. YU. Kopeykina, A. O. Chumak // Journal of engineering sciences. – 2017. – Vol. 4, Iss. 1. – S. F8–F14

5. Klimenko S. An. Vliyaniye osobennostey topografii kontaktnykh poverkhnostey na iznos rezhushchikh instrumentov (obzor) / S An. Klimenko, A. G. Naydenko, A. O. Chumak, N. N. Belousova // Rezaniye i instrumenty v tekhnologicheskikh sistemakh : zb. nauk. prats'. – Khar'kov: NTU «KHRI», 2018. – Vyp. 89. – S. 69–77.

6. Chumak A. O. Finish machining of the cutting inserts from cubic borine nitride
BL group composite / A. O. Chumak, S. A. Klimenko, S. An. Klimenko,
A. S. Manokhin, A. G. Naydenko, M. Y. Kopeikina, M. O. Bondarenko,
V. V. Burikin, V. I. Burlakov // Cutting & Tools in Technological System : zb.
nauk. prats'. – Kharkiv : NTU Ukrayiny, 2021. – № 94. – P. 102–114.

7. Klymenko S. A. Modelyuvannya stanu zony struzhkoutvorennya pry tortsevomu frezeruvanni zahartovanoyi stali / S. A. Klymenko, A. S. Manokhyn, A. O. Chumak, S. An. Klymenko, M. YU. Kopeykyna, O. F. Salenko // Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu Kharkivs'kyy politekhnichnyy universytet. Seriya "Tekhnolohiyi v mashynobuduvanni". – Kharkiv : NTU «KHPI», 2022. –  $N_{2}5.$  – S. 3–9

8. Chumak A. O. Osoblyvosti finishnoyi obrobky robochykh elementiv rizal'nykh instrumentiv iz polikrystalichnoho kubichnoho nitrydu boru hrupy BL / A. O. Chumak, YU. O. Mel'niychuk, S. An. Klymenko, S. A. Klymenko // Tekhnichna inzheneriya. – 2022. – N1. – S. 55–61.

Article in the scientific publishing companie of Ukraine

Klimenko S. A. Obrabotka zakalennykh staley instrumentom, osnashchennym kompozitami s ponizhennym soderzhaniye kubicheskogo nitrida bora / YU. A. Mel'niychuk, M. YU. Kopeykina, S. An. Klimenko, A. O. Chumak // Zhurnal «Oborudovaniye i instrument dlya professionalov», 2017– № 5m.

Practical evaluation articles

10. Manokhin A. S. Kontaktna vzayemodiya v zoni rizannya pry tochinni zahartovanoyi stali instrumentamy z PNTM na osnovi cBN hrup BH i BL / A. S. Manokhin, S. A. Klymenko, M. YU. Kopeykina, A. O. Chumak // Ynzheneryya poverkhnosty y renovatsiya yzdelyya : mat. 17-y Mezhdunarod. nauch.-tekhn. konf., 29 maya-02 yyunya 2017 h., h. Odessa. – Kyev : ATM Ukrayny, 2017. – S. 120–122.

11. Klimenko S. A. Rezhushchiye instrumenty, osnashchennyye sverkhtverdymi kompozitami na osnove kubicheskogo nitrida bora / S. A. Klimenko, M. YU. Kopeykina, YU. A. Mel'niychuk, S. An. Klimenko, A. S. Manokhin, A. O.

Chumak // Novyye i netraditsionnyye tekhnologi v resurso- i energosberezhenii : mat. Mezhdunarod. nauch.-tekhn. konf., 16–18 sentyabrya 2019 g., g. Odessa. – Odessa : ONPU, 2019. – S. 69–70.

12. Klymenko S. A. Modelyuvannya stanu zony struzhkoutvorennya pry tortsevomu frezeruvannii zahartovanoyi stali / S. A. Klymenko, A. S. Manokhin, S. An. Klymenko, M. YU. Kopyeykina, A. O. Chumak // Kompleksne zabezpechennya yakosti tekhnolohichnykh protsesiv ta system : tez dop. XII mizhnarod. nauk.-prakt. konf., 26–27 travnya 2022 r., m. Chernihiv.. V 2-kh t.– Chernihiv : NU «Chernihivs'ka politekhnika» , 2022. – T. 1. – S. 37–39.

13. Klymenko S. An. Doslidzhennya kontaktnykh napruzhen' ta rozrakhunok yomvirnosti ruynuvannya instrumentiv iz PKNB hrupy BL pry udarnykh navantazhennyakh / S. An. Klymenko, A. O. Chumak, A. S. Manokhin, S. A. Klymenko, YU. YU. Rumyantseva. Vazhke mashynobuduvannya. Problemy ta perspektyvy rozvytku : mat. XX Mizhnarodnoyi naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi, 01–03 veresnya 2022 r., m. Ternopil'.– Kramators'k-Ternopil' : DDMA, 2022. – 93–94 s.

14. Chumak A. O. Osoblyvosti vykorystannya instrumentiv iz PKNB hrupy BL pry obrobtsi zahartovanykh staley / S. An. Klymenko // XVIII Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiya. Mashynobuduvannya ochyma molodykh: prohresyvni ideyi – nauka – vyrobnytstvo. Materialy mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi 31 zhovtnya – 2 lystopada 2019 roku / Pid zah. Red. V. D. Kolval'ova. – Kramators'k: DDMA, 2019. – S. 193-194.

15. Klymenko S. A. Vibro-mahnitna-abrazyvna obrobka rizal'nykh plastyn iz PKNB / A. O. Chumak // Nadtverdi, kompozytsiyni materialy ta pokryttya: otrymannya, vlastyvosti, zastosuvannya: Tezy dopovidey Odynadtsyatoyi konferentsiyi molodykh vchenykh ta spetsialistiv, 28–29 travnya 2020 r., m. Kyyiv. – Kyyiv: INM NANU, 2020 – S. 7–8.

<b>3MICT</b>	
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	22
ВСТУП	23
1. ЗАСТОСУВАННЯ РІЗАЛЬНИХ ІНСТРУМЕНТІВ ІЗ	
КОМПОЗИТІВ НА ОСНОВІ КУБІЧНОГО НІТРИДУ БОРУ	30
1.1. Використання різальних інструментів із ПКНБ для обробки	
важкооброблюваних матеріалів	30
1.2. Основні механізми зношування різальних інструментів із	
ПКНБ з різним вмістом нітриду бору	37
1.3. Модифікація робочих поверхонь різальних інструментів для	
підвищення стійкості	49
Висновки до розділу 1	60
2. МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ	61
2.1. Оброблювані матеріали, обладнання та інструменти для	
проведення досліджень	61
2.2. Методика лабораторних дослідження	64
2.2.1 Електронно-мікроскопічні дослідження	64
2.2.2. Дослідження шорсткості та топографії поверхонь	
різальних елементів із ПКНБ	64
2.2.3. Дослідження методом скретч-тестування	67
2.2.4. Дослідження складових сили різання	68
2.2.5. Визначення працездатності різального інструменту	69
2.2.6. Зношування інструменту із ПКНБ при обробці в	
контрольованому газовому середовищі	70
2.2.7. Дослідження контактних явищ при обробці інструментом	
з ПКНБ	71
2.2.8. Напружено-деформований стан в зоні стружкоутворення	72
2.2.9. Вібро-магнітно-абразивна обробка різальних пластин із ПКНБ	78

2.2.10. Оцінка розвитку пошкоджень різальних пластин із	
ПКНБ методом демографії	80
Висновки до розділу 2	82
3. КОНТАКТНА ВЗАЄМОДІЯ В ЗОНІ РІЗАННЯ ЗАГАРТОВАНИХ	
СТАЛЕЙ ІНСТРУМЕНТАМИ ІЗ ПКНБ	83
3.1. Вплив зміцнення поверхневого шару оброблюваного	
матеріалу на характеристики процесу різання при обробці	
загартованої сталі	83
3.2. Контактування стружки із передньою поверхнею	
інструменту, оснащеного ПКНБ групи BL	92
3.3. Контактна взаємодія в зоні різання і працездатність	
різального інструмента, оснащеного ПКНБ групи BL	98
3.4. Зв`язок зносу інструменту із ПКНБ та статистичними	
механічними характеристиками поверхневого шару композиту	103
Висновки до розділу 3	124
4. НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН В ЗОНІ	
СТРУЖКОУТВОРЕННЯ ПІД ЧАС РІЗАННЯ ЗАГАРТОВАНИХ	
СТАЛЕЙ	125
4.1. Моделювання напружено-деформованого стану в зоні	
стружкоутворення	125
4.2. Дослідження сил різання під час обробки з ударами	128
Висновки до розділу 4	136
5. КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ РІЗАННЯ ТА ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ	
РІЗАЛЬНИХ ІНСТРУМЕНТІВ	137
5.1. Особливості обробки різанням в контрольованому газовому	
середовищі	137
5.2. Оброблюваність полікристалічних надтвердих композитів на	
основі кубічного нітриду бора групи ВН та BL	140

5.3. Топографія робочих поверхонь різальних пластин із ПКНБ	
групи ВН після додаткового фінішної обробки	149
5.4. Визначення зносу та часу настання відмови інструментів із	
ПНТМ на основі КНБ методом хемографії	160
5.5. Вібро-магнітно-абразивна обробка різальних пластин із ПКНБ	164
5.5.1. Вплив на продуктивність процесу ВіМАО зернистості	
феромагнітного порошку	164
5.5.2. Вплив кількість деталей в партії на інтенсивність	
обробки при ВіМАО	168
5.5.3. Вибір робочого середовища при ВіМАО	169
5.5.4. Зміна мікрорельєфу робочих поверхонь різальних	
пластин із ПКНБ при обробці методом ВіМАО	171
5.6. Стійкість різальних інструментів із ПКНБ групи ВН та BL	182
Висновки до розділу 5	188
6. ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ІНСТРУМЕНТІВ,	
ОСНАЩЕНИХ ПКНБ	180
6.1. Рекомендації з лезової обробки загартованих сталей	
інструментами ПКНБ груп ВН, ВL	190
6.2. Дослідно-промислове випробування інструментів при обробці	
сплавів високої твердості	192
Висновки до розділу 6	202
ВИСНОВКИ	204
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	207
ДОДАТКИ	220
Додаток А	221
Додаток Б	224
Додаток В	226
Додаток Г	228
Додаток Д	230

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

cBN	– кубічний нітрид бору;
BH	– кубічний нітрид бору з високим вмістом бору;
BL	– кубічний нітрид бору з низький вмістом бору;
CVD	<ul> <li>– хімічне осадження з парової фази;</li> </ul>
EDX	– метод енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії;
SEM	<ul> <li>скануючий електронний мікроскоп;</li> </ul>
VB	– середній знос по задній поверхні, мкм;
ABT	– апарат високого тиску;
ACM	– мікропорошок алмазу синтетичний;
АЦП	– аналогово-цифровий перетворювач;
BiMAO	– вібро-магнітна-абразивна обробка:
	biopo marinina aopasibila oopooka,
ДТА	<ul> <li>– диференціальний термічний аналіз;</li> </ul>
ДТА КМК	<ul><li>диференціальний термічний аналіз;</li><li>керамо-матричний композит;</li></ul>
ДТА КМК МАО	<ul> <li>– диференціальний термічний аналіз;</li> <li>– керамо-матричний композит;</li> <li>– магнітно-абразивна обробка;</li> </ul>
ДТА КМК МАО МОТС	<ul> <li>диференціальний термічний аналіз;</li> <li>керамо-матричний композит;</li> <li>магнітно-абразивна обробка;</li> <li>мастильно-охолоджувальне технологічне середовище;</li> </ul>
ДТА КМК МАО МОТС ПКНБ	<ul> <li>диференціальний термічний аналіз;</li> <li>керамо-матричний композит;</li> <li>магнітно-абразивна обробка;</li> <li>мастильно-охолоджувальне технологічне середовище;</li> <li>полікристалічний кубічний нітрид бору;</li> </ul>
ДТА КМК МАО МОТС ПКНБ РЕМ	<ul> <li>диференціальний термічний аналіз;</li> <li>керамо-матричний композит;</li> <li>магнітно-абразивна обробка;</li> <li>мастильно-охолоджувальне технологічне середовище;</li> <li>полікристалічний кубічний нітрид бору;</li> <li>растрова електронна мікроскопія;</li> </ul>

#### ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. На сьогодні близько 80% деталей сучасної техніки отримуються методами механічної обробки. Найбільш часто механічній обробці піддаються деталі машин і механізмів, експлуатація яких пов'язана із значними навантаженнями, внаслідок чого для виготовлення використовують матеріали з високими механічними ïχ властивостями. До таких матеріалів відносяться важкооброблювані конструкційні залізовуглецеві сталі високої твердості, корозійностійкі та жароміцні сталі та тверді сплави. Обробка виробів з таких матеріалів характеризується низькою продуктивністю, великими витратами енергії, підвищеною витратою інструменту.

Розвиток технологій механічної обробки важкооброблюваних конструкційних матеріалів пов'язаний з підвищенням швидкості та точності обробки, що веде до створення нових різальних інструментів із використанням високоефективних інструментальних композитів із полікристалічних надтвердих матеріалів на основі кубічного нітриду бору (ПКНБ).

Композити із ПНТМ на основі КНБ поділяються на дві групи – з високим вмістом бору (ВН) – 90–95 об.% *с*ВN та низьким (ВL) – 40–65 об.% *с*ВN. Відмінність в хімічному складі і фізико-механічних властивостях композитів обумовлює особливості їх ефективного використання. Композити групи BL дозволяють проводити ефективну обробку важкооброблюваних матеріалів на швидкостях різання 150–210 м/хв, що у два рази вище ніж при використанні інструментальних композитів групи ВН. Для забезпечення надійності та високої ефективності використання різальних композитів із ПКНБ групи BL на швидкостях різання до 200 м/хв ключовими факторами стають геометрія інструменту, технологічні особливості формування та точність робочих поверхонь інструменту. Проблемі створення та використання інструментів із ПКНБ присвячені роброти як вітчизняних так і зарубіжних вчених, серед яких С.А. Клименко, А.С. Манохін, В.М. Бушля, В.М. Волкогон, І.А. Петруша, Sugihara, Т., De Godoy,V., Diniz, A., Chou Y., Koönig W., Davies M. A та інші. Роботи даних вчених присвячені розробці нових складів та типів різальних інструментів із ПКНБ так дослідженню процесів їх використання при обробці важкооброблюваних металів та сплавів.

Підвищення стійкості різальних інструментів із ПКНБ при фінішній лезовій обробці загартованих сталей базується на результатах широкого кола наукових досліджень, природи та закономірностей протікання механічних та фізико-хімічних процесів у зоні контакту інструменту з оброблюваним зношування, матеріалом, механізмів руйнування інструменту та закономірностей формування робочих поверхонь. Результати такого комплексу наукових досліджень є запорукою удосконалення процесів виготовлення та використання інструментів із ПКНБ.

Отже, в залежності від умов експлуатації інструменти із ПКНБ груп ВН та ВL вимагають розробки окремих підходів та методів формування робочих поверхонь. Це дозволить суттєво підвищити стійкість інструменту в умовах високошвидкісного фінішного різання в тому числі в умовах ударних навантажень.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами. Робота виконувалася в ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України відповідно до відомчої тематики НАН України: «Створення багатолезового інструменту, оснащеного ΠHTM, для якісної обробки виробів 3 важкооброблюваних матеріалів високої твердості та полімерних композицій» (ДР № 0117U000393); «Дослідження особливостей формування робочих поверхонь різальних інструментів, оснащених ПНТМ з різним вмістом нітриду бору» (ДР № 0118U003293); грант НАН України кубічного дослідницьким групам молодих вчених НАН України, договір № 11/01-2022(4) (ДР № 0122U002232) на виконання наукового проєкту «Розробка та дослідження нових композитів на основі кубічного нітриду бору для оснащення різальних інструментів, які застосовуються в умовах ударних навантажень».

Метою роботи є підвищення стійкості інструментів із надтвердих композитів кубічного нітриду бору групи ВL при фінішній обробці загартованих сталей за рахунок формування робочих поверхонь різальних інструментів та зміною умов контактної взаємодії інструменту з оброблюваним матеріалом.

Для досягнення постановленої мети було сформульовано такі задачі:

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 з врахуванням наявності атмосферного повітря.

4. Дослідити оброблюваність полікристалічних надтвердих композитів на основі нітриду бору групи BL.

5. Дослідити топографію робочих поверхонь різальних пластин із ПКНБ групи BL.

6. Розробити додаткові методи фінішної обробки інструментів із ПКНБ груп ВН та BL в залежності від умов експлуатації.

7. Встановити умови обробки загартованих сталей модифікованим інструментом із ПКНБ груп ВН та BL.

8. Виконати дослідно-промислову перевірку отриманих результатів.

**Об'єкт** дослідження – процес обробки загартованих сталей різальним інструментом оснащеним ПКНБ груп BL.

**Предмет** дослідження – підвищення ефективності фінішної лезової обробки загартованих сталей інструментами з надтвердих композитів групи

BL за рахунок зміни умов контактної взаємодії між інструментальним та оброблюваним матеріалом.

Для досягнення поставленої мети в роботі використано наступні **методи** дослідження: скануюча електронна мікроскопія, методи оптичної мікроскпії, метод мікроіндентування, хемографії, високошвидкісне точіння (ударне та безударне), точіння в газовому середовищі.

#### Наукова новизна:

1. Вперше встановлено, що керування напруженим станом інструменту із ПКНБ групи BL 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 BL 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 контактної зоні, значне збільшення ступеню деформації оброблюваного матеріалу (1,8 – у зоні зсуву).

3. Встановлено, що збільшення радіуса заокруглення різальної кромки інструменту із ПКНБ групи BL 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.

4. Методом хемографії встановлено, що в області різальної кромки інструментів із ПКНБ групи ВL мають місце енергетично навантажені ділянки, які утворюються ще на етапі виготовлення робочих елементів інструментів, і для зменшення їх впливу на працездатність інструменту необхідно проводити додаткову фінішну обробку, у якості якої пропонується вібро-магнітно-абразивна обробка.

#### Практичне значення отриманих результатів полягає у наступному:

1. Визначено умови фінішної обробки різальних пластин із ПКНБ групи ВН та BL – вібро-магнітно-абразивна обробка (ВіМАО).

2. Вдосконалено пристрій для практичної реалізації процесу BiMAO, що складається з контейнера з карбіду кремнію SiC, електродвигуна з ексцентриком і пристроєм для створення електромагнітного поля; пристрій забезпечує оптимальні робочі характеристики для процесу BiMAO – 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 BL мікропорошками алмазу ACM 2/1 та групи BH – мікропорошками ACM 14/10.

4. 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.

5. Результати дисертаційної роботи пройшли дослідну 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 ТіN в 6 разів та ПКНБ виробництва КНР – на 44%. Особистий внесок здобувача. Основні результати роботи, які виносяться на захист, одержані автором самостійно. Постановка завдань досліджень, розробка методології та підходів до їх вирішення визначалася спільно з науковим керівником.

Особистий внесок автора в отриманні наукових і практичних результатів, представлених в роботі, полягає в наступному: розробці загальної схеми проведення досліджень; розробці та обґрунтуванні концепції підвищення стійкості інструментів із ПКНБ при точінні загартованих залізовуглецевих сталей; визначенню механізмів контактної взаємодії в зоні різання при обробці загартованих сталей інструментами із силових закономірностей ПКНБ: визначенню процесу різання та закономірностей на стійкість інструментами із ПКНБ груп ВН та BL; проведені оцінки ймовірності руйнування композитів із ПКНБ групи ВН та BL; розробці додаткових методів фінішної обробки інструментів із ПКНБ груп ВН та BL в залежності від умов експлуатації; аналізі отриманих результатів і розробці на їх основі практичних рекомендацій по підвищенню стійкості інструментів із ПКНБ при фінішній обробці загартованих залізовуглецевих сталей в тому числі в умовах ударних навантажень.

Апробація матеріалів дисертації. Основні результати дисертації були представлені на 7 міжнародних конференціях: 17-й Міжнародна науковотехнічна конференція «Інженерія поверхні та реновація виробів» (м. Одеса, 2017. 2019 pp.); XII Міжнародна науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (м. Чернігів, 2022 р.); XX Міжнародна науково-технічна конференція «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку» (м. Тернопіль, XVIII 2022 p.); Міжнародна конференція науково-практична «Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво (МОМ–2018)» (м. Київ, 2018 р.).

Публікації. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 15 наукових праць, серед яких 1 монографія, 1 стаття у виданнях, що належать до міжнародних наукометричних баз, 6 статей у фахових виданнях України, 7 тез доповідей на міжнародних конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, 6 розділів, загальних висновків, переліку використаних джерел та додатків. Дисертація викладена на 159 друкованих аркушах основного тексту. Повний обсяг дисертації, анотації, списку публікацій за темою дисертації українською та англійською мовами, додатків становить 232 сторінки які містять 28 таблиць, 138 рисунків, 115 найменувань використаних джерел, 5 додатків на 12 аркушах.

#### **РОЗДІЛ 1**

# ЗАСТОСУВАННЯ РІЗАЛЬНИХ ІНСТРУМЕНТІВ ІЗ КОМПОЗИТІВ НА ОСНОВІ КУБІЧНОГО НІТРИДУ БОРУ

# 1.1. Використання різальних інструментів із ПКНБ для обробки важкооброблюваних матеріалів

У сучасному машинобудуванні, де широко використовуються важкооброблювані конструкційні матеріали, застосування інструментів із полікристалічних надтвердих матеріалів на основі кубічного нітриду бору (ПКНБ) [1–3] є основою забезпечення високої ефективності виробництва. ПКНБ являються одними із найтвердіших та хімічно інертних до заліза інструментальних матеріалів. За своєю природою ПКНБ це кераміка, але завдяки унікальним фізико-механічним властивостям вони мають багато переваг, являючись альтернативою або перевищують за працездатністю тверді сплави та традиційну різальну кераміку. В деяких випадках лезова обробка інструментами із ПКНБ може замінити операції шліфування.

Використовуючи інструменти із ПКНБ при обробці конструкційних матеріалів високої твердості та міцності можна досягти суттєвого підвищення продуктивності обробки, в порівнянні з традиційним твердосплавним та керамічним інструментом, за рахунок збільшення швидкості різання та забезпечити отримання оброблених деталей високої якості.

Вміст *с*ВN у композитах на основі кубічного нітриду бору, як правило, адаптують до умов обробки і хімічного складу оброблюваних матеріалів і він може значно змінюватись (ISO 513-2014): 1) 45–65 об.% *с*BN у матриці на основі сполук елементів Ta, Ti, C, N, B, Al, O (група BL, low-CBN grades); 2) 70–95 об.% *с*BN переважно з металевою матрицею Co i Ni (група BH, high-CBN grades). Для використання у якості матричних матеріалів найпридатнішими сполуками є: TiN, Ti(C,N), TiC, TaN, TiB<sub>2</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, SiC, MAX- фази (наприклад Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub>), що зумовлено їх високою твердістю, значним модулем пружності, хімічною стабільністю, високим опором корозії та високою зносостійкістю; 3) інструменти із захисним покриттям (група BC). Найбільш поширеними є дві перші групи композитів.

Галуззю використання інструментів із ПКНБ групи BL є чистова безперервна обробка або обробка з незначними ударними навантаженнями. Вони ефективні при високих швидкостях різання – 200–250 м/хв [4, 5]. В роботах [6–8] показано, що матеріали з низьким вмістом кубічного нітриду бору (45–65 об.%) демонструють найбільшу стійкість інструменту під час безперервного точіння загартованих сталей.

Інтенсивність зношування інструментів із ПКНБ, особливо на високих швидкостях різання, залежить від інтенсивності протікання механічних, хімічних та адгезійних процесів в контактній зоні внаслідок трибохімічних реакцій взаємодії між інструментальним та оброблюваним матеріалами. ПКНБ групи ВН мають більш високу в'язкість руйнування, є більш міцними, тому оснащені ними інструменти зазвичай рекомендуються для обробки з більшими зрізами та для обробки з відносно значним динамічним навантаженням [9]. Фізико-механічні властивості керамічних інструментальних композитів наведено в табл. 1.1

Таблиця 1.1

Властивості	Різальна кераміка	ПКНБ групи	
		BH	BL
Твердість (HV), ГПа	16–19	40–44	31–36
Твердість (HV) при 1000 °C, ГПа	8–10	~18	—
В'язкість руйнування (МПа·м <sup>1/2</sup> )	3,3	10,0	3,7
Теплопровідність (Вт/м·°С)	12–18	100–150	44
Модуль Юнга (кН/мм <sup>2</sup> )	420	680	587
Коефіцієнт теплового розширення (×106/K)	8,0	4,9	4,7

Фізико-механічні властивості інструментальних композитів [6]

Для порівняння працездатності інструментів, оснащених композитами груп ВН і ВL, проведені дослідження при точінні загартованої сталі, використовуючи водоемульсійну суміш (6% мастила) [10]. Глибина різання та подача – 0,2 мм та 0,3 мм/об відповідно. Швидкість різання 200 м/хв була однаковою для всіх інструментів. Досліджували ряд композитів груп ВН та ВL з керамічною матрицею зі сполуками ТiN, TiC, Ti (C, N), (Al, Co)-з'єднаннями, TiN із сполуками Al та ін. Дисперсність складової сВN у структурі композиту < 2–8 мкм.

Основний висновок, зроблений з результатів порівняльних випробувань – інструмент, оснащені композитами з малим вмістом cBN (50–65%), демонструють значно більш тривалу роботу на фінішних операціях порівняно з інструментом, оснащеним композитами cBN групи BH (рис. 1.1).

ТіN, Ті (C, N), ТіC, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, SiC, MAX-фази (наприклад, Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub>) та ін., як матричні матеріали, давно привертають увагу дослідників, що обумовлено їх високою твердістю та модулем пружності, хімічною стабільністю, опором корозії та зносостійкістю. В [11] переваги матеріалу групи BL (на прикладі системи cBN-TiC) у різальному інструменті продемонстровано порівняно з матеріалом групи BH при обробці сплавів EN31, M2 та SKD11 в умовах фінішного точіння (рис. 1.2).

Зіставлення характеру зношування інструменту із зазначеними матеріалами призводить до інтерпретації процесу зношування у термінах, запропонованих загалом для інструментів, оснащених ПКНБ [11]:

– зношування внаслідок хімічної взаємодії матеріалу інструменту з повітрям навколишнього середовища та матеріалом оброблюваної деталі. Дефектність структури матеріалу інструменту прискорює цей процес – як і для інших ковалентних матеріалів для *c*BN існує гранична температура (900 °C), вище за яку локалізована деформація, що виникає при нижчих температурах, поширюється, утворюючи протяжні дислокаційні структури, підвищена хімічна активність яких дає додатковий внесок – деградацію структури за механізмом травлення;  – за сприятливих умов на контактній ділянці інструменту зі стружкою утворюється тонкий захисний шар, близький за складом до матеріалу оброблюваного виробу;

– стабільність захисного шару визначає його контролюючий вплив на зношування інструменту. При нижчих температурах та/або швидкостях різання шар втрачає стійкість і видаляється з контактної зони. Зношування поверхонь інструменту також інтенсифікується через адгезію шару до основи стружки та відриву фрагментів матеріалу інструменту разом із захисним шаром.



Рисунок 1.1 – Вплив складу керамічної матриці, розміру зерен сВN та його вмісту у КМК на тривалість роботи інструменту до моменту досягнення критичного зносу  $h_3 = 0,3$  мм



Рисунок 1.2 – Контактна ділянка інструменту після 20 хв обробки загартованої сталі М2Н: *a* – з композитом групи ВН; *б* – з композитом групи ВL

Встановлено, що інструмент з матеріалами групи BL має підвищене зношування по задній поверхні при важкому переривчастому різанні, в той час як інструменти з матеріалами групи BH менш чутливий до динамічних навантажень, але швидше зношується при високих швидкостях різання [12, 13]. В [14] показано, що інструмент з композитами групи BH краще підходить для роботи в умовах переривчастого різання, а з композитами групи BL – для безперервної, без ударної обробки.

В [15] вивчався механізм зношування та характер поведінки інструменту з матеріалами груп BL і BH за різних умов різання. Обробляли заготовки із загартованої сталі AISI 4340 (52 HRC) у станах, що забезпечують умови безперервного різання, незначних динамічних навантажень та різання з ударом. Застосовується інструмент з композитами, що містять 50% *c*BN у зв'язці TiC, 65% *c*BN у зв'язці TiCN та 90% *c*BN у зв'язці Co-Ni (табл. 1.2).

Встановлено, що зношування інструменту відбувається в результаті хімічної взаємодії, що термічно активується на контактних ділянках – чим вищий об'ємний вміст з BN в композиті, тим більша швидкість його зношування в умовах безперервного точіння, особливо при високих швидкостях різання.

П	65% <i>c</i> BN,	50% <i>c</i> BN,	90% <i>c</i> BN,
Показники	зв'язка TiCN	зв'язка ТіС	зв'язка Co-Ni
Границя міцності під час	1000	800	1200
згинання, МПа	~1000	~800	~1200
Теплопровідність λ, Вт/мК	50–55	44	100–120

Властивості ПКНБ

За наявності в композиті сполучних фаз ТіС і ТіСN у кількості відповідно 50 і 65%, інструмент зношується з меншою швидкістю, порівняно з інструментом, оснащеним композитом з 90% *c*BN у зв'язці Со-Ni в умовах безперервного різання (рис. 1.3).



Рисунок 1.3 – Тривалість роботи інструменту за різних умов різання сталі (PcBN груп BH, BL; AISI 4340, 52 HRC) [23]: А – безперервне різання; Б – різання з незначним динамічним навантаженням; В – різання з ударом

При безперервному різанні інструмент із композитом 90% *c*BN у зв'язці Co-Ni за 5 хв роботи зношується по задній поверхні до величини, що перевищує максимально допустиме значення. Інструмент з композитом 50% *c*BN у зв'язці ТiC показує низьку швидкість зношування при безперервному різанні, а з композитом 65% *с*ВN у зв'язці ТіСN найкраще працює при незначному динамічному навантаженні.

При обробці з ударом інтенсивність термічно обумовленого зношуванням зерен з *c*BN знижується, а складові зв'язки в композиті зношуються з підвищеною швидкістю. У таких умовах найбільшу працездатність має інструмент, оснащений композитом з 90% *c*BN.

В [16] приводяться результати досліджень з визначення характеру зносу інструментів із ПКНБ з різним вмістом нітриду бору при точні з ударом сталі M50 твердістю 62–64 HRC на різних швидкостях різання. Показано, що стійкість інструментів із ПКНБ зменшується із збільшенням швидкості різання. На швидкості різання до 120 м/хв найкращу стійкість показували інструменти з ПКНБ групи ВН, при збільшені швидкості різання до 240 м/хв найкращу працездатність показували інструменти із ПКНБ групи BL. Основний вид зносу інструментів – формування фаски зносу по задній поверхні та утворення лунки по передній. Переважаючим фактором зменшення стійкості інструментів із ПКНБ групи ВН було підвищення температури, пов'язане зі збільшенням швидкості різання. Висока стійкість інструментів із ПКНБ групи BL пояснюється хімічною стійкістю композиту та розм'якшенням оброблюваного матеріалу в зоні різання, що полегшує видалення стружки. Однак слід відмітити, що збільшення швидкості різання до 468 м/хв призводить до теплового розм'якшення робочих поверхонь інструментів із ПКНБ групи BL і, як наслідок, їх руйнування.

Також автори показали вплив форми різальної кромки на стійкість інструментів із ПКНБ груп ВН, ВL. Для цього було використано інструменти із фаскою та заокругленою різальною кромкою при точні з ударом та без. Інструменти із фаскою на різальній кромці демонструють високу стійкість при без ударному точінні, тоді як закруглення різальної кромки інструменту більш ефективно для роботи із ударом.

В роботі [17] показано порівняння працездатності інструментів з різальною керамікою та ПКНБ групи ВL при безперервному та
переривчастому точінні. При постійній швидкості різання інструменти із ПКНБ групи BL демонструють значно вищу стійкість в порівнянні із різцями з різальної кераміки, однак при точінні з ударом стійкість двох типів композитів була однаково низькою.

З аналізу технічної літератури можна зробити висновок, що найбільш на стійкість різальних інструментів впливає температура в контактній зоні, яка визначає інтенсивність протікання хімічних реакцій взаємодії, дифузійних та адгезійних, механічних процесів. Особливо це актуально для інструментів із ПКНБ групи BL, які працюють в області високих швидкостей різання та температур.

Отже можна зробити висновок, що в залежності від умов експлуатації інструменти із ПКНБ груп ВН та ВL 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.

# 1.2. Основні механізми зношування різальних інструментів із ПКНБ з різним вмістом нітриду бору

В залежності від оброблюваного матеріалу, режимів обробки, особливостей оточуючого середовища характерними механізмами зношування інструментів із ПКНБ є наступні: абразивний [18–21], адгезійний [22–24], дифузійний [25, 26] та хімічний (за рахунок хімічної взаємодії елементів композиту на основі кубічного нітриду бору із оброблюваним матеріалом та елементів оточуючого середовища) [27–30].

В процесі обробки виділити один перевалюючий механізм зношування інструменту складно – процес зношування потрібно розглядати як результат сумісної дії декількох видів контактної взаємодії у зоні різання. Проте слід відмітити, що зношування інструментів з різним вмістом КНБ має свої особливості. Для інструментів із ПКНБ групи ВН характерне абразивне стирання на низьких швидкостях різання та інтенсивна хімічна взаємодії із оброблюваним матеріалом на високих швидкостях різання під впливом високої температури [31, 32]. Інструменти із ПКНБ групи BL, завдяки низькому вмісту КНБ, більш стійкі до хімічної взаємодії на високих швидкостях різання, тому для них більш характерне абразивне зношування та температурна деградація робочих поверхонь інструменту.

Знос різальних інструментів відбувається за рахунок утворення лунки на передньої поверхні, утворення тріщин та просідання різальної кромки, а також стирання по задній поверхні. Саме інтенсивність утворення лунки по передній поверхні та фаски зносу на задній поверхні інструменту обумовлюють його стійкості до досягнення визначеного критерію та визначають загальну працездатність.

Утворення лунки, що викликано розчиненням інструментального матеріалу в стружці, абразивним впливом твердих частинок зі складу оброблюваного матеріалу та вільних частинок зі складу інструментального композиту, адгезійною взаємодією інструментального та оброблюваного матеріалів на передній поверхні інструменту. Адгезійне зношування відбувається в результаті схоплювання матеріалів інструменту та стружки на локальних ділянках під дією високих тисків і температури та руйнуванням утворених зв'язків, що супроводжується вириванням окремих фрагментів матеріалу інструменту.

Зношення інструменту по задній поверхні відбувається через тертя по оброблюваній деталі. Нижче розглянуто основні механізми зношування інструментів із ПКНБ із різним вмістом кубічного нітриду бору при обробці важкооброблюваних матеріалів.

В роботі [33] приведено дослідження по визначенню механізмів зношування для інструментів із різним вмістом КНБ при точінні з ударом та без удару загартованої сталі AISI 4340 (56 HRC) на різних швидкостях різання. Інструменти були оснащені ПКНБ марок CBN7025 (група BH) та CBN7015 (група BL) (Sandvik Coromant).

На швидкості різання 150 м/хв для інструментів із ПКНБ групи BL в основному притаманне абразивне зношування робочих поверхонь. Також автори відмічають наявність гладких поверхонь на зношених ділянках, що характерно для умов дифузії бору в стружку та оброблюваний матеріал.

Зі збільшенням швидкості різання до 270 м/хв робочі поверхні інструментів піддавались дії високих температур, завдяки чому реалізувалося більш інтенсивне дифузійне зношування. Найбільше знос інструменту завдяки цьому проявлявся на передній поверхні у вигляді лунки. Рентгенівська спектроскопія показала на робочих поверхнях інструменту невелику кількість заліза (до 12%), що спричинено дифузією. Висока температура призводила до розм'якшення сполучної фази, у наслідок чого відбувалося випадіння частинок КНБ з композиту.

Для інструментів із ПКНБ групи ВН характерний абразивний знос на швидкості 150 м/хв та інтенсивна хімічна взаємодія з оброблюваним матеріалом при швидкості різання 190 м/хв. Абразивний знос проявляється у вигляді рисок та подряпин по задній поверхні, хімічна взаємодія – у вигляді гладкої робочої поверхні у зоні зносу на задній поверхні та лунки зносу на передній поверхні. При точінні з ударом автори відмічають відсутність тріщин і сколів на різальній кромці, що говорить про високу в'язкість композитів, якими були оснащені інструменти.

В роботі [34] проводили дослідження різальних інструментів марок ВN7000 на кобальтовій зв'язці (група ВН) та BN350 на керамічній зв'язці ТіN (група BL) (Sumitomo Electric Industries) при обробці нікелевої жароміцної сталі Inconel 718 на швидкостях різання 100–500 м/хв.

Автори відмічають збільшення фаски зносу для обох типів інструментів зі збільшенням швидкості різання. На швидкості різання 100 м/хв знос робочих поверхонь інструментів відбувається за рахунок абразивного зношування та механічного пошкодження. На швидкості різання 500 м/хв високу зносостійкість показує інструмент із ПКНБ із низьким вмістом КНБ та керамічною зв'язкою. Автори пояснюють це тим, що керамічні зв'язуючі на основі ТіN мають кращу хімічну стійкість щодо нікелю порівняно із КНБ. В роботі приводиться поперечний переріз зношеної ділянки інструменту із ПКНБ групи BL, де під тонким адгезійним шаром спостерігалася гладка поверхня, характерна для дифузійної взаємодії. На основі цього, автори роблять висновок, що на високих швидкостях різання під дією температури головний механізм зношування пов'язаний з дифузією бору в оброблюваний матеріал.

В роботі [35] досліджувалися процеси різання нержавіючої сталі AISI 316L та високолегованої інструментальної сталі Vanadis 4E інструментами із композиту на основі КНБ із зв'язкою Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>.

Інструменти із ПКНБ з вмістом КНБ 50 об.% показали високу зносостійкість при обробці сталі AISI 316L на швидкості різання 300 м/хв. Як рахують автори, знос інструменту пов'язаний з хімічною взаємодією ПКНБ з оброблюваним матеріалом та дифузія бору зі складу КНБ. При збільшені швидкості різання до 500 м/хв знос інструментів швидко збільшувався завдяки підвищенню температури різання. Приблизно таку ж інтенсивність зношування демонструють інструменти, оснащені ПКНБ з об'ємним вмістом КНБ 60, 65 об.% на обох швидкостях різання.

При точінні сталі Vanadis 4E інструменти із ПКНБ з вмістом КНБ 50 об.% показали найбільшу швидкість зношування. Найбільшу зносостійкість демонструють інструменти із ПКНБ з вмістом КНБ 60, 65 об.%.

Автори [35] припускають, що на швидкості різання 150 м/хв переважними механізмами зношування є абразивний та дифузійний. Зі збільшенням швидкості різання дані механізми зношування супроводжуються активною механічною деградацією матеріалу інструменту та його руйнуванням.

Автори [36] провели серію випробувань різальних інструментів із ПКНБ з різним вмістом КНБ (30%, 45%, 60%) при точінні сталі Inconel 718 на швидкостях різання 250, 350 та 450 м/хв. Найбільшу стійкість показали інструменти із ПКНБ з вмістом кубічного нітриду бору 45, 60%.

Механізми зношування автори визначали методом SEM на трьох етапах роботи інструменту при швидкості різання 250 м/хв – Т1 являє собою

початковий період зносу (45 с після початку точіння), T2 – половина терміну служби інструмента (3 хв), T3 – закінчення терміну служби інструменту (6 хв).

На першому етапі утворюються зазубрини на різальній кромці, знос по задній поверхні майже не визначається. Матеріал заготовки утворює наліт на передній поверхні інструменту.

В період T2, знос по задній поверхні інструменту зростав, по передній поверхні збільшувалась кількість нальоту із оброблюваного матеріалу.

Для останнього етапу ТЗ автори вказують, що вплив температури різання є визначальним при руйнуванні інструменту.

Проведений EDX аналіз зношених ділянок інструменту показав наявність хімічних елементів Al i Ti, які входять до складу зв'язки, та Cr, Fe, Nb i Ni з матеріалу заготовки. Отже, автори, виокремлюють дифузійне зношування, як домінуючий механізм при високій швидкості різання для інструментів із ПКНБ групи BL. Щоб зменшити інтенсивність дифузійного зношування потрібно протидіяти впливу високої температури в зоні різання. В роботі [37] для зменшення інтенсивності дифузійних процесів та хімічних реакцій взаємодії використовувалася система для подачі рідкого азоту в зону

Дослідження приведені в [38] показано, що склад оброблюваного матеріалу та його твердість значно впливають на стійкість інструментів із ПКНБ. Так інструменти із ПКНБ групи ВН на металевій зв'язці демонстрували високу стійкість при обробці швидкорізальної сталі, яка є вкрай абразивним матеріалом, через вміст дуже великих карбідів в своїй структурі. І навпаки інструменти із ПКНБ групи ВL демонстрували більшу стійкість при обробці інструментальних сталей, які є менш абразивними.

Davies та Luo [39, 40] додатково досліджували вплив твердих включень в оброблюваному матеріалі на стійкість інструментів із ПКНБ. Вони визначили, що головним механізмом зношування інструменту є стирання зв'язки твердими частинками оброблюваного матеріалу. SEM-огляд зношених ділянок інструменту показав наявність канавок по задній та

передній поверхнях інструменту, що характерно для абразивного стирання. Механізм абразивного зношування полягає в тому, що тверді включення в оброблюваному матеріалі руйнують зв'язку композиту, цим самим послаблюючи міцність утримання частинок КНБ, які випадають з матриці композиту та інтенсифікують абразивне зношування інструменту.

В роботі [41] детально досліджено особливості високошвидкісної обробки сплаву Inconel 718 інструментами із ПКНБ групи ВН та ВL. Інструменти були оснащені композитами із вмістом КНБ 85–95 об.% на кобальтовій зв'язці та із вмістом КНБ 55–65 об.% з керамічною зв'язкою на основі ТіN. Випробування відбувалися на швидкості різання 20, 100 та 300 м/хв.

Зображення ділянок інструментів, зношених при експлуатації з різними швидкостями різання, показано на рис. 1.4. При роботі зі швидкістю різання 20 м/хв, автори відмічають сильну адгезію оброблюваного матеріалу на передній поверхні інструментів з двох груп ПКНБ (рис. 1.5). Поперечний переріз (шліф) робочої ділянки різальної кромки інструменту після точіння (рис. 1.6, *a*, *б*) показав наявність лунки зносу по передній поверхні. Поверхня лунки мала значні нерівності та проникаючі тріщини.



Рисунок 1.4 – Зношені ділянки на передній поверхні інструменту зі збільшенням швидкості різання від 20 до 300 м/хв [41] (PCBN-A – ПКНБ групи BH; PCBN-B – ПКНБ групи BL)



Рисунок 1.5 – Передня поверхня інструментів після точіння на швидкості 20 м/хв; *а* – ПКНБ групи ВН, *б* – ПКНБ групи BL[41]









Рисунок 1.6 – Поперечні перерізи робочих ділянок різальних кромок інструментів із ПКНБ груп ВН (*a*) та ВL (б) після точіння на швидкості 20 м/хв (*a*, б), 100 м/хв (*e*, *e*), 300 м/хв (*d*, *e*) [41]

Такий характер зносу пов'язаний з тим, що у процесі сходу стружки по передній поверхні інструменту відбувається безперервне створювання та відривання адгезійного шару, що веде до механічного виривання частинок КНБ та утворення тріщин у матеріалі композиту.

При збільшенні швидкості різання до 100 м/хв адгезійний шар на передній поверхні інструменту зникає. Це пов'язано із збільшенням температури різання, що веде до зниження механічних властивостей оброблюваного матеріалу, часткового появлення розплаву оброблюваного матеріалу та його видалення із контактної зони.

Поперечний переріз робочих ділянок різальних кромок інструментів (рис. 1.6, *в*, *г*) показує, що передня поверхня стала гладкою, що говорить про знос частинок КНБ внаслідок дифузії.

Таким чином, домінуючим фактором зношування інструменту на швидкості різання 100 м/хв є зміна механічної взаємодії у контактної зоні на хімічну під дією високої температури. При збільшенні швидкості до 300 м/хв

має місце аналогічна картини зношування інструменту що і при швидкості різання 100 м/хв, тільки із більшою інтенсивністю.

На рис. 1.6, *д*, *е* показано переріз робочих ділянок різальних кромок інструментів після точіння на швидкості 300 м/хв. Жодного механічного руйнування робочих поверхонь зафіксовано не було. Крім того, автори відмічають збільшення стійкості інструментів із низьким вмістом бору за рахунок менш інтенсивної взаємодії з оброблюваним матеріалом.

Проаналізувавши наведені вище результати, можна зробити висновок, що для інструментів із ПКНБ, незалежно до якої вони належать групи, на високих швидкостях різання найбільш часто характерна хімічна взаємодія із оброблюваним матеріалом та дифузійні процеси, інтенсивність яких визначає температурою різання.

Розглянемо більш детально хімічні реакції взаємодії матеріалів інструменту та виробу у зоні різання та роль температури в цих реакціях.

За результатами аналізу мікроструктури інструментальних матеріалів і зношування інструментів із високим та низьким вмістом КНБ в роботі [42] дійшли висновку, що зношування інструментів із ПКНБ суттєво пов'язане з хімічної взаємодією у зоні різання та взаємодією з киснем оточуючого середовища. Тонкий шар, що за складом близький до оброблюваного матеріалу, осаджується на передньої поверхні інструменту в зоні контакту із стружкою. При низьких температурах, такий шар стає нестабільним і періодично видаляється із зони різання, у результаті чого поверхня інструменту в подальшому зношуванню, механізм якого має адгезійний Автор стверджує, що відносно низька теплопровідність характер. інструменту з низькою концентрацією КНБ призводить до зменшення утворення окислювального шару, що сприяє збільшенню терміну служби інструменту.

В роботах [43, 44] на передній та задніх поверхнях інструменту було виявлено наліт, утворений в результаті зношування інструменту, та який складається із з'єднань елементів, що входять до складу оброблюваного та інструментального матеріалів, а також продуктів їх взаємодії з киснем повітря. В роботі[45] дійшли висновку, що у процесі зношування на поверхнях інструменту із ПКНБ має місце формування нальоту і видалення із зони різання у вигляді рідкої фази продуктів плавлення хімічних сполук, які утворено за рахунок взаємодії у зоні різання. Наліт включає в себе елементи з інструментального та оброблюваного матеріалу, продукти їх окислювання. На підставі результатів експериментальних досліджень продуктів взаємодії між інструментом із ПКНБ, оброблюваним матеріалом та навколишнім середовищем автори в роботі [46] виявили, що зношування інструменту при обробці загартованих сталей визначається хімічною взаємодією у зоні різання при температурах 800–1200 °С. При таких температурах швидкість реакції взаємодії з киснем повітря збільшується, відбувається утворенням та видалення з контактних ділянок інструменту борного ангідриду B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Як свідчать результати ДТА (диференціальний термічний аналіз), при 1200 °С починається зменшення маси системи «ПКНБ-Fe», швидкість протікання хімічних реакції різко збільшується з ростом температури до1460 °С і супроводжується ендотермічним ефектом. Структура окислених ПКНБ має вигляд ниткоподібних кристалів складного хімічного складу. Крім основних елементів – бору, кисню і алюмінію, в них є домішки магнію, калію, кальцію і натрію. Нитки не завжди прямолінійні, деякі замкнуті у вигляді петель, мають відгалуження.

В роботах [43, 47–50] приведена модельна схема хімічної взаємодії інструментального ПКНБ із оброблюваним матеріалом (рис. 1.7 [50]). Показано, що утворення рідкої фази відбувається при повторному нагріві системи. При температурі 1380 °С відбувається початок протікання хімічних реакцій взаємодії з утворення з'єднань (Fe, Ni, Cr)<sub>x</sub>B<sub>y</sub>Ta(Fe, Ni, Cr)<sub>x</sub>B<sub>y</sub>O<sub>z</sub>, при повторному нагріві відбувається утворення і плавлення евтектик типу Fe-Fe<sub>2</sub>B з утворенням рідкої фази при температурі 1177 °С.

Наведені в даних роботах температури початку протікання хімічних реакцій утворення з'єднань бору вищі за середню температуру різання при

обробці матеріалів на основі (Fe, Ni, Cr), проте в роботах [51, 52] були проведені дослідження температури на плямах спалаху на контактної плями стружки з передньою поверхнею інструменту в режимі in-situ.



Рисунок 1.7 – Модельна схема хімічної взаємодії ПКНБ із оброблюваним матеріалом

З цією ціллю в отвір твердосплавного інструменту в районі зони контакту на відстані 0,1 мм від різальної кромки різця було розміщено алмазне «вікно» товщиною 0,5 мм рис. 1.8.



Рисунок 1.8 – Експериментальна модель для температурних досліджень в контактній зоні [51]: *1* – алмазне вікно; *2* – різальна пластина; *3* – дзеркало;

4 – інфрачервоне випромінювання; 5 – оптичний тепловізор

Інфрачервоне випромінювання від плями спалаху на передній поверхні інструменту в процесі різання проектувалося на сканер термографічної

системи з високою роздільною здатністю через оптичний канал, виконаний у державці різця. Для визначення абсолютних величин температури різання система тарувалась за допомогою стружки, яка нагрівалася до різних температур в середовищі інертного газу. У даній роботі наведені термограми розподілу температури по плямам спалаху на передній поверхні інструменту при точінні сплавів TiAl6V4 i AlZnNgCu1.5.

Як видно з рис. 1.9, величина температури в зоні контакту із стружкою при обробці алюмінієвого сплаву AlZnNgCu1.5 (v = 21,6 м/с; S = 0,1-0,4 мм/об) становить 800–1000 °C (рис. 1.9, *a*), а при обробці титанового сплаву TiAl6V4 (v = 2,5 м/с; S = 0,05-0,3 мм/об) знаходиться в діапазоні 1800–2100 °C (рис. 1.9, *б*).



Рисунок 1.9 – Розподіл температури по контактній ділянці на передній поверхні інструменту[46]: *а* – при точінні сплаву AlZnNgCu1,5 (*v* = 16,6 м/с;

S = 0,1 мм/об; t = 0,5 мм);  $\delta$  – при точінні сплаву TiAl6V4

На рис. 1.9 можна виділити область, яка відповідає середній частині стружки в напрямку переміщення стружки уздовж передньої поверхні різця. Ця область відповідає зоні з максимальним контактним навантаженням. Саме тут спостерігаються аномально високі величини контактної температури, які значно перевищують середню контакту температуру різання. Як показано в роботах [51, 52], рівень температури на п'ятках спалахів, при обробці алюмінію та титану може бути > 1000 та 2000 °C, такий рівень температур цілком може виникати і при обробці загартованих сталей. Даний ефект підтверджується в роботі [49, 50], де було виявлено наявність рідкої фази на контактних ділянках інструменту, яка могла утворитися тільки при появі евтектики при температурі 1177 °C з заліза та бориду Fe<sub>2</sub>B, який створюється при температурі 1380 °C.

В роботі [53] зауважено, що при точінні загартованої сталі 52100, на задній поверхні інструменту утворюється шар із нових хімічних з'єднань, які мають значний вплив на процес зношування інструментів із ПКНБ. Наявність такого шару була також зафіксована на поверхнях інструменту із ПКНБ BZN6000 (група BH), який має грубу канавчасту структуру та містить оксиди заліза та значну кількість діоксиду кремнію. Хімічний шар із продуктів взаємодії для інструмента із ПКНБ ВZN8100 (групаВН) має гладку пластинчасту структуру, основними компонентами якого є оксиди заліза та карбіди [54]. При оцінці зносостійкості інструменту із композиту КНБ+ТіС БарріДж. і Бірн Г. [55] показали, що при обробці сталі BS817M40, домінуючий механізм зношування інструменту пов'язаний з хімічною взаємодією у зоні різання, так як на зношених поверхнях виявлено елементи, які присутні в оброблюваному матеріалі в невеликих (Mn, Si) або дуже малих(Al, S, O) кількостях. Було також висловлено думку, що наявність в інструментальному матеріалі карбіду ТіС сприяє мінімізації інтенсивності дифузії або розчинення інструментального матеріалу в оброблюваному матеріалі.

# 1.3. Модифікація робочих поверхонь різальних інструментів для підвищення стійкості

Приведений в розділі 1.2 аналіз існуючих уявлень щодо механізмів зношування різальних інструментів із ПКНБ показує, що температура в

контактній зоні при обробці на високої швидкості різання є одним із основних чинників, який визначає інтенсивність протікання хімічних реакцій взаємодії інструментального і оброблюваного матеріалів, дифузії та процесів окислення інструментального матеріалу.

Для підвищення стійкості різальних інструментів із ПКНБ в контактній зоні доцільно створити умови, які б дозволити зменшити температуру різання. Відомо, що температура в зоні різання виділяється внаслідок деформації оброблюваного матеріалу в зоні зсуву та від тертя на передній та задній робочих поверхнях інструменту [56]. Деформаційною складовою теплоутворення в зоні різання достатньо важко керувати фізичними чи механічними способами, проте можливо зменшити температуру за рахунок зміни трибологічних умов контактування на робочих поверхнях інструменту із ПКНБ.

На сьогодні існує достатньо велика кількість методів, що дозволяють змінювати трибологічні властивості контактних поверхонь металообробних інструментів. В основному методи направлені це на зменшення мікрогеометрії поверхонь інструменту з одного боку та створення спеціальної текстури контактної поверхні з другого. До таких методів належать – додаткове фінішне полірування робочих поверхонь інструментів, магнітно-абразивна обробка (МАО), створення на поверхня спеціальної текстури за допомогою лазерної обробки для зміни умов контактування з оброблюваним матеріалом та покращення потрапляння МОТС в зону різання та ін. Розглянемо більш детально вказані методи для визначення найбільш оптимального для застосування стосовно до інструментів із ПКНБ.

В роботах [57, 58] розглянуто вплив заниження мікронерівостей на робочих поверхнях на стійкість різальних інструментів із ПКНБ при точінні сплаву Inconel 718 на швидкостях різання 20–300 м/хв.

Провівши аналіз контактних поверхонь, автори роблять висновок, що при швидкості різання більше 100 м/хв утворення лунки зносу відбувається

по шліфувальних рисках (grindingmark), залишених при виготовленні інструменту (рис. 1.10).



Рисунок 1.10 – Передня поверхня інструмента після довжини різання 5, 15 і 25 м (v = 100 м/хв)[54]

Електронно-мікроскопічні дослідження зношених ділянок інструменту показали, що в області шліфувальних рисок відбувається інтенсивне налипання оброблюваного матеріалу, що сприяє дифузії між матеріалами заготовки та інструменту з утворенням лунки зносу по передній поверхні інструменту.

Для усунення шліфувальних рисок робочі поверхні інструменту піддавалися додатковому поліруванню. Значення шорсткості поверхні інструментів приведені в табл. 1.3. На рис. 1.11 наведено зображення зношених ділянок для шліфованої та полірованої передньої поверхні інструментів в залежності від довжини різання.

Таблиця 1.3

Шорсткість контактних поверхонь інструментів після різних методів

M111111101 001	O D TATT
	инки

Поверхні інструменти	<i>Ra</i> , нм	<i>Rz</i> , нм
Без обробки	100	578
Шліфовані	54	260
Поліровані	5	22



Довжина різання: 5 м Довжина різання: 15 м Довжина різання: 25 м



а

б

Рисунок 1.11 – Зношені ділянки шліфованої (а) і полірованої (б) передньої поверхні інструментів в залежності від довжини різання (v = 100 м/хв) [54]

На відміну від звичайного інструмента (див. рис. 1.10), на інструменті із шліфованою і полірованою передньою поверхнею (рис. 1.11, a,  $\delta$ ) не спостерігаються ділянки значного локального зносу. Дослідження стійкості показали, що інструмент із полірованою поверхнею демонструє вищу стійкість в порівнянні із інструментом без обробки та із шліфованими поверхнями.

На основі отриманих результатів автори роблять висновок, що більш гладка поверхня пригнічує розвиток лунки зносу по передній поверхні і має кореляцію з шорсткістю контактних поверхонь. Такий ефект досягається за рахунок зниження інтенсивності тертя на контактних ділянках інструменту, а також запобігання локальної адгезії між інструментальним і оброблюваним

матеріалами. За наведеними в роботі даними, полірування контактних поверхонь інструменту може підвищити його стійкість до 40%.

В роботах [59, 60] представлені дослідження впливу шорсткості поверхні CVD покриття  $Al_2O_3$ , нанесеного на твердосплавні інструменти, на трибологічні характеристики їх поверхонь, отримані на машині тертя і при різанні металу. Вихідний зразок покриття мав шорсткість *Ra* 360, інші зразки полірувалися до шорсткості Ra 11,18 (A); Ra 5,47 (P1) і Ra 2,372 (P3) мкм відповідно. Автори поділяють коефіцієнт тертя на два компонента – адгезійний компонент і деформаційний. Отримані результати показують, що адгезійний компонент на початкових циклах випробувань має тенденцію до збільшення поверхонь 3 високою шорсткістю через для процеси мікросхоплювання, в той же час внесок деформаційного компонента оскільки тертя відбувається по парі знижується метал-метал. Для полірованих поверхонь адгезійне перенесення матеріалу відносно низьке, що призводить до окислення поверхонь і утворенню оксидної трибоплівки, що призводить до зниження коефіцієнта тертя.

На рис. 1.12. показано робочі поверхні інструментів після точіння сталі AISI 4140, автори відзначають на полірованій поверхні зменшення кількості адгезійних налипів оброблюваного матеріалу, а також зменшення довжини контакту зі зниженням висоти мікронерівностей.



Рисунок 1.12 – Передня поверхня стандартного інструменту (*a*) і полірованого інструменту (б) після точіння сталі AISI 4140 [56]

Стан робочих поверхонь інструменту після полірування суттєво впливає на механіку та теплофізику процесу різання. Дослідження показали зниження ступеня деформації на контактних поверхнях при використанні інструменту з полірованою поверхнею, що також підтверджується розподілом градієнта твердості в стружці [60]. Крім того дослідження стружки методом EDX аналізу показали, що для неполірованого інструменту стружка більш окислена, що свідчить про більш високу температуру в зоні контакту.

Застосування полірованого інструменту також дозволяє знизити шорсткість обробленої поверхні – з *Ra* 0,2 для неполірованого інструменту до *Ra* 0,05 для полірованого.

Ефективним методом фінішної обробки поверхонь інструментів є магнітно-абразивна обробка (МАО) феромагнітними порошками у магнітному полі, яке виконує роль віртуальної зв'язки. Процес МАО із використанням суміші магнітних частинок та абразивного матеріалу згладжує нерівномірні вершини поверхні. В результаті шорсткість поверхні зменшується зі збереженням розмірів та точності форми оброблюваної деталі із мінімальним видаленням матеріалу.

В роботі [61] проводили МАО для твердосплавного інструменту із покриттям, який в подальшому використовувався для фрезерування титанового сплаву Ті-6АІ-4V. В якості магнітного середовища було використано стальну крупу з розміром частинок 700 мкм та частинки заліза розміром 44-105 мкм, в якості абразивного матеріалу – алмазну пасту зернистістю 1/0. Схема обробки показана на рис. 1.13.

Лабораторна перевірка працездатності оброблених інструментів показала, що МАО підвищує стійкість інструменту в 1,5 рази в порівнянні із інструментом без такої обробки. Автори відмічають, що збільшення стійкості інструментів після МАО відбувається за рахунок зменшення інтенсивності тертя на контактних ділянках інструменту, що веде до зменшення сили та температури різання.



б

(i) Tool holder



nolder

Nd-Fe-B magnets

Particle brush

with abrasive

Vise

Screw

Tool Ti washer

(Edge

protector)

Cylinder

Nut

5 mm

Рисунок 1.13 – Схема магнітно-абразивної обробки; *а* – задньої поверхні інструменту; *б* – передньої поверхні інструменту [58]

В роботі [62] досліджувалися процеси формування мікропрофілю поверхні твердосплавного інструменту та його працездатність. Процеси МАО дозволяють підвищити мікротвердість поверхневого шару та формують різальну кромку з більшим радіусом заокруглення. При використанні в якості робочого середовища порошоку ФЕРОМАП 400/315мкм, ФЕРОМАП200/100 мкм з додаванням алмазного порошку, величина шорсткості змінювалася від *Ra* 0,8 до *Ra* 0,3.

Дослідження стійкості різальних інструментів після МАО показали зростання їх стійкості на 20% в порівнянні із різцями без обробки. Автори відмічають, що дане зростання стійкості не залежить від радіуса різальної кромки, а обумовлено більш стабільним процесом різання за рахунок зменшення вібрацій.

З відносно простих і доступних методів текстурування поверхні є одним із найбільш перспективних, оскільки він дозволяє виконувати екологічно чисту обробку шляхом поліпшення трибологічних характеристик оброблюваних виробів. Створення поверхневих фактур у діапазоні мікромасштабів на різальних інструментах сприяє покращенню змащувальної здатності та зменшенню адгезії, при цьому спостерігається помітне поліпшення трибологічних властивостей досліджуваних поверхонь [63–78].

Фактично забезпечують робочої елементи текстури на поверхні інструменту дискретний контакт зі стружкою, що зменшує коефіцієнт тертя та довжину контактної ділянки [79–83]. Автори [84, 85] встановили, для текстурованих поверхонь відмінності в характеристиках процесу тертя – частинки, що утворюються в процесі зношування, потрапляють на текстуровані поверхні і, таким чином, допомагають мінімізувати руйнування компонента пари тертя на межі інструменту-стружки. Практичне використання інструментів з фактурними поверхнями характеризується зменшенням інтенсивності тертя та зношування, що призводить до поліпшення енергоефективності, терміну служби виробу та, в кінцевому рахунку, допомагає економити сировину та паливо, як детально описано в [86].

Наступним методом модифікації робочих поверхонь різальних інструментів є створення на них різної геометричної форми та розмірів Наявність текстур допомагає поліпшити трибологічні текстур. характеристики інструменту та процесу різання, а саме: зменшує довжину контакту із стружкою, зменшити інтенсивність тертя та температуру різання, покращує попадання МОТС в зону контакту, зменшує силу різання та шорсткість обробленої поверхні.

Для одержання текстури на поверхні інструменту використовуються різні методи, це і методи мікрообробки за допомогою теплової енергії, технології механічної мікрообробки, технології електроерозійної обробки і, нарешті, техніки мікро-, нано- алмазної фінішної обробки.

Різні автори використовували методи мікрообробки за допомогою теплової енергії, такі як лазерна обробка поверхонь, за допомогою сфокусованого іонного променю, щоб створити на поверхні різальних інструментів текстури різного розміру та форми. Деякі з дослідників використовували такі методи, як гідро-абразивна обробка, мікрошліфування, абразивна піскоструйна обробка, механічне текстурування за допомогою вібрації для створення текстур на передній чи задній поверхні різальних інструментів. Використовували також техніку електрохімічної обробки, оскільки вона не спричиняє термічних чи механічних пошкоджень робочого матеріалу.

В роботі [87] створено керамічний різальний інструмент  $Al_2O_3$ -ТіС з текстурою на передній поверхні, впадини якої заповнені твердим мастило на основі графіту іп situ. Форма текстури та поперечний переріз інструменту із текстурами показано на (рис. 1.14).



Рисунок 1.14 – Форма мікротекстури на передній поверхні інструменту та заповнення канавки текстури графітом після гарячого пресування [60]

Експериментальні випробування текстурованих різальних інструментів відбувалися при точінні сталі 45. Було встановлено, що інструменти з текстурою, розташованою поперечно до напрямку сходу стружки, демонструють найменшу силу та температуру різання тим самим збільшуючи стійкість інструменту.

Механізм підвищення стійкості інструментів із текстурованою передньою поверхнею з додаванням твердого мастила автори пояснюють тим, що в початковий момент різання стружка вдавлюється у нерівності мікротекстури, видавлюючи графіт назовні, що створює тонку плівку графітового мастила, що зменшує тертя на контактних ділянках інструменту, що в свою чергу веде до зменшення довжини контакту стружки із передньою поверхнею інструменту, зменшення сили та температури різання.

В роботі [88] для обробки алюмінієвого сплаву Al-Cu/TiB<sub>2</sub> було використано інструмент із текстурованою передньою поверхнею (рис. 1.15).



Рисунок 1.15 – Лінійна текстури на передній поверхні твердосплавного інструменту; *а* – перпендикулярна до напрямку сходу стружки;

б – паралельна напрямку сходу стружки [61]

Використання текстурованих різальних інструментів дозволило зменшити силу різання на 30%, як в умовах сухого різання так і в умовах використання МОТС за рахунок зменшення адгезійної взаємодії з оброблюваним матеріалом та відсутності утворення наросту. Питома енергія різання при використанні інструментів із перпендикулярною текстурою зменшується на 25% при сухому різанні та на 30% при різанні із використанням МОТС.

В роботі [89] текстури наносилися на передню поверхню інструменту з гарячепресованої кераміки Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiC, після чого текстури заповнювали твердим мастилом на основі MoS<sub>2</sub>. Форма текстур приведена на рис. 1.16.

Текстура у вигляді "хвилі" демонструє найбільший ефект зниження сили різання, температури різання та коефіцієнта тертя на межі розподілу інструмент-стружка в порівнянні з іншими типами текстур на інструментах.

В роботі [90] показано, що текстурований інструмент дозволяє зменшити тертя на робочих ділянках інструменту тим самим зменшуючи силу різання,

що пояснюється зменшення довжини контакту передньої поверхні інструменту із стружкою.



Рисунок 1.16 – Передні поверхні інструментів із нанорозмірними текстурами:

*а* – перпендикулярні різальній кромці; *б* – паралельними;

в – мікророзмірна текстура у вигляді "хвилі" [62]

В роботі [91] на твердосплавному інструменті створено текстури у вигляді канавок, розміщених паралельно, перпендикулярно та під кутом 45° до головної різальної кромки на передній поверхні. Автори прийшли до висновку, що з-поміж усіх фактур канавки, паралельні головній різальній кромці, забезпечували інструменту більшу стійкість до зношування через феномен, який називають повторним різанням — тверді включення оброблюваного матеріалу, які викликають абразивний знос потрапляють у канавки текстури де гальмують свій рух та осідають, тим самим мінімізуючи абразивну дію.

Проаналізувавши вище викладений матеріал можна зробити висновок, що серед всіх проаналізованих методів модифікації робочих поверхонь різальних інструментів найбільш доцільними для використання стосовно інструментів із ПКНБ є методи фінішної обробки за допомого полірування та магнітно-абразивна обробка. Метод створення текстур на робочих поверхнях інструментів є досить перспективним в плані проведення досліджень, але вимагає високовартісного обладнання та трудомісткості, що в свою чергу вплине на кінцеву вартість інструментів.

#### Висновки до розділу 1

Із аналіз науково-технічної літератури, пов'язаної із стійкістю та зношуванням різальних інструментів із ПКНБ, методами підвищення працездатності інструменту при точінні загартованих сталей можна відмітити:

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.

ПКНБ 2. інструментів Механізм зношування i3 визначається комбінацією різних явищ: абразивним стиранням, механічним руйнуванням, протіканням адгезійних, дифузійних та хімічних процесів в зоні контакту. В окремому випадку визначення превалюючого механізму кожному 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 *c*BN приводить до збільшення стійкості інструменту за рахунок зменшення хімічної взаємодії між інструментальним та оброблюваним матеріалом.

4. Після проведених досліджень з'ясована область використання інструментів із ПКНБ групи ВН та ВL з якого видно, що група BL демонструє найбільшу стійкість при чистовому безударному точінні.

5. В залежності від умов експлуатації інструменти із ПКНБ груп ВН та ВL 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.

## РОЗДІЛ 2 МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

# 2.1. Оброблювані матеріали, обладнання та інструменти для проведення досліджень

Експериментальні дослідження проводились з використанням токарногвинторізного верстата ФТ-11 (рис. 2.1) в Інституті надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України.



Рисунок 2.1 – Токарно-гвинторізний верстат мод. ФТ-11

Дослідження закономірностей процесу різання проводилось при обробці загартованих сталях марок ШХ15 (60–62 HRC) та ХВГ (50–55 HRC) як без удару, так і з динамічним навантаженням. Для забезпечення ударних навантажень, на заготовках (діаметр 60 і 80 мм) виконувались поздовжні пази шириною 10 мм із глибиною також 10 мм.

Твердість оброблюваних заготовок із загартованих сталей вимірювалась із використанням динамічного твердоміра ТДМ - 1 (НПФ «Промприлад») і

контролювалась через кожні 2 мм знятого припуску. Фізико-механічні властивості сталей представлені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Сталь	Показники		HRC		
Cituib	ρ, кг/м <sup>3</sup>	<i>R</i> <sub>p0,2</sub> , МПа	<i>R<sub>cm</sub></i> , МПа	λ, Вт/(м⊙К)	ince
ШХ15	7812	1960	2160	40	60–62
ХВГ	7850	—	_		50–55

Фізико-механічні властивості оброблюваних сталей

Як показано в розділі 1, найбільш ефективним та економічним є застосування інструментів із ПКНБ груп ВН, ВL.

У роботі використані такі ПКНБ:

групи ВН – ПКНБ «Борсиніт» (склад 96,7% *c*BN-3,3% Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>),
«Кіборит» (склад 97,0% *c*BN-3,0% AlN), «Ельбор РМ», «Гексаніт Р».

- групи BL – композити складу 60% *c*BN-5% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiC 35%, 50% *c*BN-45% TiC-5% Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, та композити, наведені в табл. 2.2, 2.3.

Фізико-механічні властивості ПКНБ наведено в табл. 2.4 [1].

Використовувались прохідні різці (рис. 2.2) та торцеві фрези з механічним кріпленням різальних пластин RNMN 070300Т (ТУ2-037-636-89). Геометричні параметри інструментів: передній кут  $\gamma = -10^\circ$ , задній кут  $\alpha = 10^\circ$ .



Рисунок 2.2 – Прохідний різець, який використовувався в роботі

Таблиця	2.2
---------	-----

Склад суміші для спікання,	Позначення партій
об.% ⇔ мас.%	пластин
<i>с</i> ВN(КМ 3/2)-ТаN (1–30 мкм, 55–45 ⇔ 22,9–77,1	21
сВN(КМ 3/2)-ТіN (1−2 мкм), 55–45 ⇔ 44,5–55,5	22
<i>с</i> ВN(AM1-2)-TiN (1–2 мкм), 55–45 ⇔ 44,5–55,5	26
wBN-TiN (1−2 мкм), 55–45 ⇔ 43,7–56,3	23
( <i>c</i> BN(КМ 3/2)-wBN)-TiN (1−2 мкм), 60−15−25 ⇔ 52,6− 13,2−34,2	28
$cBN(KM 3/2)$ -TiC ( $\leq 4,5-7$ мкм) <sup>4</sup> , 55–45 $\Leftrightarrow 46,4-53,6$	24
wBN-TiC( $\leq 4,5-7$ мкм) <sup>4)</sup> , 55–45 $\Leftrightarrow$ 46,2–53,8	25
$cBN(KM 3/2)$ -TiC ( $\leq 4,5-7$ мкм) <sup>4</sup> , 75–25 $\Leftrightarrow 68-32$	27

## Позначення партій пластин та їх вихідні склади

Таблиця 2.3

# Склад шихти при спіканні композитів

N⁰	Склад, об.%			
зразків	cBN	TiC	TiCN	Al
1	60	35	_	5
2	70	20	_	5
3	90	_	7	5

Таблиця 2.4

## Фізико-механічні властивості ПКНБ

	Показники				
Композит	НК, ГПа	Е, ГПа	ρ, кг/м <sup>3</sup>	ν	λ, Вт/(м○К)
ПКНБ-ВН «Борсиніт»	44	909	3,46	0,18	150
ПКНБ-ВН «Кіборит»	30-32	860	3,46	0,18	100

ПКНБ-ВL	39	530	4,05	—	—

64

### 2.2. Методика лабораторних дослідження

#### 2.2.1. Електронно-мікроскопічні дослідження

Електронно-мікроскопічні дослідження виконувались в використанням скануючого електронного мікроскопа ZEISS EVO 50XVP (виробництво фірми CARL ZEISS, Німеччина) з енергодисперсійним аналізатором рентгенівських спектрів INCA450, оснащеним детектором INCAPentaFETx3 та системою HKL CHANNEL-5 для дифракції відбитих електронів (виробництва фірми OXFORD) в IHM ім. В. М. Бакуля НАН України.

# 2.2.2. Дослідження шорсткості та топографії поверхонь різальних елементів із ПКНБ

Шорсткість поверхні визначалася на безконтактному інтерференційному 3D профілографі «Micron-alpha» (рис. 2.3.) через кожні 10 хв обробки.



Рисунок 2.3 – Безконтактний інтерференційний 3D профілограф «Micron-alpha»

Технічні можливості прибору «Micron-alpha»:

- побудова 2D і 3D профілів поверхонь;
- кількісна оцінка характеристик поверхонь;
- вираховувати об'єми виступів (впадин);
- спостерігати інтерференційні картини;
- проводити металографічні дослідження.

Вимірювання параметрів шорсткості обробленої поверхні проводилось також з використанням: – в стаціонарних умовах профілографпрофілометром мод. 170621 заводу «Калибр»; – безпосередньо на верстаті за допомогою профілометрів мод. 170311 та TR110 (Time Group Inc.) (рис. 2. 4).



Рисунок 2.4 – Визначення шорсткості обробленої поверхні заготовок

Дослідження топографії поверхонь різальних інструментів із ПКНБ вимагає високої якості та точності отриманих результатів, особливо у випадках, коли мова йде про топографію зношених ділянок інструменту. Реалізація таких досліджень широко використовуваними в експериментальних дослідженнях щуповими аналоговими профілограф-профілометрами (типу Surtronics-3, Renk Teylor Hobson, Великобританія та прибору мод. 201 заводу «Калибр», Росія) в більшості випадків не можлива, через наявність в їх конструкціях опорних елементів та невеликі розміри зношених ділянок інструменту, які потрібно дослідити. Тому для проведення топографічних досліджень було використано атомно-силовий мікроскоп (ACM) мод. NT-206 (Білорусь) (рис. 2.5, табл. 2.5). Використання ACM дає можливість отримувати та аналізувати ACM-зображення об'єктів мікро- та нанометрових розмірів з високим ступенем роздільної здатності. Дослідження проводилися на базі Черкаського державного технологічного університету.



Рисунок 2.5 – Атомно-силовой мікроскоп NT-206 в базовій конфігурації:

1 – блок сканування; 2 – блок електронного управління

Таблиця 2.5

Режим роботи	Статичний (включаючи контактний режим і мікроскопію латеральних сил)
Максимальне поле сканування	20×20×3 мкм
Крок сканування	20 нм
Розмір матриці	До 1024×1024 точок і більше
Схема сканування	Зразок переміщується в площині XY (горизонтально) і в напрямку Z (вертикально) під нерухомим зондом
Зонд	Чіп розміром 3,4×1,6×0,4 мм із АСМ-зондами
Умови роботи	Відкрите повітря 760 ± 40 мм рт. ст.; 22 ± 4 °С

Характеристики АСМ NT-206

B використанням ACM виконували також латерально-силову мікроскопію, за результатами якої побудовано карти розподілу латеральних сил (умовних сили тертя) по поверхні досліджуваних зразків, шляхом контролю кута кручення зонду при скануванні. Оскільки зонд крім вертикального рахунок молекулярного протягуванняpyxy, 3a сил відштовхування, здійснює ще й згинальні руху (вліво-вправо) за рахунок «проковзування» самого зонда по поверхні – є можливість фіксувати силу цього проковзування (фактично, силу тертя).

Однак, оскільки для визначення абсолютного значення сили тертя необхідно знати не тільки матеріали з яких виготовлені зонд і досліджуваний матеріал, але й умови взаємодії зонда з матеріалом, що практично неможливо, тому отримати карту розподілу сил тертя можна тільки якісно.

В якості зразків для проведення топографічних досліджень були використані різальні пластини із ПКНБ, якими проводилась чистова обробка загартованої сталі ШХ15 при швидкостях різання 0,5–3,0 м/с.

#### 2.2.3. Дослідження методом скретч-тестування

Для оцінки механічних властивостей матеріалу поверхневого шару матеріалу застосуваний метод склерометрування (Scratch Test), при якому досліджувана поверхня сканується навантаженим індентором. Вибором нормального навантаження *P* на індентор, розмір області, що деформується на поверхні досліджуваного зразка, може бути наближений до такої, що відповідає деформації в процесі експлуатації. Таким чином склерометрування являє собою також метод моделювання параметрів контактного навантаження на інструмент в зоні різання.

У даній роботі з метою оцінки впливу термобаричного навантаження в зоні різання на фізико-механічні властивості поверхневого шару композитів проводилося склерометрування експериментальних зразків надтвердих

інструментальних матеріалів. Для вимірювань використовувався прилад «Мікрон-гамма», розроблений в Національному авіаційному університеті (рис. 2.6). Даний мікро/нано індентометр має широкі діапазони заданих зусиль (від 0,01 до 10 Н) і реєстрованої глибини індентування (від 10 нм до 200 мкм).



Рисунок 2.6 – Зовнішній вигляд приладу «Мікрон-гамма»

Сканування всіх зразків проводилося по передній поверхні інструменту в радіальному напрямі від центру різальних пластин в напрямі різальної кромки. Вимірювання проводилося при навантаженні на індентор 100 сН, довжина траси сканування складала 270 мкм, швидкість сканування 22 мкм/с.

#### 2.2.4. Дослідження складових сили різання

Складові сили різання вимірювались універсальним динамометрами УДМ-600, УДМ-1200 конструкції «ВНІ Інструмент». Калібрування динамометра проводилося за допомогою спеціального пристосування із зразковим динамометром ДОСМ-200 (ДСТУ ГОСТ 13782:2009).

Миттєві значення складових сил різання фіксувались за допомогою спеціального апаратного комплексу (рис. 2.7), який складається із модуля

вимірювання, оснащеного АЦП ADA-1406 та персонального комп'ютера для обробки отриманих даних.



Рисунок 2.7 – Схема проведення досліджень з визначення складових сил різання

Частота опитувань по кожному із трьох каналів становила 33 кГц, що дозволяє реєструвати ударні імпульси в умовах переривчастого різання заготовок із пазами у широкому діапазоні швидкостей різання заготовки.

#### 2.2.5. Визначення працездатності різального інструменту

Стійкісні дослідження інструментів із ПКНБ приводилися при точінні загартованих сталей при постійних значеннях перетину зрізу: S = 0,14 мм/об;

*t* = 0,2 мм. З метою імітації ударних навантажень на заготовках (діаметр 60 мм, довжина 200 мм) виконувались поздовжні пази шириною 10 мм, глибиною 10 мм.

У якості оцінки працездатності інструменту був прийнятий період часу досягнення критичної величини ширини фаски зносу по задній поверхні –  $h_3$  = 0,3 мм. Вимірювання ширини фаски зносу інструменту по задній поверхні проводилося за допомогою мікроскопу МБС-9, а також за допомогою мікроскопа (збільшення ×100), встановленого на станині верстата.

# 2.2.6. Зношування інструменту із ПКНБ при обробці в контрольованому газовому середовищі

Для виконання дослідження була розроблена спеціальна камера (рис. 2.8, 2.9), контейнер якої виконаний з прозорого органічного скла, що дало можливість наглядно спостерігати за процесом обробкими. Габарити контейнера (500×350×250 мм) забезпечили встановлення заданого розміру заготовки та залишку місця для накопичення стружки. Камера установлена на металорізальному верстаті моделі ФТ-11 і закріплена на задній бабці. Газ подавався в контейнер через штуцер під надлишковим тиском 0,4–2,5 МПа, що забезпечило видалення з камери повітря і в то же час не створювало потоку газового середовища біля зони обробки.



Рисунок 2.8 – Схема різання в газоподібних середовищах: 1 – камера; 2 – деталь; 3 – різець; 4 – балон з газом; 5 – станок (різцетримач); 6 – шланг

Через спеціальне вікно камери був встановлений різець із ПКНБ групи ВН з можливістю переміщення вздовж розміщеного в камері оброблюваного зразку. Конструкція контейнера дозволяє фіксувати силу різання за допомогою динамометра УДМ 600. В якості газового середовища з підвищеним тиском використано азот і стиснене повітря.



Рисунок 2.9 – Камера для обробки в газоподібних середовищах

#### 2.2.7. Дослідження контактних явищ при обробці інструментом з ПКНБ

Під характеристиками зони контакту на передній поверхні інструменту розуміли величини довжини контакту (L), площі контактної ділянки (A) та активної довжини різальної кромки (b). Зображення контактної ділянки на передній поверхні інструменту фіксувалося на мікроскопі NEOPHOT 21 зі збільшенням ×12,5.

Поперечна усадка стружки ξ<sub>*a*</sub> визначалася експериментально з використанням залежності:

$$\xi = \frac{a_{cm}}{a_{cp}}$$

де  $a_{cr}$  – середня товщина стружки у поперечному перерізі;  $a_{cp}$  – середня розрахункова товщина перерізу зрізу

$$a_{cp} = S \cdot \frac{t}{b}$$

де *b* – активна довжина різальної кромки; для інструменту з круглою різальною пластиною знаходиться за формулою:

$$b = r \cdot a_{cp} \cos\left(\frac{r-t}{r}\right) + r \cdot a_{cp} \sin\left(\frac{S}{r}\right)$$

де *r* – радіус різальної пластини.

Товщина стружки *a*<sub>ст</sub> визначалася за її поперечними шліфами з використанням мікроскопу NEOPHOT 21 при збільшенні ×20.

При виділенні складових сили різання, що діють на задній поверхні інструменту, їх екстраполяція використовувалася на нульову товщину зрізу.

Середні значення нормальних *q*<sub>*N*cp</sub> та дотичних *q*<sub>*F*cp</sub> напружень на поверхнях інструменту визначалися за експериментальними даними по силах різання.

#### 2.2.8. Напружено-деформований стан в зоні стружкоутворення

Для аналізу явищ, що мають місце в процесі різання, перспективні модельні дослідження, зокрема з використанням методу скінченних елементів.

В даний час є велика кількість досліджень, наприклад [92, 93, 94, 95] присвячених моделюванню процесу обробки з використанням цього методу.

У роботі виконано дослідження напружено-деформованого стану в зоні стружкоутворення при обробці загартованих сталей інструментами з ПНТМ на основі КНБ з різною вмістом надтвердої фази в умовах різання, оптимальних для даного типу інструменту. При моделюванні застосовувалися багатоцільові кінцево-елементні розрахункові пакети LS-DYNA, DEFORM-3D.

Серед вихідних даних для процесу моделювання одними з найбільш важливих є дані про механічні властивості оброблюваного матеріалу, тобто показники зв'язку між деформаціями і напруженнями при деформації тіла. Ці властивості описуються визначальним рівнянням і рівнянням стану.

При моделюванні процесів деформації матеріалу необхідно враховувати вплив умов в зоні різання на його механічні характеристики. В даний час, при моделюванні методом кінцевих елементів набула поширення модель Джонсона-Кука [24], що описує поведінку деформується матеріалу:
$$\sigma_{s} = \left(A + B \cdot \left(\varepsilon^{p}\right)^{n}\right) \cdot \left(1 + C \cdot \ln \dot{\varepsilon}^{p}\right) \cdot \left[1 - \left(\frac{T - T_{r}}{T_{m} - T_{r}}\right)^{m}\right]$$

де  $\sigma_{\rm S}$  – поточна величина межі міцності;  $\varepsilon^{p}$  – величина інтенсивності пластичних деформацій;  $\dot{\varepsilon}^{p}$  – інтенсивність швидкості пластичних деформацій;  $T, T_{m}, T_{r}$  – поточна температура, температура плавлення і температур навколишнього середовища відповідно; A, B, C, n, m – емпіричні коефіцієнти.

Для завдання коефіцієнтів визначального рівняння скористаємося комбінованими даними робіт [94, 96] для сталі AISI 52100 (62 HRC), яка за хімічним складом і твердості відповідає загартованої сталі ШХ15: A = 3538 МПа; B = -1965 МПа; C = 0,061; n = -0,062; m = 3,17 та дані роботи [97] для сталі AISI 52100 (53 HRC): обробка без удару, A = 821,9 МПа; B = -72,1 МПа; C = 0,13; n = -0,419; m = 1,13; обробка з динамічним навантаженням, A = 972, B = -219, C = 0,133, n = 0,186, m = 1,1. (коефіцієнти отримані інтерполяцією табличних даних, що надані в базі даних матеріалів).

Як критерій руйнування використовуємо критерій накопичених пластичних деформацій в формі Джонсона-Кука:

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon_f} \ge 1,$$

де  $\varepsilon_f$  – гранична величина накопичених пластичних деформацій.

У тих елементах, де виконується зазначене умова, тензор напружень Коші встановлюється рівним нулю і вони видаляються з кінцево-елементної сітки. Коефіцієнти для виразу, що визначає критерій руйнування, отримуємо з використанням тестів на розтягнення-стиснення або за літературними даними. У першому наближенні величину є<sub>f</sub> можна визначити, використовуючи дані [98].

На рис. 2.10 показана діаграма пластичності – залежність критичної величини інтенсивності деформацій зсуву  $\Lambda_p$  (граничної деформації) від

відносного гідростатичного тиску (співвідношення гідростатичного тиску  $\sigma_m$  і інтенсивності дотичних напружень  $t_i$ ) для високовуглецевої загартованої сталі.



Рисунок 2.10 – Діаграма пластичності високо вуглецевої загартованої сталі (1 – 48 HRC; 2 – 51 HRC, 3 – 56 HRC)

Для визначення необхідної для моделювання процесу різання граничної деформації  $\Lambda_p$ , знаходимо відношення  $\sigma_m/t_i$ , характерне для зони, прилеглої до різальної кромки інструменту, в якій відбувається руйнування оброблюваного матеріалу – підминаєтся різальною кромкою.

Попередній розрахунок показників напружено-деформованого стану проводить розподіл його на матеріал, який іде в стружку і до оброблюваного матеріалу, модель якого визначена у вигляді запропонованому Джонсоном-Куком, дозволяє визначити величини середніх напружень (гідростатичний тиск):

$$p = -\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$$

і еквівалентних напружень:

$$\sigma_{eqv} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \left[ \left( \sigma_1 - \sigma_2 \right)^2 + \left( \sigma_2 - \sigma_3 \right)^2 + \left( \sigma_3 - \sigma_1 \right)^2 \right]}$$

В умовах моделювання, що відповідають реальним умовам обробки дані величини поблизу різальної кромки інструменту мають значення: *p* = 0,64– 0,67 ГПа;  $\sigma = 1,00-1,05$  ГПа, а відносини  $\sigma_m/T$  відповідає  $\Lambda_p = 4,0-4,2$ . Величина максимальної накопиченої деформації складає при цьому  $\varepsilon_f = 2,31-2,43$ . При моделюванні приймемо середнє значення  $\varepsilon_f$  рівним 2,37.

При вирішенні пов'язаної термомеханічної завдання граничні умови складалися в жорсткому закріпленні опорної поверхні заготовки і переміщенні абсолютно-жорсткого інструменту уздовж осі X заготовки з постійною швидкістю v, глибиною різання (в даному випадку дорівнює товщині зрізу) і шириною зрізу (табл. 2.6). В ході розрахунку вирішується термомеханічне завдання з урахуванням теплопровідності матеріалів інструменту і заготовки.

#### Таблиця 2.6

T	/						Коефіцієнт тертя по
Інструмент	<i>V</i> , M/XB.	а, мм	<i>t</i> , MM	γ	α	р, мкм	загартованій сталі
ПКНБ BL	100	0.03	1	-10°	10°	15	0,22
ПКНБ ВН	200	0,05					0,26
		0,02				10	0,05

Умови обробки

Механічні і теплофізичні характеристики матеріалів представлені в табл. 2.7. Моделі інструменту і заготовки представлені на рис. 2.11.

Геометричні розміри моделей при визначенні напруженодеформованого стану в зоні різання вибиралися пропорційно товщині зрізу. Моделювання виконувалося в 2D постановці з абсолютно жорстким інструментом. Параметри моделі різця: довжина моделі – 0,13 мм; висота – 0,15 мм; радіус округлення різальної крайки і передній кут приймався в різних чисельних експериментах змінним; характерний розмір елементів моделі різця 0,012–0,002 мм (в області різальної кромці розбивка дрібніша, рис. 2.12); тип елементів Shell-13.

Матеріал	<i>Т</i> пл, °С	С <sub>т</sub> , Дж/кг·К	λ, Вт/м·К	Е, ГПа	ν	р, кг/м <sup>3</sup>
ПКНБ-BL	—	750	40	570	0,20	4370
ПКНБ-ВН	—	720	100	780	0,17	3400
	—	480	150	860	0,20	4200
Сталь ШХ15	1480	642	40	204	0,30	7800

Теплофізичні властивості матеріалів



Рисунок 2.11 - Схема процесу моделювання

Параметри моделі різця при визначенні зміцнення оброблюваного матеріалу: довжина – 1,0 мм; висота – 0,24 мм; характерний розмір мінімальних елементів моделі різця 0,024 мм (в області різальної кромці розбивка дрібніша – 0,0038 мм); характерний розмір мінімальних елементів моделі заготовки:0,022 мм (0,0012 в зоні контакту) (рис. 2.13).

Рішення контактної задачі виконувалося стандартним методом штрафів (алгоритм \*CONTACT\_2D\_AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE). Тертя на контактних майданчиках між інструментом і деталлю при моделюванні найбільш часто описується рівнянням Show M.C., т константи якого можуть бути визначені експериментально

Таблиця 2.7

$$\tau_{\text{max}} = \min\left(\mu(T,\sigma_n)\sigma_n; m\sigma_{\text{ss}}\left(\varepsilon^p, \varepsilon^p, T\right)\right).$$

Рисунок 2.12 – Звичайно-елементні моделі: а – різця; б – частини заготовки



Рис. 2.13 – Адаптивна розбивка моделі оброблюваної заготовки на елементи в зоні контакту різець-оброблюваний матеріал

В LS-DYNA застосовується аналогічна методика і максимальна сила тертя обмежується величиною  $F_{\text{max}} = A_c \cdot VC$ , де  $A_c$  – площа контакту, і VC – коефіцієнт в'язкого тертя, який можна визначити за формулою:  $vc = \sigma_s / \sqrt{3}$ . Така величина сили тертя характерна для ділянки пластичного контакту.

Щоб врахувати особливості контактної взаємодії параметр *vc* встановлений завищеними так, щоб незалежно від контактних навантажень

коефіцієнт тертя відповідав зовнішньому тертю. Для обох типів досліджуваних інструментів величина даного параметра визначалася при терті торцевої поверхні ріжучої пластини із заготівлі без поздовжньої подачі, щоб виключити зняття стружки. Коефіцієнт тертя розраховувався по виміряним величинам радіальної і тангенціальною складових сили діючої на різець. Виміри проводилися при швидкостях 100 і 200 м/хв. Отримані величини коефіцієнтів тертя для ПКНБ-BL і ПКНБ-ВН наведені в табл. 2.7.

#### 2.2.9. Вібро-магнітно-абразивна обробка різальних пластин із ПКНБ

Обробку змінних багатогранних різальних пластин із ПКНБ виконували з використанням пристрою, який складається з контейнера, електродвигуна з ексцентриком і пристосування для створення електромагнітного поля (рис. 2.14, 2.15).



Рисунок 2.14 – Схема пристрою для вібро-магнітно-абразивної обробки різальних пластин із ПКНБ

Для обробки різальних пластин із ПКНБ контейнер виконано з карбіду кремнію SiC. У внутрішню порожнину контейнеру завантажувалися

оброблювані пластини із ПКНБ, порошок феромагнітного абразиву з доданням штучних алмазів марок AC6 63/5, ACM 50/40, ACM 28/20.



Рисунок 2.15 – Установка для ВіМАО

У якості джерела магнітного поля використаний статор трифазного електродвигуна, у який, з можливістю вібрації в обертовому магнітному полі, був встановлений керамічний контейнер.

При включенні обмоток статору створювалося обертове магнітне поле з індукцією 0,3–0,35 Тл. Це поле періодично змінює щільність феромагнітного абразиву. Зміною поєднання частот вібрації та електромагнітного поля регулюється продуктивність і якість обробки пластин ПКНБ у пристрої.

Основою пристрою для здійснення обробки змінних багатогранних різальних пластин із ПКНБ (див. Рис. 2.14) є рама I, на якій змонтовано електродвигун КД-50 2 (n = 2780 об/хв, 50 Вт), понижуючий редуктор 3 (частота коливань ~ 25 Гц), блок підшипників 4, що є опорою вала ексцентрику віброприводу 5 (амплітуда коливань 4 мм). Над віброприводом на стійках 6 встановлено корпус 7, в якому встановлено статор 8 трьохфазного електродвигуна, що створює магнітне поле. В корпусі, у внутрішньому просторі статора, розташовано робочу камеру 9 для заготовок, що оброблюються, феромагнітного абразиву з доданням штучних алмазів. Над

контейнером і статором закріплено ковпак 10. Між ковпаком і кришкою контейнера 11 вставлено пружину 12, що сприяє вібрації робочої камери. Підведення електроживлення проводиться через вхідні (захисні) автомати 13. Над ковпаком розміщено вентилятор 14 для охолодження статора.

Для того, щоб частинки алмазу були розміщені по усьому об'єму контейнера, в робочу камеру додають феромагнітний порошок, на який впливає обертове магнітне поле. При завантаженні деталей та абразиву в робочу камеру закривається кришка та вмикають обертове магнітне поле, яке з'єднує феромагнітний порошок і штучні алмази марки AC6, ACM в ущільнену масу. Потім вмикають вібропривод, який проштовхує деталі, що оброблюються, крізь ущільнення. Таким чином, збалансована магнітна індукція та вібраційна сила створюють сприятливі умови для обробки надтвердої кераміки. Для забезпечення необхідної тривалості процесу ВіМАО обробки здійснюють охолодження пристрою.

# 2.2.10. Оцінка розвитку пошкоджень різальних пластин із ПКНБ методом хемографії

Пошкодження інструментів з ПКНБ відбувається внаслідок накопичення та активного розвитку мікродефектів, присутніх у поверхневому шарі матеріалу. До таких дефектів належать дислокації, мікротріщини та порушення цільності інструментального матеріалу.

Для виявлення сукупності дефектів малого розміру доцільно використовувати метод хемографії [99, 100]. Сутність методу полягає у фотофіксації наявності окислювальних реакцій надмалих концентрацій, що протікають на поверхні твердих тіл, і залежать від стану поверхні та умов її термобаричного навантаження.

Для прогнозування розвитку пошкоджень різальних інструментів з ПКНБ застосування методу хемографії є доцільним, оскільки відмінності в отриманих для одного і того ж різального інструменту зображеннях дефектних ділянок можуть свідчити про динаміку розвитку пошкоджень. Також метод хемографії дозволяє визначити швидкість розвитку пошкоджень, початкові відхилення властивостей матеріалу інструменту, що визначають швидкість розвитку пошкоджень. При цьому, потік відмов, пов'язаних з викришуванням і сколюванням, може також бути визначений за характерними фрагментами зображення в зонах, максимально схильних до руйнування.

Оскільки хемографічні картини відрізнялися оптичною щільністю зображення, застосували методику усереднення відтінків сірого (рис. 2.16). Так, для оцінки ступеня впливу фактора, що діє на хемографічне зображення, використано індекс відносної чорноти, який розраховували за формулою:

$$I_c = F_i / (100 - F_{\min})$$

де  $F_i$  – поточна чорнота точки на аналізованій поверхні (%);  $F_{\min}$  – область світлого тла, у % відносно прийнятого рівня білого.



Рисунок 2.16 – Хемографічне зображення пластини із ПНТМ на основі КНБ після точіння сталі ХВГ

Це дозволило визначити оптимальний час експозиції  $\tau_e$  за отриманим рівнем індексу відносної чорноти у функції часу  $\tau$ . Результати показали, що проведення експозиції протягом  $\tau_e = 20$  хв дає можливість отримати максимальне значення контрастності зображення, і виявити окремі дефекти, як на поверхні, так і в поверхневому шарі.

Дослідження виконувались за допомогою мікрофотометра, зразків різальних робочих елементів із ПКНБ, рентгенівської фотоплівки, хімічних реагентів для отримання фотозображення, дистильованої води, абразивного порошку М10, пластин скла завтовшки 4–6 мм.

Досліджувалися нові різальні елементи із ПКНБ та після обробки загартованої конструкційної сталі 40Х. Режими обробки – швидкість різання 120 м/хв, подача – 0,15 мм/об, глибина різання – 0,2 мм.

#### Висновки до розділу 2

1. Розроблена методика з підвищення стійкості інструментів оснащених ПКНБ при точінні загартованих сталей, яка включає вибір обладнання та інструменту, проведення експериментальних досліджень впливу вмісту *с*ВN в композиті на основі параметри процесу різання, а також промислові випробування інструменту.

2. З метою оцінки впливу навколишнього середовища на контактну взаємодію інструментів із ПКНБ з оброблюваним матеріалом, проведено дослідження обробки загартованих сталей в захисному середовищі для визначення фактору зносу за рахунок окислення контактних ділянок.

3. Вдосконалено підхід до фінішної обробки різальних пластин із КНБ, заснованим на вібро-магнітно-абразивному впливі на оброблюваний виріб, 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.

4. Було проведено дослідження поверхневого шару інструментів із ПКНБ після фінішної обробки методом хемографії, що дало можливість виявити найбільш енергетично навантажені ділянки на поверхні інструментів.

#### РОЗДІЛ З

# КОНТАКТНА ВЗАЄМОДІЯ В ЗОНІ РІЗАННЯ ЗАГАРТОВАНИХ СТАЛЕЙ ІНСТРУМЕНТАМИ ІЗ ПКНБ

## 3.1. Вплив зміцнення поверхневого шару оброблюваного матеріалу на характеристики процесу різання при обробці загартованої сталі

Предметом вивчення є вплив явища попередньої деформації зрізаного шару оброблюваного матеріалу на характеристики пластичної деформації, напруження в поверхневому шарі та сили різання. Вказане обумовлено тим, що середня товщина зрізаного шару при різанні мала (10–20 мкм) і глибина на яку розповсюджуються залишкові напруження при великих силах різання суттєво вище (до 100 мкм). Для урахування цього фактору модель передбачає реалізацію трьох послідовних проходів, на кожному з яких зрізується 20 мкм і після кожного проходу інструмент переміщується на товщину зрізу вниз по осі *Y*. Для імітації імпульсного навантаження з наявністю проміжку часу  $\Delta t$  між врізаннями леза при точінні, довжина кожного проходу (від 1 до 3) зображено на рис. 3.1.

Deform 2D має кілька опцій для опису тертя на контактних поверхнях [101]:

1. Питома сила тертя (тангенційні напруження) є постійною і дорівнює  $f_s = k \cdot m$ , де k – межа плинності матеріалу на зсув, m – довільний коефіцієнт, для врахування інтенсивності фікційної взаємодії. Даний вираз використовується, коли на контактуючих поверхнях має місце пластичний режим тертя (внутрішнє тертя). Найбільш часто при симуляції процесу різання величину коефіцієнту m приймають 0,6. Це обумовлено тим, що межа плинності при зсуві дорівнює  $1/\sqrt{3} \cdot \sigma$ , де  $\sigma$  – межа плинності деформованого матеріалу.

2. Зовнішнє тертя за Кулоном:  $f_s = \mu p (p - тиск);$ 

3. Комбінована модель:  $f_s = \min(\mu \cdot p, k \cdot m)$ .



Рисунок 3.1 – Положення різця при його переміщенні відносно заготовки на кожному з трьох проходів

В загальному випадку при опису процесу різання остання модель найбільш наближена до реальності, і використовувалась в пропонованій серії чисельних експериментів при m = 0,6 та  $\mu = 0,5$  що пов'язано з необхідністю порівняння результатів розрахунку та експериментальних даних, а також оцінкою впливу на контактні характеристики моделі коефіцієнту тертя, як окремого фактора, трактуючи його в якості усередненої величини коефіцієнтів внутрішнього та зовнішнього тертя на ділянках пластичного та пружного контакту.

Графічне зображення залежності границі плинності оброблюваного матеріалу AISI52100 твердістю 53 HRC від ступеню деформації при різних температурах зображено на рис. 3.2.

Як видно, σ<sub>т</sub> інтенсивно зростає при збільшенні ступеню деформації оброблюваної сталі в межах від 0 до 1 при подальшій стабілізації цієї

.

залежності. Температура різання і відповідно, розігріву зрізаного шару зменшує границю плинності. Цей вплив найбільш помітний при високих температурах (700–1000 °C).



Рисунок 3.2 – Границя плинності оброблюваного матеріалу залежності від ступеню деформації та температури

Межа плинності оброблюваного матеріалу з ростом ступеня його деформації відповідно до моделі матеріалу, що описує криву плинності, зростає. Найбільш інтенсивне зростання характерне для низьких температур. При підвищених температурах це проявляється в значно меншій мірі. Характерне зменшення межі плинності в діапазоні температур від 20 до 600 °C складає для ступеню деформації 1 від 1700 до 1150 МПа. Зростання цього параметру для температури 600, що спостерігається при збільшенні ступеню деформації від 0 до 0,5 знаходиться в межах 740–1100 МПа. Параметром який демонструє зміну умов різання, стан інструменту або при постійності цих параметрів, зміну характеристик оброблюваного матеріалу є величина складових сили різання. Визначимо дані показники в залежності від часу. На діаграмі (рис. 3.3) видно, що при врізанні спостерігається всплеск сили різання значенням 10–11%, що відповідає процесу перехідному процесу стружко утворення з наростанням довжини контакту стружки з інструментом, переміщення стружки вздовж передньої поверхні на цьому етапі відсутнє.



Рисунок 3.3 – Складові сили різання, розраховані при моделюванні

В перші мілісекунди різання довжина контакту та усадка стружки вища у порівнянні зі квазісталим процесом обробки. Така закономірність спостерігається на кожному з проходів, при цьому на першому проході величини складових сили різання відрізняються від цих параметрів визначених для проходів 2 та 3. Середнє значення  $P_z$  на першому проході складає 78 H, на подальших – 68 H;  $P_y$  – 38 H та 40 H відповідно. Пояснення причин цього явища буде надано нижче при розгляді інших параметрів контактних явищ та характеристик деформації оброблюваного матеріалу. Розглянемо такий параметр контактної взаємодії як усадка стружки  $\zeta$ , який характеризує деформацію в зоні зсуву та є одним з показників впливу коефіцієнту тертя на процес різання. На малюнках зображено корні стружок на кожному з проходів (рис. 3.4). Як і в попередньому випадку дана контактна характеристика на першому проході ( $\zeta = 2,12$ ) суттєво відрізняється від подальших ітерацій процесу ( $\zeta = 1,78$ ) при товщині стружок відповідно 0,042 мм та 0,035 мм. Кут зсуву при цьому змінюється з 25°10′ до 29°15′.



Рисунок 3.4 – Корні стружок на першому (a) та третьому ( $\delta$ ) проходах

Довжина контакту стружки з передньою поверхнею різця змінюється при цьому дуже суттєво: від 0,034 мм до 0,023 мм після першого проходу інструменту. Розподіл величин контактних напружень вздовж контактної ділянки на передній поверхні (за межами округленої ділянки різальної кромки) приведено на рис. 3.5.

Відносно нормальних та тангенційних напружень визначено залежність коефіцієнту тертя від відстані від різальної ромки. Як видно з аналізу графіків, коефіцієнт тертя не змінюється суттєво, хоча спостерігається зростання величин нормальних та тангенційних контактних напружень з 1,9 до 2,15 та з 0,8 до 1,06 ГПа відповідно.



Рисунок 3.5 – Контактні нормальні (*a*, *c*, *ж*) та тангенційні (*б*, *d*, *3*) напруження, коефіцієнт тертя (*в*, *е*, *u*) в залежності від координати на передній поверхні різця на кожному з проходів

Ступінь зміцнення оброблюваної поверхні будемо характеризувати ефективною деформацією матеріалу, яку визначимо в вертикальному перетині на відстані 0,1 мм за різальною кромкою різця на кожному з проходів. Вихідна деформація відсутня. Після першого та другого проходів ступінь деформації на поверхні (максимальній) дорівнює 0,36, збільшуючись до 0,48 після третього проходу. Зона на яку розповсюджується суттєве зміцнення по глибіні зростає з кожним проходом, досягаючи на третьому проході величини 0,2 мм. При встановлений для моделювання товщині зрізу 20 мкм, для першого проходу глибина, що відповідає є = 0,2, складає 36 мкм, після другого та третього 42 та 60 мкм відповідно.

Зміцнення поверхневого шару обробленого матеріалу є причиною зміни величин сил різання, як це було показано на рис. 3.6. Оскільки глибина зміцнення достатньо висока, весь шар матеріалу, що зрізується після першого проходу вже має механічні властивості, що відрізняються від вихідних механічних характеристик поверхневого шару сталі.

Так при ступені ефективної деформації 0,5, границя міцності сталі зростає з 770 до 1100 МПа. Вказане приводить до зростання ефективних напружень в матеріалі, що деформується в зоні різання що вочевидь повинно було б збільшувати сили різання. На практиці, як вже відмічалось, спостерігається зниження величин даного параметру.

Пояснення цього факту полягає в тому, що при зміцненні та зменшенні пластичності оброблюваного матеріалу зростає кут зсуву та суттєво зменшується усадка стружки при цьому вплив зміцнення менш інтенсивний у порівнянні зі збільшенням кута зсуву, що супроводжується зменшенням довжини контакту стружки з передньою поверхнею інструменту.

Надати характеристику зміцненню можна також у горизонтальному перетині, на рівні 10 мкм від поверхні (середина товщини зрізу), рис. 3.7. Наростання ступеню деформації відбувається в зоні випереджальної хвилі інформації на відстані 60 мкм, на відстані 30 мкм є вже дорівнює 0,35 досягаючи 1,2 та 1,8 у зоні зсуву та в приконтактній зоні (рис. 3.7, *a*). Характеристика деформації підповерхневого шару після третього проходу на цій глибині складає є = 0,27 (рис. 3.7, *б*).

Нестаціонарний характер обробки з врізанням леза інструменту та виходом його з зони різання обумовлює наявність періодів наростання температури різання та охолодження різальної пластини. Характер імпульсів температурного навантаження на лезо інструменту, які характеризують



Рисунок 3.6 – Ступінь деформації оброблюваного матеріалу в залежності від глибини вимірювання на кожному з проходів

Порівняно низькі для умов обробки загартованої сталі температури (300–380 °C) пов'язані з тим, що у процесі моделювання враховано лише початковий етап різання, а точка виміру температури розташована на інструменті, який прогрівається за більший період часу у порівнянні з оброблюваним матеріалом, що обумовлено наявністю термічного опору на границі розділу стружка-передня поверхня різального інструменту.



Рисунок 3.7 – Залежність ступеня деформації від відстані від різця у напрямку швидкості різання:

*a* – характер наростання ступеню деформації в зоні випереджальної хвилі
*б* – характеристика деформації підповерхневого шару після третього проходу



Рисунок 3.8 – Точка виміру температури в інструменті та динаміка наростання температури на кожному з проходів

Розподіл контактної температура вздовж лінії контакту зі сторони передньої поверхні зображено на рис. 3.9. Як можна бачити величина температури в даному випадку значно вища і досягає 600 °С. При наростанні часу обробки величина температури різання буде збільшуватися, а значення температури виміряне в інструменті буде наближуватися до максимальної температури в оброблюваному матеріалі.



Рисунок 3.9 – Розподіл температурних полів в оброблюваному матеріалі (*a*) та епюра температурного навантаження на передній поверхні інструменту на першому проході (б)

## 3.2. Контактування стружки із передньою поверхнею інструменту, оснащеного ПКНБ групи BL

Як вказано раніше, зону контакту стружки із передньою поверхнею інструменту із ПНТМ на основі cBN можна охарактеризувати наступними величинами – довжиною контакту (L), площею контакту (A) та активною довжиною різальної кромки (b). Визначення вище вказаних величин, безпосередньо в процесі різання, достатньо складно [102]. Тому в роботі [103] для визначення розмірів зони контакту звертають увагу на зношені ділянки інструментів, на яких видно наліт металу заготовки у виді плям по границям яких визначалися розміри зони контакту. Налиплий матеріал може

також бути на зношених ділянках інструменту або на суміжних зонах, що знижує точність отриманих даних. Крім того при використанні ПКНБ, які володіють високими фізико-механічними властивостями визначення розмірів зони контакту по розмірам зношеної ділянки на передній поверхні інструменту майже не можливо, через те, що стружка при проході даної ділянки не залишає чітко видимих слідів на передній поверхні інструменту.

Визначення величини довжини контакту стружки (L) з передньою поверхнею інструментів із ПКНБ є важливою задачею, оскільки дана величина є одним з найважливіших параметрів, що чинить вплив на оцінку сили, температури різання, характеристики стійкості 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 [27]. Тому найбільш достовірними даними будуть експериментальні дані, отримані для кожного окремого випадку обробки.

Для проведення експериментів були використані різальні пластини з ПНТМ «Борсиніт» та композит із ПКНБ із низьким вмістом бору (cBN-TiC (45 об.%)-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) в обох випадках на різальні пластини наносилося тонкий шар алюмінію товщиною 2 мкм, для більш чіткої візуалізації зони контакту (рис. 3.10–3.12). Вплив алюмінієвого покриття на точність отриманих даних мінімальний, оскільки у перший момент точіння покриття виноситься із зони різання і виконує лише інформаційну функцію. Результати досліджень представлені в табл. 3.1, 3.2 та на рис. 3.13, 3.14.

Вибір коефіцієнту поперечної усадки стружки обумовлений тим, що в процесі точіння сталі ХВГ утворюється зливна стружка різноманітної

кривизни і для визначення її товщини можна використовувати як мікроскоп так і універсальні вимірювальні засоби.



Рисунок 3.10 – Вигляд контактних ділянок інструменту із ПКНБ «Борсиніт» після точіння сталі ХВГ (v = 90 м/хв; t = 0,2 мм): a - S = 0,1 мм/об;  $\delta - S = 0,12$  мм/об;  $\epsilon - S = 0,14$  мм/об; c - S = 0,16 мм/об

Значення усадки стружки по товщині отримані експериментальним шляхом. За допомогою мікроскопа визначалися поперечні розміри стружки *a*<sub>1</sub> і розраховували коефіцієнт усадки.

При використанні інструментів із низьким вмістом бору (*c*BN-TiC(45 об.%)-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) залежність усадки стружки від подачі можна апроксимувати виразом (при v = 100 м/хв):

$$\xi(S) = 13,74 \cdot S^2 - 13,96 \cdot S + 4,62 \,. \tag{3.1}$$



a



б

в

Рисунок 3.11 – Вигляд контактних ділянок інструменту із низьким вмістом бору (*c*BN-TiC(45 об.%)-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) після точіння сталі XBГ (v = 100 м/хв; t = 0,2 мм):

a - S = 0,1 мм/об; 6 - S = 0,19 мм/об; e - S = 0,29 мм/об

Таблиця 3.1

# Коефіцієнт усадки стружки, експериментальні значення довжини контакту стружки та активної довжини різальної кромки при точінні сталі ХВГ інструментом із ПКНБ «Борсиніт»

<i>v</i> , м/хв	<i>S</i> , мм/об	<i>t</i> , MM	ζ	<i>L</i> , мм	<i>b</i> , мм
90 _	0,10		3,7	0,195	1,25
	0,12	0,2	3,3	0,203	1,31
	0,14		3,0	0,214	1,32
	0,16		2,9	0,230	1,35



*а* б

в

Рисунок 3.12 – Вигляд контактних ділянок інструменту із низьким вмістом бору (*c*BN-TiC(45 об.%)-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) після точіння сталі XBГ (v = 200 м/xB; t = 0,2 мм):

a - S = 0,1 мм/об;  $\delta - S = 0,19$  мм/об; e - S = 0,29 мм/об



Рисунок 3.13 – Залежність довжини контакту стружки із передньою поверхнею інструменту (1), а також коефіцієнту усадки стружки (2) від подачі при точінні сталі ХВГ інструментом із ПКНБ «Борсиніт»

Таблиця 3.2

Коефіцієнт усадки стружки, експериментальні значення довжини контакту

стружки та активної довжини різальної кромки при точінні сталі ХВГ

інструментом із низьким вмістом бору ( $cBN-TiC(45 \text{ ob.})-Si_3N_4$ )

<i>v</i> , м/хв	<i>S</i> , мм/об	<i>t</i> , MM	ζ	<i>L</i> , мм	<i>b</i> , мм
	0,10	0.2	4,0	0,073	1,45
	0,14		3,8	0,078	1,47
100	0,19		3,5	0,085	1,50
	0,24		3,2	0,110	1,57
	0,29		3,1	0,160	1,65
200	0,10	0,2	3,5	0,064	1,44
	0,14		2,9	0,068	1,50
	0,19		2,6	0,076	1,53
	0,24		2,1	0,102	1,56
	0,29		1,9	0,139	1,70



Рисунок 3.14 – Залежність довжини контакту стружки із передньою поверхнею інструменту (1), а також коефіцієнту усадки стружки (2) від подачі при точінні сталі ХВГ інструментом із низьким вмістом бору (*c*BN-TiC(45 об.%)-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)

Аналіз проведених досліджень показує, що збільшення подачі, як при використані інструментів із ПКНБ «Борсиніт» так інструментів із низьким вмістом бору (cBN-TiC(45 об.%)-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>), приводить до збільшення довжини контакту стружки із передньою поверхнею інструменту, що обумовлено збільшенням товщини зрізу, при цьому коефіцієнт усадки стружки зменшується внаслідок збільшення температури різання.

При використанні інструментів із низьким вмістом бору, які працюють з більш високими режимами різання, слід відмітити менші значення довжини контакту при збільшені подачі в порівнянні із інструментами із ПКНБ «Борсиніт», що пояснюється комплексною зміною параметрів процесу різання, а саме: збільшення температури обробки та зміною умов тертя на контактних ділянках інструменту.

Дослідження, проведені для визначення коефіцієнта усадки стружки (ξ), показали, що при швидкостях 90–100 м/хв, у двох типах інструментів, коефіцієнт усадки знаходиться майже у одному діапазоні значень, що говорить про майже однаковий ступінь пластичної деформації в зоні різання. При збільшені швидкості різання до 200 м/хв коефіцієнт усадки стружки для інструменту з низьким вмістом бору зменшується, що говорить про більш сприятливі умови стружкоутворення – зменшується степінь деформації матеріалу на робочих поверхнях інструменту та збільшується швидкість сходу стружки по передній поверхні інструменту внаслідок чого на зняття припуску затрачаються менші зусилля.

## 3.3. Контактна взаємодія в зоні різання і працездатність різального інструмента, оснащеного ПКНБ групи BL

Як показано в розділі 1, при обробці з невисокими швидкостями різання зношування інструменту на основі КНБ відбувається переважно по задній поверхні і визначається інтенсивністю протікання процесів абразивної і адгезійної взаємодії контактуючих матеріалів. З її збільшенням стійкість інструменту істотно знижується. Особливо інтенсифікується процес зношування інструменту при швидкості різання понад 120 м/хв. Це пов'язано з тим, що із збільшенням швидкості різання збільшується контактна температура, що визначає зростання інтенсивності хімічної взаємодії контактуючих матеріалів. Проведені у роботі [104] експерименти показують, що при використанні традиційних композиційних інструментальних матеріалів на основі нітриду бору при обробці заготовок із загартованої сталі твердістю 60–62 HRC збільшення швидкості різання вище 110 м/хв недоцільно у зв'язку з низькою стійкістю інструменту.

В даній роботі досліджували композити групи BL на базі чотирьох основних компонентів: cBN, TaN, TiC, TiN (табл. 3.3). Для дослідження особливостей контактної взаємодії при різанні (Fe-C)-сплавів високої твердості та ефективності застосування в лезовому інструменті розроблених матеріалів із згілно ISO спечених заготовок були виготовлені 1832-2004 партії непереточуваних різальних пластин RNMN 09T300 (круглої форми діаметром 9,52 мм, товщиною 3,97 мм). Для різних умов обробки були виготовлені пластини як з гострою різальною кромкою так і зміцнюючою фаскою (0,2×20°). Шорсткість робочих поверхонь пластин становила *Ra* 0,038–0,067.

Дослідження проводились при точінні загартованих сталей ШХ 15 (56– 62 HRC) та ХВГ (56–64 HRC). Дослідження особливостей контактної взаємодії розроблених керамо-матричних композитів групи BL переважно проводились при високих швидкостях різання 140–350 м/хв.

Для порівняльного аналізу розроблених матеріалів на першому етапі проводились чистове точіння заготовок із загартованої сталі ШХ 15 відносно невисокої твердості– 56–58 HRC. Величина подачі та глибини різання були постійними та становили: S = 0,1 мм/об, t = 0,2 мм.

При точінні із швидкостями різання 170 м/хв величина зносу по задній поверхні пластин із більшості партій (22, 23 24, 26, 27, 28) не перевищувала  $h_3$ = 0,1 мм після 10 хв роботи, що свідчить про високу стійкість розроблених матеріалів при обробці в таких умовах.

100

Склад суміші для спікання, об.% ⇔ мас.%	Позначення партій пластин
<i>с</i> ВN(КМ 3/2)-ТаN (1–30 мкм, 55–45 ⇔ 22,9–77,1	21
<i>с</i> ВN(КМ 3/2)-ТіN (1−2 мкм), 55–45 ⇔ 44,5–55,5	22-Д
<i>с</i> ВN(AM1-2)-TiN (1−2 мкм), 55–45 ⇔ 44,5–55,5	26
wBN-TiN (1–2 мкм), 55–45 ⇔ 43,7–56,3	23-Д
( <i>c</i> BN(KM 3/2)-wBN)-TiN (1–2 мкм),	28
60–15–25 ⇔ 52,6–13,2–34,2	20
$cBN(KM 3/2)$ -TiC ( $\leq 4,5-7$ мкм) <sup>4</sup> , 55-45 $\Leftrightarrow 46,4-53,6$	24-Д
wBN-TiC( $\leq$ 4,5–7 мкм) <sup>4</sup> , 55–45 $\Leftrightarrow$ 46,2–53,8	25-Д
$cBN(KM 3/2)$ -ТіС ( $\leq 4,5-7$ мкм) <sup>4</sup> , 75–25 $\Leftrightarrow 68-32$	27

Позначення партій пластин та їх вихідні склади

Процес точіння із швидкістю різання 215 м/хв характеризується поступовим рівномірним зношуванням дослідних пластин (рис. 3.15) та монотонним незначним збільшенням сили різання радіальної сили  $P_y$  (рис. 3.16) Значення тангенційної сили  $P_z$  для всіх партій зразків (за винятком  $N \ge 21$ ) практично не змінюється і дорівнює 100 Н. Швидкість зношування дослідних партій знаходиться в межах 10–12 мкм/хв.



Рисунок 3.15 – Контактна ділянка задньої поверхні зразка № 24 ШХ15 (58 HRC) (v = 215 м/хв, S = 0,1 мм/об, t = 0,2 мм,  $h_3 = 0,05$  мм, T = 5 хв)



Рисунок 3.16 – Зміна складових сил різання  $P_y$  и  $P_z$  при точінні сталі ШХ15 (58 HRC) пластиною з партії № 23 (v = 215 м/хв; S = 0,1 мм/об; t = 0,2 мм)

З підвищенням швидкості до *v* = 265 м/хв швидкість зношування дослідних КМК зростає до 15–18 мкм/хв (партії №№ 24, 26, 27). Випробування партій №№ 24, 26 при *v* = 320 м/хв показує їх високу працездатність за таких умов обробки (швидкість зношування 25 мкм/хв).

Серед усіх складів розроблених КМК найнижчими різальними властивостями виділяється партія № 21. Незважаючи на вдалий підбір компонентів, які теоретично мають високу стійкість до оксидувавання при високих температурах, такий композит вже при швидкості різання 170 м/хв зношується в 2 рази скоріше у порівнянні з рештою партій.

При обробці із швидкістю різання v = 215 м/хв пластини із партії № 21 втрачали працездатність вже після 2 хв роботи. За цей час складові сили різання стрімко зростають:  $P_y$  –з 110 до 300 H,  $P_z$  – з 100 до 160 H. Спостерігається утворення в пластинах макротріщин, які можуть знаходитись як безпосередньо в контактній зоні інструментальний-оброблюваний матеріал, так і за її межами (рис. 3.17). Наявність зміцнюючої фаски на передній поверхні пластин № 21 не впливає на процес утворення макротріщин (рис. 3.18).



Рисунок 3.17 – Контактні ділянки задньої (*a*) та передньої (б) поверхні зразка з партії № 21 ШХ15 (58 HRC)





Рисунок 3.18 – Тріщина за межами контактної зони зразка з партії № 21

Це свідчить про невисоку міцність та стійкість до зносу отриманого матеріалу. Причиною утворення макротріщин та інтенсивного зношування композиту № 21 є неоднорідна структура матеріалу. Застосування крупнодисперсних компонентів TaN (агрегати розміром до 30 мкм) при спіканні композитів в умовах високих тисків і температур призводить до нівелювання високої стійкості до оксидування компонентів отриманого композиту.

## 3.4. Зв`язок зносу інструменту із ПКНБ та статистичними механічними характеристиками поверхневого шару композиту

На діаграмах представлено залежності величини тангенційної складової спротиву матеріалу зразків руйнуванню – силу тертя-мікрорізання та глибини занурення при повздовжньому переміщенні індентора (рис. 3.19–3.22). Ділянки входу та виходу індентора відсічені і враховано тренд нахилу діаграм.



Рисунок 3.19 – Сканування зразка № 21: *а* – траса сканування; *б* – залежність глибини занурення індентора від координати *X* та навантаження

Аналіз даних діаграм на рис. 3.23, 3.24 і табл. 3.4 дозволяє оцінити характер залежності між параметрами, що характеризують процес мікроруйнування поверхневих шарів композитів – глибиною занурення індентора склерометра та тангенціальним зусиллям на інденторі.



Рисунок 3.20 – Сканограма пластини № 21: *а* – залежність сили тертя від координати *X*; *б* – залежність глибини занурення від координати *X* 



Рисунок 3.21 – Сканограма пластини № 27: *а* – залежність сили тертя від координати *X*; *б* – залежність глибини занурення від координати *X* 



Рисунок 3.22 – Сканограма пластини № 24: *а* – залежність сили тертя від координати *X*; *б* – залежність глибини занурення від координати *X* 



Рисунок 3.23 – Залежність математичного очікування сили тертямікрорізання від номера зразка та нормального навантаження на індентор



Рисунок 3.24 – Залежність математичного очікування глибини занурення індентора при скануванні від номера зразка та нормального навантаження на індентор

## Таблиця 3.4

Зразок	Навантаження,	<i>M</i> [ <i>h</i> ],	σ[ <i>h</i> ],	$M[F_{\tau}],$	$\sigma[F_{\tau}]$ ,	$F_R$ ,
№	сH	МКМ	МКМ	сH	сH	Н/мм
	30	-1,00	0,18	17,02	3,21	
21	50	-1,91	0,16	27,66	3,61	_
	100	-4,07	0,22	47,92	4,45	-
	30	-1,36	0,13	17,69	2,30	
22	50	-2,20	0,18	30,78	3,00	132,8
	100	-4,53	0,30	56,59	4,21	-
	30	-1,08	0,11	15,45	1,81	
24	50	-1,75	0,14	27,95	2,58	108,0
	100	-3,85	0,16	55,13	4,76	-
	30	-1,58	0,22	17,53	2,06	
27	50	-2,17	0,16	30,61	2,96	188,5
	100	-4,19	0,13	56,45	4,41	

### Статистичні характеристики механічних властивостей композитів

Сила тертя-мікрорізання від практично не залежить типу експериментального композиту за виключенням зразка № 21. Величина даного параметру для цього зразка значно нижча, що свідчить про те, що за сукупністю механічних властивостей зразок № 21 значно (на 14%) поступається іншим типам композитів. В цілому, значення СКВ та маточікування сили тертя-мікрорізання не дозволяє визначити найбільш ефективний тип композиту при вимірюванні сили тертя-мікрорізання вказуючи лише тільки на принципову працездатність нових матеріалів.

Ще одним методом, що використовується при оцінці властивостей крихких матеріалів є FR-метод – це мікрометод сколювання кромки зразка, який забезпечує визначення опору тендітних матеріалів руйнуванню шляхом сколювання гострої прямокутної кромки зразка за допомогою конічного стандартного індентора Роквелла (рис. 3.25).



Рисунок 3.25 – Схема проведення досліду при сколюванні крихких матеріалів (*a*) та результати вимірювань (б)

При цьому на кромці зразка утворюються шрами відколів, що використовуються для визначення основного експериментального параметра таких випробувань – величини відстані руйнування *L*. Значення опору

руйнування при сколюванні кромки зразка FR (fracture resistance) дорівнює відношенню величини зусилля, прикладеного до індентора і викликаючого сколу кромки зразка Pf, до величини відстані руйнування L. Перевагою таких механічних випробувань є простота їх виконання і обмежені витрати матеріалу, а також можливість використання прямокутних кромок виробів при їх виконанні [105–108]. В даному випадку при досліджені нових модифікацій надтвердих полікристалічних композиційних матеріалів було застосовано модифікований FR-метод при якому визначалася величина сили сколювання та глибина занурення індентора при якому відбувалось сколювання на різних відстанях від кромки зразка. Результати вимірювань наведено на діаграмі на рис. 3.25,  $\delta$ .

Представлені на рис. 3.26 діаграми руйнування досліджуваних крихких матеріалів демонструють особливості їх механічної поведінки в умовах локального пошкодження мікрооб`ємів крайок зразків. При визначенні відношення нормального навантаження на індентор до глибини занурення індентора при сколюванні (рис. 3.25 б) необхідно відзначити, що максимальне значення параметру  $F_R$  притаманне зразку № 24, а мінімальне – № 27.



Рисунок 3.26 – Відношення нормального навантаження на індентор до глибини занурення індентора при сколюванні
Для лінійно-пружних матеріалів спостерігається прямо пропорційна залежність  $F_R$  від  $K_{1c}$  На відміну від них, для керамічних матеріалів, в руйнуванні яких значну роль відіграють процеси пластичної деформації, що визначається параметром  $\chi$  згідно [109],  $K_{1c}$  в загальному випадку залежить від  $F_R$  не лінійно, хоча кореляція між вказаними параметрами зберігається. Таким чином можна вважати  $F_R$  комплексним показником, який доповнює таку характеристику матеріалу, як критичний коефіцієнт концентрації напружень  $K_{1c}$  [107] та, вочевидь, міцністні характеристики матеріалу. Отже, згідно даних діаграми (див. рис. 3.25) зразок № 24 повинен характеризуватися максимальною міцністю та тріщиностійкістю.

Діаграми на рис. 3.27 демонструють залежності сили тертя (*a*) та глибини занурення індентора (б) від координати при скануванні зразків №№ 21, 22, 24, 27 при навантаженні 30 сН.

Графіки на рис. 3.27 рознесено відносно нуля для зручності аналізу. Якщо діаграма, яка характеризує глибини занурення індентора при охарактеризувати скануванні не дозволяє однорідність механічних властивостей випробуваних матеріалів, то характеристики сили тертямікрорізання надають можливість визначити, найбільшою ЩО однорідністю характеризуються зразок № 24. Користуючись результатами розрахунків, наведеними в таблиці 1 побудуємо діаграму ранжування зразків за параметром середньо-квадратичного відхилення сили тертямікрорізання при скануванні зразків з нормальним навантаженням 30 сН (рис. 3.28).



Рисунок 3.27 – Залежність сили тертя (*a*) та глибини занурення індентора (б) від координати при скануванні зразків №№ 21, 22, 24, 27



Рисунок 3.28 – Величина СКВ значень сили тертя при скануванні зразків

**Чистове точіння сталі ХВГ (62–64 НRС).** Силові закономірності при точінні дослідними КМК досліджувались при чистовому продольному точінні заготовок із термообробленої сталі ХВГ (62–64 HRC), яка характеризується більшою глибиною загартовування та гіршою оброблюваністю у порівнянні зі сталлю ШХ15.

При високошвидкісній обробці сталі ХВГ (62–64 НRС) КМК, що містять ТіN, спостерігається висока ймовірність утворення мікросколів на різальній кромці інструменту, що призводить до передчасної втрати працездатності інструменту. Використання КМК № 22 при точінні із швидкістю v = 190 м/хв (S = 0,1 мм/об, t = 0,2 мм) характеризується високою інтенсивністю зношування (рис. 3.29) та швидкою втратою працездатності інструменту. Вже після 3 хвилин роботи відбувається сколювання різальної кромки інструменту. Руйнування інструментального матеріалу переважно відбувається по передній поверхні інструменту (рис. 3.30).

Зважаючи на вищенаведене, подальші дослідження проводились із використанням КМК із вмістом ТаС.

На початковому періоді обробки (3–4 хв в залежності від умов точіння) інструментом, оснащеним пластинами №24, спостерігається порівняно інтенсивне зростання величини радіальної складової сили різання  $P_y$ . При точінні із швидкістю v = 200 м/хв (S = 0,1 мм/об, t = 0,2 мм) па першому

проході (час проходу складає T = 3,3 хв) таке зростання складає з 120 до 230 Н. Це пов'язано із утворенням фаски зносу по задній поверхні на стадії приробки, яка у даному випадку складає  $h_3 = 0,08$  мм (рис. 3.31). На наступних проходах спостерігається стабілізація зростання  $P_y$  (на кожному проході на 40–50 Н) та швидкості зношування інструменту. Вимірювання величини зносу після 10 хвилин роботи (три проходи) показало, що вона складає складає  $h_3 = 0,13$  мм. Стійкість інструменту до досягнення величини зносу  $h_3 = 0,4$  мм складає 34 хв.



Рисунок 3.29 – Зміна радіальної сили різання *P*<sub>у</sub> при точінні сталі ХВГ (62 HRC) пластиною з партії № 22 до сколювання різальної кромки (*v* = 190 м/хв; *S* = 0,1 мм/об; *t* = 0,2 мм, *T* = 3 хв)

Подальше підвищення швидкості різання до *v* = 320 м/хв не призводить до суттєвої зміни характеру зносу інструменту – відбувається поступове зношування по задній поверхні та збільшення лунки на передній поверхні (рис. 3.32). Для визначення технологічних можливостей інструменту, оснащеного КМК, було проведено обробку загартованої сталі ХВГ (62 HRC) із підвищеними подачами. Для порівняння було обрано матеріали, що мають

найвищі експлуатаційні властивості при чистовому точінні: КМК з партії № 26 та CBN100 (фірма Seco). Як показали проведені випробування, інструменти, оснащеними такими матеріалами, при точінні із подачею S = 0,19 мм/об з підвищенням швидкості до v = 215 м/хв (t = 0,2 мм) втрачали свою працездатність вже після 6 хвилин роботи. Для CBN100 характерним є інтенсивний знос по задній поверхні (рис. 3.33), для КМК № 27 — мікросколювання різальної кромки в контактній зоні (рис. 3.34).





Рисунок 3.30 – Передня (*a*) та задня (б) поверхня зразка з партії № 22 (*v* = 190 м/хв, *S* = 0,1 мм/об, *t* = 0,2 мм, *h*<sub>3</sub>= 0,2 мм, *T* = 3 хв, ШХ15 (58 HRC)



Рисунок 3.31 – Контактні ділянки задньої поверхні пластини № 24 після точіння сталі ХВГ (62 НRС (v = 200 м/хв, S = 0,1 мм/об, t = 0,2 мм):  $a - T = 3,3 \text{ хв} (h_3 = 0,08 \text{ мм}); \delta - T = 10,0 \text{ хв} (h_3 = 0,13 \text{ мм})$ 



Рисунок 3.32 – Контактна ділянка задньої поверхні пластини № 24 після точіння сталі ХВГ (62 HRC) (v = 314 м/хв, S = 0,1 мм/об, t = 0,2 мм,  $h_3 = 0,13$  мм, T = 2,1 хв)



Рисунок 3.33 – Контактні ділянки передньої (*a*) та задньої (*б*) поверхні пластини CBN100 (Seco) після точіння сталі XBГ (64 HRC) із подачею S = 0,19 мм/об (v = 215 м/хв, t = 0,2 мм, T = 6,2 хв)

Проведення стійкісних випробувань показало, що найбільш перспективними в цьому напрямку є КМК із вмістом cBN 55–45 об.%. Стійкість інструменту, оснащеного КМК № 24, при високопродуктивному точінні із режимами різання: v = 215 м/хв, S = 0,19 мм/об, t = 0,2 мм складає 12,5 хв при величині зносу  $h_3 = 0,35$  мм. На контактних поверхнях пластини не спостерігається сколювання інструментального матеріалу (рис. 3.35).



Рисунок 3.34 – Контактні ділянки передньої (а) та задньої (б) поверхні пластини № 27 після точіння сталі ХВГ (64 HRC) із подачею S = 0,19 мм/об (v = 215 / xB, t = 0,2 мм, T = 6,2 xB)



Рисунок 3.35 – Контактні ділянки передньої (*a*) та задньої (*б*) поверхні пластини № 24 після точіння сталі ХВГ (62 HRC) (*v* = 215 м/хв, *S* = 0,19 мм/об, *t* = 0,2 мм, *T* = 12,5 хв, *h*<sub>3</sub> = 0,35 мм)

Вимірювання параметрів шорсткості обробленої поверхі після кожного проходу інструменту показало, що її якість залишається достатньо високою після 7 проходів до настання величини зносу  $h_3 = 0,35$  мм (табл. 3.5). На наступних проходах з'являється вібрація, що пов'язано із значним зростанням радіальної сили різання, рівень якої за таких умов обробки досягає  $P_y = 1200$  Н. При обробці матеріалів меншої твердості (сталь ХВГ (57 HRC) стійкість

пластин із партій № 27 та 28 підвищується до 25–30 хв, що значно розширює сферу застосування КМК групи BL інструментального призначення.

#### Таблиця 3.5

	1			
№ проходу	Час точіння, хв	<i>Ra</i> , мкм	<i>Rz</i> , мкм	
1	1,8	0,48	2,48	
2	3,6	0,39	2,19	
3	5,4	0,46	2,65	
4	7,2	0,51	2,70	
5	9,0	0,53	2,90	
6	10,8	0,54	2,97	
7	12,6	0,58	3,19	
8	14,4	0,67	3,70	

Шорсткість обробленої поверхні після точіння

**Чистове точінні сталі ШХ15 (62–64 НRC).** Порівняльну працездатність одержаних композитів при точінні загартованої сталі ШХ15 високої твердості 62–64 НRC оцінювали за результатами аналогічних випробувань стандартних пластин RNMN 09T300 (рис. 3.36) групи BL CBN100 (Seco, Швеція) з *c*BN ~50 об.%, WBN565 (Ceram Tec, Німеччина), Томал-10 – двошарові пластини (Томілінський завод алмазного інструменту, Росія), що містить окрім кубічного нітриду бора нітрид та діборид титану, мідь, інтерметаллід та пластин групи BH типу борсиніт з 96,7 об.% *c*BN (IHM ім. В.М. Бакуля НАН України).

У результаті зношування різальних пластин в процесі точіння складові сили різання зростають. Найбільш інтенсивно збільшується радіальна сила  $P_y$  (рис. 3.37), що визначається збільшенням зносу по задній поверхні різця і площі контакту інструмента з оброблюваним матеріалом та призводить до інтенсифікації тертя задньої поверхні із заготівкою.





Рисунок 3.36 – Різальні пластини RNMN 09Т300F (ISO 1832-2004): *a* – *c*BN100, *б* – WBN 565, *в* – Томал-10, *г* – пластина № 24, *д* – пластина № 25, *е* – пластина № 23

При точінні із швидкостями різання 90–120 м/хв швидкість зношування порівнювальних пластин суттєво не відрізняється і знаходиться на рівні 3– 9 мкм/хв, а стійкість інструменту при досягненні величини зносу по задній поверхні  $h_3 = 0,4$  мм становить понад 60 хв.

Із збільшенням швидкості різання до 140 м/хв швидкість зношування пластин Томал-10 становить 30 мкм/хв, а при швидкостях різання 160 м/хв такий різальний інструмент втрачає працездатність внаслідок швидкого руйнування різальної крайки.

Процес точіння із швидкостями різання до 140 м/хв із використанням інших матеріалів, що досліджувалися, характеризується поступовим рівномірним зношуванням по задній поверхні дослідних пластин та монотонним збільшенням сили різання *P*<sub>y</sub> (див. рис. 3.37).



Рисунок 3.37 – Зміна складових сили різання  $(1 - P_y, 2 - P_z, 3 - P_x)$  при точінні сталі ШХ15 (62 НRС) різальною пластиною № 24 при v = 140 м/хв (S = 0,1 мм/об; t = 0,2 мм)

Зі збільшенням швидкості різання до v = 175 м/хв зношування різальних пластин з борсиніту має вкрай нестабільний та інтенсивний характер. Різке ступінчасте зростання сил  $P_z$  і  $P_y$  свідчить про утворення мікросколів на різальних кромках і контактних поверхнях інструменту. Дані реєстрації сил різання та визначення величини зносу при обробці пластинами cBN100, WBN565, № 23, 24, 25 вказують на відносно низьку швидкість зношування таких матеріалів при таких режимах різання.

При швидкостях різання до 220 м/хв розроблені інструментальні матеріали групи BL зберігають високу працездатність, однак спостерігається інтенсифікація процесу зношування та зменшення стійкості інструменту. За таких умов збільшується ймовірність виходу з ладу інструменту внаслідок сколювання його різальної вершини до досягнення критичної величини зносу інструменту по задній поверхні. При обробці з високими швидкостями різання стружка нагрівається до надзвичайно високої температури і однією із головних умов проведення процесу точіння є безпечний і швидкий відвід стружки із зони обробки (рис. 3.38).





Рисунок 3.38 – Точіння із швидкістю різання v = 250 м/хв заготовки із загартованої сталі ШХ15 (62 HRC) інструментом, оснащеним різальною пластиною RNMN 09T300F із партії № 24

Аналіз отриманих даних по зміні складових сили різання вказує, що пластини № 23 дозволяють оброблювати загартовані сталі із високими швидкостями різання *v* = 275 м/хв, а інтенсивність його зношування нижче у порівнянні із пластинами CBN100 (рис. 3.39).



Рисунок 3.39 – Зміна складових сили різання  $(1 - P_y, 2 - P_z, 3 - P_x)$  при точінні сталі ШХ15 (62 НRС) при v = 275 м/хв (S = 0,1 мм/об; t = 0,2 мм,): a - пластина № 23,  $\delta - c$ BN100

За отриманими даними побудовано залежність швидкості зношування дослідних пластин від швидкості різання (рис. 3.40), що вказує на перспективність застосування розроблених матеріалів групи BL при точінні загартованих сталей із високими швидкостями різання.



Рисунок 3.40 – Залежність швидкості зношування різальних інструментів із ПКНБ від швидкості різання при точінні сталі ШХ15 (62 HRC) (*S* = 0,1 мм/об; *t* = 0,2 мм): *1* – CBN100, *2* – WBN565, *3* – Томал-10, *4* – борсинит, *5* – пластина № 23, *6* – пластина № 25, *7* – пластина № 24

Обробка заготовок із сталі ХВГ (62–64 НRС) із дефектною поверхнею (напівчистове точіння). Вищенаведені результати при обробці сталі ШХ15, ХВГ проводились в умовах чистового безударного точіння при постійній глибині різання, що не призводило до динамічних навантажень на інструмент. При обробці загартованої заготовки зі сталі ХВГ (62–64 HRC), на якій в осьовому напрямку були в наявності осьові тріщини (рис. 3.41), були отримані наступні результати.

Вже при швидкостях різання *v* = 190 м/хв пластини CBN100 мають низьку стійкість. Після 2,3 хв роботи спостерігається інтенсивне зношування та руйнування задньої поверхні такого матеріалу (рис. 3.42). При точінні в

таких умовах КМК № 27 рівномірно зношується (рис. 3.43) без утворення явних макродефектів. Швидкість зношування такого КМК скдадає 16 мкм/хв, що забезпечує стійкість інструменту 25–30 хв.



Рисунок 3.41 – Заготовка із сталі ХВГ (62 HRC) із повздовжньою тріщиною



Рисунок 3.42 – Контактні ділянки передньої (*a*) та задньої (*б*) поверхні пластини CBN100 (Seco) після напівчистового точіння сталі XBГ (62 HRC) (v = 190 м/хв, S = 0,1 мм/об, t = 0,2 мм, T = 2,3 хв)

Із підвищенням швидкості до 250 м/хв протягом першої хвилини роботи відбувається катастрофічне руйнування інструментальних КМК із низьким (50 об.%) вмістом КНБ. Такі інструменти (на прикладі КМК № 24 та СВN100) виходять з ладу внаслідок утворення макросколів (рис. 3.44, 3.45), що свідчить про неможливість їх застосування при точінні матеріалів навіть з незначним ударом.



Рисунок 3.43 – Контактні ділянки передньої (*a*) та задньої (б) поверхні пластини № 27 після точіння сталі ХВГ (62 HRC) (*v* = 190 м/хв, *S* = 0,1 мм/об, *t* = 0,2 мм, *h*<sub>3</sub> = 0,15 мм, *T* = 6,9 хв)





Рисунок 3.44 – Контактні ділянки передньої (а) та задньої (б) поверхні пластини CBN100 (Seco) після напівчистового точіння сталі XBГ (62 HRC) (v = 250 м/xB, S = 0,1 мм/об, t = 0,2 мм)



Рисунок 3.45 – Контактні ділянки передньої (а) та задньої (б) поверхні пластини № 24 після напівчистового точіння сталі ХВГ (62 HRC) (v = 250 м/хв, S = 0,1 мм/об, t = 0,2 мм, T = 2,3 хв)

При обробці в таких умовах КМК № 27 зберігає свою працездатність до настання критичної величини зносу по задній поверхні. Механізм зносу КМК № 27 не змінюється – переважно зношується задня поверхня інструменту із утворенням лунки на передній поверхні (рис. 3.46).



Рисунок 3.46 – Контактні ділянки передньої (а) та задньої (б) поверхні пластини № 27 після точіння сталі ХВГ (62 HRC) (v = 265 м/хв, S = 0,1 мм/об, t = 0,2 мм, h<sub>3</sub> = 0,2 мм)

#### Висновки до розділу 3

1. Методом кінцевих елементів виконано моделювання процесу зміцнення поверхневого шару виробу у процесі точіння з врахуванням циклічності силового та температурного навантаження у зоні різання.

2. Методом склерометрування встановлено, що за сукупністю механічних властивостей поверхневого шару найкращим є матеріал, який має склад *c*BN (55 об.%)-ТіС. Однорідність механічних властивостей даного матеріалу, яка визначена за величиною СКВ сили тертя-мікрорізання, перевищує показники зразку cBN (75 об.%)-ТіС і значно перевищує властивості ПКНБ складу cBN (55 об.%)-ТаN.

3. На основі проведених стійкісних досліджень інструментів із ПКНБ групи BL на базі основних компонентів: *c*BN, TaN, TiC, TiN при точінні загартованих сталей ШХ 15 (56–62 HRC) та ХВГ (56–64 HRC) на швидкостях

різання до 215 м/хв встановлено, що найбільш перспективним для застосування є композити з вмістом *c*BN 55–45 об.% та зв'язкою на основі ТіС, за рахунок більш однорідного структурного стану матеріалу.

# РОЗДІЛ 4 НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН В ЗОНІ СТРУЖКОУТВОРЕННЯ ПІД ЧАС РІЗАННЯ ЗАГАРТОВАНИХ СТАЛЕЙ

## 4.1. Моделювання напружено-деформованого стану в зоні стружкоутворення

На рис. 4.1. представлені розрахункові значення складових *Pz* та *Py* сили різання, отримані при моделюванні різання сталі ШХ15 інструментом на контактних поверхнях якого задано середній коефіцієнти тертя 0,1, а на рис. 4.2 – залежність розрахункових значень складових сили різання від коефіцієнту тертя.



Рисунок 4.1 – Сили різання (модель) при  $\mu = 0,1: a - P_z; \delta - P_y$ 

Використання моделі тертя за Кулоном дозволило виокремити коефіцієнт тертя як визначальний фактор, що обумовлює параметри стружкоутворення та сили різання. Експериментальні дані для складових сили різання на передній поверхні, отримані екстраполяцією на нуль товщини зрізу становлять –  $P_Z = 282$  H,  $P_Y = 122$  H (ширина зрізу 1,9 мм). Похибки розрахункових даних у порівнянні із експериментальними даними складає 7% для складової  $P_Z$ , та 30%

для Py (велика похибка для Py пояснюється тим, що при екстраполяції на нуль товщини зрізу з експериментальних даних виключається вплив радіуса заокруглення різальної та фаски зносу по задній поверхні). Нижня оцінка впливу коефіцієнту тертя на компоненти сили різання (по Pz) демонструє приріст Pz на 30% при збільшенні коефіцієнту тертя  $\mu$  у 3 рази.

Зміна величин сили різання є наслідком зміни характеристик процесу стружко утворення. Залежність сил різання від коефіцієнту тертя лінійна, тому розглянемо лише крайні точки чисельного експерименту –  $\mu = 0,1$  та  $\mu = 0,3$ .

Усадка стружки – параметр зв'язаний з відносною деформацією матеріалу – зростає від 2,8 до 3,22, довжина контакту стружки з передньою поверхнею зростає з 0,10 мм до 0,15 мм.



Рисунок 4.2 – Розрахункова залежність сил різання на 1 мм ширини зрізу (Н/мм) від коефіцієнту тертя

Спостерігається значне збільшення температури різання в області прилеглій до різальної кромки (рис. 4.3) від 390 до 490 °C. Відносно низькі для різання загартованої сталі значення температури пов'язані із малим часом моделювання – шлях різання моделі складає 0,75 мм.

Максимальні еквівалентні напруження (по Мізесу), характерні для різання інструментом з  $\mu = 0,1$ , в приконтактній зоні складають 1120 МПа, (рис. 4.4, *a*) максимальна ступінь еквівалентної деформації (по Мізесу) в приконтактній зоні: 1,1–1,25, в зоні зсуву 0,83-0,95 (рис. 4.5, *a*).



Рисунок 4.3 – Температурне поле при  $\mu = 0,1$  (*a*) та  $\mu = 0,3$  (б)



Рисунок 4.4 – Еквівалентні напруження при  $\mu = 0,1$  (*a*) та  $\mu = 0,3$  (*б*)



Рисунок 4.5 – Еквівалентні деформації при  $\mu = 0,1$  (*a*) та  $\mu = 0,3$  (*б*)

Максимальні еквівалентні напруження (по Мізесу), характерні для різання інструментом з  $\mu = 0,3$ , в зоні зсуву складають 1150 МПа (рис. 4.4,  $\delta$ ), максимальна ступінь еквівалентної деформації в приконтактній зоні – 1,45–1,60, в зоні зсуву 0,85–0,90 (рис. 4.5,  $\delta$ ).

Моделювання не виявило змін в значеннях напружено-деформованого стану за різних умов тертя (за винятком приконтактної зони в стружці). Основний вплив пов'язаний зі збільшенням сил тертя на передній поверхні, що визиває зростання усадки, довжини контакту та температури різання.

Вплив величини радіусу округлення різальної кромки оцінимо на моделі з коефіцієнтом тертя 0,2 та  $\rho = 10$  мкм та  $\rho = 30$  мкм. Різниця температур різання для таких інструментів становить 30 °C (440 та 470 °C). Сили різання  $P_z = 151$  Н та  $P_y = 68$  Н для  $\rho = 10$  мкм і  $P_z = 163$  Н та  $P_y = 95$  Н для  $\rho = 30$  мкм. Деформації в зоні біля різальної кромки складає 1,3 та 1,75 (рис. 4.6).



Рисунок 4.6 – Деформації в зоні біля різальної кромки для радіусу заокруглення  $\rho = 10$  (*a*) та для  $\rho = 30$  (*б*)

#### 4.2. Дослідження сил різання під час обробки з ударами

Вид імпульсів складових сили різання показано на діаграми на рис. 4.7. Динамічний ефект проявляється у піковому зростанні величин складових  $P_z$  і  $P_y$  на величину до 20%. Зношування інструменту по задній поверхні веде до зростання величини радіальної складової сили різання, абсолютна величина динамічного сплеску при цьому не змінюється і дорівнює 100 Н (рис. 4.8).



Рис. 4.7 – Сили різання при обробці інструментом з ПКНБ «Борсиніт» (v = 120 м/хв, t = 0,4 мм, S = 0,1 мм/об,  $h_z = 0$  мм)



Рис. 4.8 – Сили різання при обробці інструментом з ПКНБ «Борсиніт» (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 сприяє суттєвому зниженню сил різання (рис. 4.9). Знімки різальної кромки інструмента, виконані після одного проходу, демонструють, що при низькій швидкості різання (рис. 4.10, *a*) різальна кромка характеризується нерівномірним руйнуванням різальної кромки полікристалу. Зношування інструменту при підвищеній швидкості має рівномірний характер (рис. 4.10, *б*).



Рис. 4.9 – Сили різання при обробці інструментом з ПКНБ «Борсиніт» при v = 120 м/хв (*a*) і v = 210 м/хв (*б*), t = 0,2 мм, S = 0,1 мм/об,  $h_z = 0,15$  мм

Руйнування композиту типу BL спостерігалося при глибині різання t = 0,4 мм та t = 0,2 мм з низькою швидкістю різання v = 120 м/хв при всіх повторних тестах та, в окремих випадках, при мінімальному навантаженні з t = 0,2 мм та v = 210 м/хв. На рис. 4.11, *а* представлений загальний вигляд реєстрованих сигналів при обробці під час якої сталося руйнування різальної пластини з композиту BL при v = 210 м/хв, t = 0,2 мм, S = 0,1 мм/об,  $h_z = 0$  мм. З діаграми видно, що катастрофічне руйнування інструменту відбулося

на 13-й (рис. 4.11, *a*) та 9-й (рис. 4.11, *б*) секундах різання, величини сил різання в цей момент можна оцінити за графіком на рис. 4.11, *в*.



Рис. 4.10 – Контактні поверхні інструменту з ПКНБ «Борсиніт» після 90 с обробки при v = 120 м/хв (*a*) і v = 210 м/хв (*б*) (t = 0,2 мм, S = 0,1 мм/об)



Рис. 4.11 – Загальний вигляд сигналів, які реєструються при обробці: *a* і *б* – зруйнований різальний інструмент з композиту BL при *v* = 210 м/хв, *t* = 0,2 мм, *S* = 0,1 мм/об, *h*<sub>z</sub> = 0 мм; *в* – різальний інструмент з композиту BH при *v* = 120 м/хв, *t* = 0,4 мм, *S* = 0,1 мм/об, *h*<sub>z</sub> = 0 мм

Для порівняння наведено (рис. 4.11, *в*) зовнішній вигляд сигналу, що реєструється за умови, що інструмент зберігає працездатність з поступовим зношуванням композиту. Детальна діаграма сил різання при обробці композитом BL зображена на рис. 4.12.



Рис. 4.12 – Сили різання при обробці інструментом з ПКНБ-ВL при v = 210 м/хв (до руйнування) (*a*); зміна сили різання у момент руйнування інструменту *t* = 0,2 мм, *S* = 0,1 мм/об (*б*)

Руйнування відбувається шляхом об'ємного макровикришування по задній та сколювання по передній поверхні інструменту. Вигляд різальної кромки інструменту після крихкого руйнування наведено на рис. 4.13.



Рис. 4.13 – Зруйновані ділянки різальної кромки інструменту з ПКНБ-ВL при v = 120 м/хв (*a*) і v = 210 м/хв (*б*) (t = 0,2 мм, S = 0,1 мм/об)

Причина руйнування полягає в піковому зростанні напружень в різальному клині інструменту в момент врізання. Моделювання переривчастої обробки при v = 120 м/хв, t = 0,4 мм, S = 0,1 мм/об (відповідає товщині зрізу 30 мкм) методом КЕ (рис. 4.14) показує, що в точці входу леза в оброблювану поверхню в небезпечній точці на поверхні різця в межах фаски зміцнення зростання третіх головних напружень досягає значення – 3,24 ГПа, що перевищує середній рівень стискаючих напружень при різанні в межах ділянки, на якої реалізується різання в 1,2 рази.

Хоча номінальне значення межі міцності на стиснення ПКНБ вище, зважаючи на дисперсію властивостей композиту, ймовірність їх руйнування в розглянутих умовах досить висока.

На основі отриманих даних з моделювання контактних напружень та літературних даних величини границі міцності під час стиску композиту із ПКНБ групи ВН та BL розраховані ймовірності руйнування інструментів при обробці з ударом. Встановлено, що ймовірність руйнування для інструментів групи ВН "Борсиніт" становить 0,1 %, для інструментів групи BL cBN-TiC (55–45 об.%), – 68,9 %, зважаючи на дисперсію властивостей композиту



групи BL, ймовірність їх руйнування в розглянутих умовах досить висока (рис. 4.15).

в

Рис. 4.14 – Результати моделювання різання з ударом при коефіцієнті тертя 0,8: *а* – загальний вигляд моделі; *б* – момент врізання клину і появлення напружень, пов'язаних з ударом; *в* – величина третіх головних напружень у залежності від часу різання (зліва направо від моменту початку обробки до

виходу з контакту (v = 100 м/хв, t = 0,4 мм, S = 0,1 мм/об)







Рис. 4.15 – Визначення ймовірності руйнування інструментів із ПКНБ групи ВН – a та ВL –  $\delta$  при точінні сталі ШХ15 (53 HRC) з ударом (v = 215 м/хв, S = 0,1 мм/об, t = 0,2 мм)

#### Висновки до розділу 4

1. Проведено дослідження зміни складових сили різання при обробці загартованої сталі ХВГ з ударом, інструментами з ПКНБ групи BL та BH в діапазоні швидкостей різання 120-210 м/xb та встановлено, що обробка супроводжується динамічним ударним ефектом, що проявляється у вигляді пікових навантажень в момент врізання інструменту та досягає величини до 40% складових сили різання  $P_z$  та  $P_y$ .

2. Моделювання переривчастої обробки при v = 120 м/хв, t = 0,4 мм, S = 0,1 мм/об методом КЕ показує, що в точці входу леза в оброблювану поверхню в небезпечній точці на поверхні різця в межах фаски зміцнення зростання третіх головних напружень досягає значення -3,24 ГПа, що перевищує середній рівень стискаючих напружень при різанні в межах ділянки, на якій реалізується різання, в 1,2 рази. Хоча номінальне значення межі міцності на стиснення РсВN вище, зважаючи на дисперсію властивостей композиту, ймовірність їх руйнування в розглянутих умовах досить висока.

3. Методом кінцевих елементів було проведено моделювання розподілу напружено-деформованого стану в зоні стружкоутворення при чистовому точінні загартованих сталей. На основі отриманих даних встановлено, що моделювання не виявило зміни в значеннях напружено-деформованого стану для інструментів з ПКНБ групи ВН та BL за різних умов тертя. Збільшення сили тертя на передній поверхні в основному впливає на температуру різання.

## РОЗДІЛ 5 КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ РІЗАННЯ ТА ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ РІЗАЛЬНИХ ІНСТРУМЕНТІВ

## 5.1. Особливості обробки різанням в контрольованому газовому середовищі

Як наведено вище, одним із основних механізмів зносу інструментів із полікристалічного кубічного нітриду бору при обробці матеріалів на основі Fe, Ni  $\epsilon$  хімічна взаємодія між інструментальним, оброблюваним матеріалами та киснем навколишнього середовища. Результатом такої взаємодії являється утворення на контактних ділянках інструменту легкоплавких боридів типу Me<sub>x</sub>B. Вважається, що даний механізм зносу інструментів із ПКНБ  $\epsilon$  превалюючим при обробці на високих швидкостях різання, для яких характерна температура >1000 °C.

З метою оцінки впливу навколишнього середовища на параметри контактної взаємодії інструментів із ПКНБ з оброблюваним матеріалом, проведено дослідження обробки загартованої сталі (58 HRC) в захисному середовищі для виключення фактору зносу за рахунок окислення контактних ділянок.

Для проведення досліджень був використаний різальний інструменьт, оснащений ПКНБ «Борсиніт». Обробка відбувалася в контейнері з подачею газу під тиском до 2,5 атм, конструкція контейнера дозволяє фіксувати силу різання за допомогою динамометра УДМ 600, величина фаски зносу фіксувалася оптичним мікроскопом (рис. 5.1). Оброблюваний матеріал – ШХ15, параметри процесу обробки: v = 95 та 230 м/хв; S = 0,12 мм/об; t = 0,2 мм.

Для виключення ефекту охолодження також проводилась обробка і в середовищі повітря, яке подавалося в контейнер під таким же самим тиском.

Встановлено, що при швидкості різання 230 м/хв і тиску азоту або повітря до 2,5 атм, за інших рівних умов, наявність газового середовища

сприяє зниженню фаски зносу інструменту по задній поверхні з 0,18 до 0,14– 0,16 мм, що пов'язано із ефектом охолодження зони різання за рахунок конвекційного механізму тепловідведення.



Рисунок 5.1 – Загальний вид обладнання для різання в газоподібних середовищах

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 (рис. 5.2).



Рисунок 5.2 – Фаска зносу інструментів із ПКНБ після точіння загартованої сталі ШХ15 на повітрі (*a*) та в середовищі азоту (б)

Можливим свідченням зміни умов контактування є характер зміни сили різання. Передбачалося, що при точінні в середовищі азоту складові сили

різання будуть збільшуватись, в порівнянні із стандартними умовами обробки, що обумовлено зменшенням окислення матеріалу і, відповідно, збільшенням сили тертя на контактних ділянках. Однак різниця в значеннях складових сили різання (рис. 5.3) для різних умов обробки мінімальна, що вказує на незмінність умов контактування між інструментальним та оброблюваним матеріалом.



Рисунок 5.3 – Складові сили різання при обробці на повітрі (*a*) та середовищі азоту (б)

Одержані результати вказують на відсутність значного впливу кисню навколишнього середовища 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 без кисневого середовища та вказує на явище безпосередньої хімічної взаємодії сВN-Fe, як основний фактор, що обумовлює зношування композиту на високих швидкостях різання.

## 5.2. Оброблюваність полікристалічних надтвердих композитів на основі кубічного нітриду бора групи ВН та BL

В останні роки активно розробляються нові покоління матеріалів інструментального призначення, які мають різні експлуатаційні характеристики та області застосування.

Композиційні матеріали на основі кубічного нітриду бора можуть суттєво відрізнятись за фізико-механічними властивостями та структурою. Це залежить від об'ємного вмісту КНБ, виду добавок та їх кількості, зернистості порошків КНБ, що використовуються при спіканні полікристалів, *P-T* умов спікання та інших факторів.

Різальні пластини з таких матеріалів повинні характеризуються високою чистотою обробки передніх та задніх поверхонь, якістю загострення (округлення) різального клина, що суттєво впливає на якість обробленої поверхні, продуктивність процесу різання, стійкість інструменту. На сьогодні ретельних досліджень процесів механічної обробки ПКНБ різних складів інструментального призначення не проводилось.

Різальні пластини з композиційних матеріалів на основі КНБ виготовляються цільними, двошаровими (різальний шар КНБ товщиною 0,5–1,5 мм на підложці з твердого сплаву), у вигляді багатогранних твердосплавних пластин з впаяними вершинами з КНБ. Останні два види

характеризуються порівняно невеликим вмістом матеріалу на основу КНБ, тому в даній роботі розглядаються особливості механічної обробки цільних пластин.

Після спікання в апаратах високого тиску (ABT) типу тороїд композиційні матеріали мають вигляд неправильної геометричної фігури, що далеко нагадує форму циліндра (рис. 5.4). В залежності від стану твердосплавних матриць та кількості попередньо проведених спікань такі заготовки різальних пластин можуть суттєво відрізнятись за розмірами, наявністю великих виступів та впадин, іншими дефектами.



Рисунок 5.4 – Зовнішній вигляд заготовок різальних пластин з ПКНБ, отриманих спіканням в апаратах високого тиску (ABT) типу тороїд

Абразивна обробка різальних пластин із ПКНБ є порівняно складним процесом, пов'язаним з високою твердістю та зносостійкістю, а також підвищеною крихкістю таких полікристалів. Така обробка проводиться виключно із використанням алмазного інструменту двома методами: алмазними шліфувальними кругами та з використанням вільних абразивних порошків.

Для проведення порівняльних досліджень оброблюваності розроблених композитів з надтвердих матеріалів необхідно отримати зразки однакових форм, розмірів та станом поверхні.

На першому етапі проводилось формування плоскопаралельних поверхонь отриманих зразків ПКНБ. Обробка проводилась на шліфувально-

полірувальному верстаті з використанням вільного абразиву (алмазного порошку AC6 зернистістю 160/125, 80/63). Цим способом можна виконувати операції як попередньої, так і доводочної обробки із застосуванням порошків меншої зернистості. Заготовки (не менше трьох) встановлювались в спеціальні касети та прижимались до шаржованого притиру (рис. 5.5). Відхилення від розміру по площинах складала ± 0,01 мм.



а

б

Рисунок 5.5 – Вигляд робочої зони шліфувально-поліровального верстата для обробки пластин з ПКНБ по площинам: *а* – перед початком обробки, *б* – після обробки

Обробка циліндричних поверхонь здійснювалась на безцентровошліфувальному верстаті із використанням алмазного шліфувального круга на органічній зв'язці В2-01 зернистістю 80/63, точність обробки – ±0,01 мм.

Порівняльну оцінку продуктивності механічної обробки різних композитів проводили на шліфувально-полівувальному верстаті з використанням вільного абразиву (алмазного порошку ACM 20/14). Для цього поверхню чавунного притиру шаржували однаковою кількістю (0,5 г) алмазного порошку та проводили обробку протягом 30 с. Після проведення обробки пластини ретельно вимивались та визначалась зміна товщини та маси всіх оброблюваних зразків. Одержані дані для чотирьох груп пластин наведено в табл. 5.1

Таблиця 5.1

Матеріал пластин	№ зр.	Діаметр пластини, мм	Початкова товщина, мм	Кінцева товщина, мм	Зміна товщини, мм	Середня зміна товщини, мм	Середня зміна маси, мг
	1	9,52	3,98	3,52	0,46		
cBN-TiC	2	9,53	3,97	3,64	0,33	0,37	30
(55-45 об.%)	3	9,53	3,98	3,66	0,32		
cBN_TiCN_A1	1	9,53	3,99	3,88	0,11		
(90-7-306 %)	2	9,53	3,99	3,87	0,12	0,11	27
(30 7 200.70)	3	9,53	3,99	3,87	0,12		
cBN TiN	1	9,53	4,00	3,64	0,36		
сыл-тил (55–45 об.%)	2	9,53	4,00	3,67	0,33	0,32	89
	3	9,53	4,00	3,72	0,28		
ORN SIN	1	9,52	4,05	3,98	0,07		
(97-3  of  .%)	2	9,52	4,05	3,97	0,08	0,08	20
	3	9,52	4,03	3,93	0,10		

Зміна товщини та маси різальних пластин після обробки алмазним мікропорошком ACM 20/14 протягом 30 секунд

Після обробки кожної групи зразків, поверхні притиру та касет ретельно чистилися для видалення шламу та залишків алмазного абразиву. Для обробки нової групи пластин готувалась нова алмазно-абразивна суспензія.

Дослідження топографії поверхонь різальних інструментів із ПКНБ проводилось за допомогою атомно-силового мікроскопа (ACM) мод. NT-206. Використання ACM дає можливість отримувати та аналізувати ACMзображення об'єктів мікро- та нанометрового розмірів з високим ступенем роздільної здатності.

В АСМ зображення поверхні отримують шляхом сканування зразка в горизонтальній площині зондом, який має радіус вершини ~ 10–100 нм, який фіксується на чутливій консолі. Автоматична система керування слідкує за положенням зонду відносно поверхні зразка в кожній її точці і підтримує постійну відстань голка-зразок.

Аналіз отриманих результатів показує, що після проведення обробки в однакових умовах зміна розмірів та маси пластин з різних композитів на основі КНБ суттєво відрізняється. Маса композитів з високим об'ємним вмістом КНБ (90–97%) змінюється на 1,9–2,7%, у той час як у процесі обробки композитів групи BL (55 об.% КНБ) видаляється 8,1–9,3% їх вихідної маси. Порівняльний аналіз показує, що із зменшенням об'ємного вмісту КНБ з 90–97% до 55% в композитах маса видаляємого матеріалу збільшується в 3,3–4,7 рази.

За даними зміни розмірів пластин з різних композитів побудована діаграма продуктивності алмазної обробки вільним абразивом (ACM 20/14) композитів з різним вмістом cBN (рис. 5.6)

Аналіз отриманих результатів показує, що після проведення обробки в однакових умовах, зміна розмірів та маси пластин з різних композитів на основі ПКНБ суттєво відрізняється (див. табл. 5.1). Маса композитів з високим об'ємним вмістом cBN (97%) змінюється на 1,9–2,7%, у той час як у процесі обробки пластин з композитів групи BL (55 об.% cBN) видаляється 8,1–9,3% їх вихідної маси. Порівняльний аналіз показує, що із зменшенням
об'ємного вмісту cBN з 97% до 55% в композитах маса видаленого матеріалу збільшується в 3,3–4,7 разів. Діаграма продуктивності алмазної обробки вільним абразивом (порошок алмазу ACM 20/14) композитів з різним вмістом cBN представлена на рис. 5.6



Рисунок 5.6 – Продуктивність алмазної обробки вільним абразивом (ACM 20/14) композитів з різним вмістом *c*BN

Отримані результати свідчать про те, що продуктивність обробки композитів групи BL на прикладі матеріалів cBN-TiC (55–45 об.%) та cBN-TiN (55–45 об.%) в 4,0–4,6 рази вище у порівнянні із композитами з високим вмістом cBN (95–97 об.% cBN). Із зменшенням вмісту cBN в композитах групи BH до 90% різниця в продуктивності обробки у порівнянні з композитами групи BL (55 об.% cBN) зменшується до 2,9–3,3 рази. Таким чином, зменшення вмісту cBN в композитах інструментального призначення на 7% призводить до збільшення продуктивності процесу обробки в 1,3 рази.

Переважна частина технологічного процесу механічної обробки пласких поверхонь різальних пластин із ПКНБ проводиться із застосуванням алмазної обробки методом вільного абразиву. Застосування методу шліфування зв'язаним абразивом може призвести до утворення суттєвих дефектів (сколів) на оброблюваних поверхнях або до руйнування заготовок пластин. При обробці вільним абразивом видалення матеріалу проводиться в результаті впливу на оброблювану поверхню зерен, шаржованих в поверхню притиру, або які тимчасово в ньому закріпилися, а також внаслідок перекочування інших зерен між оброблюваною заготовкою та притиром.

Завдяки розвинутій поверхні та наявності великої кількості різальних «кромок» доцільно використовувати алмазні порошки марок AC4, AC6, AC15, що дозволяє проводити високоефективну обробку заготовок із ПКНБ без утворення суттєвих дефектів на оброблених поверхнях пластин.

Обробка алмазними порошками здійснює суттєво різний вплив на якість поверхонь полікристалів на основі КНБ в залежності від їх складу.

При чорновій обробці із застосування порошки алмазу AC6 160/125 якість обробленої поверхні пластин з композитів cBN-TiC (55–45 об.%), cBN-TiCN-A1 (90–7–3 об.%), cBN-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (97–3 об.%) суттєво відрізняється. Із зменшенням вмісту cBN до 55% спостерігається збільшення висоти мікронерівностей в 1,5 рази. Із зменшенням зернистості порошків алмазу до 80/63 така тенденція до різниці значень параметру *Ra* зберігається (рис. 5.7).

Аналіз отриманих результатів, наведених рис. 5.8, а, показує, що висота мікронерівностей (параметр Rz) на оброблених поверхнях інструментів із зменшенням в композиті вмісту cBN суттєво збільшується. Особливо ця різниця спостерігається при чорновій обробці порошками великої зернистості. Крім того, на поверхні заготовок з композиту cBN-TiC (55-45 об.%) спостерігається утворення великої кількості глибоких подряпин, вм'ятин та кратерів різних за формою та розмірами (рис. 5.8, б). що говорить нерівномірність обробки поверхні, пов'язаний із неоднорідністю алмазного порошку. Подальша чистова обробка поверхонь різальних пластин проводилась із застосування алмазних мікропорошків АСМ зернистістю 40/28, 20/14, 14/10, 7/5, 2/1. Як видно із графіка на рис. 5.9, а при обробці мікропорошками спостерігається зменшення впливу складу композитів на висоту мікронерівностей поверхонь оброблюваних пластин. Проте використання порошку алмазу ACM 14/10 при обробці пластин групи BL (cBN-TiC (55-45 об.%)) не дозволяє досягти необхідної якості поверхні. Величина параметру

*Ra* при цьому складає 0,21 мкм. У той час, як при обробці пластин групи ВН (понад 90%) *c*BN за однакових умов досягається значення *Ra* 0,16, тобто в 1,3 рази нижча.



Рисунок 5.7 – Залежність шорсткості обробленої поверхні композитів на основі cBN від зернистості порошку алмазу AC6 при шліфуванні вільним абразивом: 1 – cBN-TiC (55–45 об.%), 2 – cBN-TiCN-Al (90–7–3 об.%), 3 – cBN-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (97–3 об.%)



Рисунок 5.8 – Залежність параметра Rz шорсткості обробленої поверхні пластин з композитів на основі cBN від зернистості порошків алмазу AC6 при шліфуванні вільним абразивом:

*1* – cBN-TiC (55–45 об.%), *2* – cBN-TiCN-Al (90–7–3 об.%), *3* – cBN-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (97–3 об.%) (*a*); вигляд поверхні пластини з композиту cBN-TiC (55–45 об.%) після обробки порошком алмазу AC6 160/125 (×100) (*б*)



Рисунок 5.9 – Залежність параметра *Ra* шорсткості обробленої поверхні пластин з композитів на основі PcBN від зернистості алмазних мікропорошків: *1 – c*BN-TiC (55–45 об.%), *2 – c*BN-TiCN-Al (90–7–3 об.%), *3 –* cBN-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (97–3 об.%) (*a*); вигляд поверхні пластини з композиту *c*BN-TiC (55–45 об.%) після обробки мікропорошком алмазу (×100) (б)

Подальша фінішна обробка пластин із використанням алмазного мікропорошку ACM 2/1 дозволило отримати наступні значення параметра *Ra* оброблених поверхонь різальних пластин із PcBN: *c*BN-TiC (55–45 об.%) – 0,05 мкм, *c*BN-TiCN-A1 (90–7–3 об.%) – 0,04 мкм, *c*BN-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (97–3 об.%) – 0,03 мкм. На зображенні поверхні (рис. 5.9,  $\delta$ ) після додаткової фінішної обробки алмазним мікропорошком ACM 2/1 можна відмітити відсутність дефектів у вигляді виривів та кратерів, а також шліфувальних міток. Це дає змогу використовувати такі пластини у різальному інструменті при лезовій обробці із малими перетинами зрізу.

Застосування виготовлених пластин із вищенаведеною якістю поверхонь в процесах лезової обробки високотвердих сталей (55–64 HRC) дозволяє стабільно отримувати оброблену поверхню із шорсткістю *Ra* 0,23–0,32 та, у переважній більшості випадків, відмовитись від процесу шліфування.

# 5.3. Топографія робочих поверхонь різальних пластин із ПКНБ групи ВН після додаткового фінішної обробки

Додаткова фінішна обробка зразків різальних пластин із ПКНБ групи ВН проводилася шляхом полірування робочих поверхонь по передній та задній площині алмазним порошком ACM 2/1. Вимірювання проводилося в точка відмічених на рис. 5.10.

В результаті проведених досліджень були отримані розподіли мікронерівностей і механічних напружень в контрольних точках (майданчик 13×13 мкм) по поверхні зразка.



Рисунок 5.10 – Зовнішній вигляд зразка з полірованої (зліва), неполірованої (справа) та бокової поверхні (по центру) із розподілом точок сканування за зразком

Розподіл мікронеровностей по поверхні дозволило встановити середньоарифметичне (*Ra*) і середньостатистичне (*Rq*) значення мікронерівностей поверхонь зразків.

Також за розподілом латеральних сил уздовж поверхні зразка, які опосередковано (в умовних одиницях), дозволяють встановити розподіл сил тертя о. Результати топографічних досліджень для неполірованого зразка пластини із ПКНБ приведені на рис. 5.11 та в табл. 5.2, а для полірованого – на рис. 5.12 та в табл. 5.3











точка 2

















Рисунок 5.11 – Результати сканування профілю неполірованої пластини; *а* – тривимірне зображення поверхні ділянки (13×13 мкм); *б* – карта розподілу латеральних сил (сил тертя); *в* – профіль досліджуваної поверхні уздовж головної діагоналі досліджуваної ділянки

Таблиця 5.2

№ точки вимірювань	<i>Ra</i> , нм	<i>Rq</i> , нм	σ, ум. одиниці
1	388	509	1200
2	275	336	5550
3*	65	77	5720
4	326	396	8800
5	393	460	9100

Значення топографічних параметрів неполірованої поверхні пластин із ПКНБ

\*Результати досліджень приведені в точці 3, не розглядаємо так, як вони суттєво відрізняються від середніх значень



























Рисунок 5.12– Результати сканування профілю полірованої пластини: *а* – тривимірне зображення поверхні ділянки (13×13 мкм); *б* – карта розподілу латеральних сил (сил тертя); *в* – профіль досліджуваної поверхні уздовж головної діагоналі досліджуваної ділянки

Таблиця	5.3	3
---------	-----	---

№ точки вимірювань	<i>Ra</i> , нм	<i>Rq</i> , нм	σ, ум. одиниці
Точка № 1	255	294	2000
Точка № 2	232	257	2880
Точка № 3	210	243	2000
Точка № 4	209	254	5500
Точка № 5	317	367	2160
Точка № 6	264	367	4100

Значення топографічних параметрів неполірованої поверхні пластин із ПКНБ

Також було проведено дослідження топографії по задній поверхні полірованих різальних пластин, результати приведено на рис. 5.13 та табл. 5.4.



точка 1







точка 2











точка 4

Рисунок 5.13 – Топографічні дослідження різальної пластини по задній поверхні: *а* – тривимірне зображення поверхні ділянки (13×13 мкм); *б* – карта розподілу латеральних сил (сил тертя); *в* – профіль досліджуваної поверхні уздовж головної діагоналі досліджуваної ділянки

Таблиця 5.4

№ точки вимірювань	<i>Ra</i> , нм	<i>Rq</i> , нм	σ, ум. одиниці
1	41	62	2100
2	141	162	9200
3	80	95	8500
4	75	94	250

Топографічні параметри різальної пластини із ПКНБ по задній поверхні

Аналізуючи наявні дані можна відмітити, що як для неполірованих так і для полірованих зразків різальних пластин із ПКНБ групи ВН, характерні зони з різною шорсткістю та виглядом мікронерівностей і, відповідно, з різним ступенем розподілу сили тертя. Встановлено, що середньоарифметичне значення мікронерівностей для полірованої основи, лежить в діапазоні Ra = 209-317 нм; середньостатистичне – Rq = 243-367 нм. Розподіл умовних сил тертя по поверхні зразків знаходиться в діапазоні 2000–5500 ум. од. (полірована основа), 1200–9100 ум. од. (неполірована основа).

Аналізуючи тривимірні зображення поверхні різальної пластини після стандартної обробки шліфуванням алмазним порошком ACM 28/20 на поверхні можна відмітити наявність окремих виривів матеріалу, шліфувальних рисок, вм'ятин та кратерів різних за формою та розмірами. В точках № 1 та № 2 топографія поверхні представлена гостровершинними шліфувальними рисками, що говорить нерівномірність обробки поверхні, пов'язаний із неоднорідністю абразиву в шліфувального інструменті. Наявність таких дефектів не має суттєвого впливу на розподіл сили тертя по поверхні інструменту, що пов'язано із незначними розмірами дефектів.

В точках 4 та 5 дефекти поверхні мають дещо інший вигляд, а саме вигляд кратерів із гладкою поверхнею та плавними переходами, наявність такого характеру дефектів пов'язана із дією температур в зоні контакту оброблюваної поверхні та інструменту. Такого вигляду дефекти маю значну площу та значно впливають на розподіл сили тертя по поверхні інструменту.

При експлуатації інструменту, особливо на високих швидкостях різання, наявність таких дефектів на робочих поверхнях може суттєво впливати на стійкість інструменту оскільки на таких локальних ділянках можуть локалізуватися напруження достатні для зародження мікротріщин та інших мікродефектів, що сприяють зародженню осередків руйнування інструменту.

Топографія поверхні полірованого інструменту має інший вигляд, в основному вона представлена залишками шліфувальних рисок, в точках №№ 1, 2 та 3 поверхня позбавлена гострих піків, а шліфувальні риски мають вигляд незначних заглиблень із плавними переходами. В точці 4 вдалося отримати найбільш якісну поверхню. Наявність дефектів у вигляді кратерів після додаткового полірування повністю відсутні.

Додаткове полірування поверхні дозволяє покращити розподіл сили тертя по поверхні зразку. На рис. 5.12 майже відсутні яскраві світлі зони, які свідчать про підвищений опір тертю.

Додаткова фінішна обробка інструменту по задній поверхні дозволила суттєво знизити шорсткість поверхні але не дефектність поверхневого шару (див. рис. 5.13).

Топографія поверхні в основному представлена кратерами великою глибини із суттєвим впливом на розподіл сили тертя. Можливими поясненням такого характеру зміни топографії по задній поверхні є недосконала технологія полірування по задній поверхні, особливо для радіусних пластин.

## 5.4. Визначення зносу та часу настання відмови інструментів із ПНТМ на основі КНБ методом хемографії

Дефекти, що зустрічаються в інструментах із ПНТМ на основі КНБ, умовно поділяють на дві великі групи [27]:

дефекти викликані стороннім включенням; кільцевими порами;
поодинокими порами; наявністю сторонніх домішок; різною
зернистістю матеріалу;

 дефекти механічної обробки: поздовжні та поперечні тріщини; сколи торця пластин; незадовільна обробка поверхні; корозійні плями.

Знос різальних пластин із ПНТМ на основі КНБ відбувається по передній та задній поверхні, вихід з ладу може бути як внаслідок зносу при інтенсивних високотемпературних контактних деформаціях (що веде до прояву поступової відмови), так і в результаті критичного розростання початкових дефектів структури, закладених на етапі виробництва різальних пластини.

Хемографія [99,100]: дозволила виявити зони, що мають найбільші навантаження в процесі різання (це зони 1–4), а також наявність магістральної тріщини, (зона 5) (рис. 5.14). Проведення досить тривалої

експозиції (120 хв) дозволило за допомогою хемографічних досліджень виявити відповідні дослідження (зона 6).



Рисунок 5.14 – Зони прояву пошкоджень на передній та задній поверхнях різального інструменту

На зразках із ПНТМ на основі КНБ за T = 20 °C були зафіксовані дефекти розмірами, що перевищують 100 мкм. При цьому дефекти менше 50 мкм не можна однозначно ідентифікувати. Підвищення температури до 80 °C дозволило фіксувати дрібні дефекти на рівні 30–80 мкм, що дає можливість визначати мікротріщини, що розвиваються.

Хемографія дозволила виявити на зразках чітко виражені контури шириною 0,4–0,9 мм (рис. 5.15, *a*), які відрізняються від наявності дефектів, що визначаються візуально на кромках і вершинах різальних елементів.

У той же час встановлено, що зі збільшенням часу обробки даною пластиною змінюється і хемографічна картина: межі стають ширшими (понад 1,5 мм). Непрацююча вершина має менше засвітлення (рис. 5.15, *б*), у той час як вершина, яка мала навантаження під час процесу різання є активнішою – більш темною. Ці особливості безпосередньо залежать від умов різання, які визначають хемографічну активність поверхні.

Хемографічна картина досліджуваної поверхні змінюватиметься зі зростанням та накопиченням критичних ушкоджень. Так, якщо в початковий момент часу, максимальна контрастність зображення спостерігається тільки на торцях (у місцях, де сходяться площини), то в процесі експлуатації індекс *І*<sub>с</sub>зростає на тих поверхнях, де дія факторів процесу була максимальною.



Рисунок 5.15 – Хемографічне зображення нової пластин із ПКНБ

При цьому локальні світлі точки на темних полях (див. рис. 5.15), що відображають наявність граней зразка, що досліджується, можуть бути пояснені тим, що в цих зонах поверхня практично не проявляє активність.

Отримавши хемографічне зображення зношеного зразка і порівнявши її з тою, яка є еталонною, можливо оцінити початковий стан цього матеріалу, і спрогнозувати період експлуатації інструменту. При цьому критерієм наявних дефектів та недосконалості структури може бути зміна індексу чорноти, максимальне значення якого свідчить про мінімум структурних порушень та внутрішніх дефектів.

Для рівняння:

$$P(t) = \left[ 0.5 + \Phi \left( \frac{d_{cmax} - d_c - \gamma_c t}{\sqrt{\sigma_{dc}^2 + \sigma_{\gamma c} t^2}} \right) \right] \left\{ 1 - \left[ 0.5 - \Phi \left( \frac{D_{kmax} - D_k - \gamma_{Dk} t}{\sqrt{\sigma_{Dk}^2 + \sigma_{\gamma Dk}^2 t^2}} \right) \right] \left[ 1 - e^{-\lambda_D t} \right] \right\} e^{-\lambda_D t} P^z$$

[99] з параметрами, що визначають пошкоджуваність різального інструменту, хемографія дозволяє встановити λ-потік відмов внаслідок

руйнування поверхневого шару зразка ПНТМ і виходу інструменту з ладу, тоді як інші параметри  $Y_C$ ,  $Y_D$ ,  $\sigma_C$ ,  $\sigma_D$  можуть бути визначені метрологічними вимірами (розсіюванням розмірів геометричних параметрів, швидкістю зносу по передній та задній поверхнях).

При цьому було встановлено, що зона із найбільшою щільністю хемографічного затемнення на контактних поверхнях різального інструменту є зоною потенційного критичного пошкодження.

Взявши до уваги хемографічні картини початкового стану пластини та після 60 хв точіння в різних умовах різання, була отримана закономірність прогнозованого часу до настання раптової відмови інструменту із ПНТМ на основі КНБ (рис. 5.16).



Рисунок 5.16 – Прогнозований час відмови *T*<sub>av</sub> в залежності від зміни площі затемнення зразка

Аналіз графіку показує, що в процесі роботи інструментів із ПКНБ стійкість інструменту є найнижчою, якщо на контактних ділянках інструменту графічні зображення будуть мати найбільшу площу та найвищий ступінь затемнення.

Проведені хемографічні дослідження дозволять визначити контактні зони на різальних елементах з ПНТМ, стан яких обумовлює низьку стійкість інструменту ще на етапі його виготовлення.

#### 5.5. Вібро-магнітно-абразивна обробка різальних пластин із ПКНБ

## 5.5.1. Вплив на продуктивність процесу ВіМАО зернистості феромагнітного порошку

В якості середовища, у якому здійснюється формоутворення виробів при вібро-магнітно-абразивній обробці неможливе використання тільки традиційних абразивних матеріалів, так як вони повинні володіти не тільки різальною здатністю, а й високими магнітними властивостями.

Основною властивістю магнітно-абразивних порошків є міцність з'єднання феромагнітної і абразивної складових. Останнє істотно впливає на стійкість зерен порошку при впливі механічних навантажень. Важливе значення має також мікротвердість, форма частинок, технологічність у виготовленні і вартість магнітно-абразивного порошку. Таким чином, в якості різальних елементів при МАО використовуються порошки феросплавів, заліза, керметів та інших речовин, з додаванням штучних алмазів, які підбираються залежно від матеріалу оброблюваних виробів, стану його поверхні і вихідної шорсткості.

Вихідна магнітно-абразивна суміш при увімкненому магнітному полі установки утримується магнітними силами, обумовленими величиною магнітного поля в робочому просторі. Зразки різальних пластин із ПКНБ при накладанні вібрацій орієнтуються в просторі робочої зони за принципом найменшого опору переміщенню, та при здійсненні поступальних рухів проходять через ущільнений магнітно-абразивний шар здійснюючи обробку поверхонь. Не зв'язані між собою зерна порошку переміщаються усередині робочої камери.

Відповідно до функціонального призначення магнітне поле формує з порошкової феромагнітної абразивної маси різальний інструмент з керованою жорсткістю. Кожна поверхня зразків із ПКНБ, що оброблюється, знаходиться у контакті із магнітно-абразивним шаром. На поверхню оброблюваних пластин діє сила різання P та сила тертя  $F_{mp}$  (рис. 5.17). Магнітно-абразивне середовище під дією сил магнітного поля ущільнюється і створює стовпчики з феромагнітного порошку та штучних алмазів, через які відбувається рух пластин із ПКНБ.



Рисунок 5.17 – Схема обробки пластин різальних пластин із ПКНБ магнітноабразивною сумішшю в реальних умовах: де *L* – лінії дії магнітного поля; *F<sub>m</sub>* – сила тяжіння; *F<sub>mp</sub>* – сила тертя; *F<sub>e</sub>* – вібраційна сила; *F<sub>mc</sub>* – магнітна сила або сила прижимання зразка

Процес вібро-магнітно-абразивної обробки — це той процес, в якому матеріал видаляється таким чином, що обробка поверхні і видалення матеріалу виконується одночасно з доданням вібрації та магнітним полем в зоні обробки. Знання сил, що діють під час ВіМАО, важливо для розуміння механізму видалення матеріалу. Сили безпосередньо впливають на формування готової поверхні і точність обробки. Згідно зі схемою сила різання представляє собою суму всіх сил, які впливають на зразок [110]:

$$Pz = Fm + Fmp + Fe + Fmc$$

Для частинки у формі еліпсоїда величину магнітної сили можна визначити за формулою:

$$F_m = \frac{4}{3} \sum_{l=1}^{n} \frac{\mu \Delta_i^2 b_i K H_i^2}{R_i + \Delta_i}$$

де К – магнітна індукція магнітного порошку;

μ – магнітна проникність порошку;

 $R_i$  – відстань від початку і-тої частинки до основи оброблюваної поверхні;

 $\Delta_i, b_i$  – розміри малої та великої осі еліпсоїда, описуваної частки.

Сила магнітної індукції:

$$F = I \times B \times L \times \sin\alpha;$$

де *I* – сила струму;

*В* – модуль вектора індукції;

*L* – довжина ділянки провідника;

α – кут між напрямком струму і вектором індукції.

У випадку перевищення сили різання, внаслідок затуплення різальних кромок зерен або зустрічі зерна із перешкодою у вигляді висотних мікронерівностей, над магнітною силою, яка утримує магнітно-абразивні зерна в певному положенні відносно оброблюваної поверхні, відбувається переорієнтація зерна в просторі робочого середовища, внаслідок чого в контакт із оброблюваною поверхнею вступають нові різальні кромки. Саме такою переорієнтацією в просторі робочого середовища можна пояснити переривчастий характер рисок – слідів абразивної взаємодії абразивних зерен із оброблюваною поверхнею.

Безперервний вступ до роботи нових різальних кромок абразивного порошку через переорієнтацію зерен усередині робочої камери, їх поворотів і переходів з однієї площини в іншу в робочій суміші створює умови безперервної обробки. В процесі ВіМАО відбувається поступовий знос зерен шляхом відривання з м'якшої феромагнітної основи зерен алмазу, затуплення різальних кромок алмазних зерен або шляхом стирання самого феромагнітного порошку. Особливістю процесу ВіМАО є наявність різких змін продуктивності процесу при зміні зернистості робочого середовища. Своєрідний різальне середовище, сформоване магнітним полем із магнітно-абразивного порошку, відрізняється підвищеною еластичністю. Глибина вдавлювання кожного зерна в оброблювану поверхню (а, значить, і об'єм матеріалу, що знімається в процесі обробки) є результатом сталої, у кожному окремому випадку, рівноваги між силами, що притискують зерно до оброблюваної поверхні, і силами опору матеріалу оброблюваної поверхні впровадженню зерна.

Як показано в [111], що саме зернистість порошку феромагнітного порошку 400/315 являється оптимальною з точки зору швидкості переміщення в робочому шарі. При МАО основну роль в інтенсивності знімання матеріалу відіграє саме зернистість порошку, але за рахунок вібрації саме вібраційна складова стала вирішальною при виборі досить продуктивного та більш дешевого матеріалу. Враховуючи, що при ВіМАО окрім магнітної складової оброки є ще вібраційна складова – доцільно використовувати саме порошки зернистістю 400/315, які дозволяють забезпечити оптимальну швидкість переміщення в робочій зоні. Саме тому ФЕРОМАП 400/315 мкм був використаній у подальших дослідженнях.

В процесі ВіМАО при взаємодії полюсів магнітного індуктора із електропровідними порошками та при переміщеннях зразків усередині робочого середовища, відносно стовпчиків абразиву, в них можуть виникати електричний струм. Причиною появи індукційного струму можуть служити також періодичні зміни щільності магнітного потоку в робочому просторі, якщо індуктор створює магнітне поле [112].

Індукційні струми впливають на величину і розподіл магнітного поля в робочому зазорі, оскільки вони завжди направлені так, щоб своїм власним магнітним полем перешкоджати зміні зовнішнього магнітного поля, що їх породжує.

#### 5.5.2. Вплив кількість деталей в партії на інтенсивність обробки при ВіМАО

Важливе значення для визначення ефективності вібраційних методів обробки має розмір партій деталей, що оброблюються одночасно.

Враховуючи чат, потрібний для обробки, невеликі партії деталей знижують завантаження устаткування, вони погіршують такі показники роботи, як продуктивність праці, собівартість продукції. Великі партії деталей дозволяють налагодити ритмічність виробництва, підвищити завантаження обладнання, скоротити час на його переналагодження, підвищити продуктивність праці, але не завжди поліпшити якість. Тому треба запускати у виробництво не мінімальний і не максимальний розміри партій деталей, а їх оптимальну кількість. Тільки така партія дозволить установці BiMAO знизити поточні виробничі витрати, підвищити продуктивність праці і одночасно поліпшити якість обробки.

При цьому, треба врахувати специфіку BiMAO, а саме: обсяг робочої камери, кількість абразиву, громіздкість і матеріаломісткість абразивного міксу, рівнь навантаження на устаткування.

Важливим фактором, що впливає на оптимальну кількість деталей в партії, а, отже, на підвищення ефективності виробництва, є обсяг робочої камери. Можна зробити висновок, що чим менше обсяг робочої камери, тим менше повинен бути розмір партії деталей, що запускається у виробництво, так як велика партія в маленькому контейнері не зможе оброблятися через дефіцит робочого простору і значно збільшує тривалість виробничого циклу.

На рис. 5.18 показаний вплив кількості оброблюваних пластин із ПКНБ (діаметр 7 мм, товщина 3,18 мм) на продуктивність ВіМАО. Аналіз графіка говорить про те, що оптимальна кількість деталей складає 8–10 пластин. Менша кількість знизить продуктивність, а більша кількість знижує інтенсивність обробки за рахунок того, що збільшується щільність робочого простору та зменшується швидкість переміщення оброблюваних зразків.



Рисунок 5.18 – Залежність продуктивності обробки при ВіМАО від кількості одночасно оброблюваних деталей (час обробки 40 хв).

#### 5.5.3. Вибір робочого середовища при ВіМАО

Особливістю абразивних матеріалів на основі алмазу є висока твердість, що визначає їхню різальну здатність.

Дослідження показали, що найбільшою продуктивністю при ВіМАО характеризуються порошок алмазу АСМ 28/20 (рис. 5.19). Це пояснюється здатністю частинок алмаза АСМ підтримувати свою різальну здатність за рахунок постійного мікросколювання контактних ділянок в результаті вібраційного і ударного навантаження в зоні обробки.

Для визначення оптимальної концентрації алмазного порошку в робочій суміші проводилися дослідження при концентрації 5, 10, 15% та подальшою оцінкою величина знімання матеріалу, час обробки становив 40 хв.

З порівняння результатів, наведених на рис. 5.20, видно, що продуктивність обробки при ВіМАО з використанням порошку алмазу АСМ 28/20 вище, ніж алмазу АС6. Цей результат обумовлений відмінністю механічних властивостей різних частинок алмазу.



Рисунок 5.19 – Кількість знімання матеріалу в залежності від марки та зернистості алмазного порошку, час обробки 40 хв, концентрація 15%



Рисунок 5.20 – Вплив концентрації порошку алмазу в робочому середовищі на величину знімання матеріалу (1 – ACM 28/20; 2 – AC6 63/50)

Величина знімання матеріалу при концентрації порошку алмазу ACM 28/20 15% обумовлює інтенсифікацію знімання зі зразка ПКНБ. Подальше збільшення концентрації не доцільне оскільки залишок порошку не бере участі в обробці, а осідає на дні робочої камери, при цьому суттєво збільшується вартість обробки.

Для одночасної обробки зразків типу пластин і циліндрів доцільно використовувати суспензії з порошками алмазу АСМ і АС6 в концентрації 10%.

## 5.5.4. Зміна мікрорельєфу робочих поверхонь різальних пластин із ПКНБ при обробці методом ВіМАО

З врахуванням того, що композити із ПКНБ групи ВL характеризуються нижчими показниками твердості та в'язкості руйнування, можна припустити, що при обробці методом ВіМАО різальні пластини із них вони будуть піддаватися обробці більш інтенсивно, ніж різальні пластини із композитів групи ВН. Дана пропозиція підтверджується результатами досліджень, які показали, що обробка методом ВіМАО різальних пластин із композитів із ПКНБ групи ВН недоцільна в зв'язку із низькою продуктивністю процесу та слабким впливом на шорсткість та радіус заокруглення виготовлених різальних пластин. Крім того слід зазначити, що обробка методом ВіМАО різальної кромки пластин – при обробці гострозаточених пластин утворюється фаска з великою кількістю зазубрин (рис. 5.21), що негативно впливає на якість обробленої поверхні та стійкість інструменту.

В зв'язку з чим подальшу обробку методом BiMAO проводили лише для різальних пластин із композитів із ПКНБ групи BL.

Аналіз профілограм розподілу мікронерівностей дозволив встановити середньоарифметичне (Ra) та середньостатистичне (Rq) значення відхилення ординат профілю мікронерівностей на поверхні зразків від середньої лінії, а також максимальну висоту нерівностей профілю ( $R_{max}$ ). Різальні пластини із ПКНБ після фінішного обробки шліфуванням мають шорсткість поверхонь Ra 0,25, профілограма представлена на рис. 5.22.

Як видно із 3*D* зображення та профілограми (див. рис. 5.22, 5.33), поверхня різального інструменту після чистової обробки шліфуванням, має шорсткість (*Ra* 0,25). Слід також відмітити, що на поверхні відсутні різкі переходи між впадинами та виступами (див. рис. 5.23), ступінь розвитку поверхні вказує, що на поверхні переважають виступи. Умовна площа ( $S_{\pi}$ ) ділянки, що досліджувалась, близька до номінальної, це свідчить про те, що поверхня достатньо гладка та не має аномальних дефектів.



Рисунок 5.21 – Різальні кромки пластин із композитів ПКНБ після обробки ВіМАО 60 хв; *а* – до обробки; *б* – після обробки; ×100



Рисунок 5.22 – Профілограма поверхні різальної пластини із ПКНБ після фінішного шліфування (*Ra* 0,25)



Рисунок 5.23 – 3D зображення ділянки інструменту із ПКНБ після фінішного шліфування

В перші 40 хв відбувається найбільш інтенсивна обробка поверхонь різальних композитів при ВіМАО, що приводить до зміни шорсткості обробленої поверхні рис. 5,24, 5.25. Параметри шорсткості обробленої поверхні представлені в табл. 5.5.



Рисунок 5.24 – Фрагмент профілограми профілю ділянки інструменту після 40 хв обробки методом ВіМАО



Рисунок 5.25 – 3D зображення ділянки інструменту із ПКНБ після 40 хв обробки методом ВіМАО

Таблиця 5.5

Значення топографічних параметрів поверхні інструменту із ПКНБ після 40 хв обробки методом ВіМАО

<i>Ra</i> , мкм	<i>Rq</i> , мкм	<i>Rz</i> , мкм
0,225	0,303	0,945

Аналіз отриманих результатів показує, що найбільш інтенсивно процес ВіМАО впливає на вершини мікронерівностей, зменшуючи їх висотні параметри. Параметри шорсткості оброблених поверхонь різальних композитів із ПКНБ після 120 хв обробки методом ВіМАО представлені в табл. 5.6, та рис. 5.26, 5.27.

Таблиця 5.6

Значення топографічних параметрів поверхні інструменту із ПКНБ після 120 хв обробки методом ВіМАО

<i>Ra</i> , мкм	<i>Rq</i> , мкм	<i>Rz</i> , мкм	
0,204	0,253	0,862	



Рисунок 5.26 – Фрагмент профілограми профілю ділянки інструменту після 120 хв обробки методом ВіМАО



Рисунок 5.27 – 3D зображення ділянки інструменту із ПКНБ після 120 хв обробки методом ВіМАО

Слід відмітити, що обробка методом ВіМАО на протязі 120 хв характеризується зменшенням шорсткості оброблених поверхонь різальних пластин із ПКНБ, а також врівноваження значень між висотою виступів та глибиною впадин мікронерівностей на обробленій поверхні. Проте на поверхні наявність окремих дефектів у вигляді борозд, наявність яких пов'язана із фінішнім шліфуванням алмазними порошками різної зернистості, вплив ВіМАО на обробку таких дефектів мінімальний.

Обробка на протязі 120 хв, дає можливість отримати поверхню з максимально плавними переходами між висотами та впадинами та з мінімальною кількістю дефектних зон з підвищеним ступенем опору тертю. Подальша обробка на протязі 180 та 360 хв несуттєво впливає на шорсткість обробленої поверхні (табл. 5.7, рис. 5.28, 5.29).

Таблиця 5.7

Значення топографічних параметрів поверхні інструменту із ПКНБ після 180 та 360 хв обробки методом ВіМАО

Т, хв	<i>Ra</i> , мкм	Rq, мкм	<i>Rz</i> , мкм
180	0,197	0,253	0,924
360	0,195	0,232	0,829



Рисунок 5.28 – 3*D* зображення ділянки інструменту із ПКНБ після 180 (*a*) та 360 (*б*) хв обробки методом ВіМАО



Рисунок 5.29 – Фрагмент профілограми профілю ділянки інструменту після 180 хв (*a*) та 360 хв (б) обробки методом BiMAO

Аналіз отриманих результатів показує, що подальша обробка майже не впливає на шорсткість поверхні, що пов'язано із руйнуванням зерен абразиву в суміші та зменшенням його різальної здатності. Для досягнення більш інтенсивної зміни шорсткості поверхні пластин доцільно поновлювати робочу абразивну суміш кожні 120 хв. Можна відмітити незначну зміну топографії поверхні в порівнянні із попередніми режимами обробки (рис. 5.30).



Рисунок 5.30 – Залежність шорсткості поверхні пластин із ПКНБ від часу обробки методом ВіМАО

При віброабразивній обробці пластичних матеріалів таких як сталь та інших матеріалів мікрорельєф формується внаслідок процесу пластичної деформації, також мікрорізання-царапання. В роботі [113] описано механізм зміни мікрорельєфу поверхні при віброабразивній обробці твердого сплаву, основним механізмом формування мікрорельєфу являється крихке руйнування. При взаємодії абразивного середовища, шорсткість обробленої поверхні зменшується, видалення матеріалу відбувається шляхом вибивання окремих карбідних зерен та в меншій мірі шляхом часткового руйнування найбільш великих зерен.

Що стосується механізму формування рельєфу для таких мало пластичних матеріалів як різальних композитів із ПКНБ, то найбільш можливим механізмом видалення матеріалу являється втомне руйнування.

В результаті ВіМАО шорсткість шліфованої поверхні різальних композитів із ПКНБ зменшується, форма рельєфу відповідає втомному руйнування, що призводить до видалення окремих частинок зерен КНБ, а також загладжуванню окремих борозенок залишених в процесі шліфування (рис. 5.31).



Рисунок 5.31 – Зображення передньої поверхні різальних композитів із ПКНБ групи BL до обробки (*a*) та після обробки методом BiMAO на протязі 360 хв (б) ×100

Механізм втомного руйнування при ВіМАО протікає під дією знакоперемінних і циклічних навантажень, які сприймаються локальними ділянками оброблюваної поверхні при взаємодії із абразивним середовищем.

Втомний механізм руйнування при ВіМАО можна розділити на два етапи:

 на першому етапі відбувається поступове накопичення дефектів в поверхневому шарі пластин, на даному етапі видимого руйнування матеріалу не відбувається;

 – на другому етапі, коли матеріал оброблюваної поверхні досягає певної концентрації мікропошкоджень, відбувається швидке руйнування у вигляді частинок зносу.

При віброабразивній обробці різальних інструментів із різних матеріалів ефект округлення кромок добре відомий [113, 114]. Округлення кромок для різальних композитів із ПКНБ, особливо групи BL, являється основним фактором для підвищення стійкості при високошвидкісній обробці, а також обробці з ударом.

При BiMAO найбільш інтенсивно обробці піддаються саме вершини різальних кромок композитів, що пов'язано із їх меншою геометричною міцністю, крім того частота мікроударів абразиву по кромці вища чим по плоских поверхнях.

При обробці методом BiMAO можна отримати радіусну кромку від 10 до 50 мкм, велична радіусу якої буде залежати від вихідної шорсткості поверхонь, часу обробки та типу абразивного середовища.

Для визначення радіусу заокруглення різальної кромки композитів із ПКНБ після обробки методом ВіМАО пластини вдавлювалися в пластичні матеріали типу алюмінієвого чи мідного дроту з подальшим аналізом відбитку на оптичному мікроскопі (рис. 5.32.). Зовнішній вигляд кромок різальної пластини наведений на рис. 5.33.



Рисунок 5.32 – Форма відбитку різальної кромки композиту із ПКНБ в алюмінієвому дроті до обробки (*a*) та після оброки методом BiMAO (*б*)



Рисунок 5.33 – Зображення кромки різальних композитів із ПКНБ до обробки (*a*) та після обробки методом ВіМАО 360 хв (*б*)

На основі залежності представленої на рис. 5.34, кінетику заокруглення різальних кромок інструменту можна розділити на три етапи в залежності від часу обробки:

– перший етап (час обробки 0–40 хв) відбувається незначна зміна радіуса заокруглення різальної кромки, так як основним механізмом зняття

оброблюваного матеріалу при ВіМАО є втомне руйнування, для якого характерно наявність певного часу на протязі якого в поверхневому шарі різальної кромки збільшується концентрація дефектів, під дією абразивного середовища, до певного критичного рівня, після чого відбувається видалення матеріалу. 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;

другий етап (час обробки 40–180 хв) на даному етапі відбувається
інтенсивне знімання матеріалу і, як наслідок, збільшення радіусу
заокруглення кромки внаслідок високої концентрації поверхневих дефектів;

– третій етап (час обробки 180–360 хв) етап сталої обробки, на даному етапі радіус заокруглення різальних кромок майже не змінюється, що говорить про те, що процес зняття матеріалу при ВіМАО в даному інтервалі часу не відбувається, це пов'язано із тим, що абразивне середовище не здатне чинити суттєвого ударного навантаження на оброблюванні поверхні внаслідок значного зносу абразивного наповнювача, а також зміцненням поверхневого шару пластин в наслідок обробки. Після фінішної обробки методом ВіМАО різальних інструментів із ПКНБ групи ВL було проведено дослідження різальної кромки методом хемографії. Встановлено, що додаткова фінішна обробка методом ВіМАО дозволяє зменшити енергонавантаженість різальної кромки що відображається зменшенням зони засвітки рис. 5.35.

Для максимального радіуса заокруглення різальної кромки, який ми отримали при фінішній обробці методом BiMAO 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 ніж з інструментами після стандартної фінішної обробки (рис. 5.36).


Рисунок 5.34 – Залежність величини радіусу заокруглення різальної кромки пластин із ПКНБ від часу обробки методом BiMAO



Рис. 5.35 – Хемографічне відображення енергетичного стану різальної кромки інструменту з пластиною RNUN090308 після обробки з використанням порошком алмазу ACM 2/1 (*a*) та BiMAO (*б*)



Рис. 5.36 – Ймовірності руйнування інструментів із ПКНБ групи BL з радіусом заокруглення різальної кромки 30 мкм при точінні сталі ШХ15 (53 HRC) з ударом (v = 215 м/хв, S = 0,1 мм/об, t = 0,2 мм)

### 5.6. Стійкість різальних інструментів із ПКНБ групи ВН та BL

Експерименти полягали у тестуванні різальних інструментів на їх працездатність в умовах точіння з ударом заготовок з загартованих сталей.

Аналіз експериментальних результатів показує, що в діапазоні низьких швидкостей різання (v = 100 м/хв) інструменти з ПКНБ групи BL фактично не працездатні і вже при глибині різання t = 0,2 мм спостерігається викришування фрагментів композиту, яке зі збільшенням глибини різання до 0,4 мм призводить до крихкого руйнування на контактній ділянці інструменту вже на початковому етапі обробки, в перші 20 с від почату різання (рис. 5.37, a– $\epsilon$ ).

Зростання швидкості різання до величини 170 м/хв. Призводить до стабілізації роботи інструментів з новими модифікаціями ПКНБ при невеликому навантаженні (глибина різання до t = 0,2 мм), при цьому для більшої величини глибини різання t = 0,4 мм, як і раніше, спостерігається

руйнування різальної кромки інструменту з втратою його працездатності (рис. 5.35, *ж*–*м*).

У всьому діапазоні зазначених глибин та швидкостей різання інструменти із ПКНБ «борсиніт» зберігають працездатність за наявності окремих ділянок мікровикришування на різальній кромці, яка остається прямолінійнійною. На задній поверхні інструментів спостерігається формування фаски зносу. Експеримент з високошвидкісної обробки показав, що навіть при швидкості 210 м/хв (рис. 5.35, *н–n*) застосування досліджуваних інструментів залишається можливим.









в

г





е





ж









м





n

Рисунок 5.37 – Морфологія поверхні зносу резального інструменту при обробці з ударом (S = 0,1 мм/об):  $a, z, \omega, \kappa, \mu$  – борсінит;  $\delta, d, s, n, o$  – CBN60-TiC3515;  $e, e, i, m, \mu$  – CBN90-TiCN7-A13;  $a - \tau = 540$  c;  $\delta - e, n - \tau = 20$  c;  $z - \tau = 420$  c;  $\omega - \tau = 450$  c;  $s - \tau = 480$  c;  $i, m - \tau = 150$  c;  $\kappa - \tau = 300$  c;  $\mu - n - \tau = 480$  c; a - e - v = 100 м/хв, t = 0,2 мм; z - e - v = 100 м/хв, t = 0,4 мм;  $\omega - i - v = 170$  м/хв, t = 0,2 мм;  $\kappa - m - v = 170$  м/хв, t = 0,4 мм;  $\mu - n - v = 210$  м/хв, t = 0,4 мм

На рис. 5.38 показані робочі ділянки інструментів з пластинами із ПКНБ «борсиніт» та інструментів з пластинами із ПКНБ групи BL з керамічною матрицею, що містить 60% TiC і 5%  $Al_2O_3$ . Для інструментів, оснащених ПКНБ «борсиніт», характерним є більш інтенсивний знос різальної кромки. Такий самий ефект спостерігається і для інструментів із ПКНБ групи BL із вмістом TiC 35%, що в даному випадку пов'язане безпосередньо не з лункоутворенням, а з меншою, у порівнянні з ПКНБ «борсиніт», міцністю композиту. Найменший

знос по задній поверхні при збереженні прямолінійності різальної кромки характерний для композиту з вмістом 90% cBN і 7% TiCN (рис. 5.39).





в

Рисунок 5.38 – Характер зносу різальних інструментів при високошвидкісної обробці з ударом (*v* = 210 м/хв): *a* – борсінит; *б* – CBN60-TiC35-Al5;

в – CBN90-TiCN7-Al3



при *v* = 210 м/хв, *t* = 0,4 мм, *S* = 0,1 мм

Дещо несподіваним є факт низької інтенсивності зносу «борсиніту», що відноситься до ВН типу полікристалів, для яких при високій швидкості різання (більше 150 м/хв) характерним є швидке зростання фаски зносу по задній поверхні інструменту. Наведені результати демонструють, що знос пластин ВН і ВL типів в умовах переривчастого різання має істотні відмінності від закономірностей зносу таких інструментів при різанні з ударом. Це проявляється як у характеристиках зношування «борсиніту», так і в тому факті, що область працездатності ріжучих пластин типу BL знаходиться в зоні високих (більше 120 м/хв) швидкостей різання. Причиною такої закономірності є інтенсивне розміцнення оброблюваного матеріалу при високій швидкості і температурі в зоні контакту і, як наслідок, менші контактні навантаження на інструменті, при яких не спостерігається крихке руйнування полікристалів.

Узагальнення даних, що характеризують умови, за яких спостерігалося руйнування полікристалів КНБ, дозволяє скласти діаграму діапазонів режимів різання в координатах швидкість різання – глибина різання при яких можливе ефективне застосування BL і BH модифікацій ПКНБ (рис. 5.40).



Рис. 5.40 – Діаграма умов ефективного використання полікристалів типу ВН і BL

#### Висновки до розділу 5

1.3 метою оцінки впливу навколишнього середовища на параметри контактної взаємодії інструментів із ПКНБ та оброблюваним матеріалом, проведено дослідження обробки загартованої сталі ШХ 15 (58 HRC) в захисному газовому середовищі, встановлено, що кисень навколишнього середовища не чинить значного впливу на контактну взаємодію інструментів i3 ПКНБ оброблюваним матеріалом 3 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.

2. Встановлено, що продуктивність алмазної обробки вільним абразивом різальних пластин із ПКНБ групи BL у 4,0–4,6 рази вища порівняно із обробкою пластин з композиту групи BH, та показано, що для покращення якості контактних поверхонь інструменту потрібно проводити додаткову фінішну обробку вільним абразивом з використанням порошку алмазу АСМ 2/1.

3. Встановлено, що інструменти, оснащені ПКНБ групи BL 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 ПНТМ з високим вмістом cBN (95–97%), що обумовлено зменшенням теплопровідності матеріалу інструмента та зміною у механізмі зношування.

4. Вдосконалено підхід до фінішної обробки різальних пластин із КНБ, заснованим на вібро-магнітно-абразивному впливі на оброблюваний виріб, 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.

5. Досліджено новий високоефективний метод оцінки працездатності різальних інструментів на основі інтенсивності хемографічного ефекту, що фіксується на поверхні пластин, що дозволило виявити найбільш енергетично навантажені ділянки на поверхні інструментів.

6. Узагальнено дані, що характеризують умови, за яких спостерігалося руйнування інструменту, дозволило скласти діаграму діапазонів режимів різання в координатах «швидкість різання – глибина різання» коли можливе ефективне застосування BL і BH модифікацій ПКНБ.

7. 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.

# РОЗДІЛ 6 ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ІНСТРУМЕНТІВ, ОСНАЩЕНИХ ПКНБ

## 6.1. Рекомендації з лезової обробки загартованих сталей інструментами ПКНБ груп ВН, BL

Різальні інструменти, оснащені керамо-матричними композитами (КМК) на основі кубічного нітриду бору (КНБ) групи BL (вміст cBN 50– 75%), дозволяють проводити високоефективну чистову лезову обробку виробів з Fe-C сплавів високої твердості (56–64 HRC), таких як загартовані леговані сталі, леговані та вибілені чавуни.

Різальні пластини, які виготовлено із композитів в системах cBN-TiN, cBN-TiC із низьким вмістом КНБ (50-55 об.%), дозволяють ефективно проводити чистове точіння загартованих сталей (ХВГ, ШХ15, 30ХГСА, 40Х, У8), чавунів (СЧ 18, ІЧХ 12, ІЧХ 22) твердістю 60-64 НКС при високих швидкостях різання v = 180-270 м/хв. Це дозволяє підвищити продуктивність обробки в 1,5-2,5 рази (з 3600 мм<sup>3</sup>/хв до 9000 мм<sup>3</sup>/хв) у порівнянні із існуючими технологіями обробки інструментом з високим вмістом КНБ. В таких умовах швидкість зношування розроблених інструментальних композитів у 1,5-5,0 разів нижче (в залежності від швидкості різання) у порівнянні із інструментами з високим вмістом КНБ (95–97%, група ВН), що дозволяє забезпечити високу якість обробленої поверхні при точінні протягом довготривалого часу (25-45 хв). При швидкостях різання понад 250 м/хв найбільш перспективне застосування різальних пластин, виготовлених cBN-TiC (55–45 об.%), i3 композитів системи які за інтенсивністю зношування не поступаються світовим аналогам (CBN100, фірми Seco (Швеція)).

При високошвидкісному точінні забезпечується шорсткість обробленої поверхні на рівні *Ra* 0,32–0,63, *Rz* 4–6, що в ряді випадків дозволяє замінити

на етапі чистової обробки операцію шліфування точінням інструментом, оснащеним керамо-матричними композитами (КМК) на основі кубічного нітриду бору.

Використання стандартних різальних пластин, виготовлених із з керамоматричних композитів групи BL, при високошвидкісній обробці забезпечує 8–12 періодів стійкості тривалістю 30–40 хв, що дозволяє виконувати обробку великогабаритних виробів за один прохід без зміни різального інструменту.

Обробку виробів, виготовлених з Fe-C сплавів середньої твердості (48– 55 HRC), можливо проводити інструментом з керамо-матричними композитами із швидкостями різання 300–360 м/хв. При цьому забезпечується стійкість інструменту 25–35 хв.

Різальні інструменти, оснащені керамо-матричними композитами (КМК) на основі кубічного нітриду бору (сВN) групи BL (вміст КНБ 70-75 об.%) за інтенсивністю зношування при чистовому точінні високотвердих (60-64 HRC) залізовуглецевих сплавів із високими швидкостями різання v = 180-270 м/хв поступаються на 25-30% аналогічним композитам із низьким вмістом КНБ (50–55 об.%), проте дозволяють проводити обробку при незначних динамічних навантаженнях на інструмент, що відповідає умовам напівчистового точіння. В таких умовах обробка композитами із низьким вмістом КНБ (50–55 об.%) призводить до швидкого руйнування різальної інструменту шляхом утворення мікровершини та макросколювань інструментального матеріалу. Точіння різальними пластинами із композитів з вмістом КНБ 70–75 об.% може проводитись із підвищеними подачами (S = 0, 2-0,3 мм/об) при високій стійкості інструменту (25–30 хв), що значно розширює сферу застосування КМК групи BL інструментального призначення.

Більшість катастрофічних поломок інструменту, що відбуваються при обробці загартованих сталей, часто пов'язані із абразивним зносом та механічними поломками, що є основними видами відмови інструменту. Ці режим руйнування інструменту викликані механічною та хімічною взаємодією між різальним інструментом та оброблюваним матеріалом під час обробки. Наявність борозенок на різальній кромці інструменту може збільшити концентрацію напружень на різальній кромці роблячи її схильною до катастрофічного руйнування при подальшій обробці.

## 6.2. Дослідно-промислове випробування інструментів при обробці сплавів високої твердості

Різальні інструменти, оснащені змінними багатогранними пластинами з полікристалічних надтвердих матеріалів на основі кубічного нітриду бора (ПКНБ) [27, 116], дозволяють проводити ефективну обробку виробів з загартованих сталей, різних чавунів. При цьому забезпечується шорсткість обробленої поверхні на рівні *Ra* 0,32–0,63 (*Rz* 4–6), що у багатьох випадках дозволяє замінити при чистовій обробці операцію шліфування точінням.

Попередні дослідження стійкості фрез з ПКНБ при фрезеруванні проводили при обробці загартованої сталі ХВГ (62–65 НRС) на універсальнофрезерному верстаті моделі 675ПФ (рис. 6.1). Використовувалася спеціальна торцева фреза (передній кут  $\gamma = -10^{\circ}$ , задній кут  $\alpha = 10^{\circ}$ ), в яку механічним способом закріплювали різальні пластини циліндричної форми з композиту групи ВН «Борсиніт». Для забезпечення рівномірного навантаження на кожен зуб фрези, виготовлено різальні пластини з ПКНБ високої точності: відхилення по діаметру ± 0,01 мм, по товщині ± 0,01 мм відповідно.

При режимах різання v = 86 м/хв,  $S_z = 0,1$ мм/зуб, t = 0,2 мм, стійкість інструменті до зносу по задній поверхні  $h_3 = 0,4$  мм склала 35–40 хв, що дозволяє проводити обробку великогабаритних виробів без зміни різального інструменту. Промислові випробування фрез з ПКНБ проводили в умовах TOB «Ерідон Tex», М. Полтава, ЩО спеціалізується ремонті на великогабаритних ДВЗ. Випробування проводились при фрезеруванні роз'ємних частин блоків циліндрів з сірого чавуну СЧ 21-40 (240 НВ) на фрезерному верстаті Сотес RP 1400 (рис. 6.2).



Рисунок 6.1 – Фрезерування із застосуванням інструменту з ПКНБ



а



б

Рисунок 6.2 – Оброблювана площина блоку циліндрів перед обробкою (*a*) та після фрезерування інструментом з ПКНБ (б)

Обробка відбувалась із інтенсивними ударними навантаженнями на різальні кромки інструменту, як за рахунок кінематики процесу фрезерування, так й особливостей конструкції оброблюваного виробу – наявності великої кількості пазів та отворів.

Використовувалась фреза-летючка (передній кут  $\gamma = -10^{\circ}$ , задній кут  $\alpha = 10^{\circ}$ ), оснащена різальною пластиною RNGN 090400T з ПКНБ «Борсиніт». Порівняння працездатності інструменту проводилось з фрезою, оснащеною різальними пластинами із твердого сплаву (TC) ВК8 з покриттям ТіN та ПКНБ виробництва КНР.

Результати випробувань (табл. 6.1) показують, що фреза з ПКНБ «Борсиніт» при швидкості різання 515 м/хв дозволяє виконувати обробку сірого чавуну із забезпеченням стійкості інструменту, збільшеною в порівнянні із фрезами, оснащеними ТС ВК8 з покриттям ТіN в 6 разів та ПКНБ виробництва КНР – на 44%. Зі збільшенням швидкості різання до 620 м/хв, отримані показники змінюються до 7 разів, та 38% відповідно.

Також на даному підприємстві було проведено дослідно-промислову перевірку працездатності модифікованих інструментів з ПКНБ групи BL при фрезерування площин блоків циліндрів з високоміцного чавуну BЧ 350-22 (320 HB).

Використовувалась фреза-летючка (передній кут  $\gamma = -10^{\circ}$ , задній кут  $\alpha = 10^{\circ}$ ), оснащена різальною пластиною RNGN 090300T з ПКНБ-1 групи BL (55 об% cBN, 43 об% TiC, 2% об. Al). Порівняння працездатності інструменту проводилось з фрезою, оснащеною різальними пластинами із ПКНБ «Борсиніт» та ПКНБ виробництва КНР.

Результати випробувань (див. табл. 6.1) показують, що фреза з ПКНБ-1 групи ВL при швидкості різання 750 м/хв дозволяє виконувати обробку високоміцного чавуну із забезпеченням стійкості інструменту, збільшеною в порівнянні із фрезами, оснащеними ПКНБ «Борсиніт» на 21% та ПКНБ виробництва КНР – на 43%. При дещо меншій швидкості – 550 м/хв стійкість

	Таблиця	6.	1
--	---------	----	---

195

NA · ·	Pe	жими різання		1	i,				
Матеріал інструменту	<i>v</i> , м/хв	<i>S</i> <sub>z</sub> , мм/зуб	<i>t</i> , MM	<i>I</i> , ХВ	<i>h</i> <sub>3</sub> , ММ	мкм/хв			
чавун СЧ 21-40 (240 НВ)									
ПКНБ «Борсиніт»				30	0,20	6,66			
TC BK8 + TiN	515			12	0,50	41,66			
ПКНБ (КНР)		0.12	0.02	30	0,30	10,00			
ПКНБ «Борсиніт»		0,12	0,02	30	0,25	8,33			
TC BK8 + TiN	620			12	0,70	58,33			
ПКНБ (КНР)				30	0,40	13,33			
чавун ВЧ 350-22 (320 НВ)									
ПКНБ-1 групи BL					0.15	6.25			
ПКНБ «Борсиніт»	550		0,10	24	0,10	0,23			
ПКНБ (КНР)		0.30			0,20	8,30			
ПКНБ-1 групи BL		0,30			0,20	11,10			
ПКНБ «Борсиніт»	750				0,25	13,90			
ПКНБ (КНР)					0,35	19,44			
сталь HARDOX (450 HB)									
ПКНБ-2 групи BL					0,20	5,00			
ПКНБ «Композит 10»	90		0,40	40	030	7,50			
ТС ВК8		0.05			0,45	11,25			
ПКНБ-2 групи BL		0,05		35	0,25	7,14			
ПКНБ «Композит 10»	120				0,35	10,00			
ТС ВК8					0,60	17,14			

Результати промислових випробувань інструментів

Інструменти, оснащені ПКНБ-2 групи BL (60 об% cBN, 35 об% TiC, 5% об. Al), пройшли промислові випробування в умовах ТДВ «Коростенський щебзавод» (м. Коростень).

Випробування проводились при фрезеруванні корпусної деталі з легованої конструкційної сталі НАRDOX (450 HB), яка характеризується високою ударною в'язкістю та стійкістю до абразивного стирання. Використовувалась фреза-летючка (передній кут  $\gamma = -10^\circ$ , задній кут  $\alpha = 10^\circ$ ), оснащена різальною пластиною RNGN 090400Т. Порівняння працездатності інструменту проводилось з фрезою, оснащеною різальними пластинами із ПКНБ «Композит 10» та твердого сплаву (TC) ВК8.

Результати випробувань показують (табл.), що фреза з ПКНБ-2 групи BL при швидкості різання 90 м/хв дозволяє виконувати обробку високоміцного чавуну із забезпеченням стійкості інструменту, збільшеною в порівнянні із фрезами, оснащеними ПКНБ «Композит 10» на 34% та TC BK8 – на 71%. Зі збільшенням швидкості різання до 120 м/хв, отримані показники змінюються до 29%, та 59% відповідно.

Таким чином, результати промислових випробувань розроблених інструментів, оснащених композитами на основі кубічного нітриду бору груп ВН та BL, свідчать про їх високу працездатність в умовах фрезерування виробів зі сталі та чавуну.

Виробничі дослідження модифікованих різальних композитів із ПКНБ відбувалися в умовах підприємства «Немирів-Авто» (м. Немирів). Випробування проводилися при точінні гальмівних дисків автомобільного транспорту, оброблюваний матеріал сірий чавун СЧ 20 твердістю НВ 230 та при обробці роз'ємних частин блоків циліндрів автомобільного транспорту із сірого чавуну СЧ 21-40 твердістю НВ 240 на верстаті Carmec SG 1400.

Умови проведення обробки та показники працездатності інструменту оснащеного досліджуваними пластинами приведені у табл. 6.2.

Результати випробувань різальних пластин із ПКНБ при

I	Режи	ми різання	Т	1	• • • • • • • • • • •	
Інструмент	<i>v</i> , м/хв	<i>S</i> , мм/об	<i>t</i> , MM	<i>1</i> , ХВ	<i>h</i> <sub>3</sub> , ММ	<i>J</i> , МКМ/ХВ
Пластини ПКНБ					0.15	18.75
«борсиніт»	125-470	0,12	0,02	8	0,10	10,70
Модифіковані					0.10	12.50
пластини ПКНБ						,
Пластини із твердого					0,30	37,50
сплаву ВК8 (TiN)						
Пластини ПКНБ					0,15	30,00
«борсиніт»		0,12	0,02	5		
Модифіковані	250-940				0,10	20,00
пластини ПКНБ						
Пластини із твердого					0,40	80,00
сплаву ВК8 (TiN)						

точінні чавуну СЧ 20 (НВ 230)

Були використані пластини із ПКНБ типу RNMN (діаметром 7,0 та 9,52 мм товщиною 3,97 мм). Пластини встановлювалися в державку з механічним кріпленням, що забезпечує такі геометричні параметри різальної частини – передній кут  $\gamma = -10^{\circ}$ , задній кут  $\alpha = 10^{\circ}$ , а для фрезерування в фрезу типу «летючка». Порівняння працездатності проводилось між стандартними пластинами із ПКНБ «борсиніт» та пластина після додаткового шліфування робочих поверхонь алмазним порошком ACM 14/10, а також твердосплавним інструментом ВК8 з покриттям TiN.

В результаті проведених випробувань встановлено, що різальні пластини після додаткового алмазного шліфування дозволяють проводити високоефективну токарну обробку сірого чавуну СЧ 20 із збільшенням стійкості інструменту в порівнянні із стандартними пластинами із ПКНБ «борсиніт» на 40% та в порівнянні із твердосплавними пластинами ВК8 (TiN) на 70%.

Шорсткість обробленої поверхні при обробці модифікованими різальними пластинами із ПКНБ становить *Ra* 0,32–0,63.

Фрезерування головок блоків циліндрів із сірого чавуну відбувалося із інтенсивним ударним навантаження (рис. 6.3) у зв'язку з чим було використані різальні пластини із ПКНБ групи BL після вібро-магнітноабразивної обробки, що дозволило сформувати на різальній кромці зміцнюючу фаску.



Рисунок 6.3 – Головка блоку циліндрів комбайну John Deere із чавуну на які проводилися випробування розроблених різальних композитів із ПКНБ

Порівняння працездатності пластин відбувалося із пластинами виробництва (КНР). Результати випробувань представлені в табл. 6.3.

Було встановлено, що використання різальних пластин із ПКНБ групи ВL після ВіМАО дозволяє підвищити стійкість інструменту на 44% при швидкості різання 515 м/хв та на 38% при швидкості різання 620 м/хв в порівнянні із пластинами із ПКНБ виробництва КНР при цьому досягається шорсткість обробленої поверхні *Ra* 0,17–0,20 (рис. 6.4).

### Таблиця 6.3

# Результати випробувань різальних пластин із ПКНБ

	Режими різання			Т	h	i
Інструмент	ν,	<i>S</i> ,	t,	XB	71 <sub>3</sub> ,	<i>J</i> , Mrm/vd
	м/хв	мм/зуб	ММ		101101	WIKW/ XD
Пластини ПКНБ				30	0,2	6,66
Пластини із	515	0,12	0,02	30	03	10.00
ПКНБ (КНР)				50	0,5	10,00
Пластини ПКНБ				30	0,25	8,33
Пластини із	620	0,12	0,02	30	0.4	13 33
ПКНБ (Китай)				50	0,7	15,55

## при фрезеруванні чавуну СЧ 40 (HB 240)



Рисунок 6.4 – Шорсткість поверхні до обробки (*a*) та після обробки пластинами із ПКНБ після ВіМАО (б)

Інструменти розроблені за вдосконаленою технологією пройшли виробничі випробування при точінні прокатних валків із загартованої нержавіючої сталі X12 (рис. 6.5) твердістю HRC 60-64 в умовах ПрАТ «КЗ«Трубосталь» (м. Коростень).



Рисунок 6.5 – Номенклатура прокатних валків, які використовуються підприємством для прокатки труб (*a*) процес точіння прокатного валка інструментом із ПКНБ (*б*); матеріал – нержавіюча сталь X12 (60–64 HRC)

Для проведення випробувань були використані пластини із ПКНБ типу RNMN 070300 (діаметр 7,00 мм товщиною 3,18 мм) та RNMN09T300 (діаметр 9,52 мм та товщиною 3,18 мм) групи ВН після додаткового фінішного шліфування алмазним порошком ACM 14/10, які встановлювались в державку з механічним кріпленням різальних пластин, що забезпечує такі геометричні параметри різальної частини – передній кут  $\gamma = -10^\circ$ , задній кут  $\alpha$ = 10°. Порівняння працездатності проводилось із вставками із ПНТМ Композит 01 «Ельбор». Умови проведення обробки та показники працездатності інструменту оснащеного досліджуваними пластинами приведені у табл. 6.4.

У результаті проведених випробувань встановлено, що розроблені за вдосконаленою технологією різальні пластини із ПКНБ дозволяють проводити високоефективну токарну обробку прокатних валків із загартованої сталі X12 зі збільшенням стійкості інструменту в порівнянні із вставками із ПНТМ Композит 01 «Ельбор» у три рази із забезпеченням відповідної якості обробленої поверхні.

Таблиця 6.4

Результати випробувань різальних пластин із ПКНБ при точінні прокатних валків X12 (HRC 60-64)

Інструмент	Pez	кими різан	ЯН	<i>Т</i> , хв	<i>h</i> <sub>3</sub> , мм	<i>j</i> , мкм/хв
	<i>v</i> , м/хв	<i>S</i> , мм/об	<i>t</i> , MM			
Пластини ПКНБ	90	0.12	0,4	60	0,25	4,16
Вставки «Ельбор»	20	0,12		60	0,65	10,83
Пластини ПКНБ	120	0,12	0,4	46	0,30	6,52
Вставки «Ельбор»				46	0,80	17,39

Також розроблені пластини пройшли виробничі випробування на підприємстві ТДВ «Коростенський щебзавод» (м. Коростень) при обробці корпусів дробарок на токарному верстаті 1М63, оброблюваний матеріал – легована, конструкційна сталь HARDOX твердістю 450 HB, яка характеризується високою ударною в'язкістю та стійкістю до абразивного стирання.

Були використані пластини із ПКНБ типу RNMN 070300 (Ø 7,00 мм, товщиною 3,18 мм) та RNMN09T300 (Ø 9,52 мм, товщиною 3,18 мм) групи ВН після додаткової фінішної обробки, які встановлювались в державку з механічним кріпленням різальних пластин, що забезпечує такі геометричні

параметри різальної частини – передній кут γ = -10°, задній кут α = 10°. Порівняння працездатності проводилось із пластинами Композит 01.

Умови проведення обробки та показники працездатності інструменту оснащеного досліджуваними пластинами приведені у табл. 6.5.

Таблиця 6.5

Результати випробувань різальних пластин із ПКНБ при точінні корпусу дробарки із сталі HARDOX 450

Інструмент	Pez	кими різані	ня	<i>Т</i> , хв	<i>h</i> <sub>3</sub> , мм	<i>ј</i> , мкм/хв
	<i>v</i> , м/хв	<i>S</i> , мм/об	<i>t</i> , MM			
Пластини ПКНБ	120		0.2	23	0,10	4,35
Композит 01		0,10	- ,		0,15	6,52
Пластини ПКНБ	150		0.4	18	0,20	11,11
Композит 01			~, ·	_ 0	0,30	16,67

У результаті проведених випробувань встановлено, що розроблені за вдосконаленою технологією різальні пластини із ПКНБ дозволяють проводити токарну обробку корпусів дробарок зі сталі HARDOX 450 зі збільшенням стійкості інструменту в порівнянні із пластинами із Композиту 01 на 34% при швидкості різання 120 м/хв та глибині різання 0,2 мм та на 33% при швидкості різання 150 м/хв та глибині різання 0,4 мм із забезпеченням відповідної якості обробленої поверхні.

Виробничі випробування інструментальних композитів із ПКНБ групи ВН та BL підтверджені відповідними актами випробувань (Додатки А–Г).

### Висновки до розділу 6

1. Різальні інструменти, оснащені керамо-матричними композитами (КМК) на основі кубічного нітриду бору (КНБ) групи BL (вміст cBN 50– 75%), дозволяють проводити високоефективну чистову лезову обробку виробів з Fe-C сплавів високої твердості (56–64 HRC), таких як загартовані леговані сталі, леговані та вибілені чавуни.

2. Випробування фрез із ПКНБ в умовах промислових підприємства показала їх високу працездатність при обробці виробів з загартованих сталей, сталей середньої твердості, сірих та високоміцних чавунів.

3. Більшість катастрофічних поломок інструменту, що відбуваються при обробці загартованих сталей, часто пов'язані із абразивним зносом та механічними поломками, що є основними видами відмови інструменту. Ці режим руйнування інструменту викликані механічною та хімічною взаємодією між різальним інструментом та оброблюваним матеріалом під час обробки.

4 Результати роботи пройшли дослідну перевірку В умовах підприємства ТОВ "Ерідон Тех" (м. Полтава) та "Немирів-Авто" (м. Немирів) при чистовому безударному точінні прокатних валків із загартованої нержавіючої 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 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%.

#### ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В роботі вирішено актуальну науково-технічну задачу, що полягає у підвищенні стійкості інструментів із КНБ групи ВL при фінішній обробці загартованих сталей за рахунок формування робочих поверхонь різальних інструментів та зміною умов контактної взаємодії інструменту з оброблюваним матеріалом, вивченні закономірностей формування структури та властивостей матеріалів інструментального призначення.

Основні висновки та результати роботи полягають у наступному:

1. Проведений комплекс досліджень із взаємодії інструментів, оснащених ПКНБ групи ВН та BL із загартованими сталями у зоні різання, довів, що ефективність використання інструментів зумовлена станом поверхневого шару робочих елементів інструментів.

2. На основі проведених стійкісних досліджень інструментів із ПКНБ групи BL на базі основних компонентів: *c*BN, TaN, TiC, TiN при точінні загартованих сталей ШХ15 (56–62 HRC) та ХВГ (56–64 HRC) на швидкостях різання до 215 м/хв встановлено, що найбільш перспективним для застосування є композити з вмістом *c*BN 55–45 об.% та зв'язкою на основі TiC, за рахунок більш однорідного структурного стану матеріалу.

3. Методом склерометрування встановлено, що за сукупністю механічних властивостей поверхневого шару найкращим є матеріал, який має склад *c*BN (55 об.%)-ТіС. Однорідність механічних властивостей даного матеріалу, яка визначена за величиною СКВ сили тертя-мікрорізання, перевищує показники зразку cBN (75 об.%)-ТіС і значно перевищує властивості ПКНБ складу *c*BN (55 об.%)-ТаN.

4. Методом кінцевих елементів проведено дослідження напруженодеформованго стану в зоні стружкоутворення під час різання загартованих сталей інструментами з ПКНБ групи ВН та BL за умов зміни коефіцієнта тертя µ від 0,1 до 0,3 та встановлено, що зміна коефіцієнта тертя в даному діапазоні не впливає на значення напружено-деформованого стану для інструментів. Збільшення сили тертя на передній поверхні інструментів в основному впливає на збільшення температури в зоні різання.

5. Проведено дослідження зміни складових сили різання при обробці загартованої сталі ШХ 15 з ударом, інструментами з ПКНБ групи BL та BH в діапазоні швидкостей різання 120-210 м /хв та встановлено, що обробка супроводжується динамічним ударним ефектом, що проявляється у вигляді пікових навантажень в момент врізання інструменту та досягає величини до 40% складових сили різання  $P_z$  та  $P_y$ .

6. Моделювання переривчастої обробки при v = 120 м/хв, t = 0,4 мм, S = 0,1 мм/об методом КЕ показує, що на поверхні різця в області різальної кромки можливе зростання третіх головних напружень до значень -3,24 ГПа, що перевищує середній рівень стискаючих напружень при різанні в межах ділянки, на якій реалізується різання, в 1,2 рази що обумовлює ймовірність руйнування різця в розглянутих умовах до 68,9%.

7. 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 матеріалом i3 ПКНБ оброблюваним величину 3 та на 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.

8. Показано, що при чорновому шліфуванні пластини із ПКНБ групи BL розмір зерен алмазу, якими проводиться обробка, здійснює більший вплив на якість оброблюваної поверхні у порівнянні виконанням оброблення пластин із ПКНБз високим (90–95 об.%) вмістом КНБ, що призводить до збільшення в 1,4 рази висоти мікронерівностей.

9. Методом хемографії встановлено, що на різальних елементах із ПКНБ є дефектні зони, особливо поряд з різальною кромкою, які в основному представлені мікротріщинами різної форми та розмірів, що утворюються ще на етапі виготовлення інструментів та є потенційними зонами руйнування різальної кромки.

10. Встановлено, що ВіМАО чинить вплив на радіус округлення різальних кромок композитів із ПКНБ групи ВL, 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.

11. На основі результатів дослідження кінетики зносу модифікованих різальних інструментів із ПКНБ групи ВН та ВL 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 BH.

12. Результати дисертаційної роботи пройшли дослідну перевірку в умовах підприємств: ТОВ "Ерідон Тех" м. Полтава, ПП "Немирів Авто" м. Немирів, ПРаТ "Трубосталь" м. Коростень.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

 Slipchenko K. Investigation of the mechanical properties and cutting performance of cBN-based cutting tools with Cr3C2 binder phase / K. Slipchenko,
 Petrusha, V. Turkevich, J. Johansson, V. Bushlya, Jan-Eric Ståhlb// Procedia CIRP. – 2018. – Vol. 72. – pp. 1433-1438.

2. Sumiya H. Mechanical properties of nano-polycrystalline cBN synthesized by direct conversion sintering under HPHT / Sumiya H., Harano K., Ishida Y. // Diamond and Related Materials . – 2014. – vol. 41. – pp. 14-19.

3. Петруша I.А. Термобаричне спікання і працездатність різального композиту сВN-ТіС групи ВL при точінні загартованої сталі Caldie / I.А. Петруша, В.М. Бушля, О.С. Осіпов та ін. // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент — техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр. — К.: ИСМ им. В. Н. Бакуля, НАН Украины, 2015. — 548 с. — Вып. 18 — С. 338—345.

4. Costes, J. P. Tool-life and wear mechanisms of CBN tools in machining of Inconel 718 / Costes, J. P., Guillet, Y., Poulachon, G., & Dessoly, M. // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2007. – № 47(7). – pp. 1081-1087.

5. Мельнійчук Ю.О. Високошвидкісне точіння деталей з загартованих сталей інструментами, що оснащені матеріалами на основі кубічного нітриду бору / Ю.О. Мельнійчук, І.А. Петруша, С.А. Клименко та ін. // Інструментальний світ. – 2015. – № 1–4(61–64). – С. 13–15.

6. De Godoy, V. A. A. Turning of interrupted and continuous hardened steel surfaces using ceramic and CBN cutting tools / De Godoy, V. A. A., & Diniz, A. E. // 2011. – Journal of Materials Processing Technology. – № 211(6). – P. 1014–1025.

7. Chou Y. K. Hard turning of M50 steel with different microstructures in continuous and intermittent cutting // Wear. – 2003. –V. 255. – pp. 1388–1394.

8. Chou Y. K., Evans C. J. Cubic boron nitride tool wear in interrupted hard cutting // Wear. – 1999. – V. 225–229. – pp. 234–245.

9. Halpin T. The performance of polycrystalline cubic boron nitride tools in continuous, semi-interrupted, and interrupted hard machining / Halpin T., Byrne G., Barry J., Ahearne E. // Proc. IMechE. – 2009. – Vol. 223 Part B: J. Engineering Manufacture. – pp. 947–953.

10. Costes J. P., Guillet Y., Poulachon G., Dessoly M. Tool-life and wear mechanisms of CBN tools in machining of Inconel 718 // International Journal of Machine Tools & Manufacture. -2007. - V. 47. - P. 1081-1087.

11. Hooper R. M., Shakib J. I., Brookes C. A. Microstructure and wear of TiC-Cubic BN tools // Materials Science and Engineering. – 1988. – V. A 105/106.
– P. 429–433.

12. Chou Y. K. Hard turning of M50 steel with different microstructures in continuous and intermittent cutting // Wear. – 2003. –V. 255. – P. 1388–1394.

13. Chou Y. K., Evans C. J. Cubic boron nitride tool wear in interrupted hard cutting // Wear. – 1999. – V. 225–229. – P. 234–245.

 Diniz A. E., Gomes D. M., Braghini A. Jr. Turning of hardened steel with interrupted and semi-interrupted cutting // Mater. Processing Technol. – 2004. – V.
 N2. – P. 240–248.

15. Halpin T., Byrne G., Barry J., Ahearne E. The performance of polycrystalline cubic boron nitride tools in continuous, semi-interrupted, and interrupted hard machining // Proc. IMechE. – 2009. – Vol. 223 Part B: J. Engineering Manufacture. – P. 947–953.

16. Diniz, A.E. Hard turning of interrupted surfaces using CBN tools / Diniz,
A.E., Oliveira, A.J. // J. Mater. Proc. Technol. – 2008. – №195. – pp. 275–281.

17. Rakesh S. Continuous and Interrupted Hard Turning Using CBN-L Tools at Moderate Cutting Speeds / S. Rakesh, N. Manoj, K. Rajiv // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. – 2015. – Volume 5, Special Issue 4. – pp. 41-46.

18. Luo S.Y. Wear characteristics in turning high hardness alloy steel by ceramic and CBN tools / S.Y. Luo, Y.S. Liao, Y.Y. Tsai // Mater. Process Technol. – 1999. –  $N_{2}$  88. – P. 21 – 114.

19. Koönig W. Machining of hard materials / W. Koönig, R. Komanduri, H. K. Toönshoff, G. Ackershott //Ann CIRP. – 1984. – № 33. – P. 27–54.

20. Davies M. A. On chip morphology, tool wear and cutting mechanics in finish hard turning / M. A. Davies, Y. Chou, C. J. Evans // Ann CIRP. – 1996. –  $N_{2}$  45. – P. 77–82.

21. Poulachon G. Wear behaviour of CBN tools while turning various hardened steels / G. Poulachon, B. P. Bandyopadhyay, I. S. Jawahir, S. Pheulpin, E. Seguin // Wear.  $-2004. - N_{2} 256. - P. 285-302.$ 

22. Narutaki N. Tool wear and cutting temperature of CBN tools in machining of hardened steels / N. Narutaki, Y. Yamane // Ann CIRP. – 1979. –  $N_{2} 28. - P. 8 - 23.$ 

23. W. Koönig Wear mechanisms of ultrahard, non-metallic cutting materials /
W. Koönig, A. Neises // Wear. – 1993. – № 162 – 164. – P. 12–21.

24. Barry J. Cutting tool wear in the machining of hardened steels Part II: cubic boron nitride cutting tool wear / J. Barry, G. Byrne // Wear. – 2001. – № 247. – P. 60–152.

25. Farhat Z. N. Wear mechaniam of CBN cutting tool during high-speed machining of mold steel / Farhat Z. N. // Mater. Sci. Eng. -2003. - N = A36. - N = 10 - 25.

26. Chou Y. K. Experimental investigation on CBN turning of hardened AISI 52100 steel. / Y. K. Chou, C. J. Evans, M. M. Barash // J. Mater. Process. Technol. – 2002. – № 124. – P. 83–98.

27. Сверхтвердые материалы. Получение и применение: В 6-и т. / Под общей ред. Н.В. Новикова. – Т.5: Обработка материалов лезвийным инструментом / Под ред. С.А. Клименко. – К.: ИСМ им. В.Н. Бакуля, ИПЦ «АЛКОН» НАНУ, 2006. – 316 с.

28. Klimenko S. A. Wear on cubic boron nitride tools / S. A. Klimenko,
Y. A. Mukovoz, V. A. Lyashko, V. V. Ogorodnik, A. N. Vashchenko// Soviet
J. Superhard Mater. – № 10(2). – 1988. – № 53–57.

29. Klimenko S. A. On the wear mechanisms of cubic boron nitride base cutting tool / S. A. Klimenko, Y. A. Mukovoz, V. A. Lyashko, A. N. Vashchenko, V. V. Ogorodnik // Wear. – 1992. – № 157. – P. 1–7.

30. Klimenko S. A. Kinetics of tool wear in turning martensitic steels / S. A. Klimenko // J. Superhard Mater. – 1995. – № 17(2). – P. 62–65.

31. Клименко С. А. Высокотемпературные явления при обработке материалов резанием / С. А. Клименко, А. С. Манохин // Надійність інстрменту і оптимізація технологічних систем. Зб. наук. пр. – Краматорськ. – 2011. – № 28. – С. 61 – 65.

32. Работоспособность режущего инструмента, оснащенного ПСТМ на основе КНБ с вакуумно-плазменным покрытием / М. Ю. Копейкина, С. А. Клименко, Ю. А. Мельнийчук, В. М. Береснев // Сверхтвердые материалы. – 2008. – № 5. – С. 87–97.

33. De Godoy, V. A. A. Turning of interrupted and continuous hardened steel surfaces using ceramic and CBN cutting tools / De Godoy, V. A. A., & Diniz, A. E. // 2011. – Journal of Materials Processing Technology. – № 211(6). – P. 1014–1025.

34. Sugihara, T. Development of Novel CBN Cutting Tool for High Speed Machining of Inconel 718 Focusing on Coolant Behaviors / Sugihara, T., Tanaka, H., Enomoto, T. // Procedia Manufacturing. – 2017. – №10. – P. 436–442.

35. E. Benko, A. Wyczesany, T. L. Barr, "CBN-metal/metal nitride composites" *Ceram. Int.*, vol. 26, no. 6, pp. 639–644, 2000.

36. Costes, J. P. Tool-life and wear mechanisms of CBN tools in machining of Inconel 718 / Costes, J. P., Guillet, Y., Poulachon, G., & Dessoly, M. // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2007. – № 47(7). – pp. 1081-1087.

37. Wang Z.Y. Hybrid machining of Inconel 718 / Z.Y. Wang, K.P. Rajurkar, J. Fan, S. Lei, Y.C. Shin, G. Petrescu // International Journal of Machine Tools and Manufacture. -2003. - N = 43. - P. 1391-1396.

38. Lahiff C. PCBN tool wear modes and mechanisms in finish hard turning / Lahiff, C., Gordon, S., & Phelan, P. // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. -2007. - N 23(6). - P. 638-644.

39. Davies M.A. On chip morphology, tool wear and cutting mechanics in finish hard turning / Davies M.A., Chou Y., Evans C.J.// Ann CIRP. – 1996. –  $N_{245.} - P.77-82.$ 

40. Luo S.Y. Wear characteristics in turning high hardness alloy steel by ceramic and CBN tools / Luo S.Y., Liao Y.S., Tsai Y.Y.// J. Mater Process Technol. – 1999. – №88. – P. 114–121.

41. Tanaka, H. High Speed Machining of Inconel 718 Focusing on Wear Behaviors of PCBN Cutting Tool / Tanaka, H., Sugihara, T., & Enomoto, T.// Procedia CIRP. – 2016. –  $N_{2}$  46. – P. 545–548.

42. Hooper R. M. Microstructure and wear of TiC-Cubic BN tools / R. M. Hooper, J. I. Shakib, C. A. Brookes // Mater. Sci. Eng. – 1988. – № A105/106. – P. 429 – 433.

43. Bushlya, V., Bjerke, A., Turkevich, V. Z., Lenrick, F., Petrusha, I. A., Cherednichenko, K. A., & Ståhl, J.-E. (2019). On chemical and diffusional interactions between PCBN and superalloy Inconel 718: imitational experiments. Journal of the European.

44. Klimenko S. A. Wear on cubic boron nitride tools / S. A. Klimenko,
Y. A. Mukovoz, V. A. Lyashko, V. V. Ogorodnik, A. N. Vashchenko// Soviet
J. Superhard Mater. – № 10(2). – 1988. – № 53–57.

45. Klimenko S. A. On the wear mechanisms of cubic boron nitride base cutting tool / S. A. Klimenko, Y. A. Mukovoz, V. A. Lyashko, A. N. Vashchenko, V. V. Ogorodnik // Wear. – 1992. – № 157. – P. 1–7.

46. Klimenko S. A. Kinetics of tool wear in turning martensitic steels /
S. A. Klimenko // J. Superhard Mater. – 1995. – № 17(2). – P. 62–65.

47. Клименко С. А. Режущий инструмент из ПСТМ на основе нитрида бора / С. А. Клименко, Ю. А. Муковоз, Л. Г. Полонский. – К.: Тов"Знання" України, 1994. – 36 с.

48. Вишневский А. С. Взаимодействие нитрида бора со сталями и титаном / А. С. Вишневский, В. Г. Делеви, Ю. А. Муковоз и др. // Синтетич. алмазы. – 1978. – № 4. – С. 17 – 22.

49. Клименко С. А. Контактное взаимодействие инструмента из поликристаллов на основе КНБ с обрабатываемым материалом / С. А. Клименко, Ю. А. Муковоз, Я. В. Ващенко, Я. В. Иваськевич // Сверхтв. матер. – 1994. – № 3. – С. 40 – 43.

50. Копейкина М. Ю. Повышение износостойкости лезвійного инструмента из ПСТМ на основе КНБ при высокоскоростном точении труднообрабатываемых сплавов: Дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук. – К.: ИСМ НАН Украины, 2008. – С. 131 – 134.

51. Müller-Hummel P., Lathres M. Temperature measurement on diamondcoated tools during machining / P. Müller-Hummel, M. Lathres // Ind. Diam. Rev. – 1995. – №2. vol. 55. – P. 78 – 83.

52. Клименко С. А. Высокотемпературные явления при обработке материалов резанием / С. А. Клименко, А. С. Манохин // Надійність інстрменту і оптимізація технологічних систем. Зб. наук. пр. – Краматорськ. – 2011. – № 28. – С. 61 – 65.

53. Сліпченко К.В. Фізико-механічні властивості сВN композитів зі зв'язками на основі карбідів Ті, Сг, V в умовах високошвидкісного точіння AISI 316L / К.В. Сліпченко, І.А. Петруша, В.З. Туркевич // «Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні» 2018. №6 (1282). С. 3–7.

54. Abhijeet S. M. Tool Wear and Machining Performance of cBN-TiN Coated Carbide Inserts and PCBN Compact Inserts in Turning AISI 4340 Hardened Steel / S. M. Abhijeet, J. Wenping, W. D. Brown, P. M. Ajay // Journal of Materials Processing Technology. – 2006. – № 180. – P. 253 – 262.

55. Barry J., Byrne G (2001) Cutting tool wear in the machining of hardened steel, part 2: cubic boron nitride cutting tool wear / J. Barry, G. Byrne // Wear. – 2001. – № 247. – P. 152 – 160.

56. Розенберг Ю. А. Резание материалов: учебник для техн. ВУЗов. – Курган: Изд-во ОАО «Полиграфический комбинат», Зауралье. – 2007. – 294 с.

57. Sugihara T. High Speed Machining of Inconel 718 Focusing on Tool Surface Topography of CBN Tool / T. Sugihara, T. Enomoto // Procedia Manufacturing. – V. 1. – 2015. – P. 675-682.

58. Клименко С. Ан. Влияние особенностей топографии контактных поверхностей на износ режущих инструментов / С.Ан. Клименко, А.Г. Найденко, А.О. Чумак, Н.Н. Белоусова // Резание и инструменты в технологических системах : Междунар. науч.-техн. сб. / Под общ. ред. проф. А. Н. Шелкового, редкол. : проф. А. И. Грабченко (отв. ред.) и др. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2018. – Вып. 89 (101). – С. 69-77.

59. Fallqvist M. Influence of the tool surface micro topography on the tribological characteristics in metal cutting: Part I experimental observations of contact conditions / M.Fallqvist, F.Schultheiss, R.M'Saoubi, M.Olsson, J.-E.Ståhl // Wear. – V. 298–299. – 2013. – P. 87-98.

60. Schultheiss F. Influence of the tool surface micro topography on the tribological characteristics in metal cutting—Part II Theoretical calculations of contact conditions / F. Schultheiss, M. Fallqvist, R. M'Saoubi, M. Olsson, J.-E. Ståhl // Wear. – V. 298–299. – 2013. P. 23-31.

61. Yamaguchi H. Magnetic Abrasive Finishing of cutting tools for highspeed machining of titanium alloys / Yamaguchi H., Srivastava, A. K., Tan, M., Hashimoto F. // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. – 2014. –  $N_{2}$  7(4). – P. 299-304.

62. Майборода В. С. Магнітно-абразивне оброблення твердосплавного інструменту в умовах великих робчих щілин / В. С. Майборода, Б. Карпушевський, О. Климов // Вісник Національного технічного університету

України "Київський політехнічний інститут". Серія Машинобудування. – 2011. – Том 1, № 61. – С. 175-183.

63. Luo S.Y. Wear characteristics in turning high hardness alloy steel by ceramic and CBN tools / S.Y. Luo, Y.S. Liao, Y.Y. Tsai // Mater. Process Technol. – 1999. –  $N_{2} 88. - P. 21 - 114.$ 

64. Koönig W. Machining of hard materials / W. Koönig, R. Komanduri, H. K. Toönshoff, G. Ackershott //Ann CIRP. – 1984. – № 33. – P. 27–54.

65. Davies M. A. On chip morphology, tool wear and cutting mechanics in finish hard turning / M. A. Davies, Y. Chou, C. J. Evans // Ann CIRP. – 1996. –  $N_{2}$  45. – P. 77–82.

66. Poulachon G. Wear behaviour of CBN tools while turning various hardened steels / G. Poulachon, B. P. Bandyopadhyay, I. S. Jawahir, S. Pheulpin, E. Seguin // Wear. – 2004. – № 256. – P. 285–302.

67. Narutaki N. Tool wear and cutting temperature of CBN tools in machining of hardened steels / N. Narutaki, Y. Yamane // Ann CIRP. – 1979. –  $N_{28.} - P.8 - 23.$ 

68. W. Koönig Wear mechanisms of ultrahard, non-metallic cutting materials /
W. Koönig, A. Neises // Wear. – 1993. – № 162 – 164. – P. 12–21.

69. Barry J. Cutting tool wear in the machining of hardened steels Part II: cubic boron nitride cutting tool wear / J. Barry, G. Byrne // Wear. – 2001. – № 247. – P. 60–152.

70. Farhat Z. N. Wear mechaniam of CBN cutting tool during high-speed machining of mold steel / Farhat Z. N. // Mater. Sci. Eng. -2003. - N = A36. - N = 10 - 25.

71. Chou Y. K. Experimental investigation on CBN turning of hardened AISI 52100 steel. / Y. K. Chou, C. J. Evans, M. M. Barash // J. Mater. Process. Technol. – 2002. – № 124. – P. 83–98.

72. Zhao, Changlong; Ma, Chen; Ma, Zhenrong; Yang, Junbao; Li, Ming. Analysis of the Effect of Preset Surface Texture on Hard State Cutting. Manufacturing Technology, Open Access, Volume 22, Issue 3, Pages 384 - 394, 2022.

73. Klimenko S. A. Wear on cubic boron nitride tools / S. A. Klimenko,
Y. A. Mukovoz, V. A. Lyashko, V. V. Ogorodnik, A. N. Vashchenko// Soviet
J. Superhard Mater. – № 10(2). – 1988. – № 53–57.

74. Klimenko S. A. On the wear mechanisms of cubic boron nitride base cutting tool / S. A. Klimenko, Y. A. Mukovoz, V. A. Lyashko, A. N. Vashchenko, V. V. Ogorodnik // Wear. – 1992. – № 157. – P. 1–7.

75. Klimenko S. A. Kinetics of tool wear in turning martensitic steels /
S. A. Klimenko // J. Superhard Mater. – 1995. – № 17(2). – P. 62–65.

76. Клименко С. А. Высокотемпературные явления при обработке материалов резанием / С. А. Клименко, А. С. Манохин // Надійність інстрменту і оптимізація технологічних систем. Зб. наук. пр. – Краматорськ. – 2011. – № 28. – С. 61 – 65.

77. Работоспособность режущего инструмента, оснащенного ПСТМ на основе КНБ с вакуумно-плазменным покрытием / М. Ю. Копейкина, С. А. Клименко, Ю. А. Мельнийчук, В. М. Береснев // Сверхтвердые материалы. – 2008. – № 5. – С. 87–97.

78. J.-P. Costes, Y. Guillet, G. Poulachon, M. Dessoly, "Tool-life and wear mechanisms of CBN tools in machining of Inconel 718" *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 47, no. 7, pp. 1081–1087, 2007.

79. Wang Z.Y. Hybrid machining of Inconel 718 / Z.Y. Wang, K.P. Rajurkar, J. Fan, S. Lei, Y.C. Shin, G. Petrescu // International Journal of Machine Tools and Manufacture. -2003. - N = 43. - P. 1391-1396.

80. Lahiff C. PCBN tool wear modes and mechanisms in finish hard turning / Lahiff, C., Gordon, S., & Phelan, P. // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing.  $-2007. - N_{2} 23(6). - P. 638-644.$ 

81. Davies M.A. On chip morphology, tool wear and cutting mechanics in finish hard turning / Davies M.A., Chou Y., Evans C.J.// Ann CIRP. – 1996. –  $N_{245.} - P.77-82.$ 

82. Luo S.Y. Wear characteristics in turning high hardness alloy steel by ceramic and CBN tools / Luo S.Y., Liao Y.S., Tsai Y.Y.// J. Mater Process Technol. – 1999. – №88. – P. 114–121.

83. Tanaka, H. High Speed Machining of Inconel 718 Focusing on Wear Behaviors of PCBN Cutting Tool / Tanaka, H., Sugihara, T., & Enomoto, T.// Procedia CIRP. – 2016. – № 46. – P. 545–548.

84. Hooper R. M. Microstructure and wear of TiC-Cubic BN tools / R. M.
Hooper, J. I. Shakib, C. A. Brookes // Mater. Sci. Eng. – 1988. – № A105/106. –
P. 429 – 433.

85. Сверхтвердые материалы. Получение и применение: В 6-и т. / Под общей ред. Н.В. Новикова. – Т.5: Обработка материалов лезвийным инструментом / Под ред. С.А. Клименко. – К.: ИСМ им. В.Н. Бакуля, ИПЦ «АЛКОН» НАНУ, 2006. – С. 231-240.

86. Klimenko S. A. Wear on cubic boron nitride tools / S. A. Klimenko,
Y. A. Mukovoz, V. A. Lyashko, V. V. Ogorodnik, A. N. Vashchenko// Soviet
J. Superhard Mater. – № 10(2). – 1988. – № 53–57.

87. Feng Y. Fabrication techniques and cutting performance of micro-textured self-lubricating ceramic cutting tools by in-situ forming of  $Al_2O_3$ -TiC / Feng, Y., Zhang, J., Wang, L., Zhang, W., Tian, Y., Kong, X. // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2017. – Nº 68. – P. 121–129.

88. Arulkirubakara D. Performance of surface textured tools during machining of Al-Cu/TiB<sub>2</sub> composite / Arulkirubakaran, D., Senthilkumar, V., Chilamwar, V. L., Senthil, P. // Measurement. – 2019. – Volume 137. – P. 636-646.

89. Xing Y. Cutting performance and wear mechanism of nanoscale and microscale textured  $Al_2O_3$ /TiC ceramic tools in dry cutting of hardened steel / Xing, Y., Deng, J., Zhao, J., Zhang, G., Zhang, K. // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2014. – No43. – P.46–58.

90. Kawasegi N. Development of cutting tools with microscale and nanoscale textures to improve frictional behavior / Kawasegi N., Sugimori H., Morimoto H., Morita N., Hori I. // Precision Engineering. – 2009. – № 33(3). – P. 248–254.
91. Liu, Y. Wear resistance of carbide tools with textured flank-face in dry cutting of green alumina ceramics / Liu, Y., Deng, J., Wu, F., Duan, R., Zhang, X., Hou, Y. // Wear. – 2017. – № 372-373. – P. 91–103.

92. Zone-Ching Lin, Yeou-Yih Lin. Fundamental modeling for oblique cutting by thermo-elastic-plastic FEM Original Research Article International Journal of Mechanical Sciences, Volume 41, Issue 8, August 1999, Pages 941–965.

93. Mahmoud Shatla, Christian Kerk, Taylan Altan. Process modeling in machining. Part II: validation and applications of the determined flow stress data. International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 41, Issue 11, September 2001, Pages 1659-1680.

94. Anand Ramesh, N. Shreys Modelling of white layer formation under thermally dominant conditions in orthogonal machining of hardned AISI 52100 steel. International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 2008. – № 48. – P. 402–414.

95. Основи 3D – моделювання процесів механічної обробки методом скінченних елементів / Д. В. Криворучко, В. О. Залога, В. Г. Корбач. – Суми: Вид-во СумДУ, 2010. – 209 с.

96. Poulachon, G.; Moisan, A.; Jawahir, I.S.: On modeling the influence of thermo-mechanical behavior in chip formation during hard turning of 100Cr6 bearing steel. Annals of the CIRP (2001) Vol. 50, 1, pp.31–36.

97. Манохін А.С. Методика определения температуры резания при обработке инструментом с ПКНБ / А.С. Манохин, С.А. Клименко // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: Сб. науч. тр. – Вып. 3 (63). Новые технологии в машиностроении. – Харьков: ХАИ, 2010. – 92–98

98. Колмогоров В. Л. Напряжение, деформация, разрушение. – Л.: Металлургия, 1970. – 229 с.

99. Application of chemography for evaluating the workability of hard alloy cutting plates / Alexander Salenko, Mykhailo Elizarov, Viktor Shchetinin, M. A.

Al-Kuraan Tarek, Sergiy Klymenko // Mechanics and Advanced Technologies. – 2020. – №1 (88). – P. 135-140.

100. Salenko A. F. Application of chemography method to study surface damage phenomena / A. F. Salenko, S. A. Klymenko, A. A. Chumak, M. A. Elizarov, D. Tanovic, P. P. Melnychuk // FME Transactions. – 2022. – Vol. 50,  $N_{2}$  3. – P.

101. DEFORMTM 2D Version 8.1 User's Manual

102. Залога В. О. Методичні вказівки до лабораторної роботи «дослідження деформації зрізуваного шару та стружки при точінні». – Суми: СУМДУ, 2004. – 18 с.

103. Трент Е. М. Резание металлов: Пер. с англ. / Пер. Г. Н. Айзенштока.
– М.: Машиностроение. – 1980. – 263 с.

104. Грубый С. В., Лапшин В. В. Исследование режущих свойств резцов из нитрида бора // Наука и образование – МГТУ им. Н.Э. Баумана – 06,06,2012 – С. 61–74.

105. McCormick N., Almond E. Edge flaking of brittle materials, J. Hard Mater. pp. 25–51, v. 51, 1990

106. Гогоци Г. А. Сопротивление керамики разрушению: базовая диаграмма и R-линия // Пробл. прочности. С. 60 – 74, № 3, 2006.

107. G. A. Gogotsi. Fracture resistance of ceramics: Base diagram and R line. Strength of Materials, May 2006, Volume 38, Issue 3, pp 261–270

108. G.A. Gogotsi. Edge chipping resistance of ceramics: Problems of test method. Journal of Advanced ceramics, pp. 370–377, v. 2(4), 2013.

109. Gogotsi G. A. The use of brittleness measure (c) to represent mechanical behavior of ceramics // Ceram. Int. -1989. -15. -P. 127 - 129.

110. Бурлаков В. И. Влияние виброабразивной обработки на качество изделий из сверхтвердой керамики // Новые и нетрадиционные технологии в pecypco-И энергосбережении / Международная научно-техническая конференция, 26-29 сентября 2018 года (к 100-летию Одесского национального политехнического университета).

111. Maiboroda V.S., Shlyuko V.Ya., Lapin N.A., Shvedov L.N. Magnetoabrasive treatment of components in equipment with magnetic gaps distributed in the form of a ring. 582 - 585, v. 25(7), *1986*.

112. Барон Ю. М. Индуцированные токи в процессе магнитноабразивной обработки / Ю. М. Барон, М. М. Радкевич, В. Н. Кудрявцев // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2019. – С. 633-642.

113. Гах В. М. Виброабразивная обработка твердосплавного инструмента: монография/ В.М. Гах. – Краматорск: ДГМА, 2009. – 220 с.

114. Бабичев А. П. Вибрационная обработка деталей / А. П. Бабичев. –
М.: Машиностроение. – 1974. – 136 с.

115. Высокопроизводительная чистовая лезвийная обработка деталей из сталей высокой твердости / С. А. Клименко, А. С. Манохин, М. Ю. Копейкина, С. Ан. Клименко, Ю. А. Мельнийчук, А. А. Чумак; под ред. С. А. Клименко. – К.: ИСМ им. В. Н. Бакуля, 2018.– 304 с.

додатки

## Додаток А

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

#### Монографія

1. Клименко С.А. Високопродуктивна чистова лезова обробка деталей із сталей високої твердості / С. А. Клименко, А. С. Манохин, М. Ю. Копейкина, С. Ан. Клименко, Ю. А. Мельнийчук, А. О. Чумак – Киев : ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2018. – 304 с. (Здобувачем вивчене питання підвищення швидкості різання інструментом із ПКНБ (п. 4.2)).

Стаття у міжнародній наукометричній базі «Scopus»

2. Salenko A. F. Application of chemography method to study surface damage phenomena / A. F. Salenko, S. A. Klymenko, A. A. Chumak, M. A. Elizarov, D. Tanovic, P. P. Melnychuk // FME Transactions. – 2022. – Vol. 50, № 3. – P. 484–490. (Здобувачем проведено дослідження фізико-механічних властивостей та випробування різальної здатності інструменту з ПКНБ). https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57889822000&origin=recordpage

Статті у фахових виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз.

3. Клименко С. А. Технологические возможности инструментов, оснащенных композитами на основе кубического нитрида бора / С. А. Клименко, М. Ю. Копейкина, А. О. Чумак // Сучасні технології у машинобудуванні : зб. наук. праць. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – Вип. 12. – С. 54–60. (Здобувач прийняв участь в дослідженнях з визначення стійкості інструментів із ПКНБ, дослідження зразків, аналізу вихідних даних).

4. Клименко С. А. Контактные напряжения на передней поверхности инструментов, оснащеннях композитами на основе кубического нитрида бора, при точении закаленной стали / С. А. Клименко, С. Ан. Клименко, А. С. Манохин, Ю. А. Мельнийчук, М. Ю. Копейкина, А. О. Чумак // Journal of engineering sciences. – 2017. – Vol. 4, Iss. 1. – С. F8–F14. (Здобувачем

проведене дослідження зразків інструментів на основі КНБ та виконаний аналіз контактних напружень).

5. Клименко С. Ан. Влияние особенностей топографии контактных поверхностей на износ режущих инструментов (обзор) / С Ан. Клименко, А. Г. Найденко, А. О. Чумак, Н. Н. Белоусова // Резание и инструменты в технологических системах : зб. наук. праць. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2018. – Вып. 89. – С. 69–77. (Здобувачем проведено дослідження літератури з фізико-механічних властивостей та випробування різальної здатності інструментів).

6. Chumak A. O. Finish machining of the cutting inserts from cubic borine nitride BL group composite / A. O. Chumak, S. A. Klimenko, S. An. Klimenko, A. S. Manokhin, A. G. Naydenko, M. Y. Kopiekina, M. O. Bondarenko, V. V. Burikin, V. I. Burlakov // Cutting & Tools in Technological System : зб. наук. праць. – Харків : НТУ України, 2021. – № 94. – Р. 102–114. (Здобувачем виконані експерименти фінішної обробки інструментів із КНБ групи BL).

7. Клименко С. А. Моделювання стану зони стружкоутворення при торцевому фрезеруванні загартованої сталі / С. А. Клименко, А. С. Манохин, А. О. Чумак, С. Ан. Клименко, М. Ю. Копєйкіна, О. Ф. Саленко // Вісник Національного технічного університету Харківський політехнічний університет. Серія "Технології в машинобудуванні". – Харків : НТУ «ХПІ»,. 2022. – № 5. – С. 3–9. (Здобувач прийняв участь в обговоренні, виконав аналіз даних).

8. Чумак А. О. Особливості фінішної обробки робочих елементів різальних інструментів із полікристалічного кубічного нітриду бору групи ВL / А. О. Чумак, Ю. О. Мельнійчук, С. Ан. Клименко, С. А. Клименко // Технічна інженерія. – 2022. – №1. – С. 55–61. (Здобувачем виконані дослідження з фінішної обробки інструментів групи BL).

Стаття у науковому періодичному виданню України

9. Клименко С. А. Обработка закаленных сталей инструментом, оснащенным композитами с пониженным содержание кубического нитрида

бора / Ю. А. Мельнийчук, М. Ю. Копейкина, С. Ан. Клименко, А. О. Чумак // Журнал «Оборудование и инструмент для профессионалов», 2017– № 5м. (Здобувачем здійснено випробування різальної здатності композитів з невисоким вмістом КНБ).

### Праці апробаційного характеру

10. Манохін А. С. Контактна взаємодія в зоні різання при точінні загартованої сталі інструментами з ПНТМ на основі сВN груп ВН і ВL / А. С. Манохін, С. А. Клименко, М. Ю. Копейкіна, А. О. Чумак // Инженерия поверхности и реновація изделия : мат. 17-й Международ. науч.-техн. конф., 29 мая-02 июня 2017 г., г. Одесса. – Киев : АТМ Украины, 2017. – С. 120–122. (Здобувачем прведена участь в експериментах з точіння, виконаний аналіз даних).

11. Клименко С. А. Режущие инструменты, оснащенные сверхтвердыми композитами на основе кубического нитрида бора / С. А. Клименко, М. Ю. Копейкина, Ю. А. Мельнийчук, С. Ан. Клименко, А. С. Манохин, А. О. Чумак // Новые и нетрадиционные технологи в ресурсо- и энергосбережении : мат. Международ. науч.-техн. конф., 16–18 сентября 2019 г., г. Одесса. – Одесса : ОНПУ, 2019. – С. 69–70. (Здобувачем прведена участь в експериментах, виконаний аналіз даних).

12. Клименко С. А. Моделювання стану зони стружкоутворення при торцевому фрезеруванніі загартованої сталі / С. А. Клименко, А. С. Манохін, С. Ан. Клименко, М. Ю. Копєйкіна, А. О. Чумак // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем : тез доп. XII міжнарод. наук.-практ. конф., 26–27 травня 2022 р., м. Чернігів.. В 2-х т.– Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка» , 2022. – Т. 1. – С. 37–39. (Здобувачем проведена участь в обговоренні результатів досліджень та написанні публікації).

13. Клименко С. Ан. Дослідження контактних напружень та розрахунок йомвірності руйнування інструментів із ПКНБ групи ВL при ударних навантаженнях / С. Ан. Клименко, А. О. Чумак, А. С. Манохін,

С. А. Клименко, Ю. Ю. Румянцева. Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку : мат. XX Міжнародної науково-технічної конференції, 01–03 вересня 2022 р., м. Тернопіль.– Краматорськ-Тернопіль : ДДМА, 2022. – 93–94 с. (Здобувачем проведено дослідження структури та складу зразків інструментів із ПКНБ).

14. Чумак А. О. Особливості використання інструментів із ПКНБ групи ВL при обробці загартованих сталей / С. Ан. Клименко // 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. (Здобувачем проведена участь у дослідженнях та написанні публікації).

15. Клименко С. А. Вібро-магнітна-абразивна обробка різальних пластин із ПКНБ / А. О. Чумак // Надтверді, композиційні матеріали та покриття: отримання, властивості, застосування: Тези доповідей Одинадцятої конференції молодих вчених та спеціалістів, 28–29 травня 2020 р., м. Київ. – Київ: ІНМ НАНУ, 2020 – С. 7–8. (Здобувачем прведена участь в експериментах фінішної обробки інструментів із ПКНБ, проведений аналіз даних).

## Додаток Б

ЗАТВЕРДЖУЮ ЗАТВЕРДЖУЮ ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України ТОВ «Ерідон Техлына заступник директора директор полтавського представництва Яковенко С. О д.т.н., проф. Клименко С. А. 02.06.2021 Ретитут 02.06.2021 p. надтверди матеріалів ім. В.М.Бакуля АКТ дентифікаційний к 0541737

## випробування різальних пластин із полікристалічного кубічного нітриду бору (ПКНБ)

Даний акт складено на предмет того, що розроблені в ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України різальні пластини із ПКНБ, пройшли промислові випробування в умовах підприємства ТОВ «Ерідон Тех» (м. Полтава).

Випробування проводились при фрезеруванні площин блоків циліндрів та головок блоків циліндрів автомобільного транспорту на фрезерному верстаті Сагтес. Оброблюваний матеріал — сірий чавун ВЧ 350-22 твердістю НВ 320. Обробка відбувалась із інтенсивними ударними навантаженнями на різальну кромку інструменту.

В якості випробувальних інструментів використовувались розроблені пластини із ПКНБ з низьким вмістом нітриду бору групи BL (55% об. cBN, 43 % об. TiC, 2% об. Al), порівняння працездатності проводилось із інструментами із ПКНБ групи BH Борсиніт та пластинами із ПКНБ виробництва КНР. Всі досліджувані пластини із ПКНБ типу RNMN (діаметром 9,52 мм та товщиною 3,18 мм), встановлювались в фрезу типу «летючка» з механічним кріпленням, що забезпечує такі геометричні параметри різальної частини – передній кут  $\gamma = -10^\circ$ , задній кут  $\alpha = 10^\circ$ .

Умови проведення обробки та показники працездатності інструменту оснащеного досліджуваними пластинами приведені у табл. 1.

	Реж	кими різанн	Я	<i>Т</i> , хв	<i>h</i> <sub>3</sub> , мм	<i>ј</i> , мкм/хв
Інструмент	<i>v</i> , м/хв	<i>S</i> , мм/зуб	<i>t</i> , мм			
Пластини ПКНБ групи BL				24	0,15	6,25
Пластини ПКНБ групи ВН (Борсиніт)	550	0,30	0,10	24	0,15	6,25
Пластини із ПКНБ (КНР)				24	0,20	8,30
Пластини ПКНБ групи BL				18	0,20	11,10
Пластини ПКНБ групи ВН (Борсиніт)	750	0,30	0,10	18	0,25	13,90
Пластини із ПКНБ (КНР)				18	0,35	19,44

#### Таблиця 1. Результати випробувань різальних пластин із ПКНБ при фрезеруванні чавуну СЧ 21-40 (НВ 260)

(Позначення: v — швидкість різання (м/хв.); S — подача (мм/зуб); t — глибина різання (мм); T — час точіння (стійкість інструменту) (хв.);  $h_{3}$  — ширина фаски зносу по задній поверхні інструменту (мм); j — швидкість зношування інструменту (мкм/хв.)

В результаті проведених випробувань встановлено, що розроблені в ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України різальні пластини із ПКНБ групи ВL на швидкості різання 550 м/хв дозволяють проводити високоефективну фрезерну обробку чавуну СЧ 21-40 із збільшенням стійкості інструменту в порівнянні із пластинами ПКНБ виробництва КНР на 25 %.

Зі збільшенням швидкості різання до 750 м/хв. розроблені різальні пластини із ПКНБ дозволяють підвищити стійкість в порівнянні із пластинами ПКНБ групи ВН на 21 % та на 43 % в порівнянні із пластинами із ПКНБ виробництва КНР.

Від ІНМ НАН України:

Від ТОВ «Ерідон Тех»:

Директор полтавського

К.т.н., с.н.с. від. №18 Мельнійчук Ю.А К.т.н. с.н.с. від. №18 Клименко С.А.

м.н.с. від. №18

Чумак А. О.

представництра Яковенко С. О.



Даний акт складено на предмет того, що розроблені в ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України різальні пластини із ПКНБ, пройшли промислові випробування в умовах підприємства «Немирів-Авто» ФОП Глиняний С.В. (м. Немирів).

Випробування проводились при фрезеруванні роз'ємних частин блоків циліндрів автомобільного транспорту на фрезерному верстаті Carmec SG 1400, оброблюваний матеріал сірий чавун СЧ 21-40 твердістю НВ 240, обробка відбувалась із інтенсивними ударними навантаженнями на різальну кромку інструменту.

Були використані пластини із ПКНБ типу RNMN (діаметром 9,52 мм та товщиною 3,97 мм), які встановлювались в фрезу типу «летючка» з механічним кріпленням, що забезпечує такі геометричні параметри різальної частини – передній кут  $\gamma = -10^{\circ}$ , задній кут  $\alpha = 10^{\circ}$ . Порівняння працездатності проводилось з твердосплавним інструментом ВК8 з покриттям ТіN та пластинами із ПКНБ виробництва КНР.

Умови проведення обробки та показники працездатності інструменту оснащеного досліджуваними пластинами приведені у табл. 1.

Інструмент	Режими різання			Т	h	÷
	ν, м/хв	<i>S</i> , мм/зуб	<i>t</i> , мм	7, ХВ	<i>и</i> <sub>3</sub> , ММ	у, мкм/хв
Пластини ПКНБ		0,12	0,02	30	0,2	6,66
Пластини ВК8 (TiN)	515			12	0,5	41,66
Пластини із ПКНБ (КНР)				30	0,3	10,00
Пластини ПКНБ	620			30	0,25	8,33
Пластини ВК8 (TiN)		0,12	0,02	12	0,7	58,33
Пластини із ПКНБ (Китай)				30	0,4	13,33

Таблиця 1. Результати випробувань різальних пластин із ПКНБ при фрезеруванні чавуну СЧ 21-40 (НВ 240)

(Позначення: v – швидкість різання (м/хв.); S – подача (мм/зуб); t – глибина різання (мм); T – час точіння (стійкість інструменту) (хв.); h<sub>2</sub> – ширина фаски зносу по задній поверхні інструменту (мм); j – швидкість зношування інструменту (мкм/хв.)

В результаті проведених випробувань встановлено, що розроблені в ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України різальні пластини із ПКНБ дозволяють проводити високоефективну фрезерну обробку чавуну СЧ 21-40 із збільшенням стійкості інструменту в порівнянні із твердосплавним пластинами ВК8 (TiN) на 84% та в порівнянні із ПКНБ виробництва КНР на 44% при швидкості різання 515 м/хв.

Зі збільшенням швидкості різання до 620 м/хв. розроблені різальні пластини із ПКНБ дозволяють підвищити стійкість в порівнянні із пластинами ВК8 (TiN) на 65% та на 38% в порівнянні із пластинами із ПКНБ виробництва КНР.

Від ІНМ НАН України: «Немирів-Авто» ФОП Глиняний С. В. К.т.н., с.н.с. від. №18 Директор оба - пі Сарняний С. В. Мельнійчук Ю.А Глиняний К.т.н. н.с. від. №18 Сергій Вікторович Клименко С.А. 48521267 М.н.с. від. №18 ниька Чумак А. О.

Un

## Додаток Г



ЗАТВЕРДЖУЮ ПрАТ «КЗ«Трубосталь» трубний головний технолог Фещенко М. В. 21 липня 2020р.

АКТ

#### випробування різальних пластин із ПКНБ при обробці прокатних валків із загартованої нержавіючої сталі X12

Даний акт складено на предмет того, що розроблені в ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України за вдосконаленою технологією різальні пластини із ПКНБ, пройшли промислові випробування в умовах підприємства ПрАТ «КЗ«Трубосталь» (м. Коростень).

Випробування проводились при точінні прокатних валків на токарному верстаті 1М63, оброблюваний матеріал – загартована нержавіюча сталь X12 твердістю HRC 60-64, діаметр оброблюваної деталі 420 мм.

Були використані пластини із ПКНБ типу RNMN 070300 (діаметр 7,00 мм товщиною 3,18 мм) та RNMN09T300 (діаметр 9,52 мм та товщиною 3,18 мм), які встановлювались в державку з механічним кріпленням різальних пластин, що забезпечує такі геометричні параметри різальної частини – передній кут  $\gamma = -10^{\circ}$ , задній кут  $\alpha = 10^{\circ}$ . Порівняння працездатності проводилось із вставками із ПНТМ «Ельбор».

Умови проведення обробки та показники працездатності інструменту оснащеного досліджуваними пластинами приведені у табл. 1.

Інструмент	Режими різання			T	1	
	<i>v</i> , м/хв	<i>S</i> , мм/об	<i>t</i> , мм	<i>1</i> , ХВ	<i>п</i> <sub>3</sub> , ММ	<i>J</i> , мкм/хв
Пластини ПКНБ				60	0,25	4,16
Вставки «Ельбор»	90	0,12	0,12 0,4 60 0,65	0,65	10,83	
Пластини ПКНБ	120			46	0,30	6,52
Вставки «Ельбор»		0,12	0,4	46	0,80	17,39

# Таблиця 1. Результати випробувань різальних пластин із ПКНБ при точінні прокатних валків X12 (HRC 60-64)

(Позначення: v — швидкість різання (м/хв.); S — подача (мм/об); t — глибина різання (мм); T — час точіння (стійкість інструменту) (хв.);  $h_2$  — ширина фаски зносу по задній поверхні інструменту (мм); j — швидкість зношування інструменту (мкм/хв.)

В результаті проведених випробувань встановлено, що розроблені за вдосконаленою технологією в ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України різальні пластини із ПКНБ дозволяють проводити високоефективну токарну обробку прокатних валків із загартованої сталі X12 зі збільшенням стійкості інструменту в порівнянні із вставками із ПНТМ «Ельбор» у 3 рази із забезпеченням відповідної якості обробленої поверхні.

#### Від ІНМ НАН України:

Від ПрАТ «КЗ«Трубосталь»:

К.т.н., с.н.с. від. №18

CUMP 🖉 Мельнійчук Ю.А

К.т.н. н.с. від. №18

Клименко С.А.

М.н.с. від. №18

N

Чумак А. О.

Головний технолог

Фещенко М. В.

.

## Додаток Д

3ATBEP/19/		ЗАТВЕРЛЖУЮ
ІНМ ім. В.М. Бакудя НАМ України		ТЛВ «Коростенський шебзавод»
заступник директора		начальник РМЦ
д.т.н., проф Клименко СА		Тарханов В. В.
26 листопала 2020 р.		26 листопада 2020р. 6679
		Sall3Hu4HHH Kod 0013
CITOHI RULL		ЕДРПОУ 01374307
AH * M	AKT	

#### випробування різальних пластин із ПКНБ при фрезеруванні корпусів дробарок із легованої конструкційної сталі HARDOX 450

Даний акт складено на предмет того, що розроблені в ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України за вдосконаленою технологією різальні пластини із ПКНБ, пройшли промислові випробування в умовах підприємства ТДВ «Коростенський щебзавод» (м. Коростень).

Випробування проводились при фрезеруванні корпусної деталі на фрезерному верстаті 6Р83Ш, оброблюваний матеріал – легована, конструкційна сталь HARDOX твердістю 450 НВ, яка характеризується високою ударною в'язкістю та стійкістю до абразивного стирання.

Були використані пластини із ПКНБ типу та RNMN09T300T (діаметр 9,52 мм та товщиною 3,97 мм із зміцнюючою фаскою 0,2х20°), які встановлювались в фрезу з механічним кріпленням різальних пластин, що забезпечує такі геометричні параметри різальної частини – передній кут  $\gamma = -10^\circ$ , задній кут  $\alpha = 10^\circ$ . Порівняння працездатності проводилось із пластинами із ПКНБ «Композит 10» та твердим сплавом ВК8.

Умови проведення обробки та показники працездатності інструменту оснащеного досліджуваними пластинами приведені у табл. 1.

Інструмент	Режими різання			T	h	i
	<i>v</i> , м/хв	<i>S</i> , мм/зуб	<i>t</i> , мм	1, ХВ	<i>н</i> <sub>3</sub> , ММ	мкм/хв
Пластини ПКНБ	90	0,05		40	0,20	5,00
Пластини ПКНБ «Композит 10»			0,4	40	0,30	7,50
Твердий сплав ВК8				40	0,45	11,25
Пластини ПКНБ				35	0,25	7,50 11,25 7,14
Пластини ПКНБ «Композит 10»	120	0,05	0,4	35	0,35	10,00
Твердий сплав ВК8				35	0,60	17,14

#### Таблиця 1. Результати випробувань різальних пластин із ПКНБ при фрезеруванні корпусної деталі із сталі НАRDOX 450

(Позначення: v – швидкість різання (м/хв.); S – подача (мм/об); t – глибина різання (мм); T – час точіння (стійкість інструменту) (хв.); h<sub>3</sub> – ширина фаски зносу по задній поверхні інструменту (мм); j – швидкість зношування інструменту (мкм/хв.) В результаті проведених випробувань встановлено, що розроблені в ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України різальні пластини із ПКНБ дозволяють проводити фрезерну обробку корпусних деталей із сталі НАRDOX 450 зі збільшенням стійкості інструменту в порівнянні із пластинами із ПКНБ «Композит 10» на 34% та на 71 % в порівнянні із різальними пластинами із твердого сплаву ВК8 при швидкості різання 90 м/хв. та на 29% і 59% в порівнянні із пластинами із ПКНБ «Композит 10» на 34% га на 71 % в порівнянні в різальними пластинами із твердого сплаву ВК8 при швидкості різання 90 м/хв. та на 29% і 59% в порівнянні із пластинами із ПКНБ «Композит 10» та твердим сплавом ВК8 відповідно, при швидкості різання 120 м/хв. із забезпеченням відповідної якості обробленої поверхні.

Від ІНМ НАН України:

Від ТДВ «Коростенський щебзавод»

к.т.н., с.н.с. від. №18 C Мельнійчук Ю.А

Начальник РМЦ

к.т.н., с.н.с. від. №18

Клименко С.А.

м.н.с. від. №18

Чумак А. О.

начальнитарханов В. В. Тарханов Віктор васильович