

В. І. ЛАВРІНЕНКО, В. Ю. СОЛОД, В. А. ТИЩЕНКО**СУЧАСНІ ДОСЛІДЖЕННЯ В ТЕХНОЛОГІЯХ АБРАЗИВНОЇ ОБРОБКИ ТВЕРДИХ ТА КРИХКИХ ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ФОРМУВАННЯ ПОКАЗНИКІВ ШОРСТКОСТІ ЇХ ПОВЕРХОНЬ**

Аналіз літературних даних засвідчив, що пластичні і крихкі матеріали мають різні механізми формування стружки і, як наслідок, різні механізми утворення шорсткості обробленої поверхні. Крім того, сучасні закордонні дослідники приділяють належну увагу поліруванню твердих сплавів і якісній різальній кромці. Показано, що із збільшенням твердості твердого сплаву шорсткість його поверхні зменшується. Це підтверджено, як на одному сплаві, так і для сукупності твердих сплавів. Причому показник R_{max} очікувано зменшується із зменшенням показника R_a , а ось поведінка відношення показників R_{max}/R_a є неочікуваною і із підвищенням твердості твердих сплавів воно зростає. Встановлено, що при шліфуванні шаруватих пластини, у яких сполучається різальна кераміка BOK71 та безвольфрамовий твердий сплав TN20, на кераміці фіксується більша шорсткість. Причому і тут на більш твердій кераміці фіксується і більше відношення R_{max}/R_a , як і на твердих сплавах, що свідчить про наявність на цих крихких матеріалах формування більшої кількості прихованих подряпин. Виявлено, що як тільки зерно КНБ проходить загартовану сталь і попадає на незагартовану, то дещо збільшується показник R_a , а ось показник R_{max} зростає суттєво. У значній мірі це викликане саме бічними ефектами (навалами), які виникають при русі зерен у масиві м'якого матеріалу. Це підтверджується і тим, що крок нерівностей S_m залишається незмінним при переході руху зерен КНБ з загартованої частини на незагартовану.

Ключові слова: твердий сплав, кераміка, крихкі матеріали, пластичні матеріали, показники шорсткості, твердість, інструментальний матеріал.

V. I. LAVRINENKO, V. Yu. SOLOD, V. A. TYSHCHENKO**MODERN RESEARCH IN THE TECHNOLOGIES OF ABRASIVE PROCESSING OF HARD AND FRAGILE TOOL MATERIALS AND DETERMINATION OF THE FEATURES OF THE FORMATION OF THE ROUGHNESS INDICATORS OF THEIR SURFACES**

The analysis of literature data proved that plastic and brittle materials have different mechanisms of chip formation and, as a result, different mechanisms of roughness of the treated surface. In addition, modern foreign researchers pay due attention to the polishing of hard alloys and a high-quality cutting edge. It is shown that with an increase in the hardness of a hard alloy, the roughness of its surface decreases. This is confirmed both on one alloy and for a set of hard alloys. Moreover, the R_{max} indicator decreases as expected with a decrease in the R_a indicator, but the behavior of the R_{max}/R_a indicator ratio is unexpected and increases as the hardness of hard alloys increases. It was established that when grinding layered plates, in which cutting ceramics VOK71 and tungsten-free hard alloy TN20 are combined, a higher roughness is recorded on the ceramics. And here, too, a larger R_{max}/R_a ratio is recorded on harder ceramics, as well as on hard alloys, which indicates the presence of the formation of a larger number of hidden scratches on these fragile materials. It was found that as soon as the cBN grain passes through the hardened steel and hits the unhardened one, the R_a indicator increases slightly, while the R_{max} indicator increases significantly. To a large extent, this is caused by the side effects (clumps) that occur during the movement of grains in a mass of soft material. This is also confirmed by the fact that the step of S_m irregularities remains unchanged when the movement of the cBN grains changes from the hardened part to the unhardened part.

Key words: hard alloy, ceramics, brittle materials, plastic materials, roughness indicators, hardness, tool material.

Вступ. Практикою інструментального виробництва та застосування різального інструменту у промисловості доведено, що для досягнення ефективного та економного використання цього сучасного високоякісного інструменту треба не тільки забезпечити високоякісну шліфовану їх поверхню, але і мати доведену різальну кромку. Це є однаковою як для інструменту з швидкорізальних сталей, коли необхідно уникнути небажаних задирок на різальному лезі, так і для твердих сплавів, керамік та надтвердих керамік, коли необхідно уникати викришування на кромці. Досягнути цього можливо не тільки шліфуванням, а і навіть поліруванням різальної кромки, коли шорсткість передньої та задньої поверхонь інструменту доводиться до R_a 0,05 мкм, а і навіть менше, що значно підвищує зносостійкість різального інструменту та якість обробленої ним поверхні. На важливість мати доведені поверхні різальних інструментів, а відтак і різальні кромки, вказували ще 50 років тому вітчизняні дослідники: Бакуль В.М., Захаренко І.П., Шепелев А.О., Грабченко А.І., Матюха П.Г. та ін. [1]. Разом з тим, нині в різальних інструментах можливе сполучення різних інструментальних матеріалів, в т.ч. пластичних та крихких. Тому, ми в даній статті і звернемо увагу на сучасні дослідження закордонних дослідників в цьому напрямку, та як це корелюється із нашими дослідженнями, що і було метою цієї статті.

Аналіз літератури. В статті [2] звертається увага на те, що пластичні і крихкі матеріали мають різні механізми формування стружки. В пластичному матеріалі стружкоутворення відбувається еластично і пластично деформується до досягнення критичної товщини стружки, а надалі утворюється стружка і відсікається від заготовки. Для крихкого матеріалу процес стружкоутворення також починається з пружної і пластичної деформації, але з-за властивостей матеріалу ця фаза є набагато меншою, ніж пластичне стружкоутворення. В цій роботі розглянуті питання виготовлення шліфувальних кругів методом адитивного виробництва. Помітне поліпшення характеристик шліфування було досягнуто за рахунок застосування термостійкої зв'язки. Встановлено, що застосування зв'язки з більш високими механічними і термічними характеристиками дозволяє забезпечити гарне утримання зерна при підвищених температурах, що сприяє зменшенню сили шліфування (до 58 % та 18 % для м'яких і твердих металів відповідно).

Перехід від пластичного до крихкого в режимі різання є важливим явищем у надточній обробці та обробці поверхні крихких матеріалів. Використовуючи нещодавно розроблений метод молекулярної динаміки, в роботі [3] досліджено вплив глибини різання на режим різання та еволюцію шорсткості. Моделювання демонструє, що модель перехідної глибини різання (transitional depth of cut – TDoC) точно передбачає механізми видалення матеріалу, на які впливають як властивості матеріалу, так і глибина різання. Коли глибина різання збільшується, робочий механізм переходить від утворення зубчастої стружки, спричиненого зсувом, до розколювання стружки (рис. 1). Дослідження середньоквадратичної шорсткості демонструє, що шорсткість є прямим результатом механізму утворення стружки і, як правило, вища, коли відбувається поломка стружки.

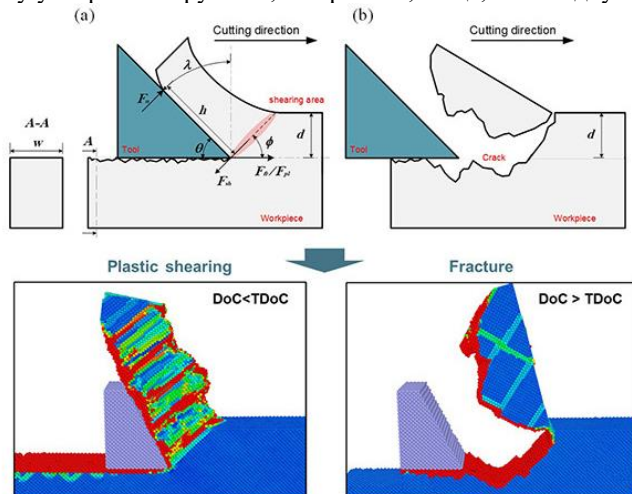


Рис. 1 – Механізми стружкоутворення та утворення шорсткості для пластичних і крихких матеріалів при моделюванні методом молекулярної динаміки [3]

Наведене вище у значній мірі відноситься і до твердих сплавів. Обробка поверхні твердого сплаву до атомарного рівня є давньою задачею в сфері виробництва і обробки матеріалів [4]. Для отримання якісних виробів з твердого сплаву в даній статті пропонується новий процес «хімічної поліровки з потовщенням зрушенням» (chemistry enhanced shear thickening polishing' (C-STP)) із застосуванням реагенту Фентона для отримання кінцевої поліровки розміром меншим 10 нм зі швидкістю, що вдвічі перевищує швидкість звичайного STP. На рис. 2 наведений механізм видалення матеріалу з сплаву карбід вольфраму–кобальт з суспензією Fenton в процесі C-STP.

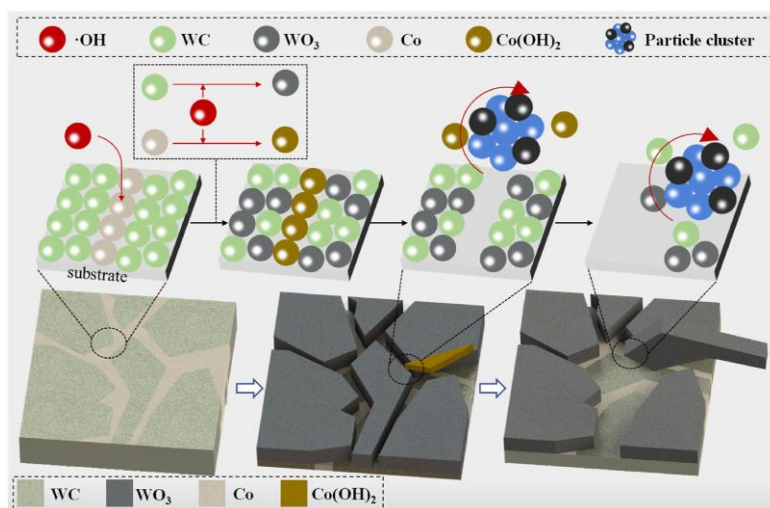


Рис. 2 – Механізм видалення матеріалу з сплаву карбід вольфраму з кобальтом методом C-STP з реагентом Фентона [4]

На першому етапі елемент Co на поверхні сплаву карбід вольфраму з кобальтом спочатку окислюється до Co(OH)_2 за рахунок сильного окислювача $\cdot\text{OH}$, оскільки він має більш низький реакційний потенціал, ніж WC. В подальшому деяка частина WC окислюється до WO_3 . Крім того, реакційний шар, що утворюється на верхній поверхні, є рихлим, що означає, що його легше видалити, ніж сплав карбіду вольфраму і кобальту. На другому етапі завдяки абразивним частинкам Co(OH)_2 на поверхневому шарі твердого сплаву швидко

видаляється. На третьому етапі видаляється елемент Co, який є зв'язуючою фазою в твердому сплаві. Між твердою фазою WC зникають зв'язки, тому зерна WC і його рихлі оксиди відносно легко видаляються абразивними частинками. Як наслідок, свіжа поверхня знову оголюється, що може прискорити реакцію окислення, а синергія як хімічної, так і механічної дії підвищує ефективність поліровки твердого сплаву [4]. Мікросвердла (Shenzhen Jinzhou Precision Technology Co., Китай) з твердого сплаву YG-6 були вибрані для перевірки застосування C-STP з реагентом Фентона. На рис. 3 (а) представлена структура форми кромки мікросвердла після шліфування діаметром 0,4 мм, на ріжучій кромці якого чітко спостерігаються численні дефекти. Для вирішення цієї проблеми були використані методи STP та C-STP для поліровки мікросвердла протягом 3 хв. Після 3 хв. STP на ріжучій кромці все ще залишається деяка стружка і сліди шліфівки на передній поверхні. Мікросвердло після 3 хв. C-STP (із застосуванням реагенту Фентона, в % за масою: 0,1 H_2O_2 та 0,6 FeSO_4) показане на рис. 3 (б), де видно, що різальна кромка повністю згладжена, а сліди шліфівки на передній поверхні усунені. Запропонований процес C-STP допоміг знизити шорсткість поверхні твердого сплаву з вихідного значення $Sa\ 120\pm 10\ \text{nm}$ до $8,4\pm 0,5\ \text{nm}$ менш ніж за 9 хв. Усунення мікродфектів на різальній кромці дозволяє, знизити інтенсивність її зношування і підвищити надійність та продуктивність процесу різання [4].

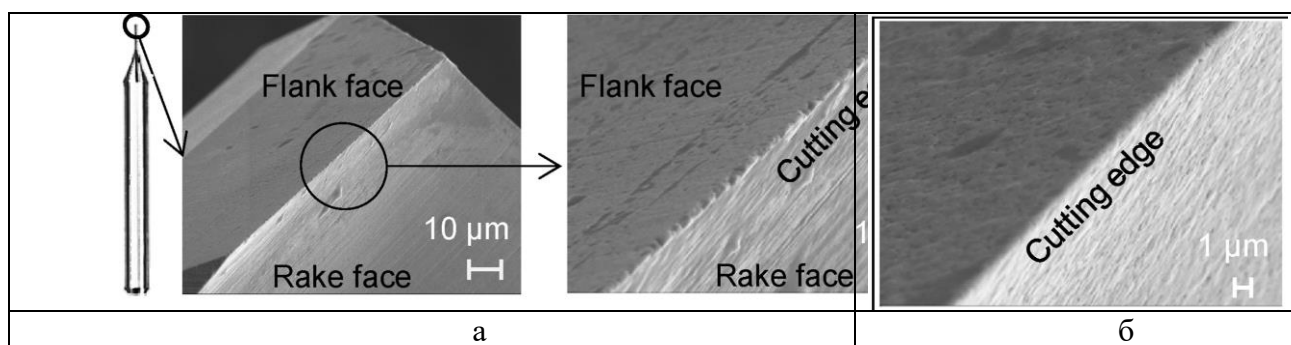


Рис. 3 – Порівняння різальної кромки мікросвердла: (а) різальна кромка без поліровки, (б) поліровка суспензією C-STP [4]

В статті [5] розроблений абразивний круг для твердофазного хіміко-механічного полірування (SPCMP) і ефективного заточування різальної кромки твердосплавного інструменту (WC-Co). Вимірювання методом дифракції рентгенівських променів і дифракції зворотного розсіяння електронів показали, що метод SPCMP видаляє приховані подряпини з поверхні матеріалів WC-Co, нанесені алмазним кругом. На рис. 4 показана взаємодія між різальним інструментом і заготовкою під час процесу різання.

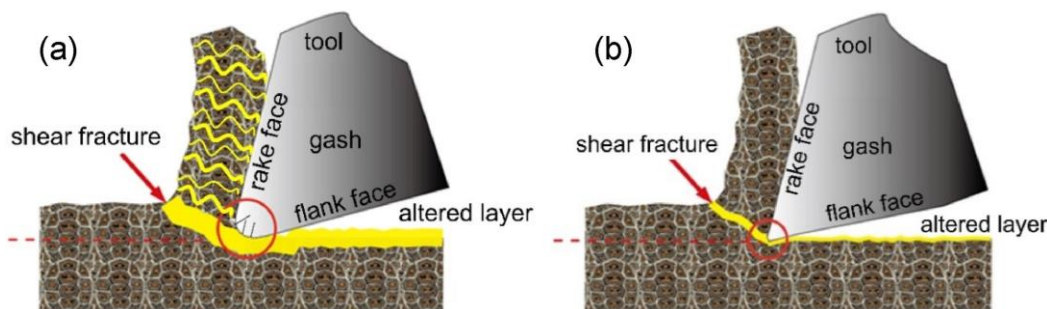


Рис. 4 – Різання комерційним інструментом (а) і інструментом з кромкою, заточеною по запропонованій у дослідженні [5] технології (б): (а) заготовка суттєво змінюється інструментом в процесі різання, (б) заготовка демонструє незначні зміни під час різання

При спостереженні у електронному мікроскопі різальні кромки комерційних інструментів мають істотні нерівності, а це збільшує площу контакту з заготовкою і опір різанню. Нерівність різальної кромки також впливає на підвищення температури під час різання, а поверхня заготовки піддається підвищеній деформації за рахунок незадовільної форми різальної кромки, що ще більше збільшує нерівність обробленої поверхні. Запропонований в роботі [5] спосіб заточки різальної кромки призваний зменшити площу контакту з заготовкою і опір різанню, а відтак зменшує механічну деформацію обробленої поверхні. Розроблений шліфувальний круг SPCMP діаметром 100 мм був виготовлений на фенольному зв'язуючому із застосуванням абразиву – зеленого карбіду кремнію (GC). Круг SPCMP був виготовлений таким чином, щоби уникнути при обробці твердого сплаву переходу фази WC в фазу W_2C , та спровокувати окислення фази WC і її видалення за допомогою GC. При різанні інструментами WC-Co з гострими різальними кромками, заточеними обробкою

SPCMP, опір різанню був низьким, а степінь зносу зменшилася. Крім того, швидкість різання інструментів WC–Co при різанні Ti–6Al–4V і Inconel 718 після заточки різальної кромки кругом SPCMP була приблизно в два рази вищою, аніж до SPCMP. Встановлено, що різання жароміцних сплавів інструментом WC–Co з гострою різальною кромкою приводить до структурних дефектів тільки поблизу поверхні, а кристалічна структура зберігається на певній глибині від поверхні [5]. Карбід вольфраму без зв'язуючого (B-WC) – твердий і крихкий керамічний матеріал, який в основному використовується для виготовлення точних прес-форм, але він незадовільно піддається точній та високоефективній полірувці. В статті [6] для вирішення цього застосований інструмент з напівжорсткою кришкою (SRB) радіусом 40 мм. Він складається з трьох шарів. Зовнішній і внутрішній шари є резиновими мембранами з твердістю за Шором 75 HA. Середній шар виконаний з листа нержавіючої сталі товщиною 0,3 мм, що дозволяє підвищити жорсткість інструмента і зберегти певну гнучкість. Зовнішня резинова плівка вкрита полірувальною подушкою. Відзначається, що шорстка поверхня підкладок B-WC перетворилася на дзеркальну вже після 2,5 хвилин полірування. А шорсткість поверхні в *Sa* була зменшена з 104 нм в середньому до 3,7 нм. Крім того, глибокі сліди від шліфувального інструменту були ефективно видалені, залишивши лише нанометричні подряпини від полірувального абразиву.

Тепер розглянемо особливості алмазної обробки пластичних матеріалів. Велика пластичність м'яких металів ускладнює досягнення високої якості поверхні при надточній обробці. У статті [7] проводилися експерименти з надточної механічної обробки полікристалічного олова та досліджувалися фактори, включаючи радіус верхньої частини інструмента, параметри різання та властивості матеріалу, що впливають на шорсткість поверхні при однокривковому алмазному точінні (single-point diamond turning – SPDT). Монокристалічні алмазні інструменти з радіусами різальної кромки 0,023, 0,209 і 1,130 мм використовувалися для дослідження впливу радіуса кромки інструмента на шорсткість поверхні в SPDT. Швидкість подачі і глибина різання в досліді були сталими. Створено модель прогнозування шорсткості поверхні олова при SPDT, яка враховує мінімальну недеформовану товщину стружки, бічний потік, анізотропію та крок межі зерен. Експерименти показують, що максимальна помилка передбачення цієї моделі прогнозування становить 6,51%. Середня арифметична висота *Ra*, розрахована за цією моделлю становить 1,13, 0,13 і 0,02 нм. Таким чином, шорсткість поверхні повинна зменшуватися зі збільшенням радіуса вершини інструмента за тих же параметрів обробки.

На закінчення цього огляду звернемо увагу на вплив геометрії алмазного зерна на особливості обробки. Для монокристалічної міді вивчений процес надшвидкісного наноскрайбування V-подібних канавок алмазами з різними передніми кутами [8]. Для нас тут є цікавим, як саме геометрія алмазу може вплинути на формування навалів (нерівної висоти канавки) в оброблюваному монокристалічному матеріалі. Було визначено, що на явище нерівної висоти з обох боків V-подібної канавки впливає передній кут алмазних зерен з вивченого діапазону: -20° , -10° , 0° , 10° та 20° . Встановлено, що шліфування з позитивним переднім кутом дозволяє отримати V-подібний поперечний переріз з однаковою висотою з обох боків (рис. 5). Разом з тим, наявність формування навалів на пластичному матеріалі буде впливати на показники шорсткості оброблюваної міді.

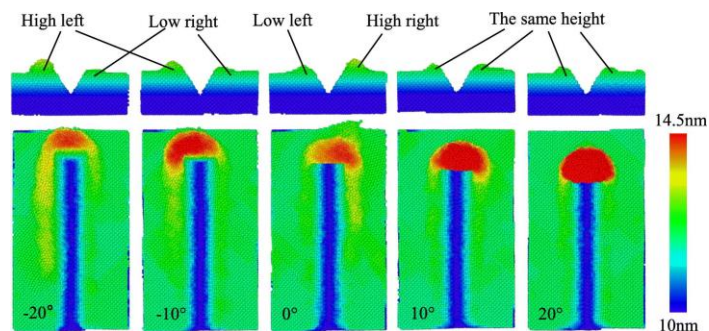


Рис. 5 – V-подібні канавки руху зерна при дослідженні надшвидкісного наноскрайбування монокристалічної міді алмазними зернами з різними передніми кутами [8]

Результати дослідження. Враховуючи мету нашого дослідження, нами були проаналізовані експериментальні дані шорсткості обробленої поверхні за параметром *Ra* при шліфуванні твердих сплавів.

При цьому нами встановлено, що шорсткість шліфованої поверхні твердих сплавів має певний кореляційний зв'язок з їхніми фізичними властивостями. Так, із зростанням густини та коерцитивної сили твердих сплавів шорсткість збільшується:

$$Ra = 1/(2,204 + 5,87 \cdot 10^5 e^{-\rho}), \quad Ra = 0,208 + 1,068 \cdot 10^{-2} K_c.$$

Із підвищенням твердості, міцності під час згинання та величини зерен карбідної фази шорсткість зменшується:

$$Ra = 3,72-3,74 \cdot 10^{-2} H_{mc}, \quad Ra = 0,4004-1,96 \cdot 10^{-5} R_{bm}, \quad Ra = 0,555-0,146 Z_{mc}.$$

Наведені залежності дозволяють у цілому прогнозувати напрямок зміни показника шорсткості поверхні, що шліфується, особливо у тих випадках, коли піддається обробці широка номенклатура сплавів в умовах дрібносерійного виробництва.

З наведеного вище нас більше зацікавила залежність шорсткості шліфованої поверхні від твердості твердих сплавів, оскільки це найбільш легко контрольований показник, у порівнянні із наведеними іншими, властивостями. Перевірку вказаної вище тенденції зменшення показника Ra із збільшенням твердості твердих сплавів зроблена нами на одному твердому сплаві ТТ21К9 при шліфуванні з охолодженням кругом 12А2-45° 150х10х3х32 – АС4МА 63/50–В1-11П-2–125 з продуктивністю 480 мм³/хв. Пластини твердого сплаву з діапазону твердостей 90,5–92,0 HRA були поділені на три групи за твердістю і була визначена для кожного діапазону шорсткість обробленої поверхні (табл. 1).

Таблиця – Показники шорсткості обробленої поверхні при шліфуванні твердого сплаву ТТ21К9 різної твердості

Діапазон твердостей, HRA	Показники шорсткості, мкм		
	Ra	R_{max}	R_{max}/Ra
90,5 – 90,9	0,28	1,81	6,5
91,0 – 91,4	0,23	1,67	7,3
91,5 – 92,0	0,20	1,51	7,6

Аналіз даних таблиці свідчить про те, що із збільшенням твердості твердого сплаву шорсткість зменшується. Тобто і на одному сплаві підтверджено, те що нами було виявлено для сукупності твердих сплавів. Тепер звернемо увагу на інший показник шорсткості – R_{max} та на поведінку відношення показників R_{max}/Ra . Показник R_{max} – найбільша висота профілю, очікувано зменшується із зменшенням показника Ra , а ось поведінка величини відношення є неочікуваною і із підвищенням твердості твердих сплавів воно зростає. Це підтверджує висновки робіт [4–6], що на твердому сплаві при алмазній обробці виникають приховані подряпини і, як бачимо по зростанню показника відношення (див. табл.), чим сплав є твердішим, тим відношення є більшим.

Тепер розглянемо як змінюються показники шорсткості, коли у нас шліфуванню піддаються шаруваті пластини, у яких сполучається різальна кераміка ВОК71 та безвольфрамовий твердий сплав (БВТС) ТН20. Дослідженню піддавалася тришарова пластина марки ВОК85С з чергуванням шарів: кераміка–БВТС–кераміка при шліфуванні з продуктивністю 600 мм³/хв. Встановлено для двох випадків застосування алмазних кругів: із зернистістю алмазів АС4 100/80 шорсткість шарів за параметром Ra складала в мкм 0,19 – 0,18 – 0,22, а із зернистістю АС6 250/200 складала 0,90 – 0,75 – 0,89 мкм. Як бачимо в обох випадках шорсткість на шарі БВТС була дещо меншою, за шорсткість шарів на кераміці. Для порівняння розглядалося шліфування двошарової пластини ВОК95С, у якій сполучається два шари – різальна кераміка ВОК71 та БВТС, з продуктивністю 480 мм³/хв. та зернистістю алмазів АС4 125/100. Встановлено, що на кераміці показники шорсткості склали: Ra – 0,30 мкм, R_{max} – 2,48 мкм, а відношення R_{max}/Ra склало 8,3. На шарі БВТС показники шорсткості склали: Ra – 0,25 мкм, R_{max} – 1,71 мкм, а відношення R_{max}/Ra склало 6,8. Як бачимо і тут на більш твердій кераміці (93 HRA) фіксується і більше відношення R_{max}/Ra , що свідчить про наявність на крихкій кераміці отих прихованих подряпин. А ось більша шорсткість на кераміці пояснюється тим механізмом утворення шорсткості на крихких матеріалах, який викладений вище у посиланні [3].

Насамкінець розглянемо обробку сталевих пластин, коли у нас є сполучення загартованої сталі 9ХФ (HRC 54–56) та м'якої незагартованої сталі 10 (твердість 74–75 HRB). Шліфування відбувалося кругом 12А2-45° 150х20х3х32 – КР 160/125 МО20-2 100 з охолодженням та продуктивністю 1100 мм³/хв. На відміну від обробки твердих та крихких матеріалів, наведених вище, тут на більш твердій сталі отримано менші показники шорсткості: Ra – 0,72 мкм, R_{max} – 3,42 мкм, а відношення R_{max}/Ra склало 4,8. На м'якій сталі 10 показники шорсткості, при руху зерен КНБ із загартованої сталі на незагартовану, склали: Ra – 0,85 мкм, R_{max} – 7,5 мкм, а відношення R_{max}/Ra склало 8,8. Як бачимо, що як тільки зерно КНБ проходить загартовану сталь і попадає на негартовану, то дещо збільшується показник Ra , а ось показник R_{max} зростає суттєво. У значній мірі це викликано саме бічними ефектами (навалами), які виникають при русі зерен у масиві м'якого матеріалу, що підкреслено у статтях [7, 8]. Це підтверджується і тим, що крок нерівностей S_m залишається незмінним при переході руху зерен КНБ на загартованій частині, так і на незагартованій, і склав 136 мкм.

Висновки. Внаслідок наведеного вище, можливо зробити наступні висновки.

1. Аналіз літературних даних засвідчив, що пластичні і крихкі матеріали мають різні механізми формування стружки і, як наслідок, різні механізми утворення шорсткості обробленої поверхні. Крім того, сучасні закордонні дослідники приділяють належну увагу поліруванню твердих сплавів і якісній різальній кромці.

2. Показано, що із збільшенням твердості твердого сплаву шорсткість зменшується. Це підтверджено, як на одному сплаві, так і для сукупності твердих сплавів. Причому показник R_{max} очікувано зменшується із зменшенням показника R_a , а ось поведінка величини відношення показників R_{max}/R_a є неочікуваною і із підвищенням твердості твердих сплавів воно зростає.
3. Встановлено, що при шліфуванні шаруватих пластини, у яких сполучається різальна кераміка ВОР71 та безвольфрамовий твердий сплав (БВТС) ТН20, на кераміці фіксується більша шорсткість. Причому і тут на більш твердій кераміці (93 HRA) фіксується і більше відношення R_{max}/R_a , як і на більш твердих сплавах, що свідчить про наявність на цих крихких матеріалах формування більшої кількості прихованих подряпин.
4. Виявлено, що як тільки зерно КНБ проходить загартовану сталь і попадає на незагартовану, то дещо збільшується показник R_a , а ось показник R_{max} зростає суттєво. У значній мірі це викликане саме бічними ефектами (навалами), які виникають при русі зерен у масиві м'якого матеріалу. Це підтверджується і тим, що крок нерівностей S_m залишається незмінним при переході руху зерен КНБ з загартованої частини на незагартовану.

Список літератури

1. Научные технологические школы в развитии современного производства: научно-информационное издание / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и В.А. Жовтобрюха. // Новиков Ф.В., Жовтобрюх В.А., Лавриненко В.И. и др. – Днепр : ЛИРА, 2021. – 436 с.
2. Mohsen Barmouz, Felix Steinhäuser, Bahman Azarhoushang, Jahangir Khosravi. Influence of bond thermal and mechanical properties on the additively manufactured grinding wheels performance: Mechanical, wear, surface integrity, and topography analysis. *Wear*. Volumes 538–539, 15 February 2024, 205215. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.205215>
3. Wenbin Zheng, Li Ma, Shiyuan Pei, Ramin Aghababaei. Numerical assessment of transition in cutting mode and its effect on roughness creation. *International Journal of Mechanical Sciences*. Volume 261, 1 January 2024, 108666. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2023.108666>
4. Mechanism of material removal in tungsten carbide-cobalt alloy during chemistry enhanced shear thickening polishing / Jiahuan Wang, Zewei Tang, Saurav Goel, et al. *Journal of Materials Research and Technology*. Volume 25, July–August 2023, Pages 6865–6879. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.07.112>
5. Yayoi Tanaka, Hisashi Sato, Osamu Eryu. Improved cemented carbide tool edge formed by solid phase chemical–mechanical polishing. *Journal of Materials Research and Technology*. Volume 20, September–October 2022, Pages 606–615. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.07.077>
6. Theoretical and experimental investigation of material removal in semi-rigid bonnet polishing of binderless tungsten carbide / Xiaolong Ke, Wei Wu, Chenchun Shi, Kangsen Li, et al. *Journal of Materials Research and Technology*. Volume 24, May–June 2023, Pages 1597–1611. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.03.090>
7. Zhifu Xue, Min Lai, Feifei Xu, Fengzhou Fang. Influence factors and prediction model of surface roughness in single-point diamond turning of polycrystalline soft metal. *Journal of Materials Processing Technology*. Volume 324, March 2024, 118256. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2023.118256>
8. Longzhou Dai, Genyu Chen, Zizhao Shan. Study on ultra-high speed nano-grinding of monocrystalline copper with V-shaped diamond abrasive grains based on molecular dynamics method. *Diamond and Related Materials*. Volume 111, January 2021, 108224. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2020.108224>

References (transliterated)

1. Scientific technological schools in the development of modern production: scientific and information publication / Under the total. ed. F.V. Novikova and V.A. Szovtobruha / Novikov F.V., Szovtobruh V.A., Lavrinenko V.I. et al. – Dnepr : LIRA, 2021. – 436 p.
2. Mohsen Barmouz, Felix Steinhäuser, Bahman Azarhoushang, Jahangir Khosravi. Influence of bond thermal and mechanical properties on the additively manufactured grinding wheels performance: Mechanical, wear, surface integrity, and topography analysis. *Wear*. Volumes 538–539, 205215. (2024). <https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.205215>
3. Wenbin Zheng, Li Ma, Shiyuan Pei, Ramin Aghababaei. Numerical assessment of transition in cutting mode and its effect on roughness creation. *International Journal of Mechanical Sciences*. Volume 261, 108666. (2024) <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2023.108666>
4. Mechanism of material removal in tungsten carbide-cobalt alloy during chemistry enhanced shear thickening polishing / Jiahuan Wang, Zewei Tang, Saurav Goel, et al. *Journal of Materials Research and Technology*. Volume 25, Pages 6865–6879. (2023) <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.07.112>
5. Yayoi Tanaka, Hisashi Sato, Osamu Eryu. Improved cemented carbide tool edge formed by solid phase chemical–mechanical polishing. *Journal of Materials Research and Technology*. Volume 20, Pages 606–615. (2022) <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.07.077>
6. Theoretical and experimental investigation of material removal in semi-rigid bonnet polishing of binderless tungsten carbide / Xiaolong Ke, Wei Wu, Chenchun Shi, Kangsen Li, et al. *Journal of Materials Research and Technology*. Volume 24, Pages 1597–1611. (2023) <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.03.090>
7. Zhifu Xue, Min Lai, Feifei Xu, Fengzhou Fang. Influence factors and prediction model of surface roughness in single-point diamond turning of polycrystalline soft metal. *Journal of Materials Processing Technology*. Volume 324, 118256. (2024) <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2023.118256>
8. Longzhou Dai, Genyu Chen, Zizhao Shan. Study on ultra-high speed nano-grinding of monocrystalline copper with V-shaped diamond abrasive grains based on molecular dynamics method. *Diamond and Related Materials*. Volume 111, 108224. (2021) <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2020.108224>

Надійшла (received) 07.01.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Лаврінченко Валерій Іванович (Lavrinenko Valerii) – доктор технічних наук, професор, завідувач відділу «Алмазно-абразивної та фізико-технічної обробки» Інституту надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, м. Київ, Україна, тел.: + 380 67 727 24 73, e-mail: lavrinen52@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2098-7992.

Солод Володимир Юрійович (Solod Volodymyr) – кандидат технічних наук, доцент, перший проректор Дніпровського державного технічного університету МОН України, м. Кам'янське, Україна; тел. + 380 68 217 23 99, e-mail: v.solod@ukr.net, ORCID: 0000-0002-7516-9535.

Тищенко Володимир Андрійович (Tyshchenko Volodymyr) аспірант Дніпровського державного технічного університету МОН України, м. Кам'янське, Україна, e-mail: v.a.tishchenko@gmail.com ORCID: 0009-0001-6473-5909.