

МАЙБОРОДА В.С., ДЖУЛИЙ Д.Ю., СЛОБОДЯНЮК І.В., БЕСАРАБЕЦЬ Ю.Й.

ОСОБЛИВОСТІ МАГНІТНО-АБРАЗИВНОГО ОБРОБЛЕННЯ ТВЕРДОСПЛАВНОГО ІНСТРУМЕНТА З ЗАХИСНИМИ ФАСКАМИ НА РІЗАЛЬНИХ КРОМКАХ

Для забезпечення надійності і працездатності різального інструменту, особливо твердосплавного, перспективним є формування раціональної мікрогеометрії робочих поверхонь, особливо форми і геометрії різальних кромок, а також їх зміцнення. Для цього необхідно виконувати додаткове оброблення інструменту після операції його заточування. Метод магнітно-абразивного оброблення в умовах великих робочих зазорів при раціональному співвідношенні ударної та фрикційної взаємодії магнітно-абразивного інструменту з оброблюваними елементами дозволяє формувати мікрогеометрію і зміцнювати як різальні кромки, так і робочі поверхні. Для забезпечення ефективного оброблення необхідно встановити закономірності формування мікрогеометрії різальних кромок з попередньо виконаними захисними фасками. У роботі наведені результати комплексного дослідження процесу магнітно-абразивного оброблення твердосплавних непереточуваних пластин з виконаними під різними кутами захисними фасками на різальних кромках. Показано, що процес округлення кромок лінійно пов'язаний з тривалістю магнітно-абразивного оброблення. Причому, швидкість збільшення розмірів радіусів округлення різальних кромок з захисними фасками лінійно зростає зі збільшенням кута нахилу фасок при інших рівних умовах процесу. Запропоновано фізичний опис механізму зміцнення поверхневого шару робочих елементів твердосплавного різального інструменту. Показано, що процес зміцнення пов'язаний з раціональним накладенням сил, що виникають в результаті фрикційної та ударної взаємодії частинок і формувань магнітно-абразивного інструменту з оброблюваними поверхнями. Встановлено, що характер зміни поверхневої твердості, отриманої після магнітно-абразивного оброблення на захисних фасках, має хвилеподібну форму в залежності від часу процесу. Найбільший ріст поверхневої твердості має місце на фасках, виконаних під кутами 10° та 20° і пояснюється величиною співвідношення між силами нормального і тангенціального походження, що виникають при контакті магнітно-абразивного інструменту з оброблюваними поверхнями.

Ключові слова: різальна кромка, фаска, твердосплавний різальний інструмент, твердість, мікрогеометрія, магнітно-абразивне оброблення.

MAIBORODA V.S., DZHULII D.YU., SLOBODIANIUK I.V., BESARABETS YU.JO.

SPECIFIC FEATURES OF MAGNETO-ABRASIVE MACHINING OF CARBIDE TOOLS WITH PROTECTIVE CHAMFERS ON THE CUTTING EDGES

To ensure the durability and working ability of cutting tools, especially carbide, it is promising to form a rational microgeometry of working surfaces, in particular, the shape and geometry of cutting edges, as well as their hardening. For this, it is necessary to carry out additional machining of the tool after its sharpening operation. The magneto-abrasive machining method in conditions of large working gaps with a rational ratio of the impact and frictional interaction of the magneto-abrasive tool with the machined elements makes it possible to form microgeometry and strengthen both the cutting edges and the working surfaces. To ensure effective machining, it is necessary to determine the regularities of forming the microgeometry of the cutting edges with pre-made protective chamfers. The paper presents the results of a complex study of the magneto-abrasive machining process of carbide not sharpened inserts with protective chamfers on the cutting edges made at different angles. It was shown that the process of edge rounding is linearly related to the duration of magneto-abrasive machining. Moreover, the rate of increase in the size of the radius of cutting edges rounding with protective chamfers increases linearly with an increase in the angle of inclination of the chamfers, all other process conditions being equal. The physical description of the hardening mechanism of the surface layer of the working elements of the carbide cutting tool was proposed. It was shown that the hardening process is associated with the rational imposition of forces arising as a result of the frictional and impact interaction of the particles and the formations of the magneto-abrasive tool with the machined surfaces. It was found that the nature of the change in surface hardness obtained after magneto-abrasive machining on the protective chamfers has the wavy shape depending on the time of the process. The greatest increase in surface hardness takes place on chamfers made at angles of 10° and 20° and is explained by the value of the ratio between the forces of normal and tangential origin arising from the contact of the magneto-abrasive tool with the machined surfaces.

Keywords: cutting edge, chamfer, carbide cutting tool, hardness, microgeometry, magneto-abrasive machining.

Вступ. Ефективність лезової обробки металів різанням багато в чому визначається якістю різального інструменту. Ця проблема актуальна під час виготовлення відповідальних деталей у серійному виробництві. Коли небажаним є заміна різального інструменту в процесі виконання однієї технологічної операції, що може призвести до зміни умов різання, і як наслідок – реальних розмірів деталей, що обробляються. Тому важливою умовою є використання різального інструменту з підвищеною працездатністю, високою міцністю та надійністю. Забезпечення зазначених параметрів вирішують, зазвичай, комплексно з урахуванням режимів обробки, матеріалу різального інструменту, наявності на ньому покриттів, специфічної геометрії тощо.

Одним з перспективних напрямків при забезпеченні надійності і роботоздатності різального інструменту є цілеспрямоване формування раціональної мікрогеометрії робочих поверхонь, у тому числі форми та геометрії його різальних кромок з одночасним їх зміцненням. Особливо це актуально для твердосплавного різального інструменту, який експлуатують в умовах переривчастого, високошвидкісного різання матеріалів з підвищеною в'язкістю, твердістю, адгезійною активністю.

© В. С. Майборода, Д. Ю. Джулий, І. В. Слободянюк, С. Ю. Бесарабець 2022

При цьому особливу увагу для такого інструменту приділяють стану різальних кромок, на які діють підвищені сили, вібраційні та температурні навантаження. Дефекти кромок, що виникають при заточуванні у вигляді мікросколів, не достатній шорсткості, як самої кромки, так і її передньої і задньої поверхонь інструменту, що безпосередньо формують саму кромку, сприяють зниженню її крихкої міцності і є джерелами зародження мікротріщин термомеханічної втоми. Тому після операції заточування твердосплавного інструменту рекомендують виконувати додаткову обробку кромок. Як правило її виконують струменево або віброабразивним методами, абразивними щітками, використовуючи метод тягового шліфування.

Аналіз стану питання. Останнім часом активно вивчається і застосовується на практиці інструмент з певною формою різучих кромок, із заданою величиною k -фактора [1], сформованими на різальних кромках однієї або більше мікрофасок [2]. Встановлено, що формування на кромках фасок або заданої, певним чином округленої форми сприяє не тільки підвищенню їхньої крихкої міцності [3], а й позитивно впливає як на процес різання, так і стружкоутворення. Важливим фактором при фінішній обробці кромок є як їх полірування, так і формування зміцненого поверхневого шару з стискаючими залишковими напруженнями в ньому, градієнтною зміною твердості. Такий комплексний підхід до фінішної обробки інструменту забезпечує суттєве підвищення його надійності під час експлуатації в екстремальних умовах.

Одним з перспективних методів обробки з комплексним забезпеченням зазначених вище параметрів є метод магнітно-абразивної обробки (МАО) в умовах великих робочих зазорів [4]. Виконані дослідження у цьому напрямі показали як перспективність використання цього методу на фінішних етапах обробки інструменту, так й суттєві резерви у напрямі його вдосконалення. Отримані позитивні результати як з точки зору формування мікрогеометрії робочих елементів різального інструменту, так і зміцнення поверхневого шару не дозволяють дати чіткого уявлення про механізм процесу обробки безпосередньо різальних кромок і розкрити процеси, що відбуваються як при формуванні кромок, так і їх зміцненні. У роботах [4, 5] показано, що процес МАО у великих робочих зазорах відбувається в результаті ударно-фрикційної взаємодії елементів магнітно-абразивного інструменту (МАІ) у вигляді квазістабільних мікрооб'єктів, сформованих магнітним полем з поверхнею, що обробляється. Встановлено специфічні особливості їх руху та переформування, що дозволило визначити способи формування стабільного МАІ протягом усього циклу МАО [6, 7].

Аналіз стану поверхневого шару деталей, підданих МАО показав наявність стійких процесів, що забезпечують підвищення твердості поверхневого шару, формування в ньому стискаючих залишкових напружень [4, 5, 8]. При аналізі зміни поверхневої твердості обробленого методом МАО твердосплавного інструменту встановлено наявність певної періодичності у її зміні залежно від часу обробки та технологічних режимів. Слід зазначити, що наявна інформація про причини зміцнення поверхневого шару деталей в результаті МАО не дозволяє чітко розділити процеси, що сприяють зміні фізико-механічних характеристик поверхневого шару деталей, що обробляються. Враховуючи той факт, що процес МАО відбувається в умовах ударно-фрикційного контакту МАІ з поверхнею, що обробляється, цілком логічним поясненням є мікропластична деформація поверхневого шару, що накопичується в результаті великої кількості окремих мікроударів елементів МАІ о поверхню деталі. Найбільш імовірно подібний процес має місце при обробці в умовах великих робочих зазорів і малих магнітних полів, коли динамічна складова, що визначається швидкістю МАО, переважає над магнітною, що визначає умови створення МАІ підвищеної жорсткості. Однак не можна не враховувати і специфіку фрикційного контакту в парі МАІ – поверхня деталі, яка також є потужним фактором, здатним змінювати фізико-механічні властивості поверхневого шару та як наслідок забезпечувати його зміцнення.

Аналіз виконаних досліджень та наявної науково-технічної інформації показує, що для отримання найкращих результатів зміцнення поверхневого шару з одночасним формуванням мікрогеометрії поверхні з низькою шорсткістю, «розгладженим» мікропрофілем необхідно чітко керувати як процесами фрикційного контакту, так і контролювати ударну взаємодію. Саме при раціональному накладенні енергій від ударної та фрикційної взаємодії можливе забезпечення необхідних параметрів якості поверхні оброблюваної деталі та її поверхневого шару.

Раніше було показано, що максимальна ефективність процесу МАО в умовах великих робочих зазорів при обробці деталей складної форми досягається при виконанні трьох взаємопов'язаних умов [9]. При більш детальному підході до забезпечення якості оброблюваних поверхонь необхідно не тільки забезпечити досягнення відповідних значень нормальної – V_n та тангенціальної – V_t складових швидкості відносного переміщення частинок МАІ та поверхні деталі, а й раціонально керувати зазначеними параметрами в залежності від завдань, що ставляться. Для

цього необхідно ідентифікувати внесок в ефективність обробки і показників якості кожної зі складових V_n і V_t і мати інформацію про співвідношення зазначених факторів. У роботах [4, 6, 10] вперше були виконані спроби розрахунковим шляхом оцінити інтенсивність процесу MAO окремо, за енергетичними параметрами – IV_n та IV_t , що визначаються через миттєві значення V_n та V_t у кожній точці оброблюваної поверхні з урахуванням кінематики процесу обробки. Окремі результати розрахунків досить точно були підтверджені експериментальними даними. Подібний збіг був при використанні рівновісних порошків. У разі використання нерівновісних порошкових магнітно-абразивних матеріалів для деяких випадків проявляється невідповідність. Це можна пояснити тим фактом, що не враховувалися умови безпосереднього контакту магнітно-абразивних частинок і квазістабільних формувань з них з поверхнею, що обробляється в процесі MAO. Однією з особливостей процесу MAO, при аналізі фрикційних процесів, оцінюваних значеннями IV_t є той факт, що MAI – це рухомо-скоординоване магнітним полем середовище і процес безпосереднього мікрорізання здійснюється окремими зернами MAI при негативних передніх кутах різання, що сприяє створенню додаткового тиску на поверхню, що обробляється [11, 12, 13]. Причому, чим вище швидкість MAO, тим більше будуть повернені зерна MAI, які контактують з поверхнею, тим вище буде тиск, що виникає від магнітних сил і відповідно від більших негативних передніх кутів. В [4] представлені результати зміни параметра Ra і поверхневої твердості на циліндричних зразках із сталі Р6М5, оброблених методом MAO в умовах великих робочих зазорів при ідентичних умовах, але магнітно-абразивними порошками різних типів, з різним ступенем нерівності частинок [4, 5, 7]. Аналіз зазначених даних є підтвердженням цього факту.

Відома науково-технічна інформація та отримані експериментальні дані досить актуальні для подальшого цілеспрямованого вирішення проблеми формування мікрогеометрії з одночасним комплексним забезпеченням зміцнення безпосередньо різальних кромки інструменту.

Метою роботи є встановлення закономірностей, що мають місце при формуванні форми та радіусів округлення різальних кромки твердосплавного інструменту з попередньо сформованими під різними кутами захисними фасками для забезпечення заданої величини радіуса округлення та відповідної поверхневої твердості при MAO в умовах великих магнітних зазорів.

Матеріали, обладнання та умови проведення досліджень. Експериментальні дослідження було проведено на твердосплавних пластинках типу SNMA 1204, виготовлених із сплаву Т15К6. На пластинках, на усіх робочих гранях перед MAO були виконані захисні фаски під кутами 10° , 20° , 30° і 40° до площини пластин (її передньої поверхні). Ширина фаски варіювалася в діапазоні 0,2-0,8 мм. На сформованих фасках контролювали поверхневу твердість та величину радіуса округлення отриманих різальних кромки, сформованих площиною фаски та задньою поверхнею. Поверхневу твердість вимірювали не менше ніж у 5 перерізах по довжині кожної грані з кроком 0,05 мм за шириною фаски. Радіус округлення вимірювали методом оцупування щонайменше ніж у 10 перерізах по довжині кожної грані. Отримані результати статистично оброблялися.

Процес MAO виконували за умов формування стабільного MAI [7], за режимами, рекомендованими у [6, 14]. В якості магнітно-абразивного матеріалу використовували порошок ДЧК з розміром частинок 400/315 мкм з додаванням алмазної пасті АСМ 28/20 мкм. Швидкість обертання деталей навколо осі кільцевої ванни становила 2,8 м/с, а частота обертання навколо осі пластини – 500 об/хв. В процесі обробки пластини базувалися в робочій зоні під кутом $\varphi = 28 - 30^\circ$ - кутом нахилу пластини по відношенню до площини до кільцевої ванни. Обробці піддавали дві групи пластин з однієї партії. Відмінність між пластинками в кожній групі полягала в тому, що в одній групі радіус округлення різальних кромки коливався в діапазоні 28,6 - 29 мкм, а в іншій - в діапазоні 23 - 24,6 мкм. Обробка кожної групи пластин виконувалась поетапно. Для першої групи тривалість кожного етапу MAO становила 1 хв, тоді як у другій – 5 хв. Після кожного етапу контролювали зміни радіуса округлення різальних кромки та величини поверхневої твердості на захисних фасках в безпосередній близькості до кромки.

Результати досліджень. Встановлено, що процес округлення ріжучих кромки методом MAO в умовах, описаних вище в залежності від часу обробки, має лінійний характер і описується рівнянням:

$$r = r_0 + V_r t$$

де r_0 - вихідна величина радіуса заокруглення різальної кромки до MAO, мкм;

t – час обробки, хв;

V_r – швидкість зміни величини радіуса заокруглення різальної кромки, мкм/хв.

Різниця в експериментальних залежностях, отриманих після вимірювання на чотирьох гранях, пов'язана лише з кутом нахилу захисних фасок (кутом – λ). Діапазон зміни величини V_r на пластинах з фасками, виконаними під різними кутами по відношенню до поверхні пластин, наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Швидкість зміни величини радіуса заокруглення різальної кромки

Кут нахилу фаски, град.	Діапазон зміни величини V_r , мкм/хв
10	1,7 – 1,77
20	1,72 – 1,9
30	2,07 – 2,15
40	2,4 – 2,41

Зростання швидкості округлення різальних кромки, зі збільшенням кута нахилу виконаних на них захисних фасок, можливо пояснити виходячи з особливостей контактної взаємодії елементів МАІ з поверхнями, що обробляються, умовами формування і руйнування віялоподібних ущільнень, що утворюються на різальних кромках в процесі їх руху в МАІ і величинами iVt , які зі збільшенням кута нахилу фаски зростають, що свідчить про зростання сил фрикційного походження. Отримані результати підтверджують результати досліджень округлення різальних кромки швидкохідних свердел, твердосплавних фрез і твердосплавних непереточуваних пластинок [4].

Аналіз зміни поверхневої твердості, отриманої після МАО на захисних фасках, показав, що як і в роботі [6] на початковій стадії обробки проявляється хвилеподібний процес зміни поверхневої твердості. Важливо, що найбільше зростання поверхневої твердості проявляється на фасках, виконаних під кутами 10° і 20° (Рис. 1). Встановлено, що перший пік на залежності зміни твердості від часу МАО проявляється через 1 хвилину обробки, другий пік з найбільшою амплітудою розташовується через 3 хв. При більшому часі обробки – понад 5 хвилин, поверхнева твердість дещо знижується, однак у середньому перевищує вихідну на 15–25%.

Подібна зміна фізико-механічних характеристик матеріалу пластин, особливо його поверхневого шару, може бути пов'язана з процесами структурної та дефектної перебудови матеріалу, аналогічно процесам, що відбуваються в процесі припрацювання інструменту [15], пов'язаних з формуванням у поверхневому шарі стійких дислокаційних структур, що формуються при фрикційно-ударній взаємодії з МАІ, що представляють багат шарову композицію з накопичених малорушливих дислокацій, розташованих на деякій глибині від поверхні. Формування подібної структури, мабуть, відбувається при раціональному накладенні сил, що забезпечують формування в поверхневому шарі нормальних напружень, що пов'язані з ударною взаємодією МАІ та поверхні. При цьому відбувається зростання щільності переважно крайових, слабо рушливих дислокацій. Дислокаційні відрізки сидячих крайових дислокацій під впливом тангенціальних сил фрикційного походження ініціюють розмноження рухомих гвинтових дислокацій [15, 16]. Саме на початкових етапах МАО відбувається енергетична перебудова поверхневого шару деталей із формуванням стабільної структури.

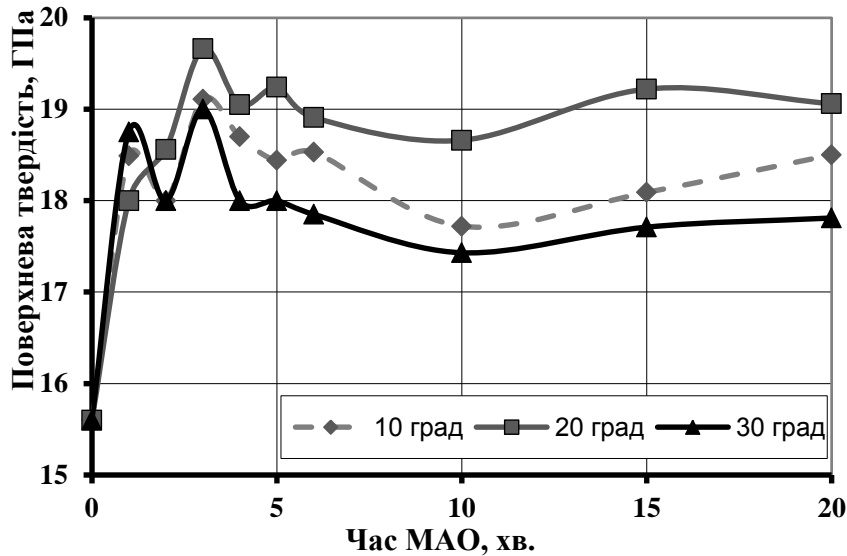


Рис. 1 - Зміна поверхньої твердості на захисних фасках твердосплавних пластин, що не переточуються.

Різні значення поверхньої твердості, отримані на захисних фасках, розташованих під різними кутами до головного вектора руху пластин у робочій зоні і є, певною мірою, відображенням зміни ступеня наклепу матеріалу, залежать від співвідношення нормальних і тангенціальних сил, що діють у зоні контакту МАІ - поверхня деталі, і визначаються різними величинами інтегральних інтенсивностей V_n і V_t .

Виконаний чисельний розрахунок значень V_n та V_t для зазначених вище умов процесу MAO та різних ділянок різальних кромки пластин показав, що найбільш раціональним буде співвідношення V_t/V_n , що знаходиться в діапазоні 1,75 – 1,85. Зазначимо, що отримані результати не суперечать даним, наведеним у [4, 6].

Для підтвердження наведеного припущення аналізували характер зміни твердості по глибині матеріалу, оскільки зміна твердості поверхнього шару є певною мірою відображенням зміни дефектної структури матеріалу. Зміни твердості поверхнього шару області сформованих фасок були отримані на косих шліфах, виконаних під кутом 1° до площини кожної з фасок (Рис. 2).

Показано, що на фасках з кутом нахилу до передньої поверхні 10° і 20° після MAO має місце різке збільшення поверхньої твердості на глибині до 0,1 – 0,2 мм. При цьому встановлено наявність підшарового максимуму за твердістю для глибини шару 0,025 – 0,03 мм. Величина твердості у цій галузі перевищує твердість серцевини на 28 – 35 % і сягає 20 – 21 ДПа. Подібна зміна твердості у зазначеному поверхньому шарі пов'язана як з фрикційним, так і ударним його зміцненням у процесі MAO, що забезпечується його дислокаційною перебудовою, пов'язаною з підвищенням щільності дислокацій, зміною його напруженого стану – формування в поверхньому шарі залишкових стискаючих напруг [4, 5].

Слід зазначити, що найбільше зростання твердості поверхнього шару уражає пластин з фасками, розташованими під кутом 20° . На цих поверхнях реалізуються найбільш раціональне співвідношення V_n/V_t .

Висновки. Виконані комплексні дослідження процесу магнітно-абразивної обробки твердосплавних пластин, що не переточуються, із захисними фасками на ріжучих кромках дозволили встановити основні закономірності при формуванні радіусів округлення ріжучих кромки. Показано, що округлення кромки лінійно пов'язаний з часом MAO. Причому швидкість збільшення радіусів округлення ріжучих кромки із захисними фасками збільшується з кутом нахилу фасок - при інших рівних умовах процесу. Запропоновано опис механізму зміцнення поверхнього шару ріжучих кромки. Показано, що процес зміцнення пов'язаний з раціональним накладенням сил, що виникають в результаті фрикційної та ударної взаємодії частинок та формувань МАІ з поверхнями, що оброблюються, причому превалюючий вплив надають процеси, що реалізуються при фрикційному контакті.

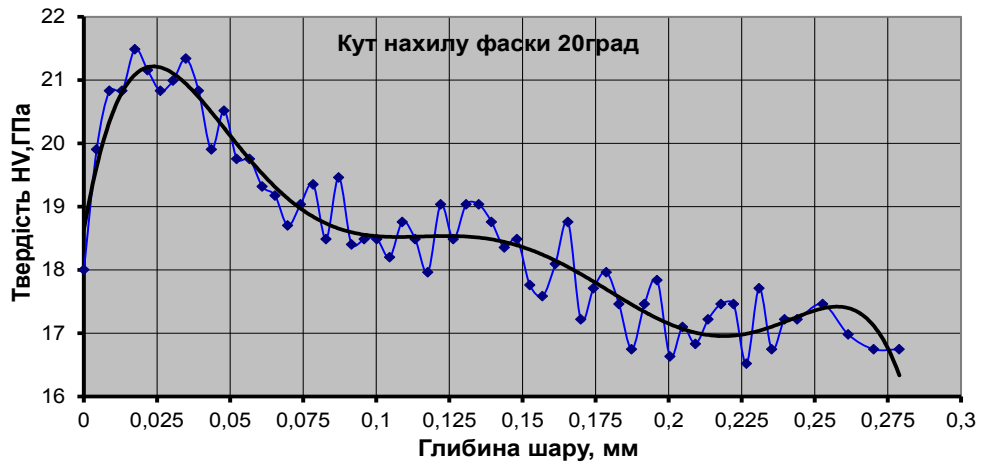
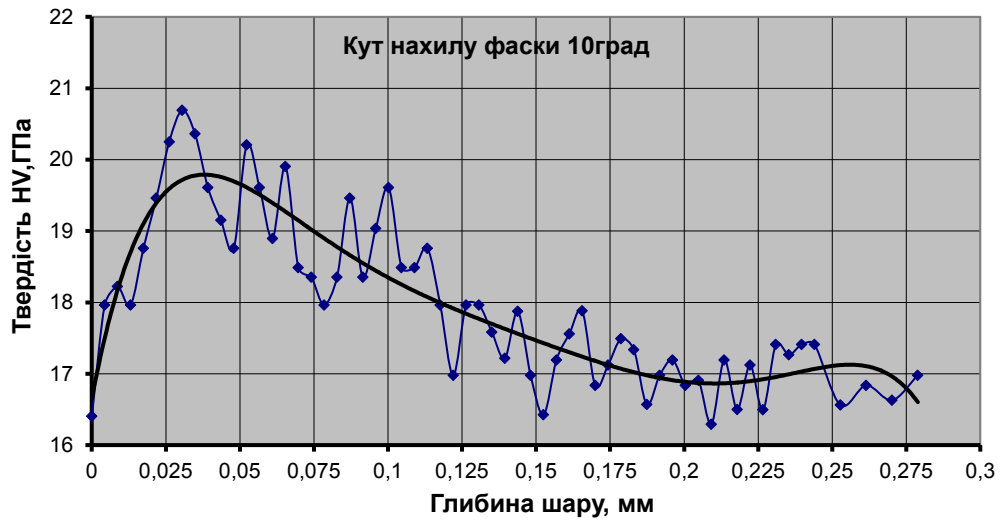


Рис. 2 - Зміна твердості поверхневого шару на захисних фасках в залежності від глибини

Список литературы

1. Tikal F., Bienemann R., Heckmann L. Schneidkantenpräparation Ziele, Verfahren und Messmethoden. Berichte aus Industrie und Forschung. Kassel: Kassel University Press GmbH, 2009. 193 p.
2. Denkena B., Köhler J., Ventura C. Strategien für die Herstellung von Schneidkantenmikrogeometrien durch Querseiten-Planschleifen // *Forum, Schneidwerkzeug-und Schleiftechnik*. 2012. Vol. 25(3), pp. 92 – 97.
3. Родичев Ю. М., Сорока Е. Б., Майборода В. С., Джулий Д. Ю., Хворостяный В. В. Влияние модификации поверхности твердосплавного инструмента на сопротивление разрушению режущей кромки при локальном нагружении. *Проблеми динаміки і міцності в турбомашинобудуванні. Тези доповідей п'ятої міжнародної науково-технічної конференції. (27 – 30 травня 2014 р., Київ)*. Київ: Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренка, 2014. С. 205 – 206.
4. Майборода В. С., Слободянюк И. В., Джулий Д. Ю. *Магнитно-абразивная обработка деталей сложной формы*. Житомир: ПП «Рута», 2017. 272 с.
5. Майборода В. С. *Основи створення і використання порошкового магнітно-абразивного інструменту для фінішної обробки фасонних поверхонь: дис. ... докт. техн. наук: 05.03.01*. Київ, 2001. 404 с.
6. Джулий Д. Ю. Підвищення якості багатограних непереточуваних твердосплавних пластин при магнітно-абразивному обробленні в кільцевій ванні: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01. Київ, 2014. 175 с.
7. Ткачук І. В. *Формування магнітно-абразивного інструменту зі стабільними властивостями в робочих зазорах кільцевого типу: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01*. Київ, 2015. 164 с.
8. Vyelyayev O. Erhöhung der Leistungsfähigkeit von HSS-Spiralbohrern durch Einsatz der magnetabrasiven Bearbeitung: Phd-thesis, Otto von Guericke. Magdeburg, Germany, 2008. 150 p.
9. Майборода В. С. Дослідження властивостей магнітно-абразивного інструменту, сформованого із сумішей порошоків. *Процеси механічної обробки в машинобудуванні. Збірник наук. праць*. Житомир: ЖДТУ, 2009. Вип. 6. С. 144 – 159.
10. Джулий Д. Ю., Майборода В. С. Аналіз умов магнітно-абразивного оброблення багатограних непереточуваних твердосплавних пластин при їх довільному розташуванні в робочих зонах установки типу кільцева ванна. *Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського. Нові технології в машинобудуванні*. Кременчук, 2008. Вип. 1/2008 (48). Частина 2. С. 27 – 31.
11. Оликер В. Е. *Порошки для магнитно-абразивной обработки и износостойких покрытий*. Москва: Металлургия, 1990. 176 с.
12. Барон Ю. М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов. Ленинград: Машиностроение, 1986. 176 с.
13. Клименко С. А., Копейкина М. Ю., Лавриненко В. И. и др. *Финишная обработка поверхностей при производстве деталей* / под общ. ред. Чижик С. А. и Хейфец М. Л. Минск: Беларуская навука, 2017. 376 с.
14. Ульяненко Н. В. Підвищення працездатності твердосплавного інструменту шляхом застосування магнітно-абразивного оброблення та нанесення зносостійких покриттів: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01. Київ, 2006. 160 с.
15. Якубов Ф. Я. *Структурно-енергетическі аспекти упрочнення і підвищення стійкості режущого інструмента*. Симферополь: Крымское учебно-педагогическое государственное издательство, 2005. 300 с.
16. Старков В. К. *Физика и оптимизация резания металлов*. Москва: Машиностроение, 2009. 640 с.

References (transliterated)

1. Tikal F., Bienemann R., Heckmann L. Schneidkantenpräparation Ziele, Verfahren und Messmethoden. Berichte aus Industrie und Forschung. Kassel: Kassel University Press GmbH, 2009. 193 p.
2. Denkena B., Köhler J., Ventura C. Strategien für die Herstellung von Schneidkantenmikrogeometrien durch Querseiten-Planschleifen. *Forum, Schneidwerkzeug-und Schleiftechnik*. 2012. Vol. 25(3), pp. 92– 97.
3. Rodichev Yu. M., Soroka E. B., Maiboroda V. S., Dzhulii D. Yu., Khvorostianyi V. V. [The influence of surface modification of carbide tools on the resistance to destruction of the cutting edge under local loading] *Vliyaniye modifikatsii poverkhnosti tverdosplavnogo instrumenta na soprotivleniye razrusheniyu rezhushchey kromki pri lokalnom nagruzhenii. Proceedings of the fifth international conference problems of dynamics and strength in turbomachinery (27 – 30 travnya, 2014, Kyiv)* [G. S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of the National Ac. Sci. of Ukraine (May 27–30, 2014, Kyiv)], Kyiv, Publ., 2014, pp. 205 – 206.
4. Maiboroda V. S., Slobodianiuk I. V., Dzhulii D. Yu. *Magnitno-abrazivnaya obrabotka detaley slozhnoy formy* [Magneto-abrasive machining of parts with complex shape]. Zhytomyr, PP "Ruta" Publ., 2017. 272 p.
5. Maiboroda V. S. *Osnovy stvorenniya i vykorystannya poroshkovoho mahnitno-abrazyvnoho instrumentu dlya finishnoyi obrobky fasonnykh poverkhon'*: dis. ... d-ra. tekhn. nauk: 05.03.01 [Basics of creating and using powder magnetic abrasive tool for finishing shaped surfaces. Dr. eng. sci. diss.]. Kyiv, 2001. 404 p.
6. Dzhulii D. Yu. *Pidvyschennya yakosti bahatohrannykh neperetochuvanykh tverdosplavnykh plastyn pry mahnitno-abrazyvnomu obroblenni v kil'tseviy vanni: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.03.01*. [Increasing quality of multisided not sharpened hard-alloy plates by using magneto-abrasive machining in ring-type working area. Candidate eng. sci. diss. (Ph. D.)]. Kyiv, 2014. 175 p.
7. Tkachuk I. V. *Formuvannya mahnitno-abrazyvnoho instrumentu zi stabil'nymy vlastyvostyamy v robochych zazorakh kil'tsevoho typu: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.03.01*. [Formation of magneto-abrasive tool with stable properties in the ring-type working gaps. Candidate eng. sci. diss. (Ph. D.)]. Kyiv, 2015. 164 p.

8. Byelyayev O. Erhöhung der Leistungsfähigkeit von HSS-Spiralbohrern durch Einsatz der magnetabrasiven Bearbeitung: Phd-Thesis, Otto von Guericke. Magdeburg, Germany, 2008. 150 p.
9. Maiboroda V. S. Doslidzhennya vlastyvostryey mahnitno-abrazyvnoho instrumentu, sformovanoho iz sumishey poroshkiv [Studying the properties of magneto-abrasive tool formed from mixtures of powders]. *Protsey mekhanichnoyi obrobky v mashynobuduvanni. Zbirnyk nauk. prats'* [The processes of mechanical processing in mechanical engineering. Collection of sciences. works]. Zhytomyr, ZSTU Publ., 2009, issue 6, pp. 144 – 159.
10. Dzhulii D. Yu., Maiboroda V. S. Analiz umov mahnitno-abrazyvnoho obroblennya bahatohrannykh neperetochuvanykh tverdospilavnykh plastyn pry yikh dovilnomu roztashuvanni v robochykh zonakh ustanovky typu kiltseva vanna [Analysis of conditions of magnetic-abrasive machining of multisided not sharpened hard-alloy plates at their arbitrary location in the working areas of the installation type ring bath]. *Visnyk KDPU imeni Mykhayla Ostrohradskoho. Novi tekhnolohiyi v mashynobuduvanni* [Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University. New technologies in mechanical engineering]. Kremenchuk: KRNU Publ., 2008, issue 1/2008 (48) Part 2, pp. 27 – 31.
11. Olikier V. E. *Poroshki dlya magnitno-abrazivnoy obrabotki i iznosostoykikh pokrytyy* [Powders for magnetic-abrasive machining and wear-resistant coatings]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1990. 176 p.
12. Baron Yu. M. *Magnitno-abrazivnaya i magnitnaya obrabotka izdeliy i rezhushchikh instrumentov* [Magnetic-abrasive and magnetic machining of products and cutting tools]. Leningrad, Mashinostroyeniye Publ., 1986. 176 p.
13. Klimentenko S. A., Kopeikina M. Yu., Lavrynenko V. I. et al. *Finishnaya obrabotka poverkhnostey pri proizvodstve detaley* [Finishing surfaces in the production of parts]. Minsk, Bielaruskaja navuka Publ., 2017. 376 p.
14. Ulyanenko N. V. Pidvyshchennya pratsездatnosti tverdospilavnoho instrumentu shlyakhom zastosuvannya mahnitno-abrazyvnoho obroblennya ta nanesennya znosostiykykh pokryttiv: dys. ... kand. tekhn. nauk: 05.03.01. [Improvement of working capacity of a carbide tool by application of magneto-abrasive machining and application of wear-resistant coatings. Candidate eng. sci. diss. (Ph. D.)]. Kyiv, 2006. 160 p.
15. Yakubov F. YA. *Strukturno-energeticheskiye aspekty uprochneniya i povysheniya stoykosti rezhushchego instrumenta* [Structural and energetic aspects of hardening and increasing the durability of the cutting tool]. Simferopol, Krymskoye uchebno-pedagogicheskoye gosudarstvennoye izdatelstvo Publ., 2005. 300 p.
16. Starkov V. K. *Fizika i optimizatsiya rezaniya metallov* [Physics and optimization of metal cutting]. Moscow: Mechanical Engineering Publ., 2009. 640 p.

Поступила (received) 03.04.2022

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Майборода Віктор Станіславович (Maiboroda Viktor Stanislavovich) – доктор технічних наук, професор, професор кафедри конструювання машин Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6902-6928>; e-mail: maiborodavs@gmail.com.

Слободянюк Іванна Валентинівна (Slobodianiuk Ivanna Valentynivna) – кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання машин Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0226-2691>; e-mail: ivannavalentinovna@gmail.com.

Джуні Дми́тро Ю́рійович (Dzhulii Dmytro Yuriyovich) – кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання машин Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8863-626X>; e-mail: dmytro.dzhulii@gmail.com.

Бесарабець Юрій Йосипович (Besarabets Yuriy Josipovich) – доцент кафедри конструювання машин Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0773-099X>; e-mail: york_bessar@ukr.net.