

## МАГНІТНО-АБРАЗИВНЕ ОБРОБЛЕННЯ ТВЕРДОСПЛАВНОГО ІНСТРУМЕНТУ В УМОВАХ ВЕЛИКИХ РОБЧИХ ЩІЛИН

*В роботі представлено огляд наукових робіт за темою магнітно-абразивне оброблення твердосплавного інструменту (МАО). В статті розглянуті особливості самого процесу МАО; процеси формування мікропрофілю інструменту під час МАО; вплив МАО на фізико-механічні характеристики оброблюваного інструменту.*

*Diese Arbeit beschäftigt sich mit dem Überblick über wissenschaftliche Arbeiten zum Thema Magnet-abrasive Bearbeitung (MAB) von Hartmetallwerkzeuge. In diesem Artikel sind die Besonderheiten der MAB; die Prozessen des Mikroprofilformens auf das Werkzeug bei der MAB; die Einflüsse der MAB auf die physik-mechanische Eigenschaften des zu präparierendes Werkzeugs betrachtet.*

*This article provides an overview of scientific papers which cover the problems of magneto-abrasive machining (MAM) of hard alloy instruments. In this paper following aspects are considered: features of the MAM itself; processes of the microprofile formation at the instrument during the MAM; influences of MAM on the physic-mechanical properties of processed instruments.*

### Вступ

Інтенсифікація і практично повна автоматизація сучасних технологічних процесів виготовлення виробів високої точності не можуть бути реалізовані без застосування різального інструменту, що має підвищену надійність і відповідну працездатність. Ці показники можливо підвищити шляхом покращення властивостей інструментального матеріалу, розробки нової геометрії інструменту, його зміцнення. Значна увага у наукових роботах надається саме дослідженню впливу мікрогеометрії різальної кромки (РК) інструменту на його працездатність та зносостійкість. Величина радіусу РК інструменту, його форма, наявність на ньому дефектів безпосередньо впливають на процес формування стружки під час різання, що в багатьох випадках визначає довговічність самого інструменту. В сучасному виробництві широко застосовуються такі методи фінішної обробки інструменту, як струминні, у вільному абразиві, обробка щітками та інші. В останній час все більше уваги починають приділяти можливостям методу магнітно-абразивної обробки, який дозволяє за відносно короткий час контролювано впливати на величину мікрогеометричних характеристик робочих елементів інструментів із різноманітних матеріалів. Магнітно-абразивне оброблення за механізмом впливу на поверхні деталей [1], що оброблюються є комплексним процесом і поєднує в собі одночасно:

- пластичне деформування мікронерівностей поверхні і тонкого приповерхневого шару;
- взаємодію магнітно-абразивного інструменту (МАІ), сформованого в робочих щілинах з поверхнею в умовах фрикційного контакту, що призводить до абразивного зношування, адгезійної і дифузійної взаємодії;
- мікрорізання з видаленням мікростружки;
- фізичні та хімічні явища, що відбуваються в магнітному полі під час оброблення і сприяють формуванню специфічного мікрорельєфу поверхні, особливих властивостей тонкого поверхневого шару.

Процес ефективного МАО виробів різноманітної просторової конфігурації у великих або малих магнітних щілинах відбувається за умов відтворення трьох основних факторів, що відтворюються в зоні безпосереднього оброблення, а саме:

- забезпечення рівномірного притискання елементів МАІ до оброблюваних поверхонь силами магнітного походження або за рахунок динамічних чинників, що визначаються характером переміщення деталей в робочих зонах установок і верстатів для МАО. Тобто наявність нормальної складової зусиль притискання частинок магнітного абразиву до оброблюваної поверхні для забезпечення як найменшого пружно-пластичного деформування мікронерівностей поверхні та тонкого поверхневого шару;
- наявність достатньої рівномірно розподіленої відносно поверхонь, що оброблюються, тангенціальної складової відносного руху елементів МАІ і поверхонь деталей для забезпечення умов активного пластичного деформування, мікрорізання і скобління поверхневого шару;
- здатність МАІ до переформування, перемішування і відновлення робочої форми, забезпечення рівномірного нівелювання відносно поверхонь деталей, що оброблюються, без утворення “застійних”, “тіньових” зон біля поверхні.

Широке застосування твердосплавного інструменту у сучасному виробництві потребує більш детального висвітлення стану проблем пов'язаних саме із МАО твердосплавного інструменту. Найширшого вжитку зазнають саме багатогранні непереточувані пластини (БНТП), тому саме висвітлення особливостей МАО пов'язаної із обробкою БНТП варто приділити найбільше уваги. Тут важливо відмітити такі моменти, як вплив МАО на:

- кінетику формування мікропрофілю БНТП, що залежить від швидкості головного руху під час обробки, її тривалості та характеристик МАІ;

- мікротвердість та формування різальної кромки БНТП, де велике значення має кут установки оброблюваного інструменту;
- експлуатаційні властивості БНТП.

На сам кінець доцільно розглянути і проблематику та особливості MAO твердосплавного кінцевого інструменту.

#### Кінетика формування мікропрофілю БНТП

Робота [2] присвячена порівнянню різних умов магнітно-абразивної обробки та характеру базування обробленого інструменту на різних верстатах для MAO. Дослідження показали, що для обробки БНТП найбільш доцільною є MAO в умовах великих робочих зазорів при їх кільцевому розміщенні із забезпеченням одночасного обертання оброблюваного інструменту навколо осі кільцевої ванни та власної вертикальної осі. При цьому напрям обертання навколо кільцевої ванни має співпадати із напрямом обертання навколо власної осі із одночасним забезпеченням переваги частоти обертання навколо власної осі не менш, ніж у два рази. Також в роботі доведена доцільність використання у якості допоміжного елемента для МАІ діамантної пасту, що значно підвищує ефективність обробки.

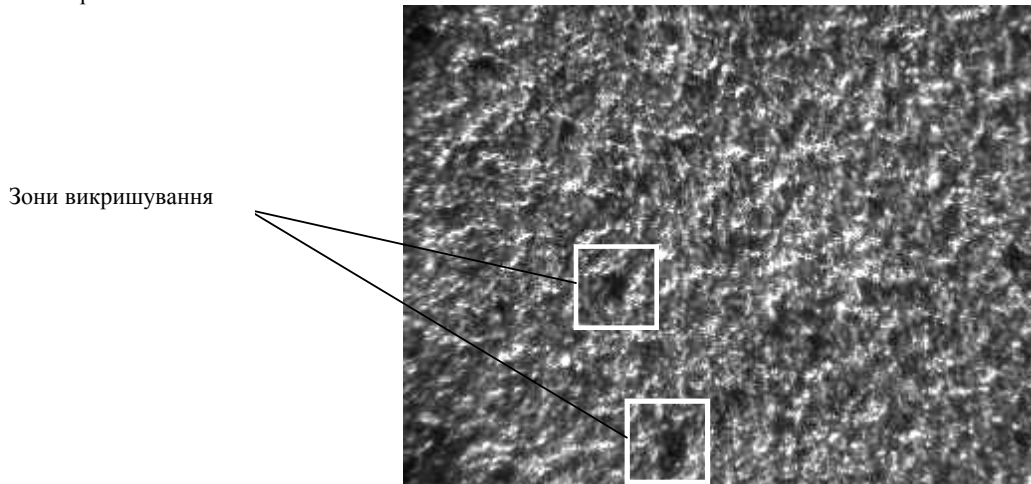


Рис. 1. Фотографія задньої поверхні твердосплавного різального елемента із зонами викришування карбідів (збільшення: x520)

Більш детальні дослідження процесів формування мікропрофілю поверхонь інструменту обробленого методом MAO представлені у [3] ще раз показали, що обробка твердосплавного різального інструменту в умовах великих магнітних щілин забезпечує формування рівномірної шорсткості робочих поверхонь різального інструменту. При цьому величина шорсткості складала  $Ra < 0,3 \mu\text{m}$  при вихідному значенні, після діамантного шліфування, –  $Ra = 0,8 \mu\text{m}$ , за менш ніж 200-240с MAO. Також в роботі проаналізовано вплив часу MAO на стан опорної поверхні робочих поверхонь БНТП. Результати досліджень показали, що основна робота по зниженню шорсткості виконується на початку обробки (перші 120-150с), що, після досягнення свого мінімуму для даного МАІ, змінюється процесами вигладжування мікроставів (до 240-300с) та часткового викришування карбідних складових твердого сплаву (більше 240-300с). На рис. 1 представлено фотографія задньої поверхні інструменту після MAO тривалістю 360с.

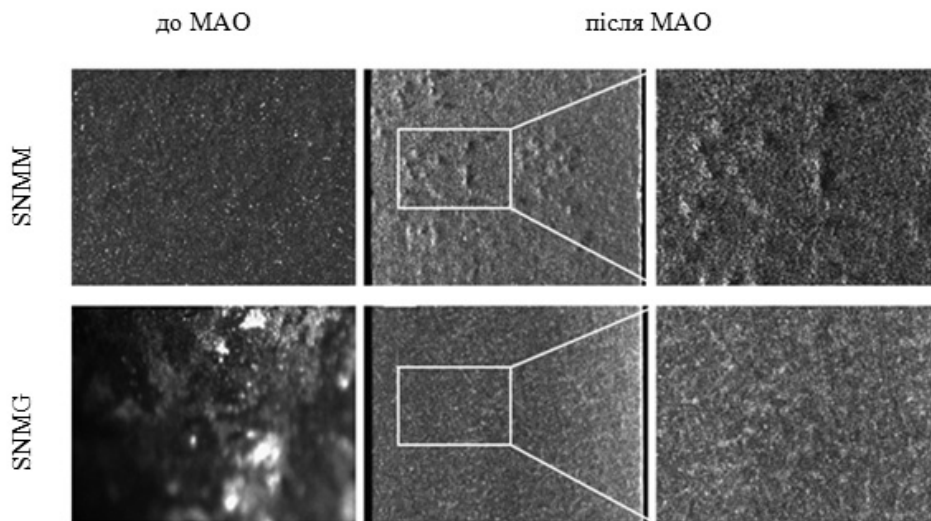


Рис. 2. Задня поверхня різальних пластин до та після 240с. MAO

Такий самий ефект було помічено у під час проведення досліджень описаних у [4], де для досліджень було вибрано твёрдосплавні пластини різної якості виготовлення. Було помічено, що низька вихідна якість інструменту зменшує час необхідний для початку активного викришування карбідних включень матеріалу. Так вже після 240с обробки на задній поверхні БНТП більш низької якості була зафіксована велика кількість таких викришувань, що унеможливили точне вимірювання шорсткісних характеристик, та загалом негативно впливали на загальний стан поверхні після MAO (рис. 2, 3).

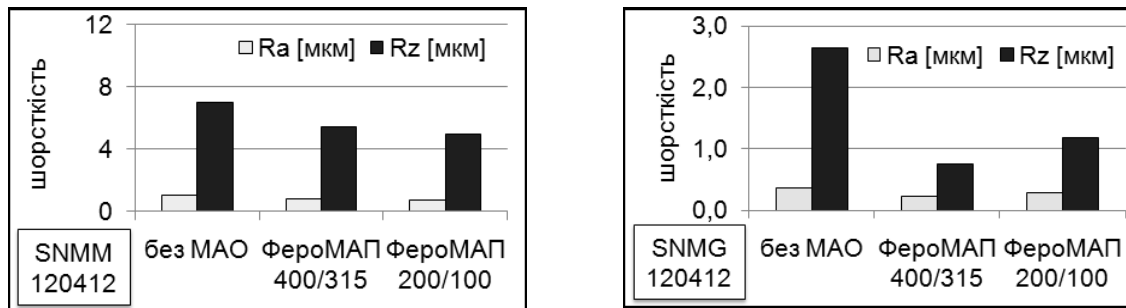


Рис. 3. Шорсткість на задній поверхні залежно від використаного МАІ

Дослідження проведені у роботі також підтвердили і факт безпосереднього впливу величини зерен МАІ на значення шорсткості поверхонь інструменту. Так використання порошку із більшими значеннями величини зерен призвело до трикратного зниження шорсткості  $Rz$  оброблюваних поверхонь інструменту (рис. 3). Було досягнуто величини шорсткості  $Rz$  меншої за 1,2мкм на передній та меншої за 0,9мкм на задній поверхні пластин, застосовуючи для обробки порошок ФероМАП 400/315мкм, при чому початкові значення шорсткості були відповідно 2,9 та 2,6мкм. Величина параметр  $Ra$  при цьому знизилася на 25-30%, тобто з 0,36 до 0,25 мкм. Це пояснюється збільшенням сил різання МАІ під час MAO пов'язане із збільшенням маси зерен [5].

В роботі [6] представлена універсальна розрахункова модель визначення співвідношення між нормальною  $V_n$  та тангенціальною  $V_t$  швидкостями під час обробки БНТП. На рис. 4 представлено базову схему установки оброблюваного інструменту на установці для MAO типу кільцева ванна [2, 4]. Таким чином в роботі показано, що для даних умов значення нормальної та тангенціальної швидкостей рівні:

$$Vn_i = |V_i| \cdot \cos(\beta_i)$$

$$Vt_i = |V_i| \cdot \sin(\beta_i)$$

де  $Vn_i$  – нормальна складова вектора швидкості,  $Vt_i$  – тангенціальна складова вектора швидкості,  $\beta_i$  – кут між вектором швидкості та вектором нормалі в даній точці профілю БНТП. Результати розрахунків представлені на рис 5. показали, що для всіх співвідношень кутових швидкостей максимум нормальних та тангенціальних складових швидкостей спостерігається при куті нахилу оправки в діапазоні  $\xi=20-30^\circ$ . При таких кутах нахилу реалізуються необхідні умови для активного MAO [5].

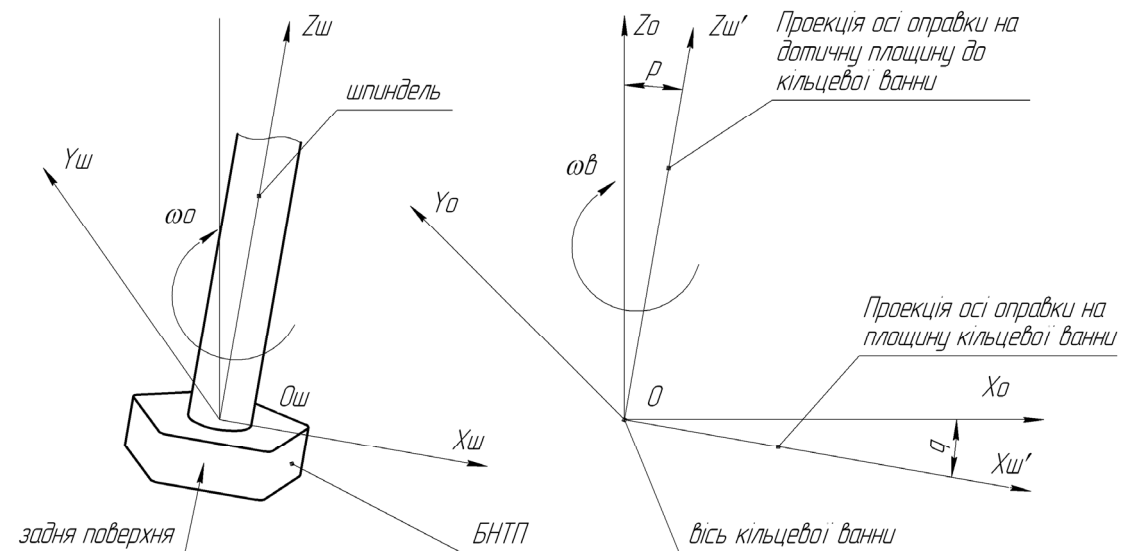


Рис. 4. Схема MAO на установці типу кільцева ванна

На величину нормальних та тангенціальних складових найсильніше впливає кутова швидкість  $\omega_v$ . Помічено також, що при переважанні  $\omega_o$  над  $\omega_v$  складові швидкості будуть невеликими (для  $\omega_o=700\text{хв}^{-1}$  при  $\omega_o/\omega_v=25/1$ :

$V_n^{max}=0,753\text{м/с}$ ,  $V_t^{max}=1,017\text{м/с}$ ) і навпаки при переважанні  $\omega_e$  над  $\omega_o$  швидкості будуть великими (для  $\omega_e=500\text{хв}^{-1}$  при відношенні  $\omega_o/\omega_e=1/100$ :  $V_n^{max}=5,56\text{м/с}$ ,  $V_t^{max}=5,7\text{м/с}$ ).

Дослідження впливу кута повороту оправки відносно власної осі на величину нормальних та тангенціальних швидкостей показали, що із його збільшенням від 0 до 45° зменшення нормальної складової швидкостей MAO зменшується тим швидше, чим більше значення кута повороту. При цьому збільшується вплив тангенціальної складової, що веде до покращення умов деформування поверхневого шару матеріалу оброблюваної деталі.

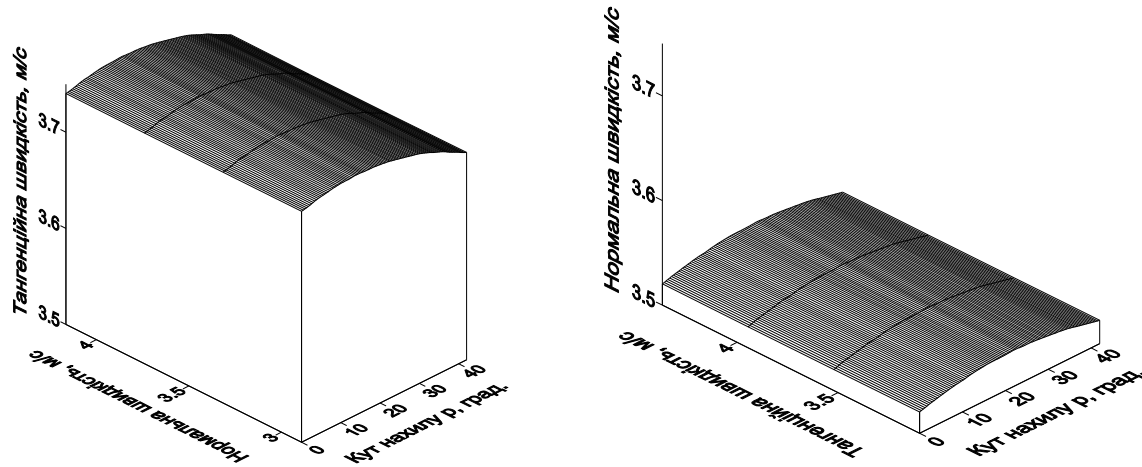


Рис. 5. Зміна нормальної та тангенціальних складових швидкості при зміні кута нахилу оправки  $\rho$  для  $\omega_o=300\text{хв}^{-1}$ ,  $\omega_e=300\text{хв}^{-1}$ : де  $\omega_o$  – кутова шв. обертання навколо осі оправки;  $\omega_e$  – кутова шв. обертання оправки навколо осі кільцевої ванни

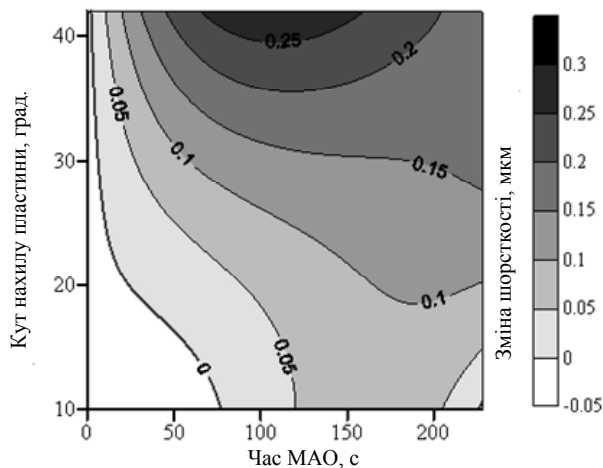


Рис. 6. Відмінність  $\Delta Ra$  між величинами шорсткості задньої поверхні БНП після обробки при значенні швидкостей обертання навколо кільцевої ванни 2м/с та 3м/с в залежності від куту нахилу пластин під час обробки

Недавні дослідження впливу кутів установки БНП по відношенню до осі кільцевої ванни та швидкості обробки представлені у [7] на шорсткість робочих поверхонь довели, що збільшення швидкості MAO з 2м/с до 3м/с призводить до досягнення більш низьких значень  $Ra$  за ідентичний час обробки, при цьому оптимальним кутом нахилу оброблюваних БНП можна вважати  $\zeta > 20^\circ$ . Підтвердження цьому можна знайти виходячи із представленої на рис. 6 топограми відмінності значень шорсткості  $\Delta Ra$ . Такий ефект досягається за рахунок зміни відношення нормальної та тангенціальної складової швидкостей різання ( $V_n/V_t$ ) при MAO від 4,5 до 1 [8] внаслідок збільшенні кута  $\zeta$  від 10 до 45°, тобто перехід від ударної взаємодії часточок MAI із оброблюваною поверхнею до вигладжування при MAO. Оптимальним співвідношенням за результатами цих досліджень можна вважати  $V_n/V_t < 2-2,5$ . Іншими словами, виконання цих наведених вище умов забезпечує оптимальні нормальні сили притискання MAI до оброблюваної поверхні та тангенціальні сили, що виконують

роботу по переміщенню MAI вздовж оброблюваної поверхні, тим самим забезпечуючи процеси мікрорізання та вигладжування [5].

#### Вплив на мікротвердість та округлення кромки БНП

Експериментальні дослідження [4, 9] показують, що найбільш рівномірний наклеп робочих елементів БНП забезпечується при куті нахилу пластини в процесі MAO по відношенню до площини кільцевої ванни рівному 20-30°, коефіцієнт зміцнення при цьому був максимальним. Характер зміни середньої величини поверхневої твердості  $HV_{200}$  в залежності від кута нахилу пластин при обробці порошком ФероМАП із розміром частинок рівним 200/100 мкм та додаванням пасти АСМ (3/2) після 120с MAO із реверсом обертання представлені на рис. 7. Використання MAI із більшим розміром зерен, при зберіганні всіх інших умов оброблення дозволило збільшити значення коефіцієнту зміцнення з  $K=1,35$  до 1,5-1,57, що пов'язане із збільшенням дії динамічних сил під час оброблення внаслідок збільшення маси зерен MAI.

Доведено, що при постійних параметрах MAO можна отримати на змінних різальних пластинах рівномірне та відтворюване округлення різальної кромки (РК). При цьому важливу роль має якість оброблюваних пластин. Змінні різальні пластилини із великою кількістю пор та РК із високою шорсткістю, як наслідок процесу їх виробництва, призводять до більшого округлення РК при MAO. Це досягається і тому, що під час MAO всі дефекти РК, про які



Рис. 7. Зміна середньої величини поверхневої твердості  $HV_{200}$  залежно від кута нахилу БНТП фірми SANDVIK під час MAO

показали, що після трьох хвили оброки має місце стійке підвищення поверхневої твердості на передній та задній поверхні БНТП у 1,2-1,3 рази та забезпечується кероване збільшення величини радіусів різальних кромки до 40-45 мкм при вихідних радіусах різальних кромки рівних 25-30 мкм. При цьому вже після 60-75с обробки спостерігалось збільшення твердості робочих поверхонь інструменту в середньому на 2ГПа по задній та на 3ГПа по передній поверхні (рис 9). Збільшення часу обробки супроводжувалося коливанням величини зміни твердості на робочих поверхнях в межах 2-4ГПа. Дослідження також показали, що найбільший ефект зміцнення робочих поверхонь (як задньої так і передньої) було забезпечено шляхом збільшення інтенсивності обробки – швидкості обробки, а саме обертання БНТП навколо осі кільцевої ванни з  $200\text{хв}^{-1}$  до  $300\text{хв}^{-1}$  та величини кута нахилу пластини до  $42^\circ$ . Це пояснюється зміною якісного впливу частинок МАІ на поверхню оброблюваного інструменту під час збільшення кута нахилу оброблюваного інструменту відносно осі кільцевої ванни.

Так при малих кутах на задній поверхні спостерігається переважно ударно-фрикційний тип взаємодії частинок МАІ із переважними нормальними силами взаємодії, в той час як на передній поверхні переважають дотичні сили, а саме процеси шкрябання, затирання та вигладжування поверхні та поверхневого шару. Оскільки нормальні по відношенню до обробленої поверхні інструменту (ударні) сили забезпечують зниження необхідного енергетичного порогу для активного розмноження дислокацій, а дотичні (фрикційні) сили взаємодії частинок та груп МАІ сприяють активному збільшенню дефектного шару [11-15], то збільшення кута нахилу призводить до оптимізації дії цих сил на всі оброблювані поверхні БНТП.

Щодо зміни радіусів різальних кромки інструменту, то тут спостерігався перехід від маже лінійного процесу притуплення кромки протягом 100-125с обробки, при якому швидкість затуплення складала 0,11-0,12 мкм/с, до загострення, що супроводжувалося зменшення радіусу різальної кромки інструменту на 3-5 мкм. (рис. 10) Такий ефект було зафіксовано після 130-150с з моменту початку обробки. Характерним виявилось і те, що

відзначалось вище, усуваються під дією тангенціальних сил. Отже, величина округлення РК у пластин низької якості збільшилася після 120с MAO на 25% (з  $r_n=54$  мкм до 67 мкм), а у пластин із більш високою якістю на 15% (з  $r_n=45$  мкм до 52 мкм). На рис. 8 представлено зовнішній вигляд РК оброблених пластин до та після MAO. Зони викришування на пластинах типу SNMM були згладжені внаслідок обробки, що призвело до покращення шорсткості оброблених пластин в три рази. Проте загальне значення величини шорсткості на РК залишилося суттєвим.

Результати більш детальних досліджень кінетики зміни поверхневої твердості багатограних пластин із твердого сплаву при MAO в умовах великих робочих щільностей описані у [10]

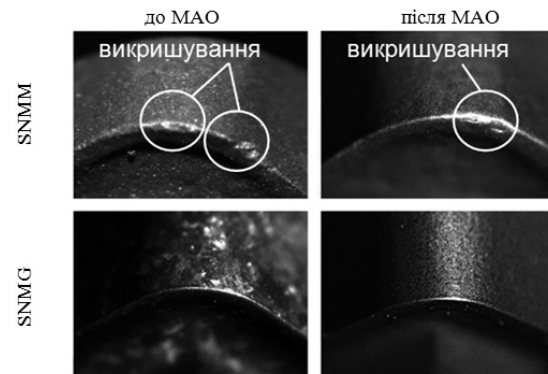
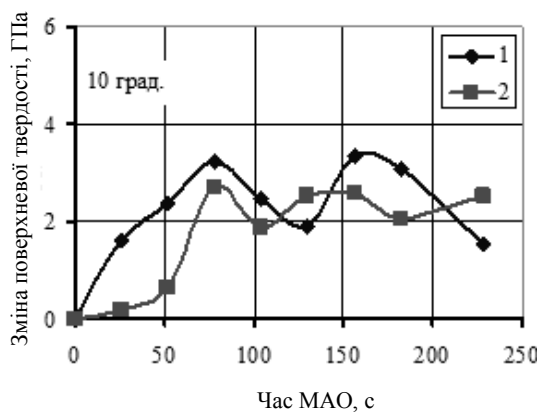
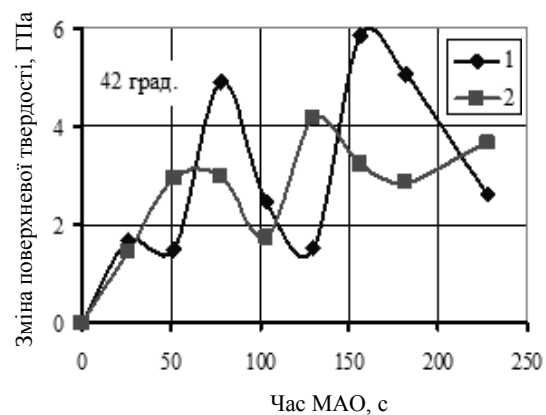


Рис. 8. Вигляд РК пластин до та після MAO



а



б

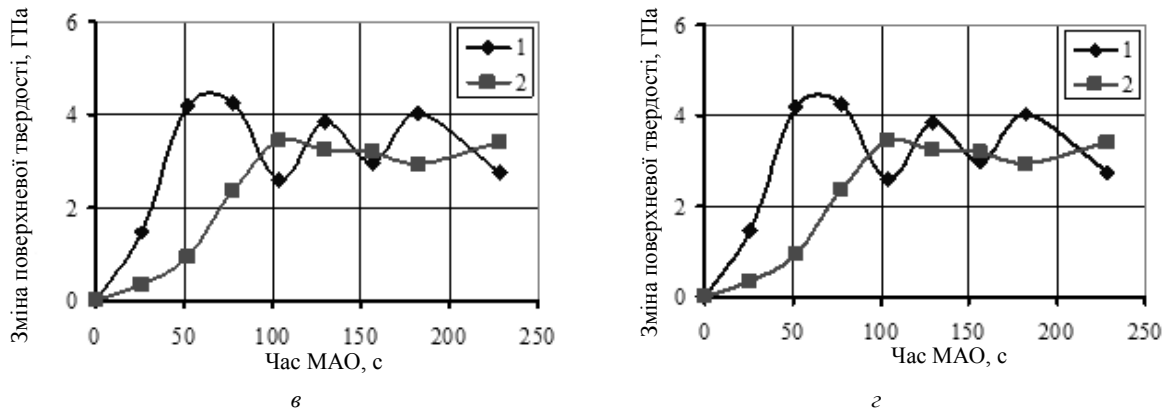


Рис. 9. Зміна поверхневої міцності: *a, б* задньої; *в, г* передньої поверхні БНТП залежно від часу МАО при швидкостях обертання пластин навколо кільцевої ванни: 1 – 200хв<sup>-1</sup>; 2 – 300хв<sup>-1</sup> при кутах нахилу вісі пластини: *a, в* 10°; *б, г* 42°

разом із тим спостерігалось і зменшення показників поверхневої твердості, як по передній, так і по задній поверхням. Дані досліджень також продемонстрували, що збільшення часу обробки до 2,5-3хв призводить до подальшого притуплення кромки з інтенсивністю 0,05-0,09мкм/с при швидкості обертання БНТП навколо осі кільцевої ванни рівній 200хв<sup>-1</sup> та його повній зупинці на рівні 12-15мкм при відповідно 300хв<sup>-1</sup>. Це пояснюється особливостями формування (та відповідно руйнування) віялоподібних ущільнених зон в МАІ та наявність критичних швидкостей обробки, при досягненні яких відбуваються процеси преформування МАІ під час магнітно-абразивної обробки [1, 5, 16].

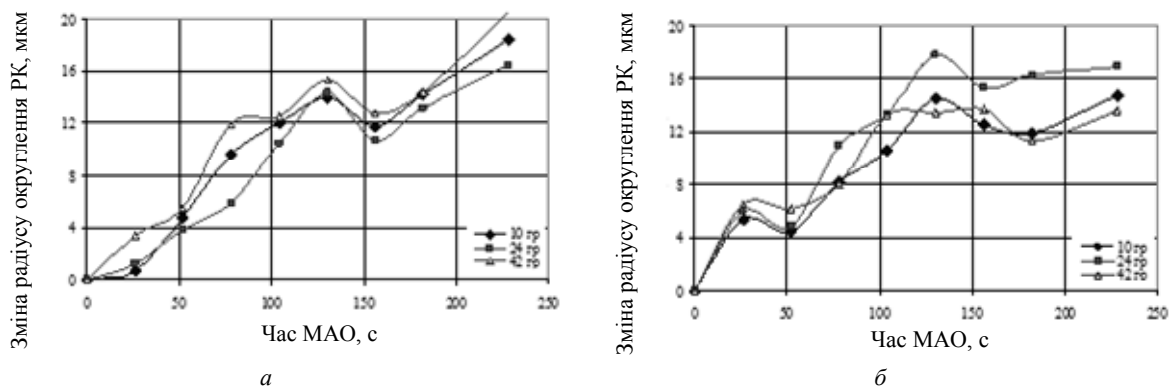


Рис. 10. Залежності зміни величини радіусів округлення різальних кромки БНТП від часу МАО при частоті обертання навколо осі кільцевої ванни: *a* – 200хв<sup>-1</sup>, *б* – 300хв<sup>-1</sup>

#### Вплив МАО на експлуатаційні характеристики БНТП

Результати досліджень по визначенню впливу МАО на зносостійкість БНТП [4, 9] показали помітне зростання їх працездатності. Порівняно із необробленими пластинами у інструмента після МАО зафіксовано зростання стійкості на майже 20% після 90 хвилин точіння (рис. 11). Цей результат спостерігався незалежно від величини отриманого радіуса РК та якості пластин до обробки. Зафіксовано, що процес різання відбувався більш стабільно. Величина зносу протягом перших хвилин роботи знизилася, не було зафіксовано наявності її різкого зростання, притаманної процесу припрацювання інструменту. Проте не було також і помічено впливу величини зерен МАІ на стійкісні характеристики попри її вагомий вплив формування мікрогеометрії БНТП.

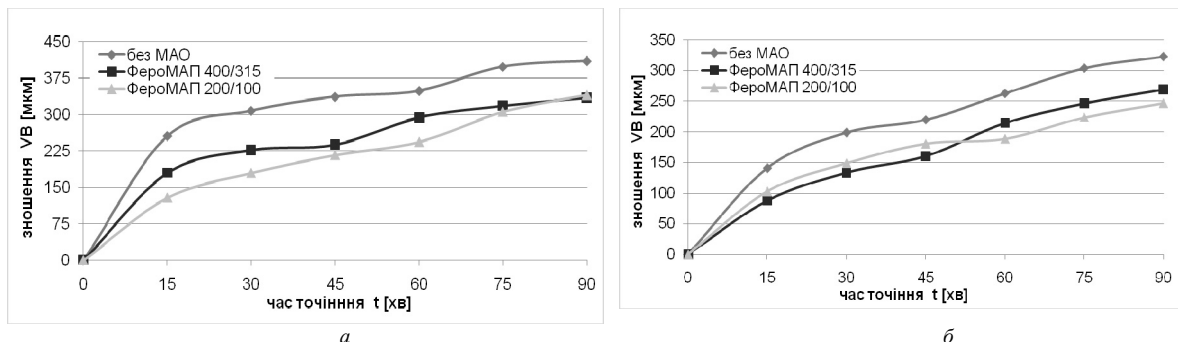


Рис. 11. Графік зношення по задній поверхні залежно від часу роботи БНТП: *a* пластини SNMM 120412, *б* пластини SNMG 120412

В статті [17] присвяченій вивченню впливу MAO на працездатність БНТП із TiN покриттям під час точіння запропоновано статистичну модель, що дозволяє прогнозувати стійкість різального інструменту та цілеспрямовано впливати на його експлуатаційні властивості. Це стало результатом досліджень мікрогеометричних параметрів та параметрів поверхневої твердості, а також трибологічних властивостей поверхневого шару інструменту після обробки. Було встановлено, що достатньо вагомо на поведінку зміцненого шляхом обробки за допомогою MAO інструменту впливає не твердість безпосередньо поверхневого шару, а так званий «підшарок» розташований на глибині 2-3мкм. Але найбільший вплив на експлуатаційну стійкість БНТП визначають параметри мікропрофілю поверхні різального інструменту, а саме величина опорної поверхні мікропрофілю на відносному рівні  $p=0,5-0,7$ . Схематичне представлення зони зношення задньої поверхні необроблених та оброблених MAO БНТП із покриттям зображено на рис. 12а та рис. 12б. «Другу фаску» зношення та перехідну зміцнену зону наведено на рис. 12в.

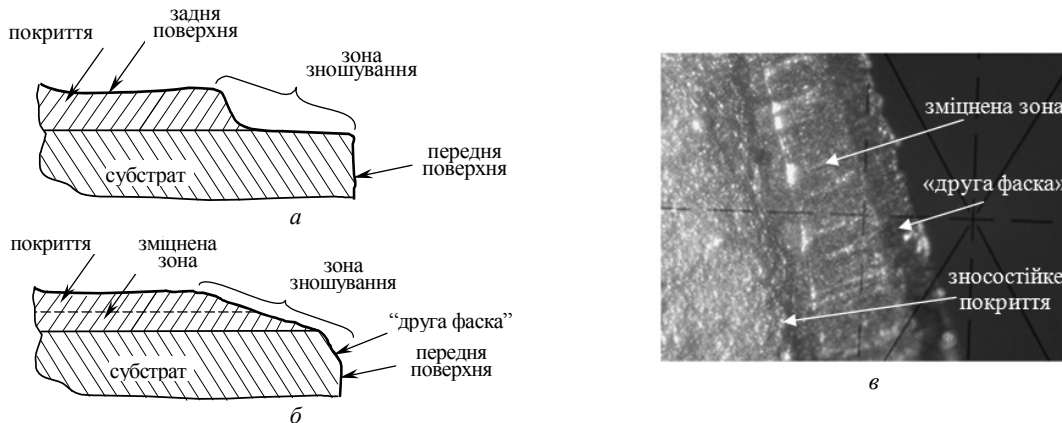


Рис. 12. Зона зношення задньої поверхні БНТП після експлуатації: а БНТП з покриттям; б БНТП з покриттям після поліруючо-зміцнюючої MAO; в вигляд зони зношення БНТП із іонно-плазмовим покриттям обробленої порошком Феромап після 40 хв. експлуатації (збільшення: x50)

Обробка кінцевого твердосплавного інструменту

В роботі [18] висвітлені результати MAO твердосплавних свердел після їх переточки по задній поверхні. Показано, що застосування MAO в даному випадку дозволяє вагомо знизити шорсткість робочих поверхонь при цьому підвищити їх твердість та отримати необхідне заокруглення РК інструменту.

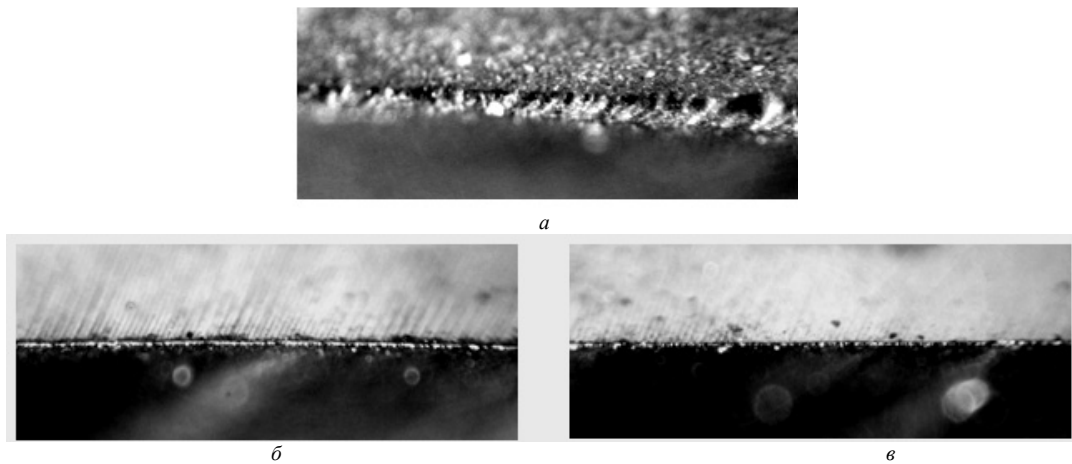


Рис. 13. Зовнішній вигляд різальної кромки у вихідному стані (а) і після MAO порошком PR P6M5; обробка в режимі натікання на робочі поверхні (б) і в режимі стікання (в), збільшення x10

Так MAO дозволяє не лише видалити дефектний поверхневий шар, що з'являється після переточки свердел, а й завдяки процесам мікропластичного деформування, що перебігають під час обробки, знизити шорсткість до  $Ra=0,3-0,5\mu\text{m}$ . При цьому поверхнева твердість збільшується із 15ГПа до 16-22ГПа. Найбільші значення поверхневої твердості були зафіксовані під час комбінованої обробки протягом 240с в режимі натікання та 120с стікання [19]. Було також помічено, що на величину радіуса різальної кромки в даному випадку найбільше впливає MAO, яке виконано в режимі натікання [1,20]. Це пояснюється недостатньою абразивною спроможністю застосованого абразивного порошку PR P6M5 при обробці твердого сплаву. Зовнішній вигляд різальної кромки до і після MAO порошком PR P6M5 з розміром частинок 160/100 мкм в режимі натікання і стікання наведено на рис. 13.

В другому етапі досліджень свердла були оброблені порошком ФероМАП, що має більші абразивно-поліруючі властивості, протягом 240с в режимах як натікання, так і стікання. Це дозволило ще більше знизити кінцеву шорсткість інструменту. Так отримана шорсткість на передній поверхні складала  $Ra=0,25-0,3\mu\text{m}$ , на задній –

$Ra=0,05-0,08\mu\text{м}$  та  $Ra=0,06-0,07\mu\text{м}$  на калібруючій частині (стрічка свердла). Відзначається зростання поверхневої твердості до 20-26ГПа. Встановлено, що в режимі натікання радіус РК збільшувався до величини 35-38 $\mu\text{м}$ , в той час як після обробки в режимі стікання величина округлення різальної кромки складала лише 5-7 $\mu\text{м}$ . Зовнішній вигляд робочих елементів свердел після другої стадії MAO наведено на рис. 14.

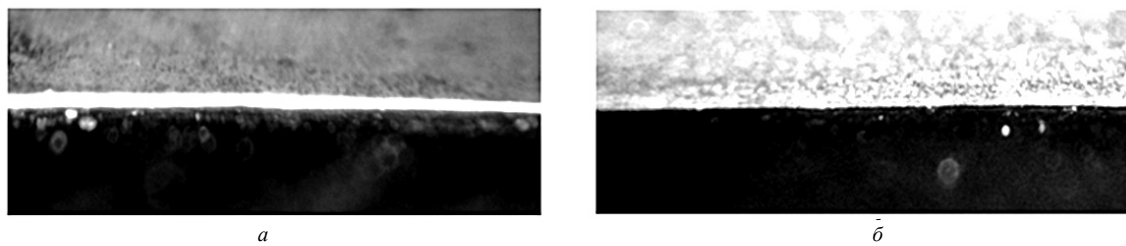


Рис. 14. Зовнішній вигляд робочих елементів свердел після другої стадії MAO обробка в режимі натікання на робочі поверхні (а) і стікання (б) порошком Феромап з додаванням алмазної пасту АСМ 3/2

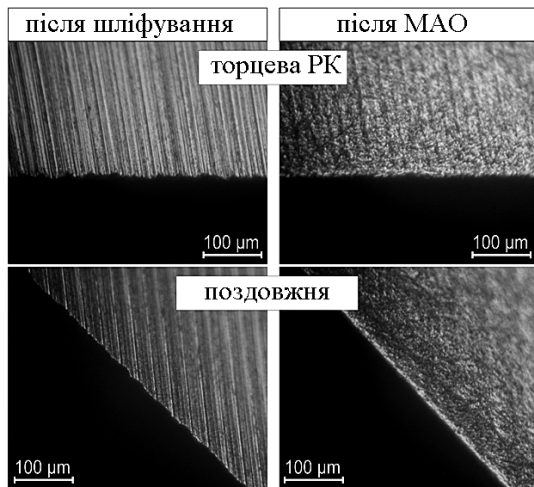


Рис. 15. РК кінцевої твердосплавної фрези після шліфування та MAO

Дослідження наведені у [21] доводять ефективність та унікальність цього виду обробки. На рис. 15 представлено зовнішній вигляд різальних кромок кінцевої твердосплавної фрези після шліфування та MAO.

Представлені результати експериментальних досліджень по застосуванню MAO для округлення кромки покритих твердосплавних свердел із прошліфуючою на РК захисною фаскою. У якості інструменту були вибрані твердосплавні свердла  $\varnothing 12,5\text{мм}$  із нанесеним покриттям  $M_{\text{тес}}$ . Оброблювався матеріал марки 20NiCrMo2-2 при  $n=2360\text{хв}^{-1}$ ,  $s_n=0,3\text{мм/об}$ ,  $t=8,0\text{мм}$  із додаванням СОЖ. Так кількість просвердлених отворів після отримання захисної фаски вручну складала трохи більше 2000; після MAO близько 3000; після отримання захисної фаски на шліфувальному верстаті із ЧПК та подальшою обробкою свердел методом MAO – більше 6000 отворів.

## Висновки

1. Для обробки інструменту найбільш доцільною є MAO в умовах великих робочих зазорів при їх кільцевому розміщенні із забезпеченням одночасного та співпадаючого за напрямом обертання оброблюваного інструменту навколо осі кільцевої ванни та власної вертикальної осі.
2. Для підвищення ефективності MAO необхідно додавати у якості допоміжного елемента МАІ діамантну пасту.
3. MAO позитивно впливає на мікрогеометрію оброблюваного інструменту. Обробка твердосплавного різального інструменту в умовах великих магнітних щільностей забезпечує формування рівномірної шорсткості робочих поверхонь та різальних кромки різального інструменту.
4. Основна робота по зниженню шорсткості виконується на початку обробки (перші 120-150с), що, після досягнення свого мінімуму для даного МАІ, змінюється процесами вигладжування мікроступів (до 240-300с) та часткового викришування карбідних складових твердого сплаву (більше 240-300с). Низька якість матеріалу БНТП веде до зниження часового інтервалу при досягненні якого починаються процеси активного викришування карбідних складових.
5. Збільшення швидкості MAO призводить до отримання менших значень шорсткості, при цьому переважання швидкості обертання БНТП навколо осі кільцевої ванни  $\omega_e$  над обертанням навколо власної осі  $\omega_o$  має бути не меншим ніж у два рази.
6. Оптимальним співвідношенням дії нормальних та тангенціальних швидкостей під час MAO можна вважати  $V_n/V_t < 2-2,5$ . При цьому кут нахилу осі оправки відносно осі кільцевої ванни під час обробки БНТП має бути рівним  $\zeta = 20-30^\circ$ .
7. Застосування крупнозернистого МАІ веде до більшого зниження шорсткості оброблюваного інструменту.
8. MAO дозволяє отримувати кероване округлення радіусу різальних кромки інструменту. При обробці кінцевого інструменту радіус помітно збільшується лише під час обробки в режимі натікання.
9. MAO твердосплавного інструменту із застосуванням мілко зернистого порошку веде до підвищення поверхневої твердості на передній та задній поверхні у 1,2-1,3. Максимальні значення твердості спостерігаються на глибині 2-3 $\mu\text{м}$ . Застосування більш крупнозернистого МАІ дозволяє отримати більші значення поверхневої твердості на рівні 1,5-1,57 від її початкової величини.



10. Застосування MAO веде до збільшення зносостійкості оброблюваного інструменту, при цьому процес різання стає більш стабільним, оскільки час необхідний для припрацювання інструменту значно зменшується.

11. Доведено ефективність застосування MAO для обробки РК із захисними фасками, що дає можливість вдвічі збільшити зносостійкість інструменту.

### Список літератури

1. Майборода В.С. Основи створення і використання порошкового магнітно-абразивного інструменту для фінішної обробки фасонних поверхонь. Дис. докт. техн. наук. Київ: 2002. – 404с.
2. Майборода В.С., Джулий Д.Ю., Фесюн Б.М., Анисимова А.В., Гейчук В.Н. Магнітно-абразивная обработка многогранных неперегачиваемых твердосплавных пластин в условиях больших рабочих зазоров // 1. Влияние условий базирования режущих пластин в рабочих зонах на эффективность процесса обработки // Машинобудування і машинознавство. Вип.6(154). Донецьк: ДонНТУ, 2009. – С.157-165.
3. Майборода В.С., Ульяненко Н.В. Кинетика формирования микропрофиля поверхности твердосплавного режущего инструмента при магнитно-абразивной обработке // Вісник Сумського державного університету (Технічні науки). – 2003. - №2(48). – С.104-111
4. Майборода В.С., Дюбнер Л.Г., Климов О.М. Вплив магнітно-абразивного оброблення на якість змінних твердосплавних пластин // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем збірник наукових праць Краматорськ – Київ, вип. 26 2010, - с 19-26
5. Майборода В.С. Дослідження властивостей магнітно-абразивного інструменту сформованного з сумішей порошків. Процеси механічної обробки в машинобудуванні. Збірник наук. праць ЖДТУ, вип. 6. 2009. – С.144-159.
6. Майборода В.С., Джулий Д.Ю. Аналіз умов магнітно-абразивного оброблення багатограних неперегачуваних твердосплавних пластин при їх довольному розташуванні в робочих зонах установки типу кільцева ванна. Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету ім. М.Остроградського. 2008.- №1(48), частина 2. – С. 22-28.
7. Майборода В.С., Гейчук В.М., Клишта Е.С. Магнітно-абразивная обработка многогранных неперегачиваемых твердосплавных пластин в условиях больших рабочих зазоров. // 2. Формирование заданной шероховатости рабочих поверхностей режущих неперегачиваемых твердосплавных пластин Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. Вип.7(166). – Донецьк: ДонНТУ, 2010. – С.82-90.
8. Гейчук В.М., Майборода В.С. Кінематика магнітно-абразивної обробки багатограних неперегачуваних твердосплавних пластин в магнітній системі типу "кільцева ванна". Процеси механічної обробки в машинобудуванні. Збірник наук. праць ЖДТУ, вип.8. 2010. – С.41-76.
9. Майборода В.С., Лебедев В.Я., Климов А.Н. Магнітно-абразивная обработка многогранных твердосплавных пластин. Машиностроение: Респ.межвед. сб.науч.тр./ под. ред. Б.М. Хрусталева Вып. 25. Минск: 2009. – С. 85-89.
10. Майборода В.С., Джулий Д.Ю., Клишта Е.С. Магнітно-абразивная обработка многогранных неперегачиваемых твердосплавных пластин в условиях больших рабочих зазоров. // 3. Влияние обработки на изменение поверхностной твердости рабочих поверхностей и характер округления режущих кромок неперегачиваемых пластин. Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Зб.наук.праць. – Краматорськ-Київ, вип.26, 2010. – С.141-147. Якубов Ф.Я., Ким В.А. Структурно-енергетические аспекты упрочнения и повышения стойкости режущего инструмента. – Симферополь: Крымское уч.-пед.гос.изд-во, 2005. – 300 с.
11. Ульяненко Н.В. Підвищення працездатності твердосплавного інструменту шляхом застосування магнітно-абразивного оброблення та нанесення зносостійких покриттів. Дис. канд. техн. наук., Київ: 2006. – 160с.
12. Фридель Ж. Дислокации. Москва: Мир, 1967. – 643с.
13. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
14. Проволоцкий А.Е. Струйно-абразивная обработка деталей машин. – К.: Тэхніка, 1989. – 177 с.
15. Патент України на винахід, №18814. Спосіб магнітно-абразивної обробки Майборода В.С., Степанов О.В. Андронов А.В. Верменко В.Я. Давыдов С.П. Устенко В.Г. Шлюко В.Я. В24В 31/112 25.12.97. Бюл.№6.
16. Майборода В.С., Степанов О.В., Ульяненко Н.В. Ульяненко Н.В. Вплив магнітно-абразивної обробки багатограних твердосплавних неперегачуваних пластин з покриттям на їх робоздатність. Промислова гідраліка і пневматика. 2005. - №3(9). – С.81-87.
17. Майборода В.С., Плівак О.А., Майданюк С.В., Гейчук В.М. Магнітно-абразивна обробка кінцевого твердосплавного різального інструменту. Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. 2007.- №1(42), частина 1. – С. 66--70..
18. О., Byelyayev. Erhöhung der Leistungsfähigkeit von HSS-Spiralbohrern durch Einsatz der magnetabrasiven Bearbeitung. . Diss. OvGU Magdeburg. Shaker Verlag 2008.
19. Степанов О.В. Исследование процесса формирования магнитно-абразивного порошкового инструмента для обработки деталей сложной геометрической формы. Дисс. к.т.н. . Киев: 1997. – 145с.
20. Byelyayev O., Hoffmann D., Pfrommer J., Maiboroda V., Geichuk W. Einige Aspekte der Schneidkantenverrundung an Bohrwerkzeugen. Simferopol: 2010