

В.С. Майборода, д.т.н., проф.
В.М. Гейчук, к.т.н., доц.
О.С. Клишта, студ.
Національний технічний університет України "КПІ"
О.А. Беляєв
фірма "ZOM", м. Магдебург, Німеччина

**КІНЕТИКА ФОРМУВАННЯ КРОМОК
КІНЦЕВОГО РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТА
ПРИ МАГНІТНО-АБРАЗИВНОМУ ОБРОБЛЕННІ
В МАГНІТНІЙ СИСТЕМІ ТИПУ "КІЛЬЦЕВА ВАННА"**

Досліджена кінетика формування кромки кінцевого інструмента з швидкорізальних сталей при магнітно-абразивній обробці в умовах великих робочих зазорів в магнітній системі типу "кільцева ванна". Показано, що для забезпечення умов загострення різальних кромки доцільне застосування порошкових магнітно-абразивних матеріалів з осколковою формою частинок при тривалості обробки до 200–240 с. Початкові величини радіусів різальних кромки при цьому визначаються умовами їх заточування і в процесі магнітно-абразивної обробки може змінюватися в діапазоні від 3–5 до 20 мкм. Експериментальна перевірка на прикладі МАО свердел діаметром 6,8 мм з швидкорізальної сталі показала як можливості керованого притуплення свердел, так і їх заточування на мікрорівні (формування радіусів різальних кромки).

Вступ. Підвищення працездатності різального інструмента є багатопланою проблемою і полягає у вирішенні декількох взаємопов'язаних задач. До них можна віднести формування оптимальних геометрій і мікрогеометрії робочих елементів різального інструмента, при умові забезпечення відповідного зміцнення. Їх вирішення полягає в комплексному підході до процесів оброблення, зокрема, на фінішних етапах виготовлення інструмента. При цьому важливим є врахування таких взаємопов'язаних технологічних аспектів обробки, як ступінь зміцнення, мікрогеометричні параметри робочих елементів різального інструменту, і в особливості тонких, загострених різальних кромки. Традиційно вважають, що чим гостріша різальна кромка, тим менші зусилля будуть виникати при експлуатації інструменту. Проте застосування різноманітних методів зміцнення, які збільшують жорсткість поверхневого шару та сприяють підвищенню

поверхневої твердості, під час експлуатації інструменту може призвести до небажаних явищ, таких як викришування тонких загострених кромки з подальшим зниженням як працездатності інструменту, так і якості оброблення. Одним з можливих шляхів позитивного керованого впливу на мікрогеометрію різальних кромки є метод абразивного оброблення із застосуванням рухомо-скоординованого абразивного інструмента з змінними жорсткістю, абразивними і поліруючими властивостями – метод магнітно-абразивного оброблення (МАО) в умовах великих магнітних щілин.

Стан проблеми. Застосування для фінішного оброблення кінцевого різального інструменту методу МАО в умовах великих магнітних щілин є одним з перспективних методів. Він дозволяє не тільки з високою продуктивністю зменшувати шорсткість поверхонь робочих елементів інструменту, а і забезпечувати їх зміцнення. Значний об'єм досліджень з МАО свердел, виготовлених з швидкорізальної сталі, показав, що практично відкритим залишилося питання цілеспрямованого керування мікрогеометрією, ступенем округлення головних різальних кромки і перемички свердел. Останні дослідження в цьому напрямку [1–3] показали, що застосування схеми типу "кільцева ванна" у порівнянні з іншими способами МАО свердел не призводить до суттєвого притуплення як різальних кромки, так і перемички. При цьому принциповим у порівнянні з попередніми дослідженнями є реалізація процесу МАО з врахуванням реологічних властивостей порошкового магнітно-абразивного інструменту (МАІ). Для кінцевого та осевого різального інструменту запропоновано оброблення інструменту в нахиленому стані – вісь інструменту з вектором головного руху складає гострий кут (режимі "стікання" порошку з оброблюваних поверхонь) або тупий кут (режим "натікання" порошку на оброблювані поверхні) [5, 6]. Попередні дослідження в цьому напрямку показали, що покращується не тільки шорсткість робочих поверхонь, а також має місце підвищення твердості поверхневого шару, його зносостійкості [3, 5], зростає робоздатність інструменту [2, 5], знижуються сили різання [6]. Доведено [2], що незначне притуплення кутків свердел, яке відбувається при МАО в умовах великих магнітних щілин за схемою, наведеною в [4], є бажаним і дозволяє не тільки уникнути сколювання кутка свердел на початковій стадії експлуатації, а і суттєво зменшити зношування на етапі припрацювання інструменту.

Проте не з'ясовано механізм формування різальних кромки, що обмежує ефективне використання методу МАО при фінішній обробці, відкритими залишились питання по встановленню механізму і кінетики

процесу формоутворення різальних кромок, що не дозволяє визначити конкретні рекомендації і обмеження при операціях оброблення кромок на фінішних етапах виготовлення інструменту із застосуванням технологічної операції MAO.

Зважаючи на вище зазначене, **метою роботи** було вивчення кінетики процесу формування і фінішного оброблення різальних кромок кінцевого різального інструменту на прикладі зразків, що імітують свердла, кінцеві фрези та інший інструмент при MAO в умовах кільцевого розташування робочих зон.

Експериментальні дослідження. Для проведення досліджень використовували зразки, що імітують робочі елементи кінцевого різального інструменту, виготовлені з загартованої швидкорізальної сталі з кутами загострення, які змінювались в діапазоні 40-137°. Загострення було виконане симетричним по площинах, що дозволяє імітувати перемичку на свердлах і з деяким наближенням безпосередньо різальні кромки на такому кінцевому інструменті, як свердла, кінцеві фрези тощо.

Обробку виконували магнітно-абразивними порошками з розмірами частинок 160/100 і 315/200 мкм. Застосовували рівновісні порошоків матеріали з осколковою формою частинок – Ферромап, у яких коефіцієнт нерівності складає $k_f = 1,5-1,6$, з округлою формою – Полімам–М і ПР Р6М5 з величиною $k_f = 1-1,15$ і нерівновісними частинками з коефіцієнтом $k_f = 2-2,5$ – Царамам [5].

Зважаючи на попередні розрахунки [7], відзначимо, що при застосуванні наведених осколкових порошоків забезпечується підвищена абразивна здатність порошкового магнітно-абразивного інструменту з урахуванням розмірів частинок і площі їх фактичного контакту з оброблюваною поверхнею [5, 8]. Округлі порошоків магнітно-абразивні матеріали при MAO в умовах кільцевого розташування робочих щілин значної величини і слабких магнітних полів виконують переважне пластичне мікродеформування поверхневого шару з незначним зношуванням оброблюваної поверхні, реалізуючи ефект вигладжування поверхні. MAO виконували на установці, що описана в [2-5]. Враховуючи попередні результати, наведені в [1-9], швидкість обертання навколо осі кільцевої ванни складала 2,5 м/с, а навколо власної осі – 1 об/хв. Кут нахилу осі зразків до вектора головного руху складав 30°. В робочих зонах під час MAO зразки розташовували таким чином, щоб проекція осі зразків на площину ванни була дотичною до кола обертання навколо осі ванни. Величина магнітної індукції в центрі робочих зон, вільних від

порошку, дорівнювала 0,24 Тл. В якості змочувально-охолоджуючих технологічних середовищ для підвищення ефективності процесу оброблення використовували мастильну рідину АСФОЛ [2].

Вимірювання радіусів округлення кромки зразків виконували в трьох перетинах вздовж різальної кромки зразка за методом "зіскоку" щупа профілометра з кромки з обох сторін по відношенню до кромки через кожні 60 с процесу MAO з реєстрацією результатів на вимірювальному комплексі за методикою, наведеною в [6]. Додаткову фіксацію зовнішнього вигляду кромки на кожному етапі виконували цифровим фотоапаратом на інструментальному мікроскопі. Загострення зразків виконували на універсальному заточувальному верстаті ельборовими кругами. В процесі загострення зразків, навіть при їх "виходжуванні" на різальній кромці завжди залишалась задирка (рис.1), величина якої може змінюватися у досить широких межах в залежності від режимів заточування. Кромки зразків заточували з величиною радіуса округлення 5–30 мкм в залежності від кута загострення. Зазначимо, що величина радіуса, яка визначена до MAO, не є дійсним радіусом закруглення самої кромки, а є величиною радіуса, по якому загнута задирка (рис. 1).

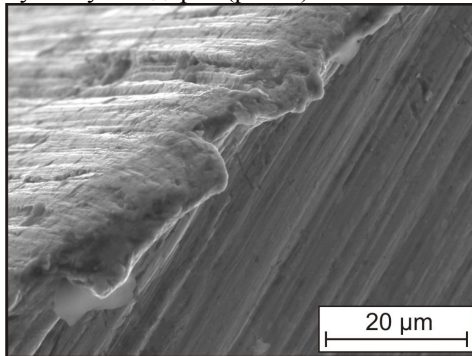


Рис. 1. Зовнішній вигляд задирки на різальній кромці зразка для досліджень після їх загострення

В роботі [7] було показано, що в процесі MAO відбувається досить складний процес взаємодії оброблюваних поверхонь з магнітно-абразивним інструментом (MAI), який формується в робочих магнітних щілинах. Під час обробки одночасно протікають процеси фрикційної взаємодії, мікрорізання, скобління, пластичного деформування поверхневого шару виробів шляхом ударної взаємодії

частинок МАІ і поверхні деталей, пластичного вигладжування, тощо. Реалізація ефективного процесу MAO визначається трьома основними чинниками, що наведені в [10]. Одним з суттєвих факторів є наявність відповідних співвідношень між складовими швидкостей відносного переміщення частинок МАІ і поверхонь, що оброблюють – нормальною і дотичною. Тому їх попереднє визначення дозволить оцінити можливість цілеспрямованого впливу на процеси формування кромки інструменту при MAO, а саме ділянки поверхонь з активним обробленням і ділянки, в яких умови для реалізації процесу MAO недостатні.

1. Моделювання умов MAO зразків у великих магнітних щілинах кільцевої форми.

Виконано попередні розрахунки кутів атаки на кромках зразків та їх робочих поверхнях, перетин яких утворює кромку. Мета розрахунків полягала у визначенні умов, наведених у [8], а саме відповідного співвідношення нормальної і дотичної складових сил з боку МАІ на оброблювану поверхню, достатніх для відтворення процесів пластичного деформування і мікрорізання оброблюваних поверхонь, а також відсутність "тіньових зон" [11] – умов, при яких повинно відбуватися активне оброблення .

На рис. 2 представлена розрахункова кінематична схема процесу MAO зразків, яка відповідає їх фактичній кінематиці процесу на експериментальному стенді. За вихідне положення зразка в правій системі координат $X_1Y_1Z_1$ прийняте його вертикальне положення з робочою частиною в нижньому положенні. Початок O_1 системи координат розташований в центрі нижнього торця зразка, тобто в середній точці кромки. Вісь Z_1 направлена від переднього торця до хвостовика. При цьому вісь Y_1 направлена до осі магнітної системи.

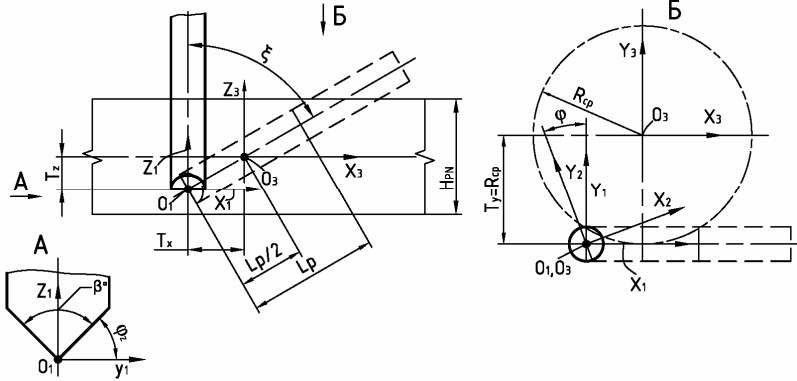


Рис. 2. Розрахункова схема кінематики процесу MAO зразків

За вихідне положення зразка з правою системою координат $X_1Y_1Z_1$ прийняте його вертикальне положення з робочою частиною в нижньому положенні. Початок O_1 системи координат розташований в центрі нижнього торця зразка, тобто в середній точці кромки. Кромка клину зразка розташована вздовж осі X_1 . Вісь Y_1 направлена до осі магнітної системи, а вісь Z_1 – від переднього торця (кромки) до хвостовика. При цьому початок O_3 системи координат $X_3Y_3Z_3$ на осі "кільцевої ванни" на відстані $H_{PN}/2$ від нижнього або верхнього торця кільцевої ванни. Її вісь Z_3 співпадає з віссю "кільцевої ванни" і направлена вгору.

Для визначення координат точок клину зразка в його обертальному русі навколо власної осі з кутовою швидкістю ω_3 використовується система координат $X_2Y_2Z_2$, яка повернута відносно системи координат $X_1Y_1Z_1$ на кут φ . Зміщення T_x , T_z , системи координат $X_2Y_2Z_2$ відносно системи координат $X_3Y_3Z_3$ вибирається таким чином, щоб після установки зразка у робоче положення, яке характеризується кутом нахилу ξ осі зразка відносно вертикалі, довжина L_p робочої частини зразка ділилась площиною Y_3Z_3 навпіл, а її серединна точка осі лежала в площині X_3Y_3 . В цьому випадку величини зміщення визначаються за формулами:

$$\begin{aligned} T_x &= -\frac{L_p \cdot \sin(\xi)}{2}, \quad T_y = -R_{cp}, \\ T_z &= -\frac{L_p \cdot \cos(\xi)}{2} \end{aligned} \quad (1)$$

Величина R_{cp} є радіусом середньої лінії "кільцевої ванни". Площини клину зразка задавались у векторній формі:

$$\begin{aligned} PL_F(x, y, \varphi_z) &= \begin{pmatrix} x \\ y \\ y \cdot \operatorname{tg}(\varphi_z) \end{pmatrix}, \\ PL_B(x, y, \varphi_z) &= \begin{pmatrix} x \\ y \\ -y \cdot \operatorname{tg}(\varphi_z) \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (2)$$

Рівняння кромки клину можна отримати підстановкою в (2) значення $y=0$. З рівнянь (2) кромка зразка лежить на осі X. Для знаходження кута атаки в заданих точках поверхонь зразка визначимо координати цих точок в початковому положенні. Виконавши перетворення координат над цими координатами, одержимо координати точки в робочому зазорі. Представимо вектори складових сумарної швидкості різання \vec{V}_p та \vec{V}_s як направлені відрізки в кінцевому положенні заданої точки, виходячи з таких положень:

– вектор швидкості \vec{V}_p завжди перпендикулярний радіусу R_p , який дорівнює відстані від осі ротора (магнітної системи) до вибраної точки інструменту;

– вектор швидкості \vec{V}_s завжди перпендикулярний радіусу R_s , який дорівнює відстані від осі інструменту до вибраної точки.

Перетворення координат виконувались за формулою:

$$\begin{aligned} R_{pt3}(x, y, \varphi_z, \varphi, \xi) &= \\ &= MT_{XYZ32}(\xi) \cdot MR_{Y21}(\xi) \cdot MR_{Z21}(\varphi) \cdot PL_F(x, y, \varphi_z) \end{aligned} \quad (3)$$

де $R_{pt3}(x, y, \varphi_z, \varphi, \xi)$ – координати кінця вектора в системі координат $X_3Y_3Z_3$; $MR_{Z21}(\varphi)$ – матриця повороту на кут φ навколо осі свердла (кругова подача зразка зі швидкістю ω_s навколо своєї осі); $MR_{Y21}(\xi)$ – матриця повороту на кут ξ навколо осі Y в системі координат

$X_2 Y_2 Z_2$; $MT_{XYZ32}(\xi)$ - матриця переміщень на величини $-T_X$ по осі X, $-T_Y$ по осі Y та $-T_Z$ по осі Z в системі координат $X_3 Y_3 Z_3$.

Склавши компоненти швидкостей \vec{V}_p та \vec{V}_s , знайдемо компоненти сумарної швидкості різання \vec{V}_s . Кутом атаки χ є кут між вектором сумарної швидкості та дотичною до поверхні інструменту в заданій точці. На рис. 3 представлені результати розрахунку кутів атаки χ на кромці ($y = 0$) в залежності від кута повороту ϕ та кута загострення β зразка.

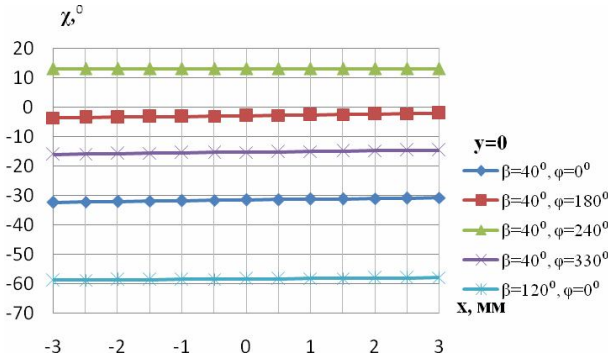


Рис. 3. Залежність кута атаки χ від положення на кромці та кутового положення ϕ

Аналіз наведених залежностей показує, що при даному співвідношенні швидкостей кругової подачі та головного руху (середнє значення за оберт $V_s/V_p \approx 6,6 \cdot 10^{-5}$) кут атаки χ мало залежить від положення по довжині кромки (від відстані до осі обертання) і в значній мірі залежить від кута загострення β зразка та від кута ϕ . На рис. 4 представлені результати розрахунку кутів атаки χ на клині в залежності від кута повороту ϕ при куті загострення зразка $\beta = 40^\circ$. З аналізу залежностей, представлених на рис. 3 та 4, можна зробити висновок, що при малих значеннях швидкості кругової подачі на величини кутів атаки мають значний вплив кути загострення β зразка та його кутове положення ϕ .

Залежності мають періодичний характер. Додатні кути атаки притаманні тільки для малих кутів загострення ($\beta = 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ$) в невеликому діапазоні кутів $\Delta\phi \approx 60^\circ \div 100^\circ$ (для менших кутів загострення – більший діапазон). На рис. 5 представлені залежності кута атаки на

кромці зразка від кута повороту φ при різних значеннях кута загострення β .

Аналіз результатів розрахунків показав, що для кутів загострення $\beta > 70^\circ$, особливо для умов "стікання" МАІ з робочих поверхонь, не буде мати місце активне оброблення кромки. Зазначимо, що поняття "активне" оброблення не враховує специфічні властивості МАІ, а саме: здатність МАІ нівелювати відносно оброблюваної поверхні в результаті дії магнітних сил; дію пондеромоторних сил і процеси пов'язані з перемішуванням і відновленням форми порошкового МАІ [5].

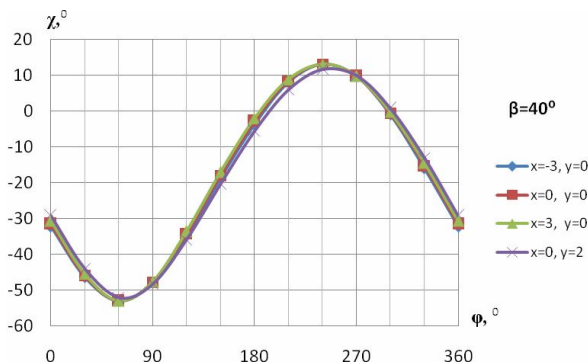


Рис. 4 Залежність кутів атаки від кута повороту φ

Саме ці властивості МАІ забезпечують можливість обробки поверхонь та кромки у так званих "тіньових" зонах, тобто на тих поверхнях, на яких при даному куті повороту φ зразка кути атаки мають від'ємні значення.

2. Магнітно-абразивна обробка в умовах "стікання" МАІ.

Залежності величин радіусів округлення кромки зразків з різними кутами загострення від тривалості МАО наведено на рис. 6. Аналіз отриманих залежностей показує, що найбільш активне збільшення радіусів округлення кромки відбувається в разі застосування рівновісних осколкових порошоків. При цьому найактивніше збільшення радіусів округлення кромки має місце при використанні порошку Полімам-Т з розміром частинок 200/100 мкм. Для інших порошоків, що використовують для формування МАІ, збільшення радіусів кромки несуттєве. Швидкість зміни радіусів кромки зразків в процесі МАО протягом 450 с наведено в табл. 1. Встановлено, що притуплення гострих кромки відбувається при застосуванні для формування МАІ порошоків осколкового типу з рівновісними частинками. Причому МАІ з більш дрібних частинок сприяє

помітно активнішому процесу збільшення радіусів кромки при МАО. Застосування округлих і нерівновісних частинок магнітно-абразивних порошків не призводить до притуплення кромки в процесі обробки і в деяких випадках навіть призводить до їх заточування (від'ємні значення швидкості зміни радіусів кромки).

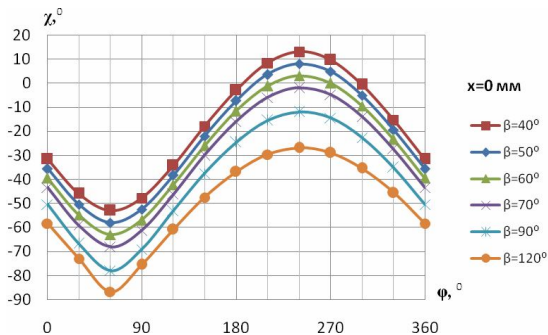
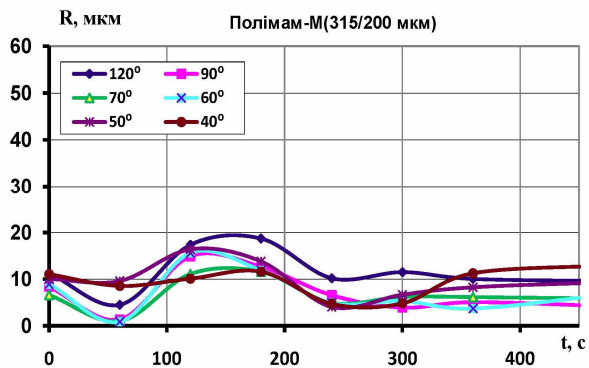
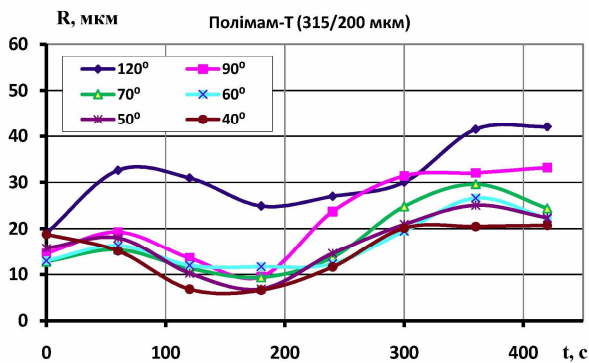


Рис. 5. Залежності кута атаки на кромці зразка від кута повороту ϕ при різних значеннях кута загострення β



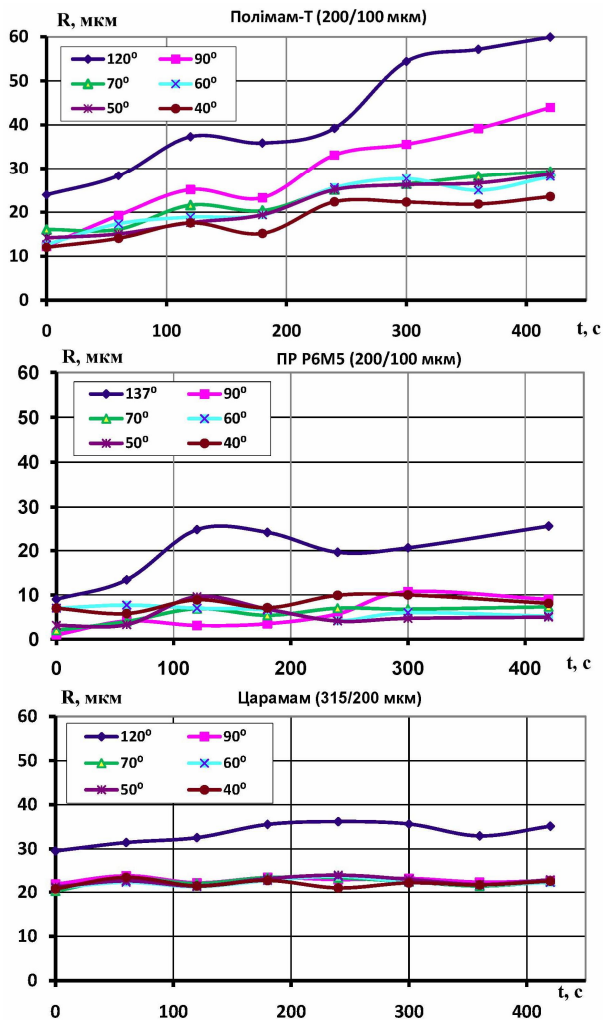


Рис. 6. Залежності величин радіусів округлення кромки зразків від тривалості МАО в умовах стікання з робочих поверхонь при різних кутах загострення β клину зразків

Кінетику зміни величини радіусів кромки після МАО аналізували по відношенню до величини радіусу після його формування на заточувальному верстаті до МАО. Характер зміни величини радіуса кромки ΔR зразків при різному часі МАО в залежності від кута загострення зразків наведено на рис. 7. Від'ємні значення величини ΔR свідчать про те, що відбувається зменшення радіуса кромки. Процеси формування радіусів кромки різними типами МАП мають свої особливості. При застосуванні дрібних осколкових МАП відбувається переважне притуплення різальних кромки, що підтверджує результати, наведені в [1].

Таблиця 1

Швидкість зміни величини радіусів округлення кромки зразків при МАО різними МАП в режимі "стікання"

Тип магнітно-абразивного порошку, форма частинок	Розмір частинок, мкм	Швидкість зміни величини радіусів округлення кромки, мкм/с					
		Кут загострення кромки, °					
		40	50	60	70	90	120
Поліам-Т, осколкова, рівновісна	200/100	0,028	0,038	0,036	0,034	0,072	0,089
	315/200	0,017	0,024	0,028	0,039	0,052	0,041
Поліам-М, округла, рівновісна	315/200	0,0019	-0,0085	-0,0065	-0,0005	-0,0093	-0,0024
ПР Р6М5, сферична	200/100	0,0061	0,0013	-0,006	0,011	0,020	0,031
Царамам, осколкова, нерівновісна	315/200	0,0008	0,0025	0,002	0,0014	0,0002	0,010

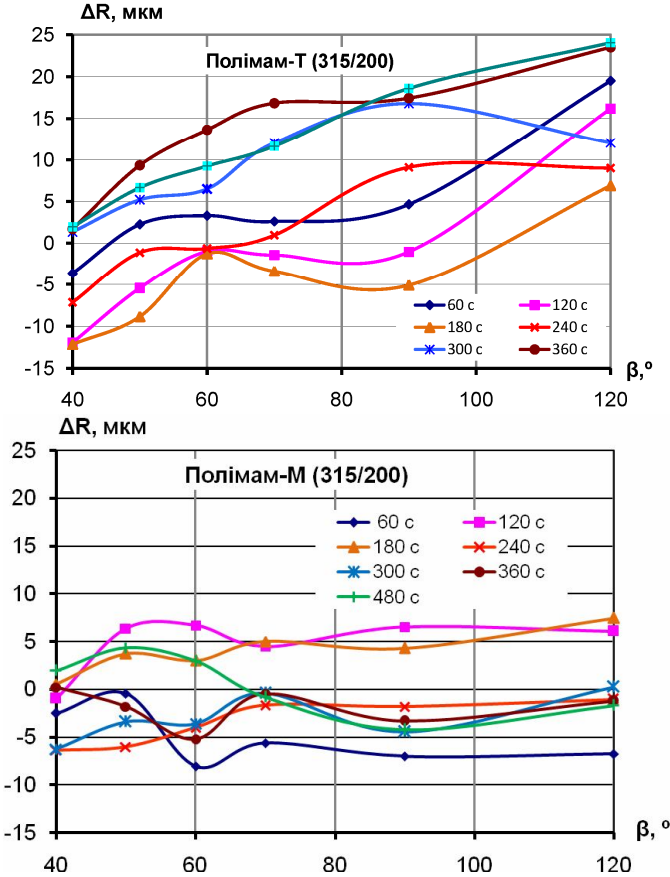


Рис. 7. Залежності зміни величини радіусів округлення різальних кромок зразків від кута загострення β та тривалості МАО

Відзначимо, що процес зміни величини R відбувається не монотонно залежно від кута загострення леза. Застосування порошоків з оскольчатою формою (Полімам-Т) і розміром частинок 315/200 мкм на першому етапі процесу МАО (протягом перших 180–240 с) призводить до зменшення радіусів округлення практично для усіх досліджуваних зразків з різними кутами загострення. Зменшення радіусів округлення під час МАО округлими порошками (Полімам-М) в 2–3 рази менше, ніж при використанні осколкових частинок. У випадку дрібних

округлих порошоків тенденція зміни величини R близька до дрібних осколкових.

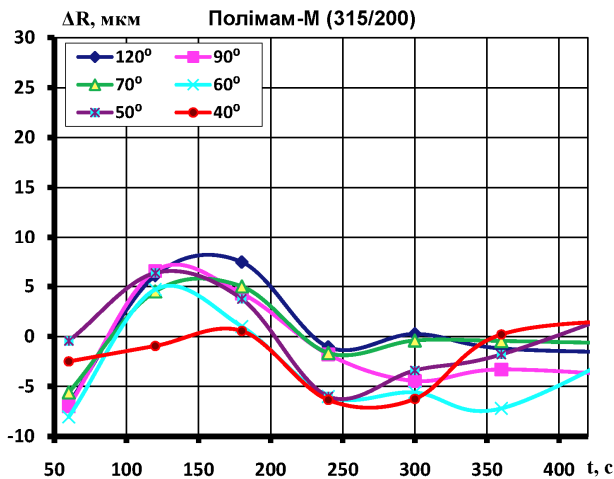
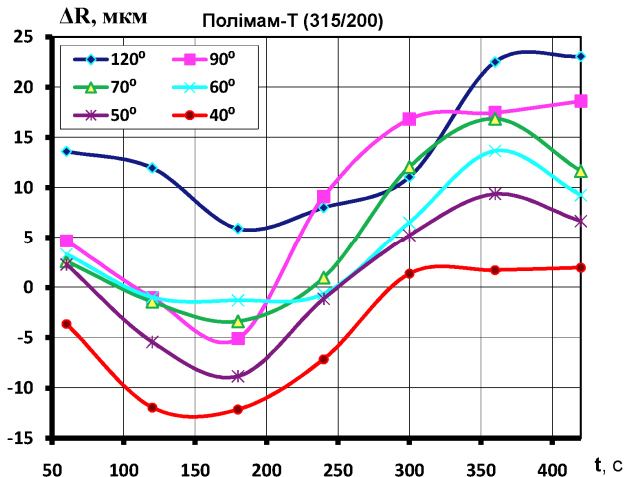
Зовсім інша поведінка зміни величини R має місце при використанні округлих порошоків з розміром частинок 315/200 мкм. У порівнянні з осколковими практично для усіх зразків з різними кутами загострення має місце зниження R в порівнянні з необробленими методом MAO. Виключення притаманне зразкам після MAO протягом 120 і 180 с. При зазначеній тривалості MAO відбувається притуплення кромки зразків приблизно на 3–6 мкм незважаючи на величину кута загострення. Відзначимо, що при кутах $\beta > 90^\circ$ зміни у величині радіусів округлення незначні, що підтверджує результати попередніх розрахунків.

Зазначені особливості зміни величини округлення різальних кромки при MAO різними за розміром і формою порошками пов'язані з їх абразивною здатністю, умовами контакту частинок MAI з оброблюваними поверхнями [5, 8, 12], особливостями пластичного мікродеформування поверхневого шару і видалення з поверхні дефектів, що отримані на операції заточування зразків.

Аналіз зміни величини ΔR в залежності від часу MAO дозволив більш ретельно проаналізувати кінетику процесу формування (заточування-притуплення) радіусів округлення різальних кромки для зразків з різними кутами загострення. Отримані залежності наведено на рис. 8.

Встановлено, що при використанні порошку Полімам-Т (200/100 мкм) відбувається стає притуплення різальних кромки з швидкістю збільшення величини R , що змінюється в діапазоні 0,03–0,09 мкм/с, а порошком ПР Р6М5 (160/100 мкм) – зі швидкістю, яка менша в 3 рази, а саме складає 0–0,03 мкм/с.

Дещо інший процес зміни величини ΔR має місце при застосуванні порошоків з розміром частинок 315/200 мкм. Аналіз отриманих результатів дозволив конкретизувати кінетику формування радіусів округлення. Встановлено, що протягом перших 60 с процесу MAO відбувається переважно видалення мікронадрізки з різальної кромки і зниження шорсткості поверхонь, що утворюють кромку, до деякої сталої величини, яка визначається попередньою шорсткістю і типом магнітно-абразивного порошку. Для порошкових матеріалів, які використовувались в наших дослідженнях, встановлено, що шорсткість, отримана через 60 с MAO не перевищувала величини R_a 0,1 мкм і в подальшому практично не змінювалась.



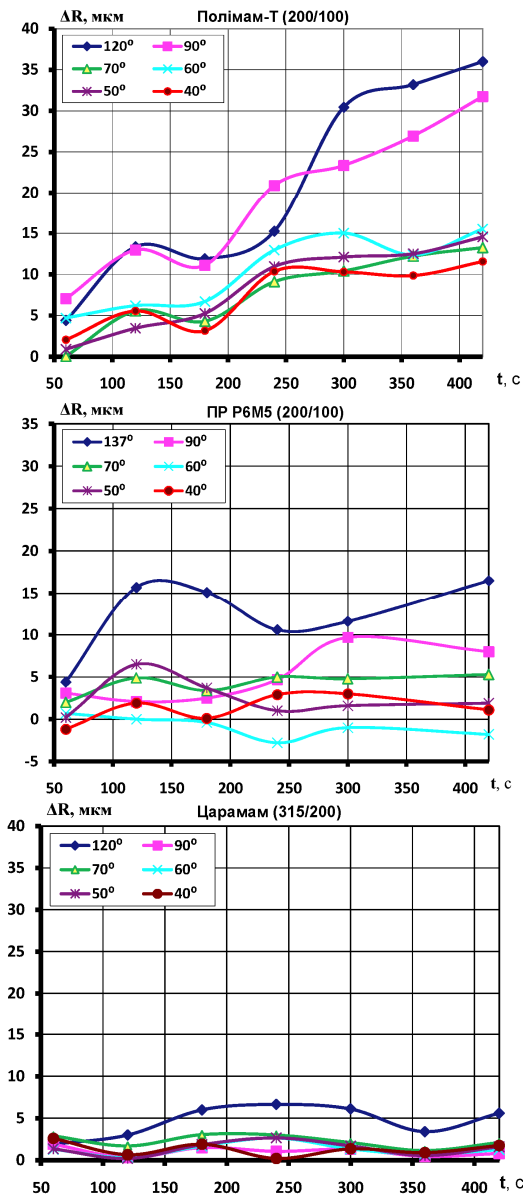
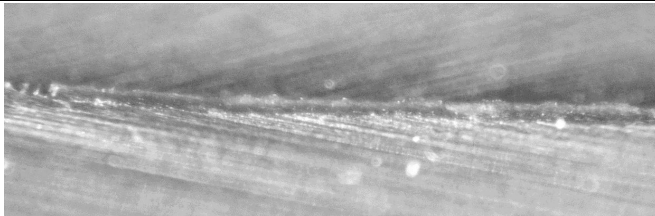


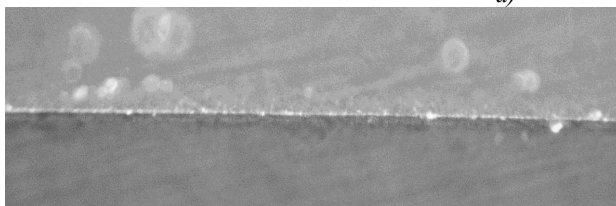
Рис. 8. Залежності зміни величини радіуса різальної кромки ΔR зразків від часу МАО при різних кутах їх загострення

Застосування осколкового порошку протягом перших 60 с призвело до повного видалення задирок і частковому розполіруванню мікрорельєфу, що сформований на операції заточування (рис. 9). У випадку застосування округлого порошку відбувалось переважно пластичне деформування поверхневого шару [7, 8], а на кромці залишалися досить гострі окремі фрагменти кореня задирки. При подальшій MAO з тривалістю до 200–240 с осколковими порошками відбувалось заточування різальних кромки шляхом видалення спадкової шорсткості поверхні і знеміцненого поверхневого шару, що сформувались в процесі заточування. При часі MAO більше 250 с після ефекту зменшення величини R відбувається притуплення кромки до деякої майже незмінної величини, типової для різних зразків в залежності від кута загострення. Причому, чим більший кут загострення, тим більша величина R формується. Необхідно окрему увагу приділити зразкам з кутами загострення 90° і 120° . Процес MAO зазначених зразків MAI з порошку Поліам-Т в усьому часовому діапазоні призводить до сталого притуплення різальних кромки, що може бути пояснено особливістю поведінки MAI і тим фактом, що оброблювані елементи (кромка і прилеглі площини) за повний оберт знаходяться в "гіньовій зоні" (рис. 5). Тобто в режимі "стікання" "активна" обробка відсутня. Проте наявність притуплення різальних кромки свідчить про те, що процес обробки кромки відбувається досить інтенсивно. Пояснення саме такого результату може свідчити про формування в MAI під час MAO збурень і своєрідних циклічних утворень в результаті перемішування порошку, які знаходяться в безпосередньому контакті з поверхнями, що утворюють різальну кромку, і самою кромкою і призводять до її притуплення.

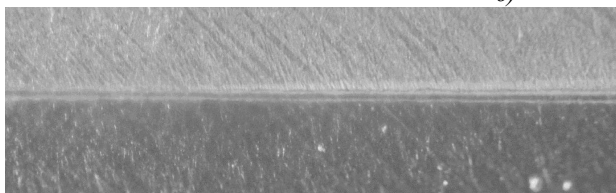
Аналогічна кінетика виявляється і при MAO крупними округлими порошками, з тією різницею, що процес формоутворення кромки потребує більшого часу. Так, перша стадія притуплення відбувається через 100–200 с MAO, а загострення, пов'язане з переважною мікропластичною деформацією поверхневого шару з спадковою шорсткістю, через 200–350 с. Зовнішній вигляд кромки на різних етапах MAO наведено на рис. 9.



а)



б)



в)

Рис. 9 Зовнішній вигляд кромки: а) з задиркою, після заточування; б) загостреної в процесі МАО; в) притупленої в процесі МАО

Описана кінетика процесу формування кромки на мікрорівні підтверджується аналізом зміни величини радіуса округлення на кожному етапі MAO у порівнянні з попереднім етапом. Отримані результати на прикладі MAO порошками з розміром частинок 3125/200 мкм наведено на рис. 10.

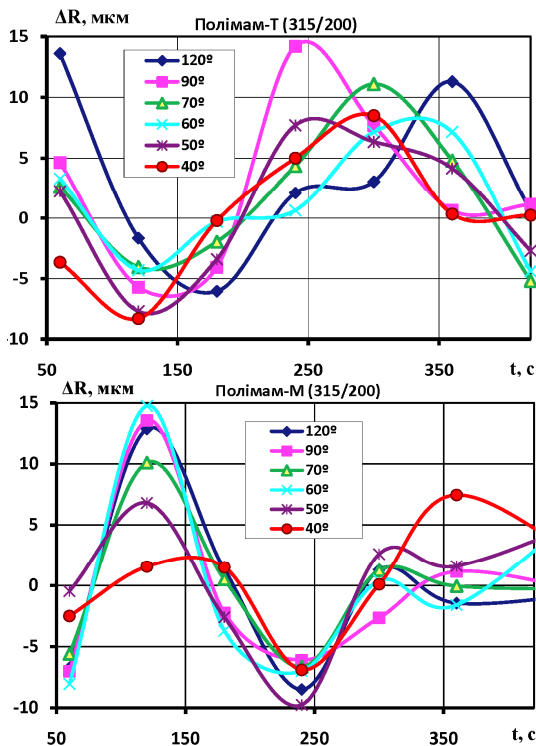


Рис. 10. Залежності зміни величини радіуса кромки ΔR на кожному етапі процесу MAO (тривалість етапу MAO складає 60 с) від часу оброблення

Узагальнені результати експериментальних досліджень доцільно представити у вигляді топограм зміни величини радіусів округлення кромки ΔR від тривалості процесу MAO і величини кута загострення зразків (рис. 11).

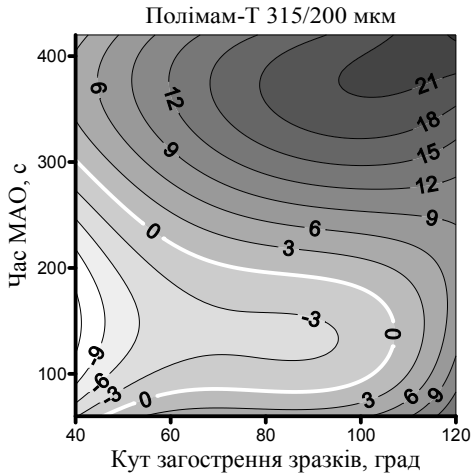
З аналізу топограм, представлених на рис. 11, випливає, що для отримання ефекту загострення при MAO в режимі "стікання" в умовах

великих магнітних щілин оброблення доцільно виконувати порошками з розміром частинок більше 200 мкм протягом 180–200 с. При цьому буде забезпечуватися повне видалення мікрозадирок, формування нової мікрогеометрії кромки і шорсткості прилеглих до неї поверхонь на рівні

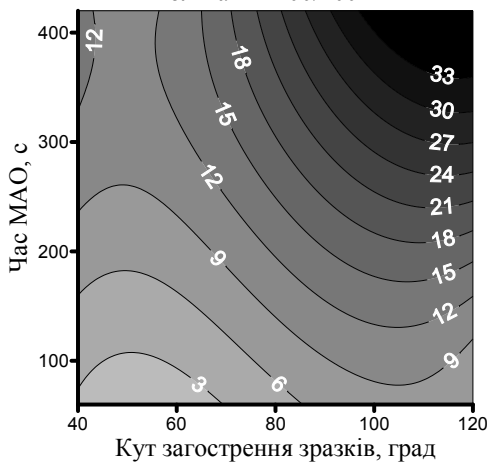
$Ra = 0,1$ мкм.

3. Магнітно-абразивна обробка в умовах "натікання" МАІ.

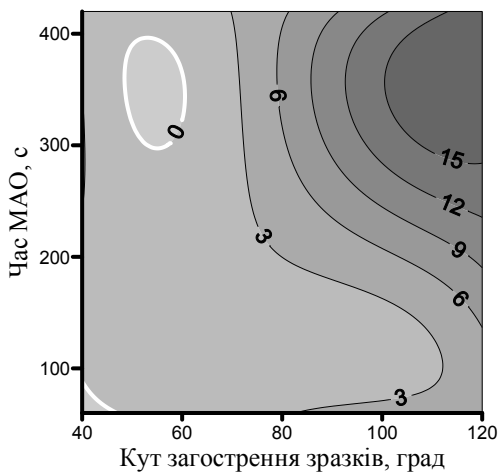
Часові залежності зміни величини радіусів округлення зразків з різними кутами загострення після МАО в умовах натікання на робочі поверхні порошками різних типів, форми і розмірів наведено на рис. 12. Встановлено, що процес МАО в зазначених умовах при застосуванні округлих рівновісних і нерівновісних частинок різних розмірів протягом шести хвилин не призводить до притуплення різальних кромки, в той час як застосування порошків з осколковими частинками спричиняє притуплення кромки. Це пов'язано з тим, що магнітно-абразивні порошки з осколковими частинками мають у порівнянні з округлими підвищену абразивну здатність і реалізують в процесі МАО більш активне диспергування матеріалу з поверхні оброблюваних зразків.



Поліам-Т 200/100 мкм



ПР Р6М5 200/100 мкм



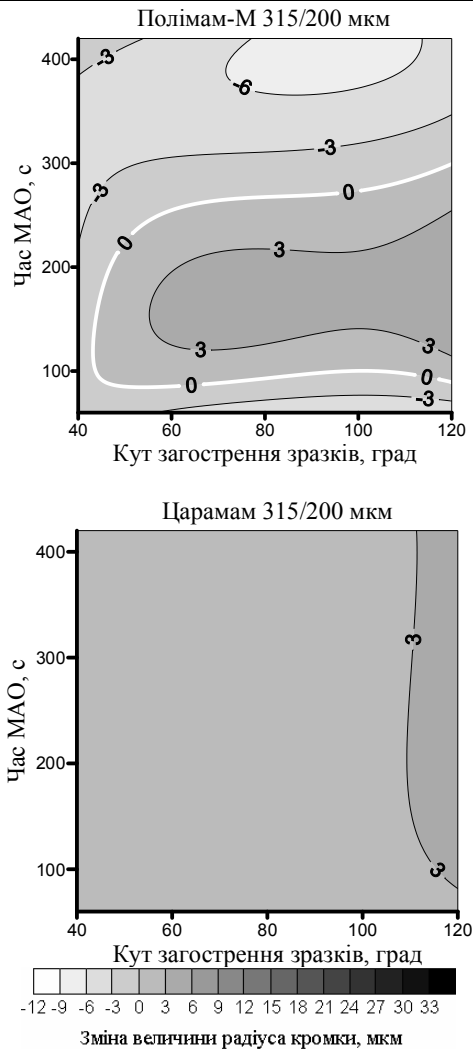


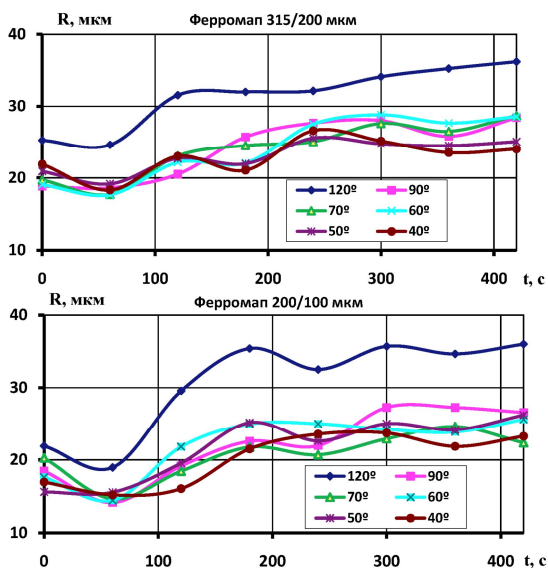
Рис. 11. Зміна величини радіусів округлення кромки зразків ΔR по відношенню до необроблених від тривалості процесу MAO і величини кута β в режимі "натікання" при їх обробленні різними порошками

Аналіз отриманих результатів показав, що на першій хвилині процесу MAO зразків відбувається видалення з кромки задирок шляхом або пластичного деформування і стирання у випадку

використання МАІ з округлих частинок, або шляхом зрізання при застосуванні осколкових порошоків. Зазначений механізм повністю співпадає з механізмом оброблення кромки в режимі «стікання» МАІ з оброблюваних поверхонь.

Швидкість зміни величини радіусів округлення кромки при МАО після видалення задирки, що формується на етапі заточування, наведено в табл. 2.

З отриманих результатів випливає, що у порівнянні з процесом МАО в умовах "стікання" (в зазначених межах даних досліджень) ми маємо суттєво меншу небезпеку щодо притуплення кромки, а при використанні округлих магнітно-абразивних порошоків відбувається незначне їх заточування. Цей факт може бути пояснено особливими умовами формування порошкового МАІ – формуванням ущільнених квазістабільних зон перед кромками, процесами "обтікання" порошковим магнітно-абразивним інструментом оброблюваних поверхонь, аналогічно з результатами по формуванню вхідних і вихідних кромки на лопатках компресорів ГТД [5, 12] і наявністю порогових швидкостей процесу МАО у "кільцевій ванні" в умовах великих робочих щілин [13].



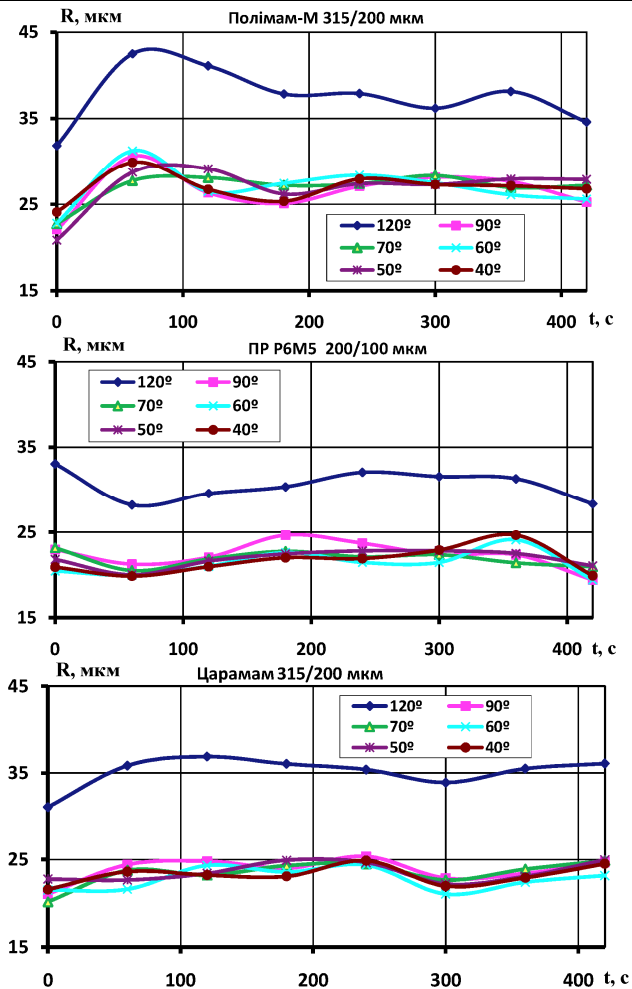


Рис. 12. Залежності величин радіусів округлення R різальних кромek від тривалості MAO в умовах натікання на робочі поверхні різними фераобразивними порошками на зразках з різними кутами загострення

Швидкість зміни величини радіусів округлення різальних кромок при MAO різними магнітно-абразивними порошками в режимі натікання MAI на робочі поверхні

Тип магнітно-абразивного порошку, форма частинок	Розмір частинок, мкм	Швидкість зміни величини радіусів округлення кромок, мкм/с					
		Кут загострення кромок					
		40°	50°	60°	70°	90°	120°
Полімам-Т, осколкова, рівновісна	200/100	0,0177	0,0155	0,0071	0,0144	0,0269	0,0158
	315/200	0,0052	0,0089	0,0239	0,0175	0,0191	0,0166
Полімам-М, округла, рівновісна	315/200	-0,0039	-0,0023	-0,0105	-0,0017	-0,0062	-0,0186
ПР Р6М5, сферична	200/100	-0,004	-0,0012	-0,0017	-0,004	-0,0102	-0,0019
Царамам, осколкова, нерівновісна	315/200	0,0077	0,0092	0,0037	0,0066	0,0016	0,0049

Аналіз зміни величини радіусів округлення по відношенню до необроблених методом MAO зразків показав, що порошки з розміром частинок 315/200 мкм призводять до збільшення радіусів округлення кромок на 2–9 мкм. Застосування дрібних порошкових магнітно-абразивних матеріалів для формування MAI на початкових стадіях процесу MAO (час оброблення до 100–120 с) призводить до незначного зменшення радіусів кромок (від'ємні значення на рис. 13). При MAO порошковими магнітно-абразивними матеріалами з округлими частинками, незалежно від ступеня їх нерівновісності, притуплення кромок зразків практично відсутнє.

За результатами досліджень кінетики формування кромок на зразках при MAO у великих магнітних щілинах можна рекомендувати умови оброблення кінцевого інструменту порошковими матеріалами різних типів, форми і розмірів частинок. Експериментальна перевірка на прикладі MAO свердел діаметром 6,8 мм з швидкорізальної сталі показала як можливості керованого притуплення свердел, так і їх заточування на мікрорівні (формування радіусів різальних кромок).

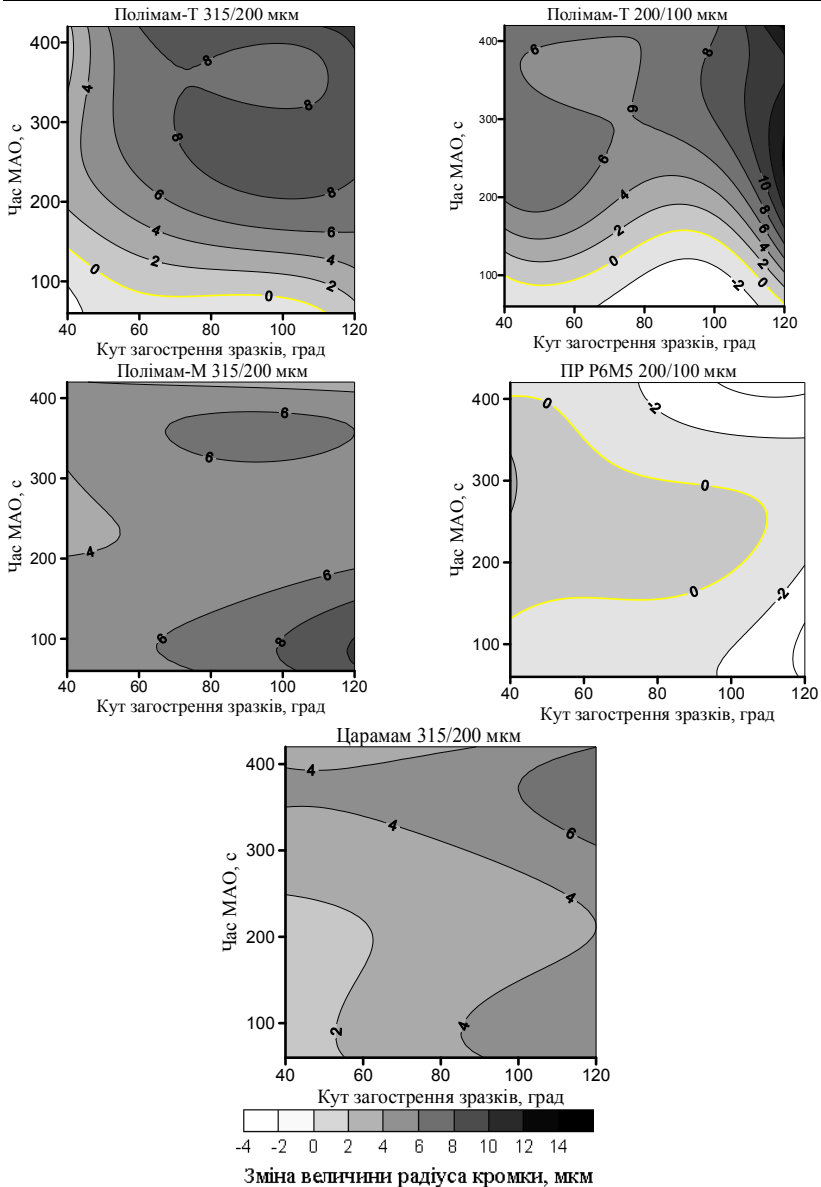


Рис. 13. Залежності зміни величини радіусів округлення кромки (мкм) від кута загострення зразків і тривалості MAO в режимі "стікання", для MAI, сформованого з різних типів порошків

Зовнішній вигляд різальних кромки свердел, оброблених методом MAO, представлено на рис. 14.

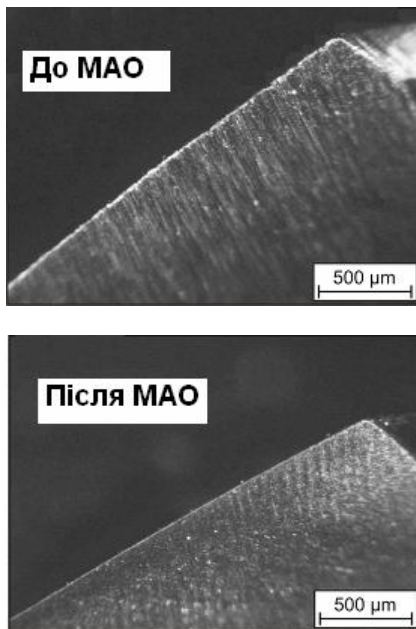


Рис. 14. Зовнішній вигляд різальної кромки свердла до і після MAO

Окремі підтвердження отриманих результатів при обробленні твердосплавних свердел наведено в [6].

Висновки. Виконані комплексні дослідження з визначення впливу процесу MAO у магнітній системі типу "кільцева ванна" в умовах великих магнітних щільностей на кінетику формування гострих кромки кінцевого різального інструменту. Доведено відсутність небезпеки пов'язаної з некерованим притупленням кромки інструменту. Показано, що в процесі MAO відбувається зниження шорсткості кромки, повністю видаляються мікрозадирки.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Дюбнер Л.Г., Майборода В.С., Ивановский А.А. Магнитно-абразивная обработка концевго режущего инструмента // Вестник национального технического университета Украины "Киевский политехнический институт". Машиностроение. – Вып. 44. – 2003. – С. 107–108.
2. Vyelyaev O. Erhöhung der Leistungsfähigkeit von HSS-Spiralbohrern durch Einsatz der magnetabrasiven Bearbeitung. Dissertation Dr.-Ing. –Magdeburg, Germany, 2008. – 149 p.
3. Б.Карпушевский, Дюбнер Л.Г., Беляев А.А., Майборода В.С. Влияние струйно-абразивной и магнитно-абразивной обработок на состояние рабочих поверхностей и режущих кромок сверл из быстрорежущей стали // Вестник двигателестроения. – 2007. – № 2. – С. 90–94.
4. Патент 78782С2 Україна, МКІ В24В 31/112 Універсальна головка для магнітно-абразивної обробки / В.С. Майборода, В.М. Гейчук, А.А. Лисенко, опубл. 25.04.2007, Бюл. № 5.
5. Майборода В.С. Основи створення і використання порошкового магнітно-абразивного інструменту для фінішної обробки фасонних поверхонь. Дис. ... докт.техн.наук. – Київ, 2001. – 404 с.
6. Майборода В.С., Пливак О.А., Майданюк С.В., Гейчук В.М. Магнітно-абразивна обробка кінцевого твердосплавного різального інструменту//Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2007. – № 1 (42), Ч. 1. – С. 66–70.
7. Майборода В.С., Ульяненко Н.В., Дюбнер Л.Г. та ін. Застосування магнітно-абразивної обробки для зміцнення різального інструменту // Вісник ЖДТУ – 2003. – № 3 (27). – С. 22–31.
8. Олиker В.Е. Порошки для магнитно-абразивной обработки и износостойких покрытий. – М.: Металлургия, 1990. – 176 с.
9. Майборода В.С., Пливак А.А., Майданюк С.В., Явтушенко С.Г. Влияние процесса магнитно-абразивной обработки сверл из быстрорежущей стали на некоторые показатели их работоспособности //Вестник ДГМА. – 2007. – № 3/9. – С. 136–143.
10. Майборода В.С. Дослідження властивостей магнітно-абразивного інструменту, сформованого з сумішей порошків // Процеси механічної обробки в машинобудуванні: Збірник наук. праць ЖДТУ. – 2009. – Вип. 6. – С. 144–159.

11. *Ульяненко Н.В.* Підвищення працездатності твердосплавного інструменту шляхом застосування магнітно-абразивного оброблення та нанесення зносостійких покриттів. Дис... к.т.н. – Київ, 2006. – 167 с.
12. Патент України на винахід № 18814 В24В 31/112 Спосіб магнітно-абразивної обробки / В.С. Майборода, О.В. Степанов, А.В. Андронов, В.Я. Верменко та інші, опубл. 25.12.97. Бюл. № 6.
13. *Майборода В.С.* Магнитно-абразивная обработка специальных деталей (на примере лопаток компрессоров ГТД): Автореф. дис... канд. техн. наук. – Киев, 1988. – 19 с.

МАЙБОРОДА Віктор Станіславович – доктор технічних наук, професор Київського Національного університету України „КПІ”.

Наукові інтереси:

- процеси обробки в машинобудуванні.

ГЕЙЧУК Володимир Миколайович – кандидат технічних наук, доцент Київського Національного університету України „КПІ”.

Наукові інтереси:

- обробка в машинобудуванні.

КЛИШТА О.С. – студент Київського Національного університету України „КПІ”.

Наукові інтереси:

- обробка матеріалів в машинобудуванні.

БЄЛЯЄВ О.А. – фірма „ZOM”, м. Магдебург, Німеччина.

Наукові інтереси:

- процеси обробки в машинобудуванні.

Подано 21.09.2009