

В.Г. Крамар, аспір.
В.І. Сидорко, к.т.н.
В.В. Скрябін, магістр, аспір.
Ю.Д. Філатов, д.т.н., с.н.с.

Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМОУТВОРЕННЯ ПОВЕРХОНЬ НЕМЕТАЛЕВИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ ДЕКОРАТИВНОМУ ПОЛІРУВАННІ

Наведені результати досліджень закономірностей процесу полірування алюмосилікатних матеріалів на основі вивчення гідродинамічної взаємодії інструменту і деталі та кластерної моделі зносу поверхонь, які взаємно притираються. Показано, що при зменшенні витрат технологічного середовища продуктивність полірування істотно зростає без помітної погіршення якості оброблених поверхонь.

Вивчено вплив конструкції робочого шару інструменту та його модуля пружності на формоутворення поверхонь при поліруванні. Представлено результати досліджень стану поверхонь, оброблених у нерівноважному процесі полірування.

1. Вступ

До теперішнього часу більшість виробів зі структурно-неоднорідних алюмосилікатних матеріалів (природного будівельного та поділкового каменю, плавленого базальту, ситалів, синтетичних каменів тощо) поліруються за допомогою суспензій і паст на основі алмазних порошків, оксиду хрому й двооксиду церію. За такої технології обробки вказаних матеріалів продуктивність процесу полірування низька, а якість оброблених поверхонь не відповідає вимогам світових стандартів. При цьому витрати полірувальних порошків, в залежності від оброблюваного матеріалу та розмірів виробу, оцінюються величинами до 100 г на 1 м². Однак недосконалість вказаної технології обробки алюмосилікатних матеріалів не обмежується економічними проблемами, пов'язаними з великою витратою енергії та матеріалів. Існують більш істотні екологічні проблеми, пов'язані з використанням і утилізацією токсичних полірувальних порошків (оксиду хрому та ін.). Це обумовлює необхідність здійснення заходів з захисту здоров'я працюючих і зменшенню забруднення навколишнього середовища.

В останній час Інститутом надтвердих матеріалів на основі вивчення механізму процесу полірування кремнеземвміщуючих матеріалів, зокрема кварцу і оптичного скла, розроблено високоефективний інструмент зі зв'язаним полірувальним порошком на основі оксидів рідкісноземельних металів. При поліруванні алюмосилікатних матеріалів цей інструмент забезпечує можливість отримання поверхні ідеальної якості. Однак продуктивність цього процесу недостатня, а використання вказаного інструменту на інтенсивних режимах неможливе через можливість його руйнування.

Таким чином, не дивлячись на принципову можливість отримання високоякісної поверхні алюмосилікатних матеріалів, розробка інструменту та технології полірування, які забезпечують достатню продуктивність обробки, є актуальною проблемою.

2. Закономірності процесу полірування

Кластерна модель зносу поверхонь інструменту і оброблюваної деталі [1] розроблена стосовно рівноважного процесу полірування кремнеземвміщуючих матеріалів інструментом зі зв'язаним полірувальним порошком. В цьому випадку тиск p_g всередині технологічної рідини (ЗОТС), яка знаходиться в проміжку між інструментом і деталлю на площині їх контакту, дорівнює номінальному тиску притискання інструменту до оброблюваної деталі p_a . В зв'язку з цим, безпосереднє використання кластерної моделі до нерівноважного процесу полірування, коли $p_a \neq p_g$, в загальному випадку неправомірно.

Розглянемо взаємодію плоских поверхонь інструменту та деталі в процесі полірування. Схема полірування кремнезем глиноземвміщуючих природних і штучних матеріалів (оптичних деталей, виробів з будівельних і поділкових каменів, ситалів і керамічного граніту тощо) така,

що фактично можна вважати, що через зазор між поверхнями інструменту і оброблюваної деталі тече рідина (ЗОТС). Відомо, що за великих чисел Рейнольдса утворюється прикордонний шар, який складається з ламінарної, перехідної та турбулентної ділянок.

Для процесу полірування вказаних деталей характерні такі умови: кутова швидкість обертання інструменту $\omega_2 = 30 \text{ с}^{-1}$ (частота – біля 300 об./хв.), тиск притискання інструменту до оброблюваної деталі $p_a = 0,05 \text{ МПа}$, діаметр інструменту $D = 0,16 - 0,32 \text{ м}$, як ЗОТС використовується вода (динамічна в'язкість за нормальних умов $\eta = 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$, кінематична в'язкість $\nu = 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$). Число Рейнольдса для вказаних умов течії рідини у відповідності до формули Блазіуса [2] таке: $Re_L = \frac{U \cdot L}{\nu}$, де U – швидкість руху рідини, $L = D$. За $Re_L \geq Re_{кр} = 3,5 \cdot 10^5$ утворюється перехідний прикордонний шар, тобто спостерігається перехід від ламінарної течії до турбулентної. Це означає, що за швидкостей, що задовольняють нерівності $U \geq \frac{Re_{кр} \cdot \nu}{D}$, потік рідини через зазор між інструментом і оброблюваною деталлю турбулентний (для $D = 0,16 \text{ м}$, $U \geq 1,88 \text{ м/с}$, що відповідає круговим зонам інструменту з радіусом $r > r_o = 62,5 \text{ мм}$; для $D = 0,25 \text{ м}$, $U \geq 1,4 \text{ м/с}$, $r > r_o = 47 \text{ мм}$; для $D = 0,25 \text{ м}$, $U \geq 1,1 \text{ м/с}$, $r > r_o = 62,5 \text{ мм}$).

Таким чином, виходячи з гідромеханічних співвідношень, показано, що в процесі полірування виникають умови для турбулентної течії ЗОТС через зазор між інструментом і оброблюваною деталлю. За зменшення кількості ЗОТС через велику завихреність потоку рідини і зниження тиску за великих місцевих швидкостей в її потоці, може спостерігатися явище гідродинамічної кавітації [2].

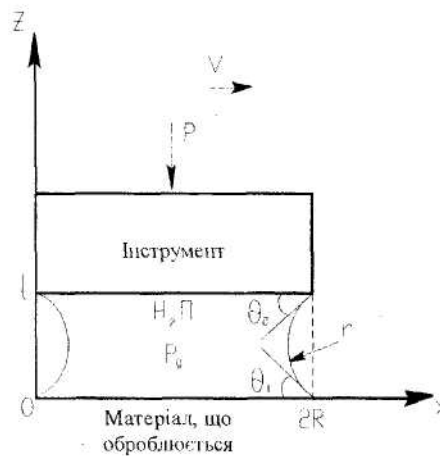


Рис. 1. Схема взаємодії інструменту з оброблюваною поверхнею в нерівноважному процесі полірування

З цього випливає, що при нерівноважному процесі полірування в рідині виникають розриви суцільності, неперервна водяна плівка в проміжку інструменту і оброблюваної деталі перетворюється в дискретний набір крапель. Це призводить до зміни умов взаємодії ЗОТС з поверхнями інструменту та оброблюваної деталі. Розглянемо гідродинамічну схему контакту поверхонь інструменту і оброблюваної деталі стосовно нерівноважного процесу полірування (рис. 1) за аналогією з [1]. Визначаючи повну силу, яка викривлює поверхню рідини внаслідок її поверхневого натягу і в'язкості, як $F = -\pi \cdot R \cdot T$, а тиск під викривленою поверхнею як

$p_s = \frac{F}{\pi r_i}$ ($T = \sigma(\cos \vartheta_1 + \cos \vartheta_2) - 2\eta V$, R – радіус плями контакту; V – поступальне переміщення інструменту відносно оброблюваної поверхні; ϑ_1, ϑ_2 – кути змочування ЗОТС поверхонь деталі та інструменту; σ – коефіцієнт поверхневого натягу ЗОТС) і знаходячи радіус викривлення r_i поверхні окремої краплі ЗОТС з геометричних міркувань, можна

показати, що тиск рідини під викривленою поверхнею крапель, які знаходяться в проміжку товщиною l між елементарними ділянками контактуючих поверхонь, визначається формулою:

$$p_g = -\frac{RT}{l^2} \left(\frac{\sin \vartheta_1 + \sin \vartheta_2}{\operatorname{tg} \frac{\vartheta_1 + \vartheta_2}{2}} \right)^2. \quad (1)$$

З іншого боку, виходячи з рівності сил, діючих на інструмент за рахунок притискання і з боку рідини, за допущення рівності розмірів всіх крапель рідини, можна показати, що при довільній кількості крапель k справедливе співвідношення $\frac{p_g}{p_a} = \left(\frac{R_2}{R} \right)^2 \cdot k^{-1}$ ($R_2 = \frac{D}{2}$ – радіус інструменту).

Розглядаючи рух ЗОТС в проміжку між інструментом і оброблюваною поверхнею деталі (густина $\rho = \text{const}$), згідно з рівняннями Нав'є-Стокса і нерозривністю [2, 3]:

$$\frac{dU}{dt} = F_m - \frac{1}{\rho} \operatorname{grad} p + \nabla^2 U; \quad (2)$$

$$\operatorname{div} U = 0, \quad (3)$$

де F_m – масові сили; p – тиск; ∇^2 – оператор Лапласа; t – час, можна отримати:

$$U(r) = \left(\frac{\lambda(D^3 - d^3)}{72\eta} + \frac{\omega_2(D-d)}{2} \right) \frac{\ln \frac{2r}{d}}{\ln \frac{D}{d}} + \frac{\lambda \left(\frac{d^3}{8} - r^3 \right)}{9\eta} + \omega_2 \frac{d}{2}. \quad (4)$$

Аналіз залежності (4) показує, що швидкість крапельної рідини при русі в напрямку від центрального отвору до периферії інструменту зростає. Площа перерізу потоку рідини, яка визначається як $S(r) = 2\pi \cdot r \cdot l(r)$, також зростає. При безперервній стаціонарній течії рідини, з рівняння витрат [2] випливає б, що товщина шару рідини зі збільшенням r зменшується. Для характеристики об'єму рідини в різних зонах контакту інструменту та оброблюваної деталі введемо величину ефективною товщини краплі у відповідності до формули: $l^* = \frac{\left(\frac{d}{2} \right) \cdot \left(l_0 U \left(\frac{d}{2} \right) \right)}{r \cdot U(r)}$.

Витрати рідини знаходимо, виходячи з формули $Q(r) = S^*(r) \cdot U(r)$, використавши середні значення у відповідності до теорії осереднення, яка використовується в математичних моделях турбулентних течій. Ми ж проведемо осереднення за координатною змінною r . Тоді:

$$Q = \frac{4\pi}{D-d} \int_{\frac{d}{2}}^{\frac{D}{2}} U(r) l^* r dr. \quad (5)$$

В результаті розрахунку на ПЕОМ бачимо, що при $l = 1$ мкм, $d = 50$ мм, $D = 160$ мм, величина витрат ЗОТС складає величину порядку 7 мл/хв. При таких витратах рідини біля центрального отвору інструменту умови течії ЗОТС будуть такими ж, як і в рівноважному процесі полірування, потік буде безперервним, тиск всередині рідини буде рівним тиску притискання інструменту до оброблюваної деталі $l = l_0$. В проміжку на площі контакту потік буде перервний, та складений з окремих крапель, тиск рідини всередині яких p_g . Для розрахунку величини цього тиску визначимо об'єм рідини в проміжку W як добуток витрати Q на час руху крапель від центрального отвору ($t = 0, r = \frac{d}{2}$) до краю інструменту T

($t = T, r = \frac{D}{2}$). З рівняння для r випливає, що величина T дорівнює $T = \frac{\ln \left(\frac{D}{d} \right)}{\omega^2}$. З іншого боку, об'єм рідини W може бути визначений як добуток об'єму однієї краплі (рис. 1), форму якої можна вважати циліндричною, на кількість крапель k , тобто $W = \pi \cdot R^2 l \cdot k$. Звідси

впливає, що добуток $k \cdot R^2$, який входить до формули $\frac{p_g}{p_a} = \left(\frac{R_2}{R}\right)^2 \cdot k^{-1}$, дорівнює $\frac{QT}{\pi \cdot l_0}$, а тиск всередині рідини визначається за формулою:

$$\frac{p_g}{p_a} = \frac{\pi D^2 l_0 \omega_2}{4Q \ln \frac{D}{d}} \quad (6)$$

Таким чином, виходячи з аналізу руху крапельної рідини, отримуємо вираз для p_g , а отже і можливість аналізу нерівноважного процесу полірування за допомогою кластерної моделі. Визначивши відстань l з формули (1) через p_g , можна перейти до параметру p_a , який визначає силовий режим процесу полірування.

При виводі рівняння, яке визначає кількість кластерів, які відриваються з поверхонь оброблюваної деталі та інструменту $n_{кл}$ [1], необхідно врахувати, що величина ξ (відношення енергії зв'язку $E_{св}$ до енергії кластера $E_{кл}$) в нерівноважному процесі полірування може відчутно відрізнятись від 1. З урахуванням цього можна показати, що:

$$n_{кл} = \frac{\omega_{123} S}{4\pi^3 t^2} \xi \exp[-\xi], \quad (7)$$

де ω_{123} – константа Ліфшица; S – номінальна площа контакту; t – час полірування.

Враховуючи, що за $l = l_0$, $p_g = p_a$ та $n_{кл} = n_{кл}^0$ (рівноважний процес), для кількості кластерів, які відриваються з поверхні в нерівноважному процесі полірування, можна отримати рівняння $n_{кл} = n_{кл}^0 \cdot \xi \left(\frac{l_0}{l}\right)^2$, в якому l визначається з виразу для p_g .

Залежність $n_{кл}$ від l має дві характерні області (рис. 2): 1 – при $l > l_0$ – рівноважний процес полірування, при збільшенні p_a кількість кластерів $n_{кл}$ і, відповідно, продуктивність полірування оброблюваної поверхні зростають; 2 – при $l < l_0$ – процес полірування нерівноважний, $n_{кл}$ зростає зі збільшенням p_g ($p_g = \text{const}$), тобто зі зменшенням l .

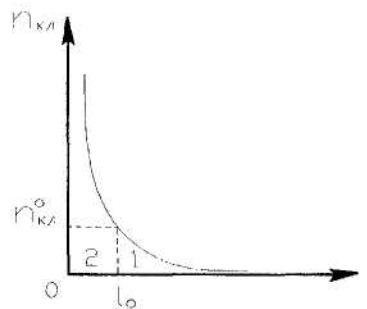


Рис. 2. Залежність кількості кластерів від l

Розглянемо закономірності нерівноважного процесу полірування стосовно обробки кремнезему, використовуючи результати, що отримані в [1]. Приймаючи $E_{св} = 3,9$ еВ, $E_{кл} = 5,29$ еВ, $R = \frac{l_0}{2}$, $V = 0,16$ м/с (довжина штриха 20 мм за частоти зворотно-поступального переміщення – 24 подв. хода за хв.), $p_a = 0,05$ МПа і використавши розраховане значення для концентрації кластерів в рівноважному процесі полірування $n_{кл} = 2 \cdot 10^{17}$ 1/м²с за $l_0 = 1$ мкм, можна отримати, що $l = 0,7$ мкм та $n_{кл} = 2,8 \cdot 10^{17}$. Для цих умов рівняння для кількості кластерів можна навести у вигляді: $N = \frac{1,5 \cdot 10^5}{l^2}$. У рівноважному процесі полірування продуктивність зняття оброблюваного матеріалу складає величину 0,2 мкм/хв. чи 3,3 нм/с, за один оберт інструменту (за 0,3 с) за розміру кластерів 10 нм [1]

знімається приблизно 1 нм, тобто приблизно 0,1 площі оброблюваної поверхні відповідає площі кластерів, які відриваються. За зменшення l можна досягти такого збільшення кількості кластерів (до $N = 1,7 \cdot 10^{18} \text{ 1/м}^2\text{с}$), що кластери будуть відриватися пошарно. Для цього необхідно l зменшити до 0,3 мкм і досягти підвищення продуктивності знімання оброблюваного матеріалу в 8 разів. Подальше зменшення l призведе до того, що кластери будуть відриватися з більш глибоких шарів і на оброблюваній поверхні утворюються каскади дефектів.

Таким чином, на основі кластерної моделі показано, що в нерівноважному процесі полірування інтенсивність знімання оброблюваного матеріалу пропорційна l^{-2} , що визначається умовами контактування інструменту і деталі та фізико-хімічними властивостями ЗОТС. З цього випливає, що для інтенсифікації процесу полірування, поряд з використанням оптимальних складів полірувального інструменту [4], товщину шару рідини в проміжку між інструментом і деталлю необхідно зменшувати, що може бути забезпечено за рахунок збільшення номінального тиску притискання інструменту до деталі p_a чи за рахунок зменшення витрати ЗОТС. Перший шлях (інтенсифікація режимів) призводить до лінійного зростання продуктивності полірування оброблюваного матеріалу зі збільшенням p_a і обмежується міцнісними характеристиками інструменту. Другий шлях (зменшення витрати ЗОТС) забезпечує істотне зростання продуктивності обробки, однак за неконтрольованого зменшення кількості ЗОТС можливе утворення на обробленій поверхні каскадів дефектів і "припиків".

3. Вплив конструкції інструменту на формоутворення поверхонь

При розробці нових процесів фінішної обробки алюмосилікатних матеріалів та пошуку засобів і методів технологічного управління якістю оброблених поверхонь використовуються основи теорії полірування кремнеземвміщуючих матеріалів інструментом зі зв'язаним полірувальним порошком з оксидів рідкісноземельних металів [1].

Механізм формоутворення прецизійних плоских оптичних поверхонь досліджено в [5], на його основі розроблені методи розрахунку конструкції робочого шару полірувального інструменту і кінематичних параметрів процесу обробки, використання яких дозволяє стабільно забезпечувати точність їх геометричної форми в межах 3–5 інтерференційних кілець. В той же час, для деталей з алюмосилікатних матеріалів іншого призначення (виробів зі штучного та природного каменю тощо) точність форми яких, на відміну від оптичних деталей, не регламентується, надзвичайно важливим є питання про умови їх контакту з поверхнею полірувального інструменту. На рис. 3 наведений розподіл висот макронерівностей необробленої поверхні керамічного граніту італійської фірми "MIRRAGE".

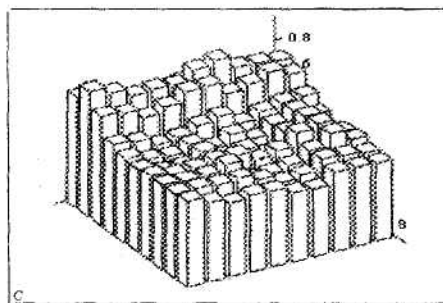


Рис. 3. Необроблена поверхня керамічного граніту

Для ефективного полірування такої поверхні необхідно співпадання її форми з формою робочої поверхні інструменту чи здатність останньої змінюватися в процесі полірування. Перша вимога в реальних умовах не може бути виконана, а друга – може бути забезпечена за рахунок зменшення модуля пружності робочого шару полірувального інструменту чи за рахунок підвищення тиску притискання інструменту до оброблюваної деталі. Іншими словами, робочий шар полірувального інструменту повинен мати еластичні властивості.

Для аналізу впливу модуля пружності інструменту на величину деформації його робочого шару в процесі обробки використаємо результати [4], згідно з якими величини модуля пружності $E_{кр}$, при якому буде досягтися повний контакт взаємодіючих поверхонь інструменту і оброблюваної деталі:

$$E_{кр} = \frac{0,09 p_a D^4}{Nh^3} \quad (8)$$

За допомогою отриманого рівняння можна визначити величину модуля пружності, який повинен мати робочий шар полірувального інструменту при обробці поверхонь деталей с різними вимогами з точності їх форми. Для прикладу розглянемо три типу деталей: деталь кіно-фотооптики (точна оптика), окулярну лінзу і деталь без вимог до точності форми (керамічний граніт "MIRAGE"), плоска поверхня природного каменю тощо). Перша з них характеризується точністю форми $N < 5$ інтерференційних кілець на діаметрі 100 мм і оброблюється полірувальним інструментом, який складається з елементів діаметром 10 мм, при тиску $p_a = 0,05$ МПа. Точність форми оброблюваної поверхні окулярної лінзи характеризується відхиленням порядку 25 мкм на діаметрі 60 мм, а процес її полірування здійснюється полірувальним інструментом з суцільним робочим шаром при такому ж тиску притискання. Відхилення від площинності оброблюваних поверхонь деталей третього типу може бути оцінено величиною порядку 100 мкм на діаметрі 20 мм (рис. 4, полірована поверхня), товщина робочого шару інструменту – 10 мм, $p_a = 0,05$ МПа. Результати розрахунку необхідного значення величини модуля пружності робочого шару полірувального інструменту $E_{кр}$ для обробки вказаних типів деталей складають відповідно: 27,7; 18,7 ГПа та 7,2 МПа.

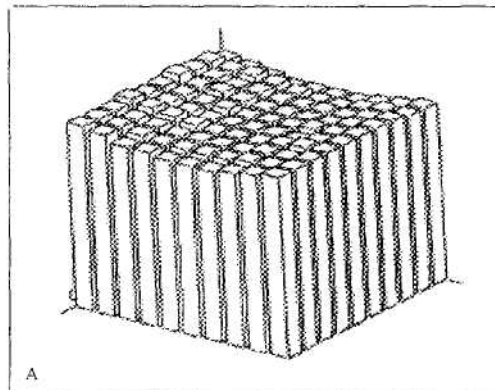


Рис. 4. Полірована поверхня керамічного граніту

Зменшення модуля пружності може бути досягнуто за рахунок створення нових полірувальних композитів на основі високонаповнених еластомерів (модуль пружності $E = 0,1 - 10$ МПа).

Теоретичне дослідження впливу конструкції робочого шару інструменту здійснювалося шляхом аналізу кривих розподілення коефіцієнта заповнення $k_i(r)$ за коловими зонами радіуса r . Аналіз проводився стосовно схеми полірування, згідно з якою плоска поверхня робочого шару інструменту взаємодіє з необмеженою оброблюваною поверхнею (з напівпростором), за допущенням про незначний вплив виходу інструменту за край оброблюваної поверхні. Виходячи з методики А.С. Пронікова, для розрахунку інтенсивності зносу робочого шару інструменту було використано таке рівняння: $I(r) = \text{const} S(r) \cdot p(r) \cdot r \cdot S(r)$ – довжина шляху, який проходить елемент робочого шару інструменту за оброблюваної поверхні; $p(r)$ – розподіл тиску притискання інструменту до оброблюваної поверхні за коловими зонами). Визначаючи $I(r)$ як добуток $2\pi k_i(r) \Delta S(r)$ ($\Delta S(r)$ – лінійний знос елементів робочого шару) і поклавши $\Delta S(r) = \text{const}$, $p(r) = \text{const}$, показано, що для забезпечення рівномірного зносу інструменту за коловими зонами необхідно і достатньо виконання рівності: $k_i(r) = \text{const} \cdot S(r)$. Для визначення $S(r)$ отримано вираз для величини відносної швидкості переміщення елементів робочого шару

відносно оброблюваної поверхні: $U(r) = \sqrt{\omega_2^2 r^2 + V_0^2 - 2\omega_2 r V_0 \sin(\omega_2 t)}$ (V_0 – швидкість поступального руху інструменту, ω_2 – кутова швидкість обертання інструменту) і визначена її траєкторія руху: $x = r \cdot \cos(\omega_2 \cdot t) + V_0 \cdot y = -r \cdot \sin(\omega_2 \cdot t)$ (рис. 5). $S(r)$ визначалася у відповідності до формули:

$$S(r) = \int_0^r U(r) dt \tag{9}$$

Криві розподілу $k_i(r)$ були розраховані для інструментів чотирьох різних конструкцій діаметром 160 мм з діаметром центрального отвору 50 мм, які відрізняються кількістю полірувальних елементів та їх розташуванням за коловими зонами (табл. 1). Усі конструкції характеризувалися зростаючим від центру до краю коефіцієнтом заповнення у відповідності до теоретичної залежності $k_i(r)$. На рис. 6 наведені теоретично розрахована крива $k_{i,2}(r)_r$ і крива розподілу $k_i(r)$ для інструменту типу 2. Аналогічні залежності отримані для інструментів всіх розглянутих конструкцій. Їх порівняння з теоретичною кривою дозволяє вибрати найбільш раціональну конструкцію робочого шару полірувального інструменту. Найбільш рівномірно в процесі полірування буде зношуватися інструмент з конструкцією робочого шару типу 1 (для неї характерно найменше відхилення залежності $k_i(r)$ від теоретичної кривої – 19 %).

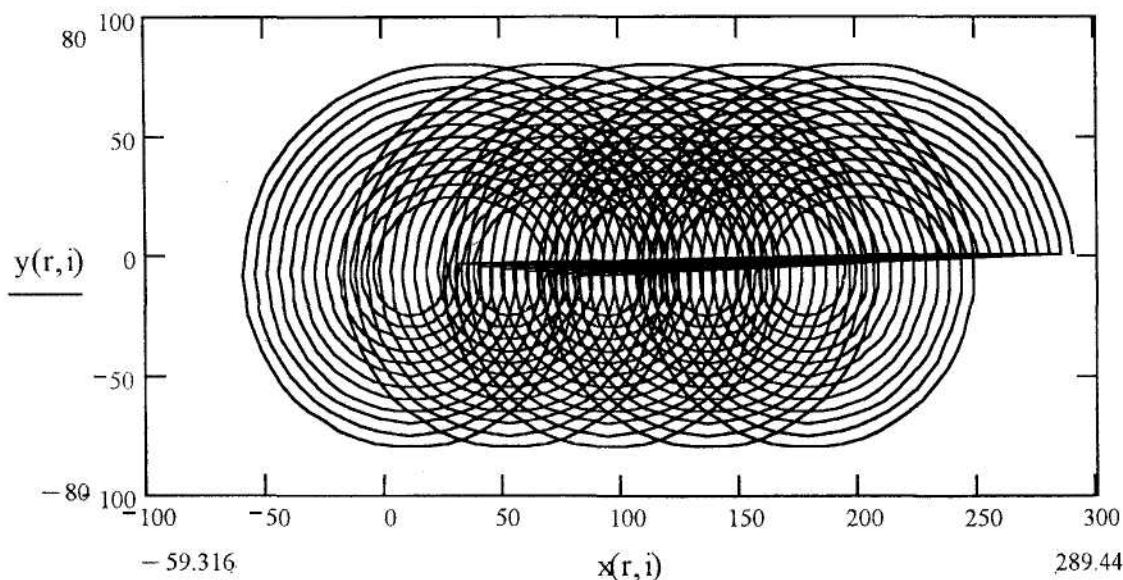


Рис. 5. Траєкторія руху елементу робочого шару інструменту по оброблюваній поверхні

Для кількісної оцінки зносостійкості розглянутих конструкцій полірувального інструменту використовувалася величина інтегрального коефіцієнту заповнення поверхні інструменту робочим шаром K_i , яка для інструментів типу 1–4 складає відповідно: 0,36; 0,25; 0,30 та 0,34. На основі отриманих результатів можна зробити висновок про те, що найбільш рівномірно і найменш інтенсивно в процесі полірування буде зношуватися інструмент з конструкцією робочого шару типу 1, який складається з 32 полірувальних елементів, та розташовані по коловим зонам інструменту у відповідності до таблиці 1.

Експериментальна перевірка отриманих результатів здійснювалася при поліруванні плоских поверхонь плит з природного і керамічного граніту інструментами на основі оксиду алюмінію з описаними вище конструкціями робочого шару на радіально-свердлильному верстаті, що спеціально пристосований для обробки великогабаритних деталей з природного каменю. В результаті дослідів встановлено, що всі конструкції робочого шару полірувального інструменту забезпечують рівномірний характер його зносу і незначно відрізняються за зносостійкістю.

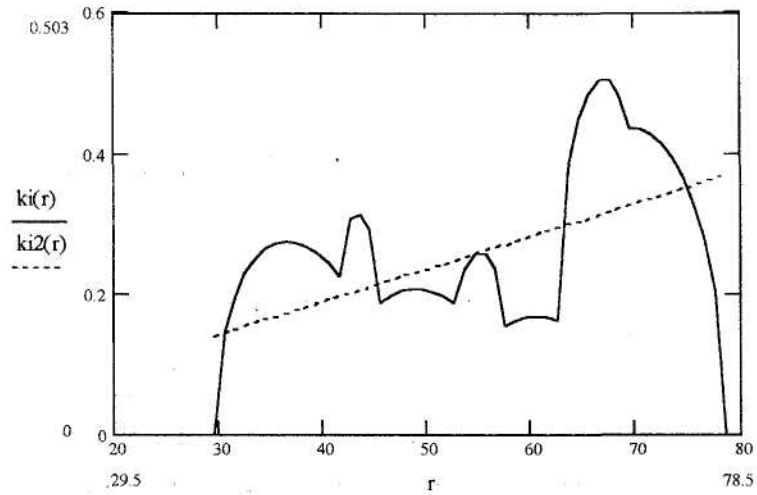


Рис. 6. Криві розподілу $k_i(r)$ для інструменту типу 2

Таблиця 1

Параметри конструкцій робочого шару інструментів

Тип 1

Номер зони, m	1	2	3	4
Радіус зони r_0^m , мм	36	39	51	66
Кількість елементів в зоні, n_m	4	4	8	16

Тип 2

Номер зони, m	1	2	3	4
Радіус зони r_0^m , мм	37,5	49,5	61	70,5
Кількість елементів в зоні, n_m	4	4	4	12

Тип 3

Номер зони, m	1	2	3	4
Радіус зони r_0^m , мм	34	47	55	68
Кількість елементів в зоні n_m	4	4	4	16

Тип 4

Номер зони, m	1	2	3
Радіус зони r_0^m , мм	37,5	44	67
Кількість елементів в зоні n_m	4	8	20

4. Стан оброблених поверхонь

Для аналізу мікропрофілю поверхонь зразків використовувалися параметри шорсткості R_a , R_z та R_{max} [6], отримані за допомогою профілографів-профілометрів мод. 250 і "Talysurf-5-120" (фірми «Taylor Hobson»), а також величини коефіцієнтів відбиття світла, які визначаються на лазерній установці, що спеціально пристосована для цього.

Випромінювання лазера на ІАГ: $Nd3+$ ($\lambda = 1,06$ мкм) після проходження крізь діафрагму, яка виділяє найбільш однорідну та інтенсивну частину пучка, посилюється квантовим підсилювачем і після проходження нелінійного кристалу (КДР) перетворюється у випромінювання видимої області спектра (друга гармоніка на $\lambda = 530$ нм). Випромінювання другої гармоніки направляєється на фотоприймач (фотодіод) і на поверхню досліджуваного зразка. Випромінювання, відбите від досліджуваної поверхні, направляєється на фотоприймач (ФЕП). Інтенсивність падаючого на фотоприймач випромінювання обмежується за допомогою фільтрів (до рівня лінійних ділянок світлових характеристик).

Порівняння величин коефіцієнтів відбиття випромінювання другої гармоніки від поверхонь деталей з алюмосилікатних матеріалів, виміряних за допомогою лазерної установки, з параметрами шорсткості показало, що для тонкошліфованих і полірованих поверхонь коефіцієнт відбиття збільшується зі зменшенням значень параметрів шорсткості R_a , R_z і R_{max} . За шорсткості обробленої поверхні $R_a = 0,2-0,01$ мкм, $R_z = 0,5-0,1$ мкм, $R_{max} = 1,3-0,2$ мкм величина коефіцієнта відбиття світла лежить у діапазоні від 2 до 6 %. При цьому похибка визначення параметрів шорсткості складала 15–20 %, а коефіцієнта відбиття світла – до 1 %.

В результаті експериментальних досліджень стану поверхонь деталей з алюмосилікатних матеріалів, а саме мікрогеометрії та відбиваючої здатності оброблених поверхонь, встановлено, що для його кількісної інтегральної характеристики доцільно використовувати коефіцієнт відбиття світла. Крім того, коефіцієнт відбиття світла залежить не тільки від шорсткості поверхні деталі, а й від її колірних характеристик.

При дослідженні стану оброблених поверхонь за допомогою скануючого мікроскопу-аналізатора "Camscan – 4DV" встановлено, що при поліруванні у нерівноважному режимі на обробленій поверхні не спостерігаються видимі дефекти. Однак при значному підвищенні тиску притискання інструменту до оброблюваної деталі на її поверхні можуть утворюватись різні дефекти. На зразках з плавленого базальту після обробки полірувальним інструментом на основі Cr_2O_3 виявлено каскади дефектів (глибокі вкопи) і наліт.

На рис. 7, а наведено зображення дефекту (збільшення $500\times$), утвореного за рахунок виривів часток зносу оброблюваного матеріалу з глибинних шарів. Нерівності поверхні дефекту (зона Т3) усередині лунки, в порівнянні з полірованою поверхнею плавленого базальту (зона Т1), утворена внаслідок відриву часток зносу з розмірами від 2 до 20 мкм. Це свідчить про те, що в умовах нерівноважного процесу полірування можливе утворення каскаду дефектів за рахунок відриву часток зносу з аномально великими розмірами.

Крім того, у процесі обробки саме в місцях утворення таких дефектів (лунок) локалізуються продукти зносу робочого шару полірувального інструменту (зона Т2). При збільшенні $1500\times$ (рис. 7, б) вигляд цієї зони дає можливість зробити висновок про те, що продукти зносу робочого шару інструменту у вигляді полімерного матеріалу зв'язуючого з зернами полірувального порошку "забивають" порожнину утвореного дефекту. Аналіз хімічного складу показує, що продукти зносу (зона Т2) містять ті ж елементи, що і робочий шар інструменту. У порівнянні з зонами Т1 і Т3, вони містять Cr_2O_3 і не вміщують оксидів Al_2O_3 , MgO , CaO та інших, які входять до складу оброблюваного матеріалу.

Поряд з дефектами, пов'язаними з виривом часток зносу оброблюваного матеріалу, на поверхні виявлено і наліт у вигляді окремих, дискретно розташованих фрагментів (рис. 8). Фрагменти нальоту висотою порядку 4 мкм, які за хімічним складом співпадають зі складом полірувального інструменту, розташовуються на обробленій поверхні на колі певного радіуса, що дозволяє визначити критичну швидкість відносного переміщення інструменту і оброблюваної деталі, при якій виникають умови для його утворення. При обробці зразка плавленого базальту (діаметром 60 мм) на верстаті мод. 6ШП-100 при частоті обертання полірувального інструменту (діаметром 72 мм) $n = 360$ об./хв., тиску притискування інструменту до оброблюваної деталі до $p_d = 1,0$ МПа і зміщенні штриха $l = 15$ мм, фрагменти нальоту розташовані між колами з радіусами $R_1 = 28$ мм та $R_2 = 33$ мм. Величина швидкості переміщення відповідних точок на оброблюваній поверхні відносно поверхні інструмента складає 1,10–1,25 м/с і практично співпадає з величиною характеристичної швидкості, визначеною у [1].

Явище, яке полягає у виникненні нальоту частинок робочого шару інструменту (полімерного матеріалу зв'язуючого з зернами полірувального порошку) на оброблюваній поверхні, не може бути поясненим ні відомим ефектом Брауна, коли наліт на оброблюваній поверхні скла утворюється за рахунок повторної полімеризації кремнезему [7], ні описаним в [8] ефектом, коли на поверхні робочого шару інструменту з'являється наліт кремнезему за рахунок хемосорбції. Напевне, що спільним для цих явищ є прояв міжмолекулярної взаємодії між частками зносу інструменту і оброблюваної деталі між собою та поверхнями інструменту і деталі.

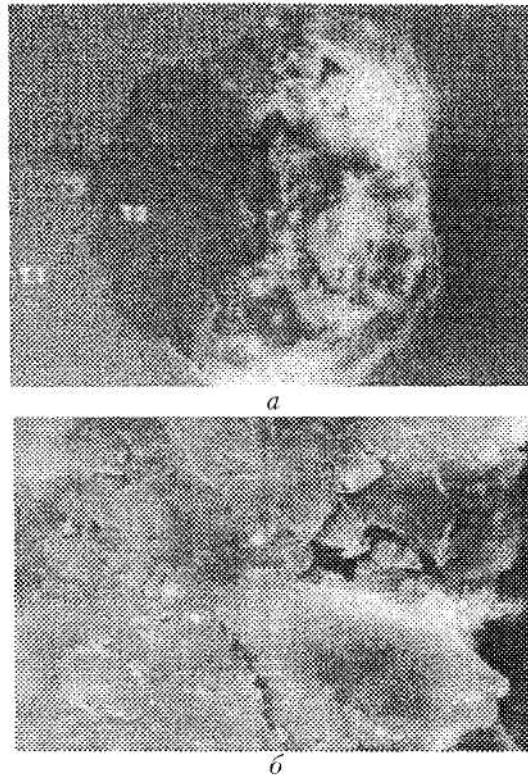


Рис. 7. Дефект на обробленій поверхні

Виявлене явище, яке полягає в тому, що фрагменти нальоту частинок робочого шару інструменту на обробленій поверхні розташовуються на колі певного радіуса, може бути пояснене тільки на основі аналізу міжмолекулярної взаємодії між частками зносу інструменту та оброблюваної деталі в умовах нерівноважного процесу полірування.

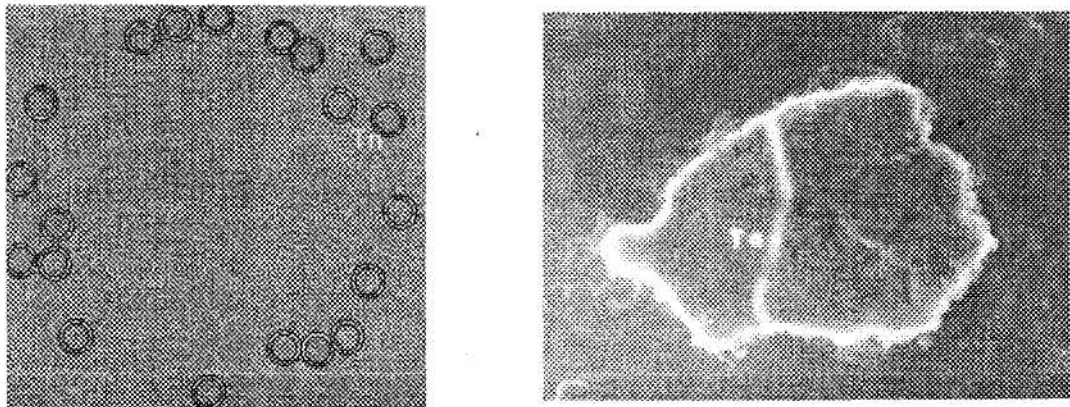


Рис. 8. Наліт на оброблюваній поверхні

Таким чином, на основі наведених результатів досліджень закономірностей процесу полірування алюмосилікатних матеріалів у нерівноважному режимі показано, що при зменшенні витрат технологічного середовища продуктивність полірування істотно зростає без помітного погіршення якості оброблених поверхонь, виявлено особливості процесу їх формоутворення. Вивчено вплив конструкції робочого шару інструменту та його модуля пружності на формоутворення поверхонь при поліруванні. Отримані результати дають можливість визначити критерії вибору значень режимних параметрів процесу обробки (тиску притискання інструменту до оброблюваної поверхні деталі, швидкості їх взаємного переміщення і витрат ЗОТС), за яких забезпечується значна продуктивність обробки без помітного погіршення якості оброблених поверхонь (запобігання виникненню описаних вище дефектів).

ЛІТЕРАТУРА:

1. Філатов Ю.Д. Наукові основи прецизійного полірування поверхонь деталей з кремнеземвміщуючих матеріалів: Автореф.дис... д.т.н. – Київ. – 1996. – 35 с.
2. Шашич В.М. Гидромеханика. – М.: Высшая школа. – 1990. – 384 с.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. – М.: Наука, 1986. – 736 с.
4. Філатов Ю.Д. Полірування поверхонь деталей з природного каменю // Вісник ЖІТІ / Технічні науки. – 1999. – № 10. – С. 90–92.
5. Філатов Ю.Д. Определение оптимальной формы инструмента при полировании плоских оптических поверхностей // Трение и износ. – 1991. – Т. 12. – № 3. – С. 452–458.
6. Філатов Ю.Д. Механизм образования микрорельефа поверхности при обработке стекла // Сверхтвердые материалы. – 1991. – № 5. – С. 61–65.
7. Brown N.J. Some speculations on the mechanisms of abrasive grinding and polishing // Precis. Eng. – 1987. – V. 9. – P. 129–138.
8. Філатов Ю.Д., Рогов В.В. Особенности процесса полирования стекла инструментом со связанным полировальным порошком // Оптика и спектроскопия. – 1993. – Т. 74. – Вып. 6. – С. 1229–1235.

КРАМАР Владислав Григорович – аспірант Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля Національної академії наук України.

Наукові інтереси:

– фізико-хімія фінішної обробки неметалевих матеріалів.

Тел.: 044-430-92-85

E-mail: imc@ism.kiev.ua

СИДОРКО Володимир Ігоревич – кандидат технічних наук Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля Національної академії наук України, заступник генерального директора концерну “АЛКОН”.

Наукові інтереси:

– фізико-хімія фінішної обробки неметалевих матеріалів.

Тел.: 044-430-92-85

E-mail: imc@ism.kiev.ua

СКРЯБІН Віктор Валерійович – магістр, аспірант Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля Національної академії наук України.

Наукові інтереси:

– фізико-хімія фінішної обробки неметалевих матеріалів.

Тел.: 044-430-92-85

E-mail: imc@ism.kiev.ua

ФІЛАТОВ Юрій Данилович – доктор технічних наук, старший науковий співробітник Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля Національної академії наук України.

Наукові інтереси:

– фізико-хімія фінішної обробки неметалевих матеріалів.

Тел.: 044-430-92-85

E-mail: imc@ism.kiev.ua