

УДК 621.9

В.І. Сідорко, к.т.н., с.н.с.,

Ю.Д. Філатов, д.т.н., с.н.с.

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

ПРОДУКТИВНІСТЬ ФІНІШНОЇ ОБРОБКИ НЕМЕТАЛЕВИХ МАТЕРІАЛІВ

Наведено результати досліджень закономірностей процесу фінішної обробки неметалевих матеріалів на основі фізико-статистичної моделі зносу поверхонь, що взаємно притираються. Показано, що на різних операціях фінішної обробки розраховані значення продуктивності видалення оброблюваного матеріалу узгоджуються з експериментальними даними.

Постановка проблеми. Процеси фінішної механічної обробки деталей з крихких неметалевих матеріалів (НМ) (скла, кераміки, природного та штучного каменю, кристалів тощо), які характеризуються малими величинами припусків на обробку (до 300 мкм) та параметрів шорсткості оброблюваної поверхні (наприклад, $Ra = 0,01\text{--}0,5$ мкм), супроводжуються взаємним переносом маси матеріалів з взаємодіючих поверхонь оброблюваної деталі та інструмента. Незважаючи на нечисленні спроби розглянути зношування цих поверхонь як явище переносу [1–3], тільки тепер розроблено фізико-статистичну модель [4, 5], яка дозволяє аналізувати процеси фінішної обробки НМ з точки зору термодинаміки і статистичної фізики. Відома кластерна модель зношування кремнеземвміщуючих та алюмосилікатних матеріалів при поліруванні [6, 7] не є універсальною. Статистичний зміст характеристичної швидкості, що входить у рівняння зносу за кластерною моделлю, і відомі методи її розрахунку й експериментального визначення не дозволяють використовувати кластерну модель для аналізу процесів полірування вказаного класу НМ і, тим більше, для шліфування та алмазного мікроточіння.

Процес диспергування частинок зносу при механічному впливі на поверхню оброблюваного матеріалу є стохастичним, а функції їхнього розподілу за розмірами і площами поверхні вивчені для багатьох матеріалів і різних операцій фінішної обробки. У той же час, незважаючи на спроби використати статистичний підхід до аналізу процесу видалення оброблюваного матеріалу, до теперішнього часу відсутні загальні закономірності таких фінішних процесів прецизійної обробки НМ, як тонке алмазне шліфування (ТАШ), надтонке алмазне шліфу-

вання (НТАШ), полірування і алмазне мікроточіння (АМ) на верстатах особливо високої точності.

Значна кількість досліджень присвячена вивченню впливу технологічних і конструктивних параметрів, фізико-хімічних властивостей деталі, інструмента й МОТС на ефективність і якість обробки НМ, однак наявні в них теоретичні й експериментальні дані носять фрагментарний характер і спрямовані на розв'язання окремих задач. Питання про відміну і подібність процесів шліфування й полірування з фізичної точки залишається, як і раніше, дискусійним [8–10].

Механізми взаємодії поверхонь інструмента і оброблюваної деталі в процесах фінішної обробки неметалевих матеріалів вивчаються без урахування кінетики формування їхніх поверхневих шарів, утворення й переміщення частинок зносу (продуктів диспергування), постійної зміни стану контактуючих поверхонь, глибини зруйнованого шару, шорсткості і дефектності. Існуючі методи розрахунку інтенсивності видалення оброблюваного матеріалу й зношування робочого шару інструмента або алмазного різця не прийнятні для дослідження зазначених фінішних процесів обробки НМ, оскільки базуються на припущеннях і наближеннях, правочинних тільки в конкретних умовах обробки певних матеріалів.

Методика проведення досліджень. Для дослідження закономірностей видалення оброблюваного матеріалу при фінішній обробці використовувалися зразки деталей з плоскими поверхнями діаметром 40–100 мм і висотою 2–12 мм із різних неметалевих матеріалів: природного каменю (граніту, габро, лабрадориту, родоніту, чароїту та ін.), декоративного ситалу, плавленого базальту, керамічного граніту, скла, оптичних кристалів та кераміки.

Використовувалися круги для тонкого і супертонкого алмазного шліфування з синтетичних алмазних шліфпорошків марки АС6, зернистістю 80/63, мікропорошків марки АСМ зернистістю 40/28 – 7/5. Як полірувальні порошки в полірувальних інструментах використовувалися порошки оксидів алюмінію, церію та ультрадисперсних алмазів (УДА). При мікроточінні алмазні різці виготовлялися з природних алмазів за спеціальною технологією [11] із наступними основними геометричними параметрами:

- радіус різальної кромки в плані – 2–10 мм;
- передній кут – 0° – (-10°) ;
- задній кут – 2° – 10° .

Експериментальні дослідження закономірностей фінішної обробки плоских поверхонь деталей виконувались при їх ТАШ, СТАШ і поліруванні на шліфувально-полірувальному верстаті ЗШП-320 і при алма-

зному мікроточінні на верстаті особливо високої точності мод. МК 6502 в період, коли привід шпинделя було вимкнено з метою запобігання вібраціям.

Продуктивність полірування поверхонь деталей визначалася величиною видалення оброблюваного матеріалу Δh , віднесеною до часу полірування T_0 ($Q = \frac{\Delta h}{T_0}$). Величина видалення матеріалу визначалася

ваговим методом за допомогою аналітичних ваг мод. АДВ-200. При визначенні продуктивності полірування гігроскопічних матеріалів (граніт, габро тощо) заготовку перед кожним зважуванням просушували в термошафі СНОЛ – 3,5.3.5.3,5/3 при температурі 110 °С протягом 30 хв. Оцінка якості обробленої поверхні проводилася комплексно за допомогою методів оптичної та електронної мікроскопії, профілометрії, еліпсометрії та спектрофотометрії.

Закономірності видалення оброблюваного матеріалу при фінішній обробці. Виходячи з фізико-статистичної моделі зносу матеріалу при механічній обробці, величина об'єму V , вилученого з оброблюваної поверхні за час t , визначається відповідно до рівняння [4]:

$$V(t) = \sum_i n_{0i} \cdot V_{0i} \left[1 - \frac{\operatorname{erf}\left(\frac{z}{2\sqrt{\eta_i \cdot t}}\right)}{\operatorname{erf}\left(\frac{\alpha_i}{2\sqrt{\eta_i}}\right)} \right] \Bigg|_{z=z_0}, \quad (1)$$

де $z_0 = R \max$ – координата, що відповідає границі тіла, що зношується (з урахуванням параметрів шорсткості); n_{0i} – концентрація кластерів на поверхні оброблюваної деталі; V_{0i} – об'єм i -тих частинок зносу; α_i – коефіцієнт; η_i – коефіцієнт об'ємного зносу;

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^x e^{-\tau^2} \cdot d\tau, \text{ – інтеграл помилок [12].}$$

Для визначення коефіцієнта об'ємного зносу, що входить у формулу (1), необхідно розв'язати трансцендентне рівняння, представлене у вигляді:

$$\varphi(\beta_i) = D(i), \quad (2)$$

де

$$D(i) = \frac{L_t}{n_{0i} \cdot S_i} \sqrt{\frac{\lambda \cdot T \cdot t}{f}}; \quad \varphi(\beta_i) = \frac{e^{-\beta_i^2}}{\sqrt{\pi} \cdot \operatorname{erf}(\beta_i)}; \quad (3)$$

$\beta_i^2 = \frac{\alpha_i^2}{4 \cdot \eta_i}$ – допоміжні функції; f – поверхневі сили; L_i – шлях тертя; S_i – площа поверхні i -ої частинки зносу; λ – коефіцієнт теплопровідності; T – температура.

Розв'язок рівняння (2) дає змогу визначити величини β_{0i} і, відповідно, коефіцієнти η_i за формулою (d_i – розмір i -ої частинки зносу, t_c – час контакту елементарної ділянки оброблюваної поверхні з поверхнею інструмента):

$$\eta_i = \frac{d_i^2}{4 \cdot \beta_{0i}^2 \cdot t_c} \quad (4)$$

Величина коефіцієнта об'ємного зносу визначається сумарним внеском всіх частинок зносу у збиток об'єму тіла, що зношується:

$$\eta = \sum_i \eta_i.$$

Шліфування неметалевих матеріалів. Концентрація частинок зносу та їх об'єм можуть бути визначені з фізико-статистичної моделі стосовно процесу шліфування. Відповідно до [6] середній розмір диспергованих в процесі шліфування скла марки К8 частинок зносу визначає площу їх поверхні при відповідних припущеннях, що ці частинки можуть бути представлені тілами обертання (еліпсоїдами). Площі поверхонь частинок зносу є кратними найменшим з них і підпорядковані дискретному ряду, а імовірність знаходження частинки з визначеною площею поверхні відповідає розподілу Пуассона.

Розглянемо взаємодію алмазного елемента (АТб 6×5) діаметром $d = 6$ мм на металевій зв'язці з поверхнею деталі зі скла марки К8 у процесі надтонкого алмазного шліфування. При швидкості переміщення елемента відносно оброблюваної поверхні 2,55 м/с, величинах сил $P_y = 160$ Н і $P_z = 18,9$ Н, номінальному тиску $p_a = 5,66$ МПа й часі шліфування 60 с, лінійна величина видалення скла, визначена експериментально, становила – 35,8 мкм, що відповідає продуктивності обробки $3,9 \cdot 10^{-10}$ м³/с. При цьому шорсткість обробленої поверхні оцінювалася параметрами $Ra = 0,16$ мкм і $Rmax = 1,16$ мкм [9–10].

Концентрація частинок зносу визначається роботою шліфування, площею оброблюваної поверхні, питомою поверхневою енергією $\sigma = 0,358$ Дж/м². Враховуючи, що коефіцієнт теплопровідності скла марки К8 $\lambda = 0,952$ Вт/(мК), температура в зоні контакту інструмента і оброблюваної деталі $T = 293$ К, а шлях тертя елементарної ділянки оброблюваної поверхні по поверхні алмазного елемента $L_i = d$ і час контакту

$t_c = 55 \cdot 10^{-3}$ с, за допомогою чисельних методів визначалися величини β_{0i} і розраховувалися значення коефіцієнта об'ємного зносу для i -тих часток η_i ($\text{м}^2/\text{с}$). Сумарне значення $\eta = 3,76 \cdot 10^{-9}$ $\text{м}^2/\text{с}$. За значеннями коефіцієнтів α_i можна розрахувати продуктивність видалення оброблюваного матеріалу при шліфуванні: $V_i = 4,03 \cdot 10^{-10}$ $\text{м}^3/\text{с}$. Ця величина практично збігається з вказаним експериментальним значенням (60 ± 1 $\text{мг}/\text{хв}$. або $35,8 \pm 0,6$ $\text{мкм}/\text{хв}$., або $(3,9 \pm 0,1) \cdot 10^{-10}$ $\text{м}^3/\text{с}$). Крім того, розраховано масовий коефіцієнт зносу $\xi = \eta \cdot \rho = 7,25 \cdot 10^{-6}$ $\text{кг}/(\text{мс})$ і безрозмірну величину інтенсивності зносу $I = \frac{\eta \cdot t}{S_c} = 4,38 \cdot 10^{-6}$ (ρ – густина оброблюваного

матеріалу, S_c – площа оброблюваної поверхні), які теж характеризують швидкість видалення матеріалу в процесі шліфування.

Розглянемо тепер взаємодію алмазного елемента з поверхнею деталі зі скла марки К8 у процесі тонкого алмазного шліфування. При експериментальних значеннях швидкості переміщення елемента відносно оброблюваної поверхні 1,55 $\text{м}/\text{с}$, величини сил $P_y = 28$ Н і $P_z = 4,6$ Н, номінального тиску притискання алмазного елемента до оброблюваної поверхні $p_a = 1,0$ МПа й часу шліфування 180 с шорсткість обробленої поверхні оцінювалася параметрами $Ra = 0,68$ мкм і $Rmax = 4,76$ мкм [9–10].

Об'єм i -тих частинок зносу у випадку, коли функція розподілу за площами їх поверхні невідома, може бути визначений, виходячи із їх найбільш імовірного розміру [6, 8] $a_v = \frac{Rmax}{0,29} = 16,4$ мкм . Середні значення їхньої площі поверхні й об'єму становлять $S_0 = \pi \cdot a_v^2 = 8,46 \cdot 10^{-10}$

м^2 і $v = \left[\frac{S_0}{\pi} \right]^{\frac{3}{2}} = 4,4 \cdot 10^{-15}$ м^3 відповідно. Величина енергоємності ТАШ в

зазначених умовах згідно з [13] становить $q = 5 \cdot 10^9$ $\text{Дж}/\text{м}^3$, а енергія, що витрачається на видалення 1 частинки зносу, відповідно $W = q \cdot v = 22,1$ мкДж . Робота шліфування за час $t = 1$ с визначається залежно від величини відносної швидкості переміщення інструмента й оброблюваної деталі u як $A(u) = P_z \cdot u \cdot t$. Концентрація частинок зносу може бути визначена як відношення цієї роботи до енергії, що витрачається

на видалення однієї частинки, і виражена відповідно до формули

$$N_0(u) = \frac{A(u)}{W}.$$

Враховуючи, що час контакту $t_c = 3,9 \cdot 10^{-3}$ с в рівняннях (1–4), за допомогою чисельних методів визначена величина $\beta_0 = 1,8$ і розраховані значення коефіцієнта об'ємного зносу $\eta = 5,38 \cdot 10^{-9}$ м²/с і коефіцієнт $\alpha_0 = 2,64 \cdot 10^{-4}$ м с^{-1/2}. За цими значеннями можна розрахувати продуктивність видалення оброблюваного матеріалу при тонкому алмазному шліфуванні $V = 1,38 \cdot 10^{-9}$ м³/с, яка практично збігається з експериментальним значенням $1,23 \cdot 10^{-9}$ м³/с (відхилення результатів розрахунку від експерименту – 11,4 %). Розраховано масовий коефіцієнт зносу $\xi = 4,1 \cdot 10^{-5}$ кг/(м·с) і безрозмірну величину інтенсивності зносу $I = 2,21 \cdot 10^{-5}$ при ТАШ скла К8.

Полірування неметалевих матеріалів. В процесі полірування неметалевих матеріалів при змінах деформованого стану поверхні твердого тіла кластери переходять із зв'язаного стану у вільний з утворенням частинок зносу. По мірі видалення частинок зносу поверхня, що зношується, зміщується в напрямку, протилежному руху частинок. При цьому частина механічної енергії витрачається на диспергування матеріалу і створення нової поверхні. Концентрація кластерів та їх об'єми можуть бути визначені, виходячи із фізико-статистичної моделі зносу, при урахуванні багатомодового (на всіх характерних частотах) режиму взаємодії поверхонь інструмента і деталі. Енергія кластера визначається сумою енергії коливань фрагментів на вказаних частотах. Константа Ліфшиця [7] розраховується для кожної пари взаємодіючих коливань шляхом інтегрування по всій області частот, характерних для заданих матеріалів (від мінімальної частоти до максимальної). Товщина прошарку мастильно-охолоджуючого технологічного середовища (МОТС) визначається для випадку невірноваженого процесу полірування [14–15]. Концентрація кластерів визначається з урахуванням їх пуассонівського розподілу за розмірами, параметр якого визначається відношенням величини енергії зв'язку оброблюваного матеріалу до енергії кластерів. При цьому враховується площа оброблюваної поверхні, ефективна товщина прошарку МОТС. Розміри, площа поверхні й об'єми кластерів визначаються через поверхневу енергію оброблюваного матеріалу та їхню енергію.

Розглянемо процес полірування кремнезему інструментом на основі діоксиду церію [16]. Діаметр деталі 60 мм, густина оброблювано-

го матеріалу $\rho = 2,65 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, мінімальна і максимальна власні частоти, характерні для вказаного класу матеріалів, складають $\omega_{\min} = 7,9 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$ і $\omega_{\max} = 22,2 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$ відповідно. Статичні діелектричні проникності матеріалів оброблюваної деталі, інструмента і МОТС дорівнюють 2,27, 21,2 і 81,0 відповідно. Розраховані значення концентрації n_{oi} і об'ємів V_{oi} кластерів при довжині шляху тертя 0,628 м з огляду на те, що коефіцієнт теплопровідності кремнезему $\lambda = 1,33 \text{ Вт/(мК)}$, температура $T = 293 \text{ К}$, параметр розподілу Пуассона $\nu = 0,247$, тиск притискання інструмента до оброблюваної деталі $p_a = 0,08 \text{ МПа}$, середня відносна швидкість переміщення інструмента 0,6 м/с, дозволили визначити функції $D(i)$, розв'язати трансцендентні рівняння (2) і визначити величини β_{oi} . Знайдено значення коефіцієнта об'ємного зносу $\eta = 1,37 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{с}$ і продуктивність видалення оброблюваного матеріалу при поліруванні $V_i = 8,29 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3/\text{с}$, яка практично збігається з експериментальним значенням $8,18 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3/\text{с}$ (відхилення результатів розрахунку від експерименту - 1,4 %). Розраховано масовий коефіцієнт зносу $\xi = 3,6 \cdot 10^{-8} \text{ кг/(мс)}$ та інтенсивність зносу $I = 4,8 \cdot 10^{-9}$.

Алмазне мікроточіння неметалевих матеріалів. Величина об'єму матеріалу V , видаленого з оброблюваної поверхні за час обробки τ , при мікроточінні визначається в загальному вигляді за формулою (1), яка при координаті Z_0 , що дорівнює глибині мікроточіння t_0 , набуває вигляду:

$$V(\tau) = \sum_i V_{oi} \cdot n_{oi} \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{t_0}{2\sqrt{\eta_i \cdot \tau}} \right). \quad (5)$$

В процесі мікроточіння поверхонь деталей з неметалевих матеріалів, в залежності від характеру руйнування матеріалу і умов утворення стружки, видалення матеріалу може відбуватися в результаті крихкого руйнування шляхом сколювання або в результаті термопластичного деформування шляхом утворення зливної стружки. В першому випадку необхідно, як і при шліфуванні НМ, визначити кількість і об'єми видалених з поверхні частинок зносу, оцінювати їх розподіл за розмірами і енергетичні параметри процесу обробки. У другому випадку в формулі (5) $\eta = \text{const}$ і знаходження суми по всіх частках дозволяє обчислити об'єм стружки. За визначенням коефіцієнта об'ємного зносу

$\eta = \frac{v(\tau_0)}{L_t(\tau_0) \cdot \tau_0}$ його можна виразити через об'єм стружки

$v(\tau) = t_s \cdot S \cdot u \cdot \tau$ (де t_s – товщина стружки; $S = \frac{V_s}{n}$ – подача на 1 оберт; n – число обертів оброблюваної деталі в одиницю часу; V_s – швидкість подачі; u – лінійна швидкість переміщення різця відносно оброблюваної поверхні) і довжину шляху тертя різця $L_t(\tau) = u \cdot \tau$ за час $\tau_0 = 1$ с. Об'єм видаленого з оброблюваної поверхні матеріалу в залежності від часу обробки τ знаходиться у відповідності до (5):

$$V(\tau) = \xi_s \cdot t_0 \cdot S \cdot u \cdot \tau \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{1}{2} \sqrt{\frac{t_0 \cdot \tau_0}{S \cdot \xi_s \cdot \tau}} \right), \quad (6)$$

де $\xi_s = \frac{t_s}{t_0}$ – коефіцієнт усадки стружки [11, 17].

Процес алмазного мікроточіння неметалевих матеріалів здійснюється при глибині різання $t_0 = 10 - 60$ мкм, частоті обертання деталі $n = 2000 - 2800$ об/хв. і швидкості подачі $V_s = 10 - 50$ мм/хв. [11]. За таких умов аргумент інтеграла похибок в

$$(6) \frac{1}{2} \sqrt{\frac{t_0 \cdot \tau_0}{S \cdot \xi_s \cdot \tau}} \ll 1, \text{ у зв'язку з цим можна скористатися розкладом}$$

функції $\operatorname{erf}(x)$ для малих значень аргументу (x) [12]:

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(x - \frac{x^3}{3} + \dots \right). \text{ Обмежуючись розглядом тільки першого}$$

члена розкладу, одержимо $\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x) = 1 - \frac{2x}{\sqrt{\pi}}$ і, виходячи з

формули (6), знаходимо залежність об'єму видаленого оброблюваного матеріалу від часу обробки при алмазному мікроточінні:

$$V(\tau) = \xi_s \cdot t_0 \cdot S \cdot u \cdot \tau \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{t_0 \cdot \tau_0}{\pi \cdot S \cdot \xi_s \cdot \tau}} \right). \quad (7)$$

З огляду на прийняті припущення величина об'єму видаленого матеріалу може бути також визначена з наближеної формули: $V(\tau) = \xi_s \cdot t_0 \cdot S \cdot u \cdot \tau$, яка має зрозумілий фізичний зміст і є загальновідомою.

В результаті розрахунку об'єму, знятого в процесі алмазного мік-

роточіння матеріалу зразка оптичного кристалу CaF_2 діаметром 100 мм (глибина різання $t_0 = 10$ мкм, частота обертання деталі $n = 2800$ об/хв. і швидкість подачі $V_s = 10$ мм/хв., коефіцієнт усадки стружки $\xi_s = 1,5$), за формулами (6) і (7), показано, що $V = 7,6 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3$, що відповідно лінійному розміру видаленого шару, який дорівнює 9,6 мкм. Знайдено значення коефіцієнта об'ємного зносу $\eta = 3,6 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{с}$, коефіцієнта масового зносу $\xi = 1,1 \cdot 10^{-7} \text{ кг}/(\text{м}\cdot\text{с})$ та інтенсивність зносу $I = 4,5 \cdot 10^9$.

Таким чином, для всіх операцій фінішної обробки неметалевих матеріалів розраховано продуктивність видалення матеріалу з оброблюваної поверхні, виходячи з єдиних позицій фізико-статистичної моделі. Дані розрахунків узгоджуються з результатами експериментів. Для ТАШ, НТАШ, полірування і АМ неметалевих матеріалів розраховано параметри, що характеризують продуктивність видалення оброблюваного матеріалу – коефіцієнти об'ємного і масового зносу, а також інтенсивність зносу I (табл. 1).

Таблиця 1

Параметри, що характеризують продуктивність видалення оброблюваного матеріалу і шорсткість обробленої поверхні на різних операціях фінішної обробки

Операція фінішної обробки	Коефіцієнт об'ємного зносу, η , $\text{м}^2/\text{с}$	Коефіцієнт масового зносу, ξ , $\text{кг}/(\text{м}\cdot\text{с})$	Інтенсивність зносу, I	Шорсткість обробленої поверхні, R_a , мкм
ТАШ	$5,38 \cdot 10^{-9}$	$4,10 \cdot 10^{-5}$	$2,21 \cdot 10^{-5}$	0,68
НТАШ	$3,76 \cdot 10^{-9}$	$7,25 \cdot 10^{-6}$	$4,38 \cdot 10^{-6}$	0,16
Полірування	$1,37 \cdot 10^{-11}$	$3,60 \cdot 10^{-8}$	$4,80 \cdot 10^{-9}$	0,01
АМ	$3,60 \cdot 10^{-11}$	$1,10 \cdot 10^{-7}$	$4,50 \cdot 10^{-9}$	0,012

Аналіз величин інтенсивності I зносу за класифікацією контакту поверхонь, що взаємодіють [18] при зазначених технологічних операціях, показує, що при ТАШ неметалевих матеріалів відбувається мікрорізання алмазними зернами, закріпленими у зв'язці, при НТАШ контакт поверхонь інструмента і деталі – пластичний, а при поліруванні і АМ – контакт характеризується як пружно-пластичний. Це дає змогу стверджувати, що, незважаючи на відмінність в механізмах утворення частинок зносу і видалення оброблюваного матеріалу на різних операціях

фінішної обробки неметалевих матеріалів, процес масопереносу під час обробки коректно описується в рамках фізико-статистичної моделі [4].

Крім того, наведені в табл. 1 дані щодо шорсткості обробленої поверхні на різних операціях фінішної обробки знаходяться у відповідності до продуктивності видалення оброблюваного матеріалу. На рис. 1 наведені діаграми, які наочно демонструють, що інтенсивність видалення оброблюваного матеріалу і шорсткість обробленої поверхні в процесі фінішної обробки змінюються одночасно. Збільшення швидкості переносу маси матеріалу, що видаляється з оброблюваної поверхні, призводить до погіршення стану обробленої поверхні.

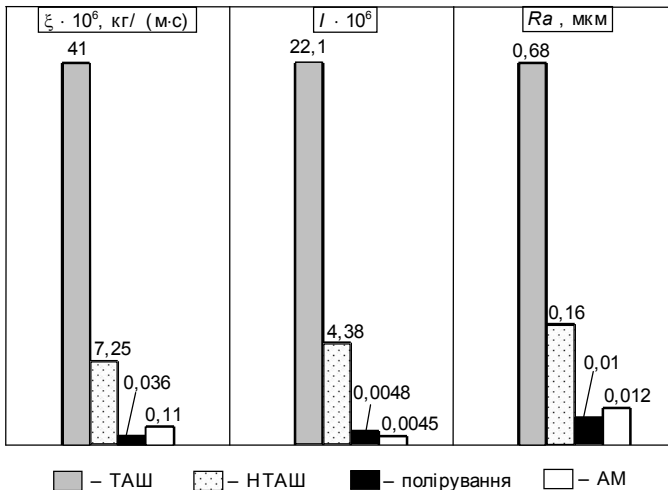


Рис. 1. Діаграма відповідності показників продуктивності видалення матеріалу і параметрів шорсткості обробленої поверхні на операціях фінішної обробки НМ

Висновки. Таким чином, виходячи з фізико-статистичної моделі зносу поверхонь деталей з неметалевих матеріалів при механічній обробці, можна розрахувати продуктивність видалення оброблюваного матеріалу при його фінішній обробці (тонкому й надтонкому алмазному шліфуванні, поліруванні інструментом зі зв'язаним полірувальним порошком і алмазному мікроточінні), яка знаходиться у відповідності до експериментальних даних. Незважаючи на відмінність в механізмах утворення часток зносу і видалення оброблюваного матеріалу на різних операціях фінішної обробки неметалевих матеріалів, процес масопереносу під час обробки коректно описується в рамках фізико-статистичної моделі.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Якубов Ф.Я., Ким В.А., Каримов Ш.А. Математическая модель термодинамики контактного взаимодействия при резании // Тез. Зон. научн.-техн. конф. «Математическое обеспечение и автоматическое управление высокопроизводительными процессами механической и физико-химической обработки изделий машиностроения». – Андропов, 1988. – С. 10–13.
2. Кім В.О., Якубов Ф.Я. Енергетика процесу самоорганізації при терті та зношуванні // Вісник ЖІТІ. – 2001 / Спеціальний випуск / Технічні науки. – С. 172–175.
3. Кухта С.В., Пешкун С.В., Хейфец М.Л. Системные основы технологической подготовки высокоэффективного производства // Вісник ЖІТІ. – 1999. – № 10 / Технічні науки. – С. 63–65.
4. Филатов Ю.Д., Сидорко В.И. Статистический подход к износу поверхностей деталей из неметаллических материалов при полировании // Сверхтвердые материалы. – 2005. – № 1. – С. 58–66.
5. Сидорко В.И., Филатов Ю.Д. Производительность обработки деталей из неметаллических материалов при полировании // Наукові праці Донецького національного технічного університету: Серія: Машинобудування і машинознавство, Вип. 92. – Донецьк: Дон НТУ, 2005. – С. 99–108.
6. Филатов Ю.Д. Механизм образования микрорельефа поверхности при обработке стекла // Сверхтвердые материалы. – 1991. – № 5. – С. 61–65.
7. Филатов Ю.Д. Полирование алюмосиликатных материалов инструментом со связанным полировальным порошком // Сверхтвердые материалы. – 2001. – № 3. – С. 36–49.
8. Цеснек Л.С. Механика и микрофизика истирания поверхностей. – М.: Машиностроение, 1979. – 264 с.
9. Сидорко В.И., Филатов Ю.Д. Производительность тонкого алмазного шлифования плоских поверхностей деталей из неметаллических материалов // Вісник Хмельницького національного університету / Технічні науки. – 2005. – № 1. – С. 25–31.
10. Сидорко В.И., Филатов Ю.Д., Крамар В.Г. Обрабатываемость неметаллических материалов при алмазном шлифовании / Высокі технології в машинобудуванні: Збірник наукових праць НТУ. – Харків, 2005. – Вип. 1 (10). – С. 115–124.

11. Состояние поверхности деталей ИК-техники после микрооточения резцами из природных алмазов и СТМ / Л.Л. Бурман, В.И. Сидорко, В.В. Рогов, А.Г. Ветров, А.П. Денисенко // Сверхтвердые материалы. – 1990. – № 2. – С. 57–60.
12. *Фарлоу С.* Уравнения с частными производными для научных работников и инженеров. – М.: Мир, 1985. – 383 с.
13. Энергетическая оценка работоспособности алмазного инструмента при шлифовании стекла / А.П. Денисенко, Ю.Д. Филатов, В.В. Рогов, Н.Д. Рублев // Сверхтвердые материалы. – 1981. – № 3. – С. 62–65.
14. *Сидорко В.И., Филатов Ю.Д.* Взаимодействие поверхностей инструмента и обрабатываемой детали при полировании неметаллических материалов // Современные процессы механической обработки инструментами с НТМ и качество поверхности деталей машин: Серия Г «Процессы механической обработки, станки и инструменты»/ НАН Украины. ИСМ им. В.Н. Бакуля. – Киев, 2003. – С. 157–165.
15. *Filatov Y., Sidorko V., Skryabin V.* Polishing Silica-Alumina Materials // МЕХАНИКА. – 2003. – № 4 (42). – Pp. 67–69.
16. *Rogov V.V., Filatov Y.D., Kottler W., Sobol V.P.* New technology of precision polishing of glass optic. – Optical Engineering. – V. 40, august 2001. – P. 1641–1645.
17. Исследование процесса микрооточения деталей из оптических кристаллов / Л.Л. Бурман, А.П. Денисенко, А.Н. Ершов, Э.Р. Павлов, В.И. Сидорко, М.Ф. Сыроватский, З.И. Штейнгольц // Автометрия. – Новосибирск: Наука, 1992. – № 1. – С. 79–85.
18. *Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С.* Основы расчетов на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.

СІДОРКО Володимир Ігорович – кандидат технічних наук, перший заступник генерального директора НТАК «АЛКОН», старший науковий співробітник Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля Національної академії наук України.

Наукові інтереси:

– фізико-хімія фінішної обробки неметалевих матеріалів.

Тел.: 044-432-95-38.

E-mail: sidorko@ism.kiev.ua

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

Наукові інтереси:

– фізико-хімія фінішної обробки неметалевих матеріалів.

Тел.: 044-451-89-64.

E-mail: filatov@ism.kiev.ua

Подано 22.08.2007