

УДК 621.9

Ю.Д. Філатов, д.т.н., с.н.с., зав. лаб.
Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля
НАН України

ВЗАЄМОДІЯ ЧАСТИНОК ШЛАМУ ТА ЗНОСУ В ЗОНІ КОНТАКТУ ДЕТАЛІ ТА ІНСТРУМЕНТА ПРИ ПОЛІРУВАННІ НЕМЕТАЛЕВИХ МАТЕРІАЛІВ

Наведено результати досліджень міжмолекулярної та електричної взаємодії частинок шlamу та зносу в зоні контакту неметалевої деталі з полірувальним інструментом. Показано, що в результаті зіткнень та розсіювання частинки рухаються за коловими траєкторіями, переміщуючись вздовж взаємодіючих поверхонь.

Постановка проблеми. Стан проблеми контактної взаємодії інструмента та оброблюваної деталі при поліруванні неметалевих матеріалів (НМ) залежить від вирішення питань, що пов'язані з вивченням механізму диспергування частинок оброблюваного матеріалу (шламу) та частинок зносу інструмента [1–2], дослідження закономірностей їх формоутворення [3–5], розробки методів розрахунку інтенсивності знімання матеріалу та зносу робочого шару інструмента та комп'ютерного моделювання мікро- та макрорельєфу поверхонь, що взаємно притираються [2–6]. Вплив технологічних та конструктивних параметрів, фізико-хімічних властивостей деталі, інструменту та мастильно-охолоджуючого технологічного середовища (МОТС) на ефективність процесу полірування та якість оброблених поверхонь можна вважати вивченим [3, 7–9]. Для процесів шліфування вивчено механізм утворення мікрорельєфу поверхні, зокрема, координатна залежність шорсткості та утворення нальоту на взаємодіючих поверхнях деталі та інструмента [10–12].

Разом з тим механізми взаємодії частинок шlamу і зносу в зоні контактуючих поверхонь інструмента й оброблюваної деталі в процесах полірування неметалевих матеріалів ще не вивчені, а причини виникнення нальоту не з'ясовані повною мірою. Тільки за умови вивчення закономірностей взаємодії частинок шlamу та зносу в контактній зоні можна з'ясувати особливості формування мікрорельєфу поверхні оброблюваної деталі і стану поверхні робочого шару інструменту, на основі яких накреслити шляхи до підвищення якості оброблених поверхонь.

Основна частина. *Закономірності взаємодії частинок шламу в зоні контакту деталі й інструмента.* Концентрація частинок шламу в точці z вздовж нормалі до оброблюваної поверхні визначається відповідно до рівняння [10]:

$$c_i(z, \tau) = n_{0i} \left(1 - \frac{1}{\operatorname{erf}(\beta_i)} \operatorname{erf} \left(\frac{z}{2\sqrt{\eta_i \tau}} \right) \right) \quad (1)$$

де n_{0i} – концентрація частинок шламу на поверхні оброблюваної деталі, η_i – коефіцієнти об'ємного зносу, $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$ – інтеграл помилок [13], τ – час полірування, $i = \overline{0, n-1}$ – номер групи частинок шламу, n – число груп.

Коефіцієнти об'ємного зносу залежать від розмірів d_i i -тої частинки шламу та часу t_c контакту елементарної ділянки оброблюваної поверхні з поверхнею інструмента $\eta_i = \frac{d_i^2}{4 \cdot \beta_i^2 \cdot t_c}$, а коефіцієнти β_i є розв'язками n трансцендентних рівнянь [10]:

$$\frac{e^{-\beta_i^2}}{\sqrt{\pi} \operatorname{erf}(\beta_i)} = \frac{L_t}{n_{0i} S_i} \sqrt{\frac{\lambda T t_c}{p_a}}, \quad (2)$$

де p_a – номінальний тиск притискання інструмента до деталі, L_t – шлях тертя, S_i – площа поверхні i -тої частинки шламу, λ – коефіцієнт теплопровідності оброблюваного матеріалу, T – температура.

При аналізі процесу полірування деталей з оптичного скла марки К8 (густина $\rho = 2,52$ г/см³, $\lambda = 0,95$ Вт/(мК), енергія зв'язку 3,9 еВ (90 ккал/моль), енергія кластера 5,3 еВ, кількість фрагментів $O = Si = O$ в кластері $\xi = 96$) інструментом АКВАПОЛ враховано, що константа Ліфшиця $\omega_{113} = 9,2 \cdot 10^{12}$ с⁻¹, параметр розподілу частинок шламу за площами поверхні $S_i = S_0(i+1)$ (розподіл Пуассона) $\nu = 0,74$, а мінімальна площа визначається формулою $S_0 = (\xi/2)L_x^2 + 8\xi^{1/2}L_xL_y$ (L_x і L_y – відстані між сусідніми фрагментами на поверхні та між шарами фрагментів відповідно [14]). Найбільш імовірний розмір частинок шламу $a_\nu = 3,2$ нм.

Розв'язуючи рівняння (2) за допомогою чисельних методів, показано, що концентрація частинок шламу на оброблюваній поверхні $c(\tau)$ майже не залежить від часу і складає $c_m = 6,7 \cdot 10^{14}$ (за 1 с). Сумарний об'єм частинок шламу, що утворюються за час одного оберту деталі, складає $3,18 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3$, а об'єм частинок, що розташовані на площі контакту інструмента і деталі, – $1,06 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3$. Об'єм контактної зони приблизно в 200 раз більше, ніж сумарний об'єм частинок, і складає $6,1 \cdot 10^{-10} \text{ м}^3$. На одну частинку шламу (найбільш імовірний об'єм частинки $17,3 \text{ нм}^3$, а їх кількість $6 \cdot 10^{13}$) припадає об'єм 10^{-23} м^3 , а відстань між сусідніми частинками дорівнює приблизно 21 нм.

Розглядаючи взаємодію частинок шламу в контактній зоні на основі динаміки молекулярних зіткнень та класичної теорії розсіювання частинок [15, 16], для потенціалу взаємодії можна використати рівняння:

$$U_{ij}(x) = -\frac{\hbar\omega_{113}}{8\pi x} \cdot \frac{d_i d_j}{d_i + d_j}, \quad (3)$$

де \hbar – стала Планка, x – відстань між частинками.

Визначаючи прицільний параметр і кінетичну енергію частинки як $b_{ij} = \frac{1}{2}(d_i + d_j)$ і $E_i = \frac{1}{2}\rho v_i u^2$ (v_i – об'єм i -тої частинки шламу) відповідно, можна визначити кут розсіювання для двохчасткових зіткнень [17, 18]:

$$\vartheta_{ij} = \pi - 2 \int_{R_{\min}}^{l_0} \frac{b_{ij} dx}{x^2 \sqrt{1 - \left(\frac{b_{ij}}{x}\right)^2 - \frac{U_{ij}(x)}{E_i}}}, \quad (4)$$

де R_{\min} – відстань найбільшого зближення частинок, l_0 – відстань між поверхнями інструмента і деталі.

З урахуванням розподілу частинок шламу за розмірами розраховано середнє $\Theta = \frac{1}{n^2} \sum_i \sum_j \vartheta_{ij} = 104^\circ$, мінімальне $\Theta_{\min} = 61^\circ$ і максимальне $\Theta_{\max} = 145^\circ$ значення кута розсіювання частинок. Ефективний диференціальний переріз розсіювання частинок шламу $\sigma_{ij} = \pi(d_i + d_j)^2$ (число частинок, розсіяних за одиницю часу в тілес-

ний кут $d\Omega = 2\pi \sin \vartheta d\vartheta$) змінюється в межах від 0,8 Тб ($I = j = 0$) до 3,9 Тб ($I = j = 4$), а залежність густини розподілу частинок шламу $\frac{dN}{d\Omega}$ від кута розсіювання показує, що чим більше розміри частинок шламу, тим менше вони розсіюються і на менші кути [18].

Траєкторії руху частинок шламу розраховано в системі координат, зв'язаній з МОТС, яке заповнює контактну зону, за припущення, що частинки влітають в нерухоме середовище, в якому рівномірно розподілені частинки, зі сталюю швидкістю u . Кути, на які відхилилась i -та частинка при розсіюванні на j -ій частинці, розраховувались методом Монте-Карло. За допомогою генератора чисел у відповідності до розподілу Пуассона вибиралось випадкове число j_m і визначався відповідний кут розсіювання θ_{ij} . Величина кута, на який відхилилась i -та частинка після m зіткнень, визначалась за формулою

$$\Delta_{im} = (m+1)\pi - \sum_{m=0}^m \vartheta_{ij_m}, \quad (5)$$

а її координати в системі XOY (вісь OX співпадає з середньою лінією профілю оброблюваної поверхні):

$$X_{im} = \sum_{m=0}^m l \cos \Delta_{ij}, \quad (6)$$

$$Z_{im} = z_i + \sum_{m=0}^m l \sin \Delta_{ij}. \quad (7)$$

В результаті розрахунків встановлено, траєкторії руху частинок шламу в технологічному середовищі являють собою кільця, діаметр яких від 70 нм (для дрібних частинок) до 30 нм (для найбільших частинок), шириною близько 10 нм, що розташовуються поблизу оброблюваної поверхні. Тобто частинки шламу, що утворились, «перекочуються» по оброблюваній поверхні, що якісно співпадає з класичними уявленнями про природу процесу полірування [18].

Закономірності взаємодії частинок зносу інструмента з частинками шламу в контактній зоні. Для розрахунку концентрації та розмірів частинок зносу інструмента використовувались експериментальні значення коефіцієнту відносного зносу $f = 0,9$, лінійного зносу інструмента $\Delta S = 3,4 \cdot 10^{-9}$ та сумарного об'єму частинок зносу $9,5 \cdot 10^{-13} \text{ м}^3$, що утворились за час одного оберту деталі. Виходячи з кластерної моделі

[14], з урахуванням значень атомної маси двооксиду церію 172 та його густини $6,7 \text{ г/см}^3$, розраховано кількість молекулярних фрагментів CeO_2 в частинці зносу $\xi=117$, енергію кластера $6,75 \text{ eV}$, об'єм частинки зносу 15 нм^3 , середній розмір $d_2 = 3,06 \text{ нм}$ та число частинок зносу $6,4 \cdot 10^{13}$. Загальна кількість частинок шламу та частинок зносу в контактній зоні $1,25 \cdot 10^{14}$, а об'єм зони, що припадає на одну частинку, складає $4,5 \cdot 10^{-24} \text{ м}^3$. Тобто в елементарній комірці об'ємом $16,5 \times 16,5 \times 16,5 \text{ нм}^3$ знаходиться одна частинка, а кількість частинок зносу в контактній зоні приблизно така ж, як частинок шламу. Середня відстань між частинками $16,5 \text{ нм}$ приблизно в 5 разів більше, ніж середній розмір частинок шламу або зносу.

Розглядаючи взаємодію частинок зносу інструмента з частинками шламу на основі класичної теорії розсіювання [15] без урахування їх електричного заряду, потенціал їх міжмолекулярної взаємодії можна визначити за формулою (3) з константою Ліфшиця ω_{123} при $j = 2$.

Визначаючи прицільний параметр і кінетичну енергію частинки як $b_i = \frac{1}{2}(d_i + d_2)$ і $E_k = \frac{1}{2} \rho_2 v_2 u^2$ (v_2 – об'єм частинки зносу) відповідно, можна визначити кут розсіювання для двохчасткових зіткнень [17, 18]:

$$\vartheta_i = \pi - 2 \int_{R \min}^{l_0} \frac{b_i dx}{x^2 \sqrt{1 - \left(\frac{b_i}{x}\right)^2 - \frac{U_i(x)}{E_k}}}, \quad (8)$$

де $R \min = \frac{1}{2}(d_{i=n-1} + d_2)$ – відстань найбільшого зближення частинок.

З урахуванням розподілу частинок шламу за розмірами розраховано середнє $\Theta = \frac{1}{n} \sum_i \vartheta_i = 101,4^\circ$, мінімальне $\Theta_{\min} = 80^\circ$ і максимальне $\Theta_{\max} = 140^\circ$ значення кута розсіювання частинок. Ефективний диференціальний переріз розсіювання частинок шламу $\sigma_i = \pi(d_i + d_2)^2$ (число частинок, розсіяних за одиницю часу в тілесний кут $d\Omega = 2\pi \sin \vartheta d\vartheta$ [15, 17, 18]) змінюється в межах від $1,0 \text{ Тб}$ до $2,4 \text{ Тб}$, а

із залежності густини розподілу частинок шламу $\frac{dN}{d\Omega}$ від кута розсіювання впливає, що найбільша кількість частинок зносу розсіюється на кут приблизно 110° .

Траєкторії руху нейтральних частинок зносу, які взаємодіють з незарядженими частинками шламу, розраховано за формулами, аналогічними (5)–(7), з використанням методу Монте-Карло. Частинки зносу рухаються в технологічному середовищі за кільцевими траєкторіями, які розташовані в майже нерухомій сфері діаметром до 50 нм.

Взаємодію заряджених додатнім електричним зарядом частинок зносу з від'ємно зарядженими частинками шламу в контактній зоні розглянемо за умови, що електричний потенціал їх взаємодії визначається формулою:

$$U_e(x) = \frac{e_1 e_2}{4\pi x \epsilon_0 \epsilon_{03}}, \quad (9)$$

де $e_1 = -1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд частинки шламу;

$e_2 = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд частинки зносу;

$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – електрична стала;

$\epsilon_{03} = 81$ – відносна статична діелектрична проникність технологічного середовища (води).

Розрахункові значення кута розсіювання частинок зносу на частинках шламу з урахуванням їх сумарної міжмолекулярної та електричної взаємодії: середнє – $\Theta = \frac{1}{n} \sum_i \vartheta_i = 165^\circ$, мінімальне – $\Theta_{\min} = 152^\circ$

і максимальне – $\Theta_{\max} = 175^\circ$. Ефективний диференціальний переріз розсіювання частинок зносу 1,0–2,4 Тб, такий самий, як для незаряджених частинок. Залежність густини розподілу заряджених частинок зносу екстремальна, а найбільша кількість частинок розсіюється на кути близькі до 166° .

Траєкторії руху частинок зносу інструмента – кола, заряджені частинки CeO_2 , взаємодіючи з частинками шламу SiO_2 , каналізують, рухаючись вздовж колових «каналів», діаметр яких приблизно 150 нм. Час між двома послідовними зіткненнями частинок зносу з частинками шламу незалежно від їх зарядового стану складає 32–35 нс.

Висновки. Таким чином, виходячи з результатів аналізу взаємодії частинок шламу і частинок зносу інструмента в зоні контакту, показано, що траєкторії їх руху являють собою колові канали. Рухаючись по цих каналах, частинки шламу можуть переміщуватись в напрямку ро-

бочої поверхні інструмента і досягати її. Саме цим пояснюється явище локалізації частинок шламу і утворення їх нальоту на поверхні робочого шару інструмента [16, 18]. При взаємодії незаряджених частинок зносу і частинок шламу вони розсіюються на $80\text{--}140^\circ$ і рухаються всередині сфер діаметром 50 нм. Заряджені частинки зносу розсіюються на заряджених частинках шламу на кути $152\text{--}175^\circ$ і рухаються по каналах, діаметр яких 150 нм, перекочуючись в контактній зоні, подібно перекочуванню абразивних зерен в класичному процесі формоутворення поверхонь за методом притиру.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Филатов Ю.Д., Бурман Л.Л., Рогов В.В.* Закономерности распределения диспергируемых частиц стекла по размерам // Сверхтвердые материалы. – 1989. – № 5. – С. 53–55.
2. *Филатов Ю.Д.* Механизм образования микрорельефа поверхности при обработке стекла // Сверхтвердые материалы. – 1991. – № 5. – С. 61–65.
3. *Филатов Ю.Д.* Полирование алюмосиликатных материалов инструментом со связанным полировальным порошком // Сверхтвердые материалы. – 2001. – № 3. – С. 36–49.
4. *Филатов Ю.Д.* Обеспечение точности формообразования плоских поверхностей оптических деталей при обработке методом притира // Сверхтвердые материалы. – 1991. – № 4. – С. 62–66.
5. *Филатов Ю.Д.* Обеспечение оптимальной формы инструмента при полировании плоских оптических поверхностей // Трение и износ. – 1991. – № 3. – С. 452–458.
6. *Rogov V.V., Filatov Y.D., Kottler W., Sobol V.P.* New technology of precision polishing of glass optic. – Optical Engineering. – V. august 2001. – P. 1641–1645.
7. *Komanduri R., Lucca D.A., Tani Y.* Technological Advances in Fine Abrasive Processes / Annals of the CIRP. – 1997. – № 46/2. – P. 545–596.
8. ITIRM as a tool for qualifying polishing processes / *Oliver W. Fahnle, Torsten Wons, Evelyn Koch, Sebastien Debruyne, Vark Meeder, Silvia M. Booij and Joseph J.M. Braat* // Applied Optics. – № 19/1, July 2002. – P. 4036–4038.
9. *Сідорко В.І., Філатов Ю.Д.* Ефективність фінішної алмазно-абразивної обробки природного та синтетичного каменю // Надтверді матеріали: створення та застосування: Зб. Наук. праць // Матеріалознавство / Процеси механічної обробки,

верстати та інструменти / НАН України, ІНМ ім. В.М. Бакуля. – Київ, 2007.– С. 197–208.

10.

11. *Филатов А.Ю., Сидорко В.И., Филатов Ю.Д.* Особенности формирования макро- и микрорельефа плоских поверхностей деталей из неметаллических материалов при алмазном шлифовании // *Сверхтвердые материалы*. – 2007. – № 6. – С. 48–57.
12. *Sidorko V., Novikov M., Filatov Yu.* Diamond-abrasive finishing non-metallic materials // *Abstracts of International Conference “Advanced Processing for Novel Functional Materials – APNFM 2008”*, Dresden, 23–25 January 2008. – P. 103.
13. *Фарлоу С.* Уравнения с частными производными для научных работников и инженеров. – М.: Мир, 1985. – 383 с.
14. *Филатов Ю.Д., Рогов В.В.* Кластерная модель механизма усталостного износа SiO₂-содержащих материалов при их полировании инструментом со связанным полировальным порошком на основе диоксида церия // *Сверхтвердые материалы*. – 1994. – № 3. – Ч. 1. – С. 40–43.
15. *Эйринг Г., Лин С.Г., Лин С.М.* Основы химической кинетики: Пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – 528 с.
16. *Филатов Ю.Д., Рогов В.В.* Особенности процесса полирования стекла инструментом со связанным полировальным порошком / *Оптика и спектроскопия*, 1993. – Вып. 6. – С. 1229–1235.
17. *Юхновський І.Р.* Основи квантової механіки: Навч. посібник. – 2-ге вид., перероб. і доп. – К.: Либідь, 2002. – 392 с.
18. Динамика столкновений и рассеяния частиц шлама в зоне контакта инструмента и детали при полировании стекла / Ю.Д. Филатов, В.И. Сидорко, С.В. Ковалев, А.Ю. Филатов // *Вестник национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт» / Машиностроение*. – К.: НТУУ «КПИ». – 2008. – № 52. – С. 201–207.

ФІЛАТОВ Юрій Данилович – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач лабораторією 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 20.09.2009