

УДК 535.36: 621.371

В. П. Ящук¹, канд. фіз.-мат. наук, О. А. Пригодюк¹, О. Ю. Філатов¹,
В. І. Сідорко², д-р. техн. наук, С. В. Ковальов², Ю. Д. Філатов², д-р. техн. наук

¹Національний університет імені Тараса Шевченка, м. Київ, Україна

²Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, м. Київ

ВИКОРИСТАННЯ КОГЕРЕНТНОГО ЗВОТНОГО РОЗСИЮВАННЯ СВІТЛА ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ РІВНОМІРНОСТІ РОЗПОДІЛУ АБРАЗИВНИХ ЧАСТИНОК У ПОЛІРУВАЛЬНОМУ ІНСТРУМЕНТІ

Possibility of use of coherent return dispersion of light for an estimation of uniformity of distribution of abrasive particles in a working layer of the polishing tool is shown. It is registered narrow peak in indicatrix dispersion from modelling samples from ZrO₂ and a polymeric material.

Вступ

На полірованих поверхнях деталей з неметалевих матеріалів (НМ) подряпини і виколи залишаються після попередніх операцій обробки та дефекти, подряпини, сітка дрібних подряпин та ін., безпосередньо від полірувального інструменту. Це пояснюється недосконалістю технології полірування деталей з НМ, відсутністю інструментів, здатних тривалий час забезпечувати необхідну якість обробки. Якість полірування залежить від якості абразивного інструменту, одним з важливих параметрів якого є рівномірність розподілу густини абразивних частинок (АЧ) [1; 2]. Для контролю нерівномірності розподілу їх густини було запропоновано використати залежність форми спектрів люмінесценції та збудження органічних барвників, спеціально введених у зв'язку абразивного інструменту, від багатократного розсіювання світла [3]. Розвиток уявлень про багаторазове розсіювання світла дає принципову можливість контролю, що ґрунтується на принципово новому ефекті – когерентному зворотному (КЗР) розсіюванні світла. Цей ефект спостерігається в концентрованих рідких суспензіях дрібнодисперсних частинок [4]. Оскільки абразивні інструменти для фінішної обробки матеріалів, особливо полірувальні, є твердою суспензією таких частинок, вони наближені за властивостями до багаторазового розсіювального середовища. У цьому абразивному інструменті доцільно дослідити умови виникнення цього ефекту. Цей метод може переважати пропонувані раніше в разі, якщо використовується полімерна зв'язка не допускати введення органічного барвника.

Когерентне зворотне розсіювання у багаторазовому розсіювальному середовищі.

З позицій фізики робочий шар абразивного інструменту – це середовище з великою концентрацією хаотично розподілених розсіювальних центрів. Внаслідок розсіювання когерентний пучок світла, що падає, поділяється на велику кількість пучків, які рухаються в поверхневому шарі по ламаних траєкторіях. Початок і кінець пучків, що виходять зі зразка у зворотному напрямку, розміщуються на поверхні робочого шару інструменту. Когерентні промені, що пройшли однаковий оптичний шлях у середовищі, на виході з робочого шару інструменту матимуть однакову фазу і, інтерферуючи, взаємно підсилюватимуться. Промені, що пройшли різні шляхи, матимуть випадкову фазу і тому не інтерферуватимуть. Якщо таких хвиль лише дві, їх інтерференція зумовить підвищення інтенсивності вдвічі. Розглянемо умови, за яких це може відбутися [5].

Нехай на поверхню середовища падає плоска хвиля з хвильовим вектором \vec{k}_0 . У результаті розсіювання ця хвиля здійснить m послідовних актів розсіювання, що супроводжуватимуться зміною хвильового вектора $(\vec{k}_0, \vec{k}_2, \dots, \vec{k}_m)$, і вийде за межі середовища (рис. 1). Для фіксованого напрямку падіння \vec{k}_0 та спостереження \vec{k}_m внаслідок рівномірності

напрямку розсіювання, в межах площини пучка, що падає, знайдеться хвиля, яка спрямується точно у зворотному напрямку $(-\vec{k}_m, -\vec{k}_{m-1}, -\vec{k}_{m-2}, \dots, -\vec{k}_1, -\vec{k}_0)$ і тому матиме на виході із середовища такий самий напрямок. Такі хвилі пройдуть однаковий шлях у середовищі, оскільки не лише подолають однакову відстань, а й зазнають однакову кількість актів розсіювання.

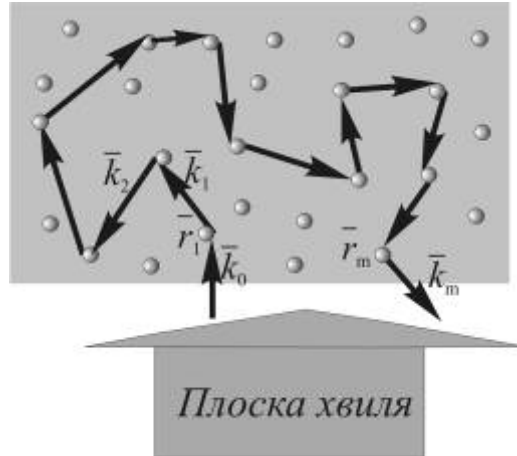


Рис. 1. Схематичне зображення розсіювання плоскої хвилі

За умови $\vec{k}_0 = -\vec{k}_m$ комплексні амплітуди на виході зі зразка будуть еквівалентні, тому що хвилі набудуть однакового зсуву фази. Внаслідок цього зазначені хвилі даватимуть конструктивну інтерференцію. Оскільки таких хвиль лише дві, інтенсивність в цьому напрямку буде вдвічі вищою від інтенсивності при звичайному некогерентному розсіюванні. Ця умова означає, що підвищення спостерігатиметься у строго зворотному до пучка, що падає, напрямку.

За умови $\vec{k}_0 \neq -\vec{k}_m$ між розглядуваними хвилями виникатиме зсув фази $(\vec{k}_0 + \vec{k}_m)(\vec{r}_1 - \vec{r}_m)$, де \vec{r}_1, \vec{r}_m – радіус-вектор відповідно першої та останньої точок розсіювання для даної траєкторії. Усереднений інтерференційний внесок для траєкторій, утворених у результаті m актів розсіювання, буде ненульовим за умови

$$|\vec{k}_0 + \vec{k}_m| < L_m^{-1}, \quad (1)$$

де L_m – середній діаметр траєкторії з m точками розсіювання.

Нерівність (1) можна виразити через модуль хвильових векторів $k = |\vec{k}_0| = |\vec{k}_m|$ і кут між ними θ :

$$k\theta \leq L_m^{-1}. \quad (2)$$

Звідси випливає, що інтерференційне підвищення інтенсивності розсіяного світла спостерігається у зворотному напрямку в межах кута

$$\theta \leq L_m^{-1} k^{-1} = 2\pi \frac{\lambda}{L_m}. \quad (3)$$

Оскільки мінімальний розмір траєкторії дорівнює відстані між двома послідовними актами розсіювання, тобто довжині вільного пробігу l , інтерференційне підвищення інтенсивності спостерігатиметься в межах кута шириною $\theta < \frac{\lambda}{l}$.

Таким чином, внаслідок багаторазового розсіювання когерентного пучка в індикатрисі розсіювання з'являється вузький пік, ширина якого обернено пропорційна довжині вільно-

го пробігу $l - \theta < \frac{\lambda}{l}$, отже, концентрації розсіювальних частинок абразивного порошку. Висота піка збільшується з підвищенням концентрації частинок до максимального рівня, що вдвічі перевищує некогерентний дифузний фон. Це явище, як зазначалося, називається когерентним зворотним розсіюванням [6].

За зовнішніми ознаками виникнення піка КЗР подібне до аналогічного ефекту при розсіянні Мі [4] та дворазовому проходженні хвилями хаотичного середовища [7]. Зокрема, підвищення концентрації частинок зумовлює підвищення інтенсивності піка діаграми розсіювання. Але на відміну від КЗР розсіювання Мі описує одноразове розсіювання, ширина індикатриси якого обернено пропорційна не відстані між частинками, а розміру частинки

$$\delta\theta \approx \frac{\lambda}{d}$$

Аналогічне співвідношення спостерігається за дворазового проходження хвилями хаотичного середовища. Іншими словами, на відміну від КЗР ширина піків у цих випадках містить інформацію не про довжину вільного пробігу, а про розмір частинки (неоднорідність).

Залежно від концентрації розсіювальних частинок спостерігається закономірність зміни параметрів піка індикатриси розсіювання [4]:

при $d < \lambda$ слабкий пік у напрямку, зворотному до пучка, що падає;

при $d \approx (2 - 4)\lambda$ пік, максимальна інтенсивність якого пропорційна концентрації розсіювальних центрів;

при значному перевищенні довжини хвилі ($d \gg \lambda$) превалює одноразове розсіювання і КЗР переходить у розсіювання Мі.

Результати

Об'єктами дослідження були модельні зразки абразивних кругів: висококонцентрована суспензія частинок ZrO_2 діаметром 1,5 мкм у полімерній матриці та везикулярні плівки. Останні не є абразивними матеріалами, але еквівалентні їм щодо розсіювання світла. Полімерну суспензію отримували перемішуванням частинок ZrO_2 у спиртовому розчині полівінілацетату (ПВА). Після випаровування спирту і полімеризації ПВА отримували зразки абразивного інструменту на органічній зв'язці з доволі щільним упакуванням частинок ZrO_2 .

Везикулярні плівки (рис. 2) отримували на основі двокомпонентного полімерного розчину, один з компонентів якого є світлочутливою сполукою, що містить азидогрупу – N_3 . Везикули утворювались при ультрафіолетовому опроміненні та подальшому нагріванні плівки, у результаті чого виділялись мікроскопічні бульбашки азоту, які агрегувались у везикули. Концентрація і середній розмір везикул визначали тривалістю експозиції ультрафіолетового опромінення і температурою нагрівання. Отриманий розмір везикул становив 2–4 мкм, концентрація варіювалась у межах $n = 2 \cdot 10^7 - 3 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$.

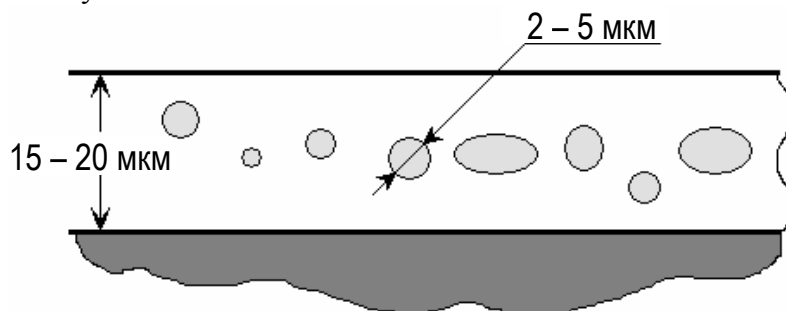


Рис. 2. Схематичне зображення везикулярної плівки

Перед початком і наприкінці вимірювань реєстрували діаграму відбиття від дзеркала, встановленого у тримач зразків 4 (рис. 3) і зорієнтованого нормально до лазерного пучка, що падає. Кутове положення піка діаграми використовували для визначення напрямку зворотного-

го відбиття після реєстрації діаграм КЗР. Під час реєстрації діаграм КЗР дзеркало екранувалося чорним екраном.

При реєстрації індикатриси розсіювання везикулярної плівки було зафіксовано, що приблизно в напрямку дзеркального відбиття з'являється доволі широкий пік ($\sim 7^\circ$). Схрещення поляроїда, розміщеного в пучку спостереження, з напрямком коливань вектора \vec{E} лазерного променя зумовлює різке зменшення піка, а паралельна орієнтація - збільшення. Пік зміщується з поворотом плівки. Із зазначеного випливає, що цей пік зумовлений дифузним відбиттям від поверхні плівки, тому що зміщується з поворотом плівки, а відповідне випромінювання поширюється в широкому тілесному куті та зберігає лінійну поляризацію лазерного пучка.

На фоні широкого піка індикатриси розсіювання спостерігався вузький пік ($\sim 15'$), кутове положення якого не змінювалося при повороті плівки на $\pm 10^\circ$ (рис. 4). Висота цього піка приблизно вдвічі перевищувала дифузний фон індикатриси. Розворот плівки на 180° і опромінення її з боку лавсанової основи практично не вплинули на пік, за винятком деякого зниження його висоти. При цьому плівка була зорієнтована так, що у процесі реєстрації дзеркально відбитий пучок не попадав в кутовий аналізатор. Це свідчить, що пік не пов'язаний з лавсановою підкладкою, а зумовлений саме розсіюванням у везикулярній плівці.

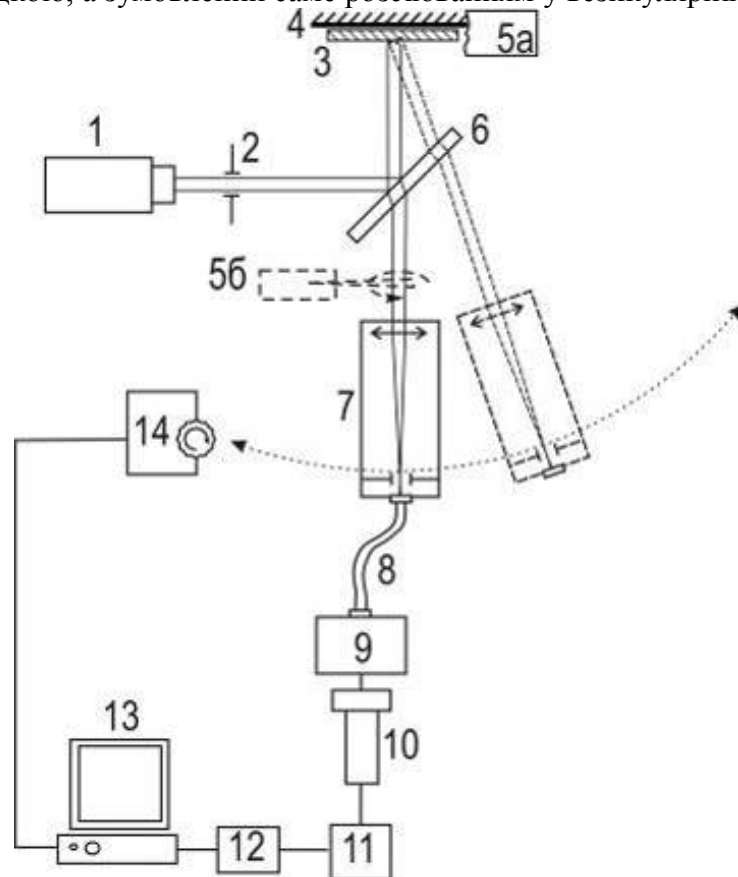


Рис. 3. Універсальна схема реєстрації кутової діаграми відбивання та розсіювання: 1 – напівпровідниковий лазер; 2 – діафрагма; 3 – досліджуваний зразок; 4 – тримач зразків з юстувальним механізмом; 5а – тримач абразивних зразків з вібратором, 5б – обтюратор з пластмасовим диском, 6 – світлоподільна пластинка; 7 – кутовий аналізатор; 8 – світловод; 9 – подвійний монохроматор ДМР-4; 10 – фотоелектричний помножувач; 11 – підсилювач постійного струму; 12 – АЦП; 13 – ПК; 14 – кроковий двигун з блоком керування

Наведені властивості вузького піка в індикатрисі розсіювання везикулярної плівки відповідають ознакам когерентного зворотного розсіювання і тому цей пік є піком КЗР. В індикатрисі розсіювання модельного зразка полірувального круга на основі порошків ZrO_2

також було виявлено вузький ($5'$) пік з аналогічними властивостями: його кутове положення не залежало від орієнтації зразка, а висота приблизно вдвічі перевищувала дифузний фон (рис. 5), що дає змогу зарахувати цей пік до КЗР. Як видно з рис. 5, пік чітко виділяється на фоні шумової доріжки, що окреслює дифузний фон індикатриси розсіювання.

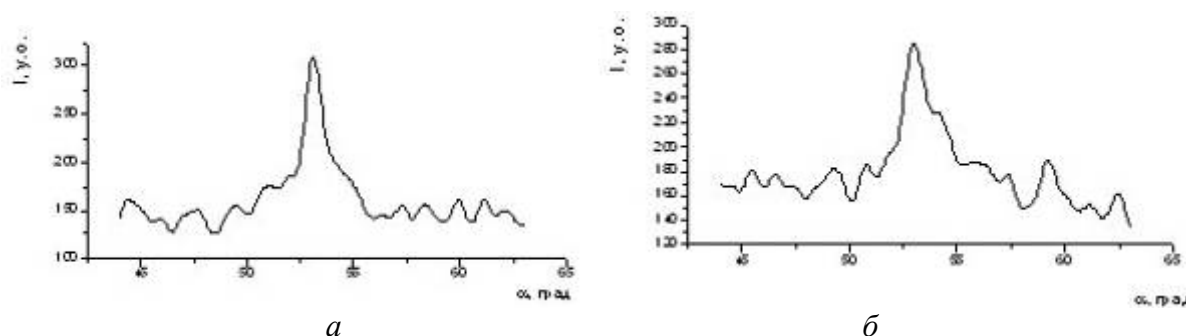


Рис. 4. Пік КРЗ у діаграмі розсіювання везикулярної плівки при орієнтації її відносно зонduючого пучка під кутом на 10° (а) і -10° (б)

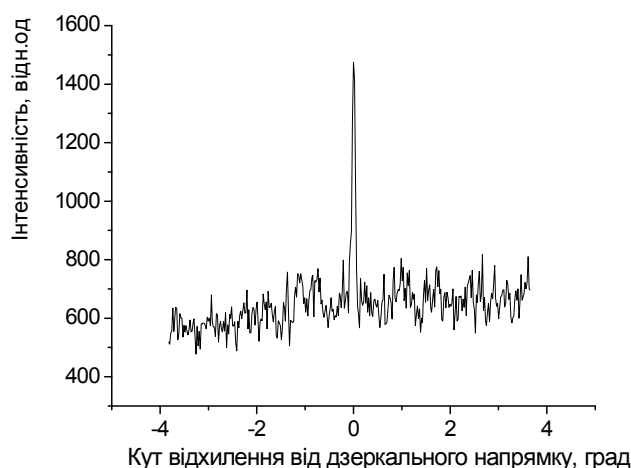


Рис. 5. Індикатриса розсіювання світла від модельного зразка полірувального інструмента з частинок ZrO_2 на основі полімерного зв'язуючого

Одже, можна стверджувати, що в індикатрисі розсіювання модельних абразивних зразків виникає пік КРЗ, який добре реєструється на дифузному фоні зворотного некогерентного розсіювання за допомогою розробленої методики та установки, тобто показана можливість контролю концентрації абразивних частинок у полірувальному інструменті за допомогою залежності ширини піка від густини розсіювальних центрів.

Висновки

Зареєстровано вузький пік в індикатрисі розсіювання від модельних зразків полірувального абразивного інструмента на основі частинок ZrO_2 діаметром 1,5 мкм, що закріплені в полімерній матриці, і везикулярній плівці. Показано, що цей пік зумовлений КРЗ, що дає змогу забезпечити можливість контролю концентрації абразивних частинок за шириною цього піка.

Література

1. Reflectometry of surfaces of non-metallic materials at polishing // Yu. D. Filatov, V. I. Sidorko, A. Yu. Filatov etc. Proceeding of 9-th International Young Scientists Conference Optics and High Technology Material Science SPO 2008, AO34. – 2008. – P. 68.

2. Филатов Ю. Д. Полирование прецизионных поверхностей деталей из неметаллических материалов инструментом со связанным полировальным порошком // Сверхтвердые материалы. – 2008. – № 1. – С. 59–66.
3. Yashchuk Vasil P., Prygodiuk Olga. Dependence of luminescence and excitation spectra on multiply scattered dyed medium parameters // Proceeding of 9-th International Young Scientists Conference Optics and High Technology, AO35. – 2008. – P. 71.
4. Kuga Y., Ishimaru A. Retroreflectance from a dense distribution of spherical particles // J. Opt. Soc. Am. A. – 1. – P. 831–835.
5. Wolf Pierre-Etienne, Marret Georg. Weak localization and coherent backscattering of photon in disordered medium // Phys. Rev. Lett. – 1985. – V. 55. – 24. – P. 2296.
6. Tsang L., Ishimaru A. Backscattering enhancement of random discrete scatterers // J. Opt. Soc. Am. A. – 1. – P. 836–839.
7. Кравцов Ю. А., Саичев А. И.. Эффекты двукратного прохождения волн в случайно-неоднородных средах // УФН 137. – 1982. – №. 3. – С. 501–527.

Надійшла 07.05.09

УДК 679.8

В. И. Сидорко, д-р. техн. наук, **В. В. Пегловский**, канд. техн. наук,
В. Н. Ляхов, **Е. М. Поталыко**

Научно-технологический алмазный концерн «Алкон» НАН Украины, г. Киев

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ПРИРОДНЫХ КАМНЕЙ НА ТРУДОЕМКОСТЬ ИХ АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ

The complex of the properties diagnosed for the natural semiprecious is considered and decorative stones at their studying, data about influence are cited on productivity of grinding of the basic strength properties of such stones.

Введение

В камнеобрабатывающем производстве при изготовлении декоративно-художественных [1] и строительных [2] изделий из полудрагоценных и декоративных природных камней [3] для определения основных технологических показателей изделий из камней – трудоемкости, энергоемкости и др. [4] – необходимо знать зависимость трудоемкости их обработки от прочностных свойств. При этом следует отметить, что такие камни обрабатывают шлифованием с использованием преимущественно алмазного инструмента.

В этой связи исследование влияния прочностных свойств природных камней на трудоемкость их алмазного шлифования является актуальной задачей камнеобрабатывающего производства.

Методика исследований

К основным свойствам, диагностируемым у полудрагоценных камней, относятся твердость по шкале Мооса, плотность, спайность, излом, формы выделения (структура), степень прозрачности, светопреломление и двупреломление.

Кроме перечисленных свойств оцениваются такие показатели качества полудрагоценных камней: просвечиваемость, насыщенность цвета, размеры бездефектных областей, включения второстепенных минералов, трещиноватость, наличие рисунка, полихромность, контрастность рисунка, размеры текстурообразующих элементов [5].