

ІНЖЕНЕРІЯ ПОВЕРХНІ ВИРОБІВ З ОПТИЧНИХ ПОЛІМЕРІВ

Доктор технічних наук Посвятенко Е.К.,
кандидат технічних наук Тітаренко О.В.

Виробництво високоякісних сцинтиляторів неможливо без урахування особливостей процесу різання оптичних полімерів. Розглянуто вплив технологічної системи на мікрогеометрію поверхні, її структуру та термодинамічну стабільність поверхневого шару при різних швидкостях обробки.

Some aspects of the cutting of optical polymers are of great importance for the production of high quality scintillators. It's show a different influence of the technology system on microgeometry, structure and thermodynamic stability of the machined surface layer under low and high speed cutting.

Постановка проблеми. Економічна доцільність комплексного забезпечення якості виробів на усіх стадіях їхнього життєвого циклу викликала необхідність аналогічного підходу до робочих поверхонь виробів та деталей. У результаті сформувався новий науково-технічний напрямок – інженерія поверхні, який на сьогодні посідає одне з провідних місць у техніці та технічних науках. Основна концепція інженерії поверхні – комплексне забезпечення якості поверхневого шару на усіх етапах життєвого циклу виробу: проектування, технологічна підготовка виробництва, виготовлення, контроль, збирання, діагностика, експлуатація, ремонт, відновлення та утилізація [1–3]. нами систематизовано понад 200 відомих на сьогодні методів інженерії поверхні з розбивкою їх на наступні класи: нанесення покриттів, модифікування поверхневого шару, технологічні та комбіновані методи [3]. При цьому показано, що формування необхідних експлуатаційних властивостей робочих поверхонь здійснюється через комплекс фізико-механічних та геометричних факторів, які забезпечуються кожним з методів. Аналіз публікацій з проблеми інженерії поверхні показав, що можливості технологічних методів, зокрема, при виготовленні виробів з неметалевих матеріалів вивчені вкрай недостатньо. Покажемо це на прикладі оптичних полімерів.

Стрімкий розвиток ядерної фізики та фізики високих енергій висуває жорсткі вимоги щодо якості матеріалів, які використовують для реєстрації радіаційних та іонізуючих випромінювань. Це поняття охоплює не тільки оптичну прозорість матеріалу та геометричні характеристики поверхні, а й довговічність стабільної роботи в жорстких умовах всебічного опромінення. Завдяки малій густині, високій міцності, негігроскопічності, ефективній світловій віддачі та високій технологічності сцинтилятори на органічній основі з полістеролу (ПС) широко використовуються в установках для дозиметрії рентгенівських та γ -променів, реєстрації β - та α -часток. Порівняно з рідкими сцинтиляторами та матеріалами з монокристалів пластмасові ПС-сцинтилятори є «швидкими» детекторами іонізуючих часток (середня тривалість сцинтиляції становить $10^{-9} - 10^{-8}$ с). Можливість підбору спектру світіння ПС за рахунок люмінесцентних домішок до відповідної спектральної чутливості реєструючого пристрою на сьогодні дозволила розширити практичне коло їх використання (побутові та промислові дозиметри радіаційного контролю, медичне радіаційне обладнання та ін.).

У залежності від області застосування сцинтилятори можуть використовуватися у вигляді тонких плівок (товщиною 0,01 мм), пластин або великогабаритних виробів (довжиною порядку 7000 мм і масою понад 100 кг). Формування експлуатаційних показників починається на етапі полімеризації і завершується для виробів товщиною більше 10 мм декількома етапами механічної обробки. У зв'язку з невеликою теплостійкістю та теплопровідністю органічних речовин найважливішим на всіх етапах механічної обробки сцинтиляторів є забезпечення мінімального проникнення тепла у матеріал. Саме тому дослідження стану поверхневого шару полімеру після обробки різними інструментальними матеріалами є одним з основних кроків в удосконаленні технологічного процесу. Поява сучасних твердосплавних матеріалів з особливою дрібною структурою, високою теплопровідністю та оптимальною геометрією передньої поверхні може значно змінити прийняті діапазони режимів різання і позитивно вплинути на якість полімерних виробів.

Аналіз досліджень. Огляд літературних джерел стосовно особливостей будови та властивостей термопластичних полімерних матеріалів [4, 5], їх деформаційної поведінки під впливом термомеханічних навантажень [6], енергетичних аспектів процесу руйнації [7], а також проблем обробки полімерів різанням

[8–11] дозволяє виділити теплофізичний чинник процесу головним у керуванні структуроутворенням та фізико-механічними властивостями поверхневого шару полімерів. Саме тому якість обробленого полімерного матеріалу доцільно оцінювати комплексно: за параметрами мікрогеометрії поверхні, її зовнішньою структурою та термодинамічними характеристиками. Якщо перші показники мають свідчити про фізичний вплив складових процесу на стан поверхні, то останні – про вплив тепла на внутрішній енергетичний стан матеріалу поверхневого шару. На жаль, за умов механічної обробки така комплексна оцінка якості майже не проводиться, тому прийняті у виробництві рекомендації щодо вибору параметрів режиму різання та інструменту спираються лише на данні аналізу мікрогеометрії поверхні, що не є достатнім.

Метою роботи є порівняльний аналіз стану поверхневого шару і поверхні ПС після обробки фрезеруванням традиційним інструментом з полікристалічного алмазу та сучасним твердосплавним інструментом з карбіду вольфраму, що дозволить виявити найбільш раціональний підхід у формування якості полімерних скінтиляторів.

Для досягнення мети вирішуються наступні задачі: за однаковими умовами обробки досліджується теплофізичний стан поверхневого шару полімерного матеріалу, проводиться якісний та структурний аналіз поверхні, розробляються рекомендації щодо вибору інструменту та параметрів режиму різання для забезпечення високої якості виробу.

Методичне та лабораторне забезпечення. Дослідження проведено на зразках з ПС \varnothing 50 мм товщиною 20 мм після обробки однозубою фрезою \varnothing 80 мм зі вставкою із надтвердого полікристалічного матеріалу на основі синтетичного алмазу марки СКМ-Р (виробництва Полтавського заводу алмазних інструментів) та різальною пластиною (ТС) із дрібнозернистого твердосплавного матеріалу марки ВК6-М (виробництва концерну CERATIZIT, Австрія). Геометрія вставки з СКМ-Р: $\alpha = 0^\circ$, $\beta = 15^\circ$, $\gamma = 45^\circ$, $\gamma_1 = 10^\circ$, $r = 0,5$ мм, пластини ТС – $\alpha = 22^\circ$, $\beta = 15^\circ$, $\gamma = 90^\circ$, $\gamma_1 = 2^\circ$, $r = 0,4$ мм з довжиною різальної кромки $l_1 = 2$ мм. Діапазон параметрів режиму різання: швидкість – $v = 30 \div 1500$ м/хв; подача – $S = 0,01 \div 0,07$ мм/об та глибина різання – $t = 0,1 \div 0,5$ мм.

Експериментальні дослідження мікрогеометрії оброблених поверхонь виконано контактним методом за допомогою профілографа-профілометру Hommel Tester T1000, а дослідження структури – методом електронної скануючої мікроскопії без нанесення струмопровідного покриття на мікроскопі Philips XL 30 ESEM-TMP. Внутрішній енергетичний стан поверхневого шару за термодинамічними параметрами оцінено методом диференціальної скануючої калориметрії за допомогою калориметру Netzsch DSC 204 F1 Phoenix® та мікротому Reichert-Jung Microtome MT6.

Результати дослідження. Мікрогеометрія поверхні полімеру після обробки зі швидкістю $v = 30$ м/хв характеризується стабільністю структури і рівномірністю мікрорельєфу. Це свідчить про відсутність суттєвих градієнтів температури як у напрямку головного, так і допоміжного руху різання. Рівень шорсткості поверхні полімеру, оцінений за критерієм Ra в залежності від параметрів перерізу зрізу (рис. 1), набуває особливо суттєвих змін при використанні інструменту СКМ-Р. Головним параметром впливу є подача. При цьому для поверхонь після обробки ТС її роль менша, тому діапазон раціональних значень для забезпечення рівня шорсткості $Ra \leq 0,3$ мкм лежить в межах $S = 0,01 - 0,045$ мм/об і $t = 0,1 - 0,25$ мм. Ефективне використання інструменту СКМ-Р підтверджується у більш вузькому діапазоні значень подачі ($S = 0,02 - 0,03$ мм/об) і при більших значеннях глибини ($t = 0,2 - 0,4$ мм). Структура поверхні зі збільшенням подачі набуває більш чітко вираженого рельєфу з відбитком слідів від задньої поверхні інструменту.

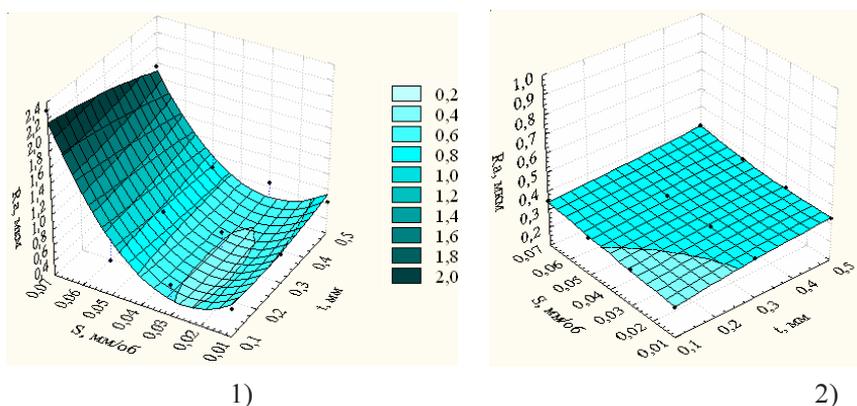


Рис. 1. Залежність шорсткості поверхні ПС від параметрів перерізу зрізу при обробці зі швидкістю $v = 30$ м/хв: 1 – інструмент СКМ-Р; 2 – твердосплавний інструмент.

Вивчення термодинамічних параметрів матеріалу поверхневого шару полімерів товщиною $h = 1$ мм показало, що термомеханічна передісторія обробки суттєво відображається на температурі переходу матеріалу з твердого до високоеластичного стану – температурі склування ($T_{ск}$) та зміні внутрішньої енергії – ентальпії (ΔH) у порівнянні з еталонними зразками відполірованих вручну мінімально деформованих поверхонь полімерів ($T_{ск} = 97,8$ °С, $\Delta H = 2,83$ Дж/г).

Усі зразки ПС, що відповідають вище зазначеним раціональним умовам обробки з використанням інструменту СКМ-Р, показали зниження $T_{ск}$ на 2 °С ч 3 °С. У разі використання пластин ТС зменшення $T_{ск}$ відбувається на рівні 1,2 °С ч 2,3 °С. Реакції повного розплавлення зразків полімерів мають екзотермічний характер, тобто характеризуються збільшенням величини ентальпії за рахунок структурних перебудов [5]. Ентальпія зразків після обробки інструментом СКМ-Р збільшується у межах 0,8...1,12 Дж/г, а після ТС – 0,4...0,76 Дж/г. Відповідний такому термодинамічному стану полімерів рівень деформації становить приблизно 10%. З часом більша частина таких дефектів здатна «заліковуватися» за рахунок релаксаційних процесів, що забезпечує рівноважність термодинамічного стану поверхневого шару полімерів та стабільність їх фізико-механічних властивостей. Тобто, обробка ПС з визначеними для кожного із інструментів параметрами перерізу зрізу при швидкості $v = 30$ м/хв майже не впливає на довговічність виробів.

Збільшення швидкості різання до $v = 800$ м/хв провокує суттєве зростання теплофізичного навантаження на поверхню матеріалу, що треба особливо враховувати при обробці термопластичних матеріалів, до яких належить ПС.

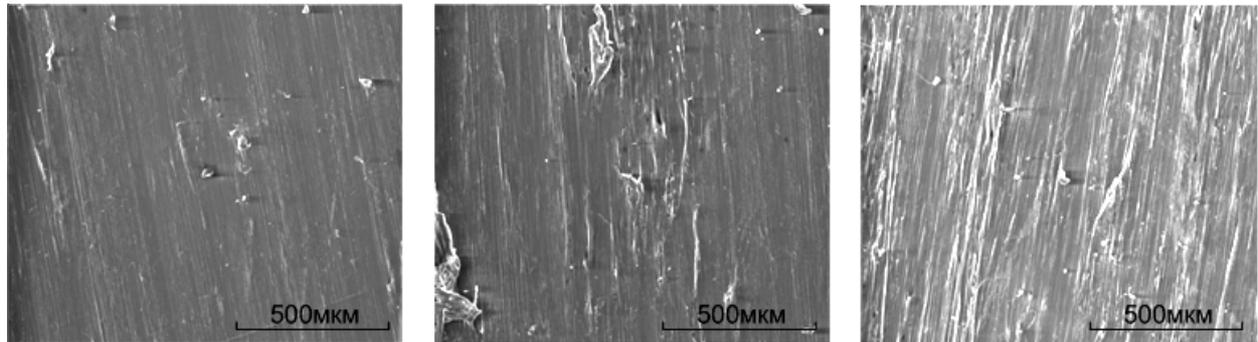


Рис. 2. Різновиди структури поверхні ПС у напрямі головного руху різання після обробки СКМ-Р з $v = 800$ м/хв, $t = 0,3$ мм та $S = 0,03$ мм/об

Структура поверхні більшості зразків з дослідженого діапазону параметрів S і t відображає нерівномірність розповсюдження тепла переважно в напрямі головного руху різання. На поверхні з'являються оплавлення та незрізані часточки стружки (рис. 2).

Графічні залежності параметру Ra від перерізу зрізу свідчать про підвищення рівня мінімальної шорсткості і збільшення впливу глибини різання (рис. 3). Для інструменту СКМ-Р (рис. 3.1) рівномірний рельєф поверхні з рівнем $Ra = 0,5 \pm 0,08$ мкм підтримується в діапазоні $t = 0,1 \dots 0,15$ мм та $S = 0,05 \dots 0,06$ мм/об.

Інструмент ТС показує кращі можливості щодо забезпечення мінімального рівня шорсткості в більш широкому діапазоні параметрів перерізу зрізу (рис. 3.2). Так, поверхні з $Ra = 0,4 \pm 0,06$ мкм і стабільним рельєфом можна досягти вже при $S = 0,03 \dots 0,05$ мм/об та $t \leq 0,2$ мм, а параметри, отримані при обробці інструментом СКМ-Р, залишаються незмінними з $t \leq 0,4$ мм.

Встановлені переваги інструменту ТС є підтвердженням того факту, що зі збільшенням швидкості обробки підвищується роль геометричних параметрів інструменту у формуванні мікрорельєфу поверхні. На користь ТС грає великий передній кут γ , який позитивно впливає на питому силу різання, та менші радіуси округлення r ріжучих кромок.

Термодинамічний стан зразків поверхонь з мінімальним рівнем шорсткості після обробки зі швидкістю $v = 800$ м/хв характеризується подальшим зменшенням температури склування (до 93,7 °С) та підвищенням ентальпії (до 3,18 Дж/г). Така картина свідчить про збільшення рівня деформації до 16 % [5] і наявності в структурі великої кількості високоенергетичних перебудов, сформованих за межами високоелас-

тичного фізичного стану полімеру (вище 112 °С). Подібні перебудови, як правило, є місцями зародження мікротріщин та причинами зниження фізико-механічних властивостей матеріалів. Таким чином, навіть при задовільному для напівчистої обробки рівні шорсткості гарантувати довготривалу стійкість виробів неможливо. Крім того, встановлене зниження температури склування вимагає наступні етапи обробки проводити з меншим термомеханічним навантаженням на поверхневий шар полімеру.

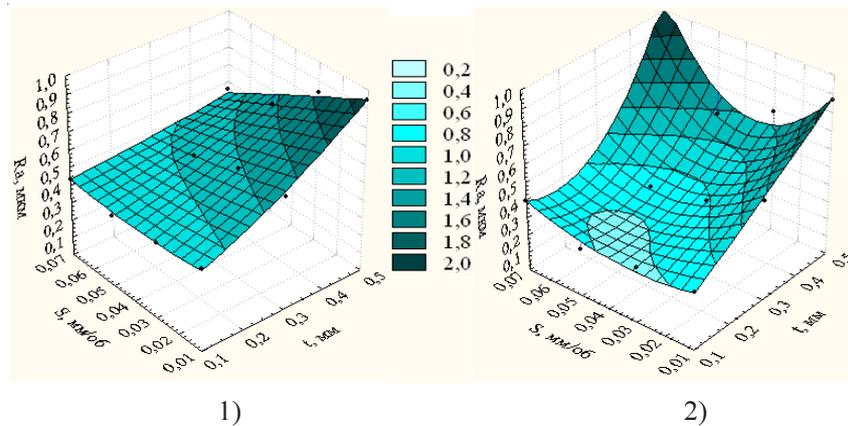


Рис. 3. Залежність шорсткості поверхні ПС від параметрів перерізу зрізу при обробці зі швидкістю $v = 800$ м/хв: 1 – інструмент СКМ-Р; 2 – твердосплавний інструмент.

Показники якості поверхні полімерів поступово покращуються лише при переході до діапазону швидкостей $v = 1150$ ч 1500 м/хв (рис. 4). При цьому раціональні значення подачі для обох інструментів залишаються аналогічними встановленим при $v = 800$ м/хв. Значення глибини різання дещо збільшуються: для СКМ-Р до $t = 0,3 \dots 0,4$ мм, для ТС – $t = 0,3 \dots 0,5$ мм. Саме за таких умов вдається зменшити вплив теплофізичних чинників механічної обробки на поверхневий шар полімеру і сформувати однорідну структуру поверхні з рівнем шорсткості меншим, ніж при обробці з $v = 30$ м/хв. Велику роль в цьому відіграє короткочасність взаємодії інструменту з заготівкою і неглибоке проникнення температурного поля в поверхневий шар полімеру.

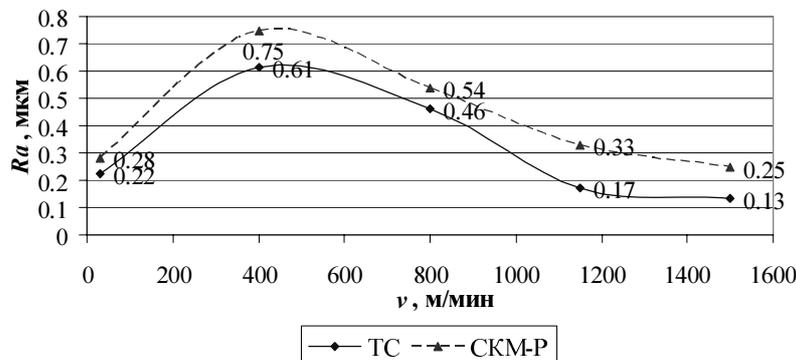


Рис. 4. Залежність середнього рівня шорсткості поверхні ПС для встановлених раціональних параметрів перерізу зрізу від швидкості різання

Більшість зразків з поверхневого шару після обробки у встановленому раціональному діапазоні значень S і t характеризуються збільшенням значень $T_{ск}$ у порівнянні до еталонних зразків ПС на 1,6 ч 1,8 °С та мінімальним збільшенням значень ентальпії. Такі показники є типовими при формуванні структури полімеру в області високоеластичного фізичного стану, що проходить з повною або частковою орієнтацією макромолекулярних ланцюгів. Відповідний рівень деформації структури згідно з дослідженнями [6] становить 40 – 45 %, що обумовлює її фізичне та орієнтаційне зміцнення. Характерним у структурі поверхні є зменшення періоду мікрорельєфу та практична відсутність слідів від задньої поверхні інструменту.

Таким чином, обробка термопластичних полімерних матеріалів в діапазоні швидкостей $v = 1150$ ч 1500 м/хв має безперечні переваги за всіма проаналізованими показниками стану поверхні і поверхневого шару.

Головною умовою забезпечення високої якості та термодинамічної стабільності структури є дотримання температури у зоні різання в межах високоеластичного стану полімеру. Для досліджених зразків ПС, згідно даних теплофізичних досліджень, він підтримується в межах 102 – 112 °С. Інструменти із синтетичних надтвердих матеріалів мають при цьому перевагу в стійкості та підтриманні невисокого стабільного рівня температури лише за умови забезпечення мінімальних радіусів округлення ріжучих кромки та великих передніх кутів. Оскільки технічно формування відповідної геометрії є проблематичним, слід звернути увагу на можливості твердосплавних матеріалів, які у вигляді пластин доступні у широкому діапазоні геометричних параметрів.

Висновки і перспективи.

Високу якість поверхневого шару виробів з полімерів можна забезпечити за умов обробки з швидкостями різання до 30 м/хв, коли деформування проходить в склоподібному твердому стані матеріалу, або з надвисокими швидкостями (1150 ч1500 м/хв) в межах його високоеластичного стану. Діапазону надвисоких швидкостей у межах встановлених параметрів перерізу зрізу слід надавати перевагу, оскільки внаслідок орієнтаційних процесів сформована структура поверхневого шару зміцнюється та набуває термодинамічної стабільності.

Обробку виробів з полімерних термопластичних матеріалів слід виконувати інструментом з полікристалічних надтвердих матеріалів типу СКМ-Р або дрібнозернистих твердих сплавів групи ВК з максимально технологічно та технічно досяжними значеннями переднього кута різальної кромки при мінімальних значеннях радіуса округлення останньої. При цьому на задній поверхні інструмента слід виконати вигладжувальну фаску шириною до 2 мм з нульовим значенням заднього кута.

Перспективним у обґрунтованому призначенні припусків на механічну обробку є оцінка товщини зміненого шару за оптичними характеристиками полімеру.

Література

1. Інженерія поверхні / К.А. Ющенко, Ю.С. Борисов, В.Д. Кузнецов, В.М. Корж. – К.: Наук. думка, 2007. – 558 с.
2. Инженерия поверхности деталей / Под ред. А.Г. Сулова. – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.
3. Посвятенко Е.К., Мельник О.В., Алексеев В.В. Комбіновані методи інженерії поверхні деталей транспортних засобів // Вісник Національного транспортного університету. – К.: НТУ. – 2006. – Вип. 11. – С. 13–16.
4. Аверко-Антонович И.Ю., Бикмуллин Р.Т. Методы исследования структуры и свойств полимеров: Учебное пособие. – Казань.: КГТУ, 2002. – 604 с.
5. Волынский А.Л., Бакеев Н.Ф. Структурные аспекты неупругой деформации полимеров // Высокомолекулярные соединения. – 2005. – сер. С, т. 47, № 7. – С. 1332–1367.
6. Визуализация структурных перестроек ориентированных аморфных полимеров при отжиге / Волынский А.Л., Гроховская Т.Е., Лебедева О.В., Бакеев Н.Ф. // Высокомолекулярные соединения. – 2006. – Сер. А, т. 48, № 5. – С. 834–847.
7. Деформация стеклообразных полимеров: запасание энергии на ранних стадиях нагружения / Шеногин С.В., Нойне G.W.H., Саламагина О.Б. и др. // Высокомолекулярные соединения. – Сер. А. 2004. – т. 46, № 1. – С. 30–42.
8. Везуб Н.В. Научные основы высокоэффективных процессов механической обработки полимерных композитов: Автореф. дис... д-ра техн. наук: 05.03.01 / Харьк. пол. ин-т., 1995. – 35 с.
9. Лавриненко С.Н., Титаренко О.В., Танченко А.Ю. Оценка величины деструкции полимерного термопластичного материала после лезвийной обработки фрезерованием // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. – Вып.71. – С. 466–472.
10. Titarenko O.V., Frank A., Riemenschneider I.C. Thermal analysis of polymeric materials under machining conditions // Proc. 6th euspen International Conf., V.1. – Baden bei Wien. – 2006. – P. 75–78.
11. Teti R. Machining of Composite Materials // CIRP Annals. – 2002. – Vol.51. № 2. – P. 611–635.