УДК 621.923

О. В. Тітаренко **О. І. Шаповалов** **Н. В. Зубкова** **С. О. Новак**

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ УМОВ ФРЕЗЕРУВАННЯ НА ЯКІСТЬ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ЧУТЛИВИХ ЕЛЕМЕНТІВ РАДІАЦІЙНОГО КОНТРОЛЮ

Наведено результати теплофізичних досліджень процесу торцевого фрезерування плоских поверхонь полістиролу для сцинтиляційних елементів дозиметрів. За допомогою термографічних даних встановлено, що збільшення глибини різання не тільки підвищує температуру в зоні різання, а й спричинює нерівномірність розподілу тепла. Якість сформованого поверхневого шару оцінено за теплофізичними характеристиками: ентальпією, температурою склування та питомою теплоємністю.

К л ю ч о в і с л о в а: термопластичні полімерні матеріали, полістирол, торцеве фрезерування, температурне поле, розподіл тепла, температура склування, поверхня різання, ентальпія, внутрішній енергетичний стан, якість поверхні, шорсткість поверхні.

Постановка проблеми. Україна є державою, яка має потужний потенціал ядерної енергетики. Станом на кінець 2018 року на її території функціонувало 15 об’єктів іонізуючого випромінювання під охороною НГУ [1]. Особовий склад підрозділів охорони має постійно здійснювати радіаційну розвідку та контроль і у разі виникнення нештатних ситуацій швидко ідентифікувати джерела небезпечного випромінювання. Технічне забезпечення підрозділів складається з різних типів дозиметричної апаратури, які дозволяють не тільки належно виконувати службово-бойові завдання, а й надійно захистити особовий склад.

Одними з найбільш універсальних засобів радіаційного контролю є дозиметричні прилади, в яких як активну речовину використовують чутливі до випромінювань сцинтиляційні полімерні матеріали. Потрапляючи в зону радіації, такі матеріали випромінюють короткочасні світлові спалахи завдяки сполукам, що поєднують високу флуоресцентну квантову ефективність, короткий флуоресцентний час життя та добру розчинність. Як правило, кількість випущених сцинтилятором фотонів пропорційна поглинутій енергії, що дозволяє одержувати енергетичні спектри випромінювання.

Довговічність та надійність роботи сцинтиляційних матеріалів визначається не тільки складом, а й станом поверхневого шару, який формується на всіх етапах виробництва. Саме через наявність внутрішніх напружень, розірваних ланцюгів у поверхневих шарах полімеру значно зменшується чутливість матеріалу до випромінювань та пришвидшуються процеси його старіння. Оскільки будь-який вплив фізичного або механічного характеру змінює, перш за все, внутрішній енергетичний стан речовини, принципово важливим є контроль стабільності стану та виявлення найбільш вагомих технологічних факторів впливу. На жаль під час формування та контролю якості виробу оцінювання його енергетичної сталості лишається поза увагою, більше орієнтуються на низький рівень шорсткості та оптичну прозорість.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Особливості зміни властивостей полімерних термопластичних матеріалів під впливом зовнішніх чинників детально розглянуто у працях [2, 3]. Зокрема зазначається, що такі полімерні матеріали під впливом термомеханічного навантаження поводять себе як в’язкопружні речовини, деформація яких складається з трьох складових: пружної, високоеластичної та деформації в’язкої течії. Важливою експлуатаційною характеристикою

© О. В. Тітаренко, О. І. Шаповалов, Н. В. Зубкова, С. О. Новак, 2019

матеріалів є температура склування $T_{ст}$, що визначає межу між склоподібним та високоеластичним фізичними станами полімеру. Через релаксаційний характер деформації $T_{ст}$ не є сталою, а безпосередньо залежить від характеру сили, що діє. Найбільш суттєві зміни $T_{ст}$ та відповідно властивостей матеріалу спостерігаються у поверхневих шарах. Ситуація ускладнюється ще й тим, що внаслідок "двоспрямованого" руху макромолекул їх змінені та деструктовані фрагменти переміщуються в об'єм матеріалу, а недеструктовані – у верхні шари. Таким чином, відбувається поступова руйнація полімеру, що змушує ретельно контролювати ступінь впливу зовнішніх чинників.

За результатами експериментальних та теоретичних досліджень особливостей поширення температурних полів у процесі фрезерування були дані рекомендації щодо вибору матеріалу ріжучого інструмента, його геометрії та діапазону швидкостей різання, за яких глибина проникнення тепла в полімерну заготівку не перевищує припуск на наступний етап обробки різанням [4]. При цьому важливим залишається питання впливу термомеханічного навантаження на внутрішній енергетичний стан поверхневого шару, зокрема на $T_{ст}$, що визначає граничні значення подальшого температурного впливу.

Метою статті є оприлюднення результатів наукових досліджень з встановлення закономірностей впливу температури, що виникає на поверхні різання, на зміну внутрішнього енергетичного стану полімерного матеріалу для визначення раціональних технологічних умов обробки чутливих елементів дозиметрів.

Виклад основного матеріалу. Згідно зі встановленими нормативами на матеріали для радіаційного контролю [5, 6] та внутрішніми вимогами науково-виробничого підприємства Інституту сцинтиляційних матеріалів НАН України [7] для дослідження якості вибрані найбільш поширені детектори на основі полістиролу (ПС) марки UPS-923A.

Попередньо зразки оброблено фрезою, діаметр якої 120 мм, з однією змінною пластиною із дрібнозернистого твердосплавного матеріалу ВК6-М (виробник концерн CERATIZIT, Австрія) з параметрами: $\gamma = 22°$, $\alpha = 15°$, $\varphi = 90°$, $\varphi_1 = 2°$, $r = 0{,}4$ мм та ріжучою кромкою $l_1 = 2$ мм. Досліджений діапазон параметрів режиму різання складає: швидкість $v = 30$ м/хв; подача $S = 0{,}05$ мм/об; глибина різання $t = 0{,}1; 0{,}3; 0{,}5$ мм.

Для експериментального дослідження теплових явищ у полімерних матеріалах під час фрезерування використано термографічний метод реєстрації інфрачервоного випромінювання теплової енергії за допомогою цифрової термографічної камери ThermoVision A20-M (FLIR) та програмного пакета ThermoCAM Researcher 2.8. Термографічний метод дав можливість дослідити оброблену поверхню, зокрема динаміку розподілу тепла та величину максимальної і середньої температур на вході та виході інструмента із зони контакту (рис. 1).

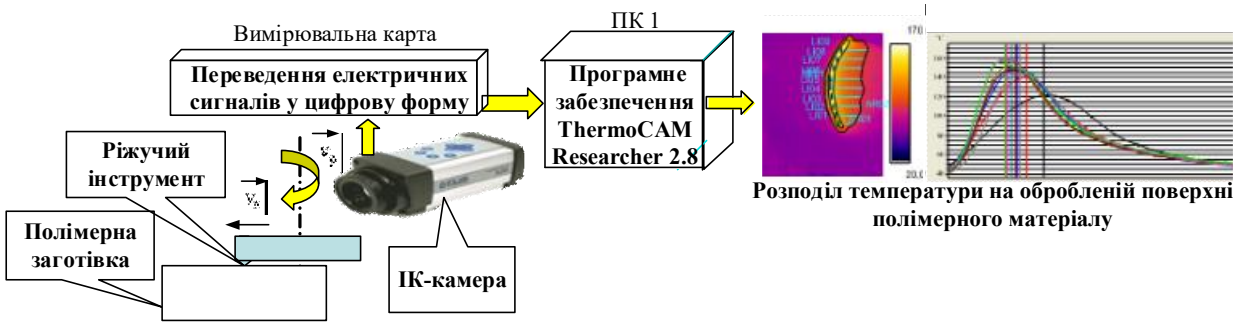
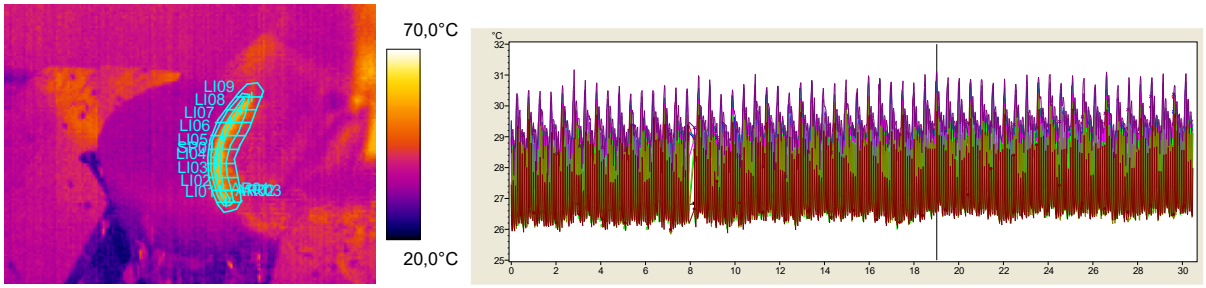


Рис. 1. Схема реєстрації та перетворення теплових сигналів під час фрезерування полімерного матеріалу

Слід зазначити, що всі дані термографічних досліджень аналізували по всій довжині зони різання: на вході ріжучого інструмента – $\Theta_{вх}$; на його виході – $\Theta_{вих}$; максимальні дані з урахуванням температури стружки – $\Theta_{пов}$. Проте для оцінювання впливу параметрів режиму різання враховувалися саме максимальні значення температури, що спостерігалися в місцях виходу інструмента із зони контакту, де спрацьовує ефект накопичення тепла.

Особливості теплового руху в структурі полімеру та термодинамічні характеристики його релаксаційних переходів досліджено методом диференціальної скануючої калориметрії (ДСК) на приладі Netzsch DSC 204 F1 Phoenix®. Згідно з методикою ДСК [8, 9, 10] у разі безперервного нагрівання (10 К/хв) визначається різниця між температурою зразка полімеру та термічно інертної порівняльної речовини. Після чого будується термограма, на якій відображається кількість тепла, що виділяється або поглинається полімерним зразком при зміні його фізичного стану до моменту повного розкладання. Полімерні зразки товщиною 1 мм для дослідження зрізалися з поверхонь після обробки фрезеруванням за допомогою мікротому Reichert-Jung Microtome MT6. Еталонами, відносно яких оцінювалося відхилення енергетичного стану від стабільного, були зразки, оброблені природним алмазом з гарантованим мінімальним теплофізичним впливом на поверхню.

Обробка полімерних матеріалів у області низьких швидкостей $v = 30…50$ м/хв характеризується невеликим ступенем деформації поверхневого шару, основна частина якої триває за пружнім зворотнім механізмом [11]. Отримані термографічні дані з поверхні різання ПС свідчать про рівномірний розподіл тепла вздовж всієї зони контакту з чітко визначеними межами (рис. 2, *а*). Переважна більшість поверхні зони різання прогрівається до 25…35 °С (рис. 2, *б*), відповідно полімерний матеріал знаходиться в межах склоподібного стану. Температурне поле на поверхні різання та обробленій поверхні відрізняється вузькою локалізацією навколо зони контакту з інструментом. Стружку, що утворюється в процесі різання, можливо повністю віднести до безперервного зливного типу.



а *б*

Рис. 2. Термографічна картина розподілу температурних полів у випадку обробки ПС з $v = 30$ м/хв, $S = 0{,}05$ мм/об, $t = 0{,}1$ мм:
а – межі поширення та аналізу температурних полів;
б – зміна температури на поверхні різання залежно від часу обробки

Збільшення глибини різання призводить до поступового збільшення розігріву поверхні (рис. 3). Так, при $t = 0{,}1$ мм в межах 25…30 °С знаходиться 65,3 % поверхні різання, при $t = 0{,}3$ мм до цієї температури розігрівається вже 55,7 %, а в окремих ділянках (до 2 %) температура може сягати 60…70 °С. Збільшення глибини різання до 0,5 мм супроводжується ще потужнішим розігрівом поверхні, внаслідок чого вже 35,7 % поверхні різання знаходиться в межах 35…40 °С, а 11,8 % її поверхні розігрівається до 60…70 °С. Відповідно збільшення розмірів перерізу зрізу (ширини) призводить до зростання сил різання на відокремлення стружки і як наслідок – до підвищення температури. При цьому з кожним збільшенням глибини різання на 0,2 мм зменшується рівномірність розподілу температури по поверхні різання.

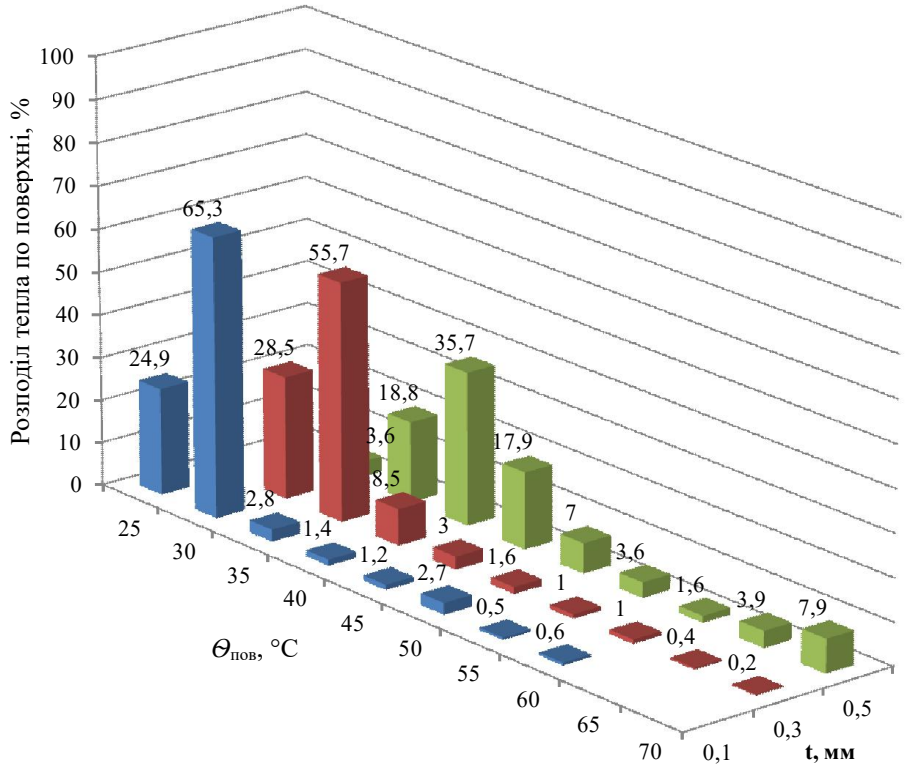


Рис. 3. Розподіл тепла по обробленій поверхні ПС
залежно від глибини різання (v = 30 м/хв, S = 0,05 мм/об)

Аналіз термограм після досліджень методом ДСК зразків з оброблених поверхонь, взятих з трьох різних ділянок, дозволив зробити такі узагальнення (рис. 4).

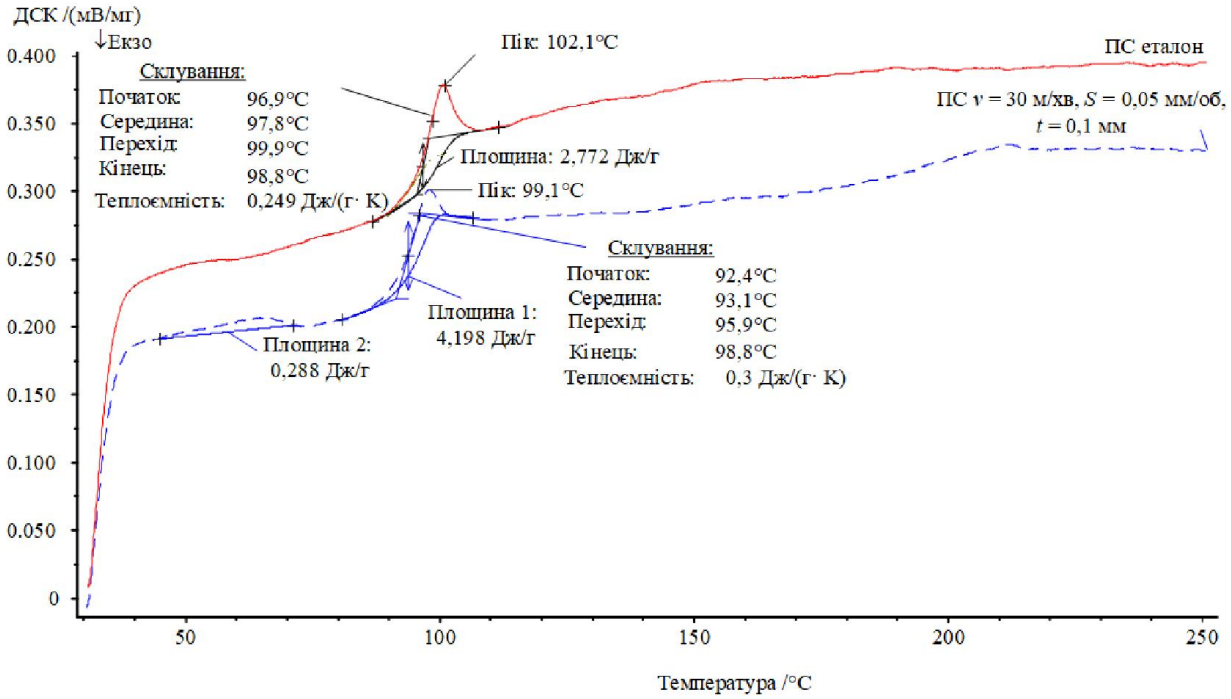


Рис. 4. Термограми еталонного та обробленого зразків ПС
з характеристиками фазових переходів

Температурна залежність питомої теплоємності еталонних зразків ПС повністю відповідає практично недеформованому стану полімеру, про що свідчить наявність тільки одного екзотермічного піка. Високоеластичний стан ПС, з якого починається його розм'якшення, припадає на 96,9…111,8 °С, відповідно $T_{ст} = 99{,}9$ °С, ентальпія переходу до текучого стану складає $\Delta H_1 = 2{,}772$ Дж/г. На графіку (рис. 4) для зразків після обробки з $v = 30$ м/хв, $S = 0{,}05$ мм/об, $t = 0{,}1$ мм спостерігаємо зміщення екзотермічного піка в бік меншої температури, отже, і відповідне зниження $T_{ст} = 95{,}9$ °С та збільшення ентальпії переходу $\Delta H_1 = 4{,}198$ Дж/г. Крім того, спостерігається ще один езотермічний пік з ентальпією $\Delta H_2 = 0{,}288$ Дж/г. Саме його поява свідчить про наявність в структурі внутрішніх перебудов типу площин зсуву, в яких акумулюється енергія деформування у разі обробки різанням [4]. Сумарне збільшення ентальпії обробленого зразка на 1,714 Дж/г характеризує зміщення балансу внутрішнього енергетичного стану в бік зростання. Отже, за несприятливих умов релаксація накопиченої енергії може супроводжуватися змінами, перш за все, оптичних властивостей полімеру, що матиме негативний вплив на довговічність функціонування виробу.

Результати аналізу термограм зразків ПС, оброблених з $t = 0{,}3$ мм та $t = 0{,}5$ мм, підтверджують тенденцію до зниження температури склування та збільшення значень ентальпії.

З огляду на те, що за встановленими показниками шорсткості поверхні всі отримані зразки відповідають вимогам попереднього етапу обробки фрезеруванням, стає зрозумілим доцільність оцінювання рівноважності енергетичного стану обробленого поверхневого шару. Саме ці дані визначають поріг температурного впливу наступного етапу обробки та вказують на можливі проблеми під час експлуатації виробу, особливо в умовах підвищеного радіаційного впливу. Відповідні раціональні технологічні умови попереднього етапу обробки з огляду на найменші зміни теплофізичних характеристик ПС становлять $v = 30$ м/хв, $S = 0{,}05$ мм/об, $t \leq 0{,}1$ мм.

Висновки

Обробка полімерних термопластичних матеріалів фрезеруванням відрізняється нерівномірним теплофізичним впливом ріжучого інструмента на оброблену поверхню. Оцінювати якість обробленої поверхні за таких умов тільки за параметрами шорсткості недостатньо, оскільки значна частина енергії деформування здатна накопичуватися у перебудовах структури і з часом релаксувати, змінюючи її фізико-механічні, оптичні та функціональні властивості. На прикладі обробки полістиролу з невеликою швидкістю та незначним термофізичним впливом на поверхневий шар показані суттєві зміни температури склування полімеру, що накладає певні обмеження на наступні етапи механічної обробки.

Перелік джерел посилання

1. Про затвердження переліку ядерних установок, ядерних матеріалів, радіоактивних відходів, інших джерел іонізуючого випромінювання державної власності, важливих державних об'єктів, що підлягають охороні Національною гвардією: Постанова Кабінету Міністрів України від 12.11.2014 р. № 628. *Офіційний вісник України*. 2014. № 95. С. 14.

2. Особенности структуры и свойств растворов, расплавов и твердых полимеров в ограниченных нанометровых объемах / А. Л. Волынский и др. *Успехи химии*. 2014. Т. 83, № 11. С. 1003–1026.

3. Волынский А. Л., Бакеев Н. Ф. Роль поверхностных явлений в структурно-механическом поведении твердых полимеров. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2014. С. 118–160.

4. Тітаренко О. В. Можливості експериментально-розрахункового підходу до пошуку раціональних умов обробки чутливих елементів дозиметрів. *Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України*. Харків, 2017. Вип. 1. С. 103–109.

5. ГОСТ 26277-84. Пластмассы. Общие требования к изготовлению образцов способом механической обработки. Введ. 01.07.85. Москва: Изд-во стандартов, 1984. 11 с.

6. EN ISO 2818. Kunststoffe. Herstellung von Probekoerpern durch mechanische Bearbeitung. Bruessel: CEN, 1997. 15 S.

7. Общемашиностроительные нормативы режимов резания, норм износа и расхода резцов, сверл и фрез при обработке неметаллических конструкционных материалов (пластмасс). Москва: НИИмаш, 1982. 144 с.

8. Годовский Ю. К. Теплофизические методы исследования полимеров. Москва: Химия, 1976. 212 с.

9. DIN EN ISO 11357-1. Plastics-Differential scanning calorimetry (DSC). Part 1. General principles. Geneve: ISO, 1997. 53 p.

10. Ehrenstein G., Riedel G., Trawiel P. Praxis der thermischen Analyse von Kunststoffen. Muenchen: Hanser, 2003. 397 S.

11. Kobayashi A. Machining of Plastics. NY.: McGraw-Hill Book Company, 1967. 175 P.

Стаття надійшла до редакції 26.11.2019 р.

УДК 621.923

О. В. Титаренко, А. И. Шаповалов, Н. В. Зубкова, С. А. Новак

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ФРЕЗЕРОВАНИЯ НА КАЧЕСТВО ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ РАДИАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ

Представлены результаты теплофизических исследований процесса торцевого фрезерования плоских поверхностей полистирола для сцинтилляционных элементов дозиметров. С помощью термографических данных установлено, что увеличение глубины резания не только повышает температуру в зоне резания, а и обуславливает неравномерность распределения тепла. Качество сформированного поверхностного слоя оценено по теплофизическим характеристикам: энтальпии, температуре стеклования и удельной теплоемкости.

К л ю ч е в ы е с л о в а: термопластические полимерные материалы, полистирол, торцевое фрезерование, температурное поле, распределение тепла, температура стеклования, поверхность резания, энтальпия, внутреннее энергетическое состояние, качество поверхности, шероховатость поверхности.

UDC 621.923

O. Titarenko, O. Shapovalov, N. Zubkova, S. Novak

STUDY OF THE EFFECT OF TECHNOLOGICAL MILLING CONDITIONS ON THE QUALITY OF POLYMERIC MATERIALS FOR SENSITIVE ELEMENTS OF RADIATION CONTROL

The safety and reliability of the protection of ionizing radiation objects by the special units of the National Guard of Ukraine is determined by the quality of the devices for dosimetric control. Sensitive elements of modern dosimeters are made of thermoplastic polymers by mechanical milling. The properties of the polymer surface layer can be significantly changed during the process of thermophysical interaction with the cutting tool. As a result, the sensitive materials are losing the functional properties farther.

The research work is devoted to determining the influence of technological conditions of production (geometry and material of the cutting tool, the parameters of the cutting mode) on the thermophysical state of the milled polystyrene (PS) surface layer. The presented results of thermographic studies of the milling process showed the increase in the maximum temperature at the cutting surface (from 55 °C till 70 °C) and changing the heterogeneity of the heat distribution (from 65,3% till 35,7%) with the growing of the cutting depth from 0,1 mm to 0,5 mm. The evaluation of quality of the formed surface layer was performed by thermodynamic characteristics (enthalpy, glass transition temperature) using method of differential scanning

calorimetry. The detected changes in the properties of the PS testify the accumulation of deformation energy in the structure of the surface layer material. Under the conditions of satisfactory surface roughness, in all investigated modes, the process of relaxation of internal stresses in time and under the action of radiation is unpredictable. The most energetically stable condition of the PS is ensured with using a carbide cutting tool and cutting mode parameters v = 30 m/min, S = 0,05 mm/rev, t ≤ 0,1 mm. The established features of the PS should be considered by determining the technological parameters of the milling processes and evaluation of the quality of produced sensitive elements of dosimeters.

K e y w o r d s: thermoplastic polymer materials, polystyrene, end milling, temperature field, heat distribution, glassing temperature, cutting surface, quality, entalpia, internal energy state, roughness of the surface.

Тітаренко Оксана Валеріївна – кандидат технічних наук, доцент кафедри інженерної механіки Національної академії Національної гвардії України.
http:// orcid.org/ 0000-0001-6811-7537

Шаповалов Олександр Ігоревич – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри автобронетанкової техніки Національної академії Національної гвардії України.
http:// orcid.org/ 0000-0001-8518-4336

Зубкова Ніна Вікторівна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інтегрованих технологій машинобудування ім. М. Ф. Семка Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут".
http:// orcid.org/ 0000-0001-8200-7924

Новак Станіслав Олександрович – курсант Національної академії Національної гвардії України.
http:// orcid.org/ 0000-0002-6362-1862