

УДК 621.923

О. В. Тітаренко

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ДЕТЕКТОРІВ ІОНІЗУЮЧИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ ДЛЯ СПЕЦІАЛЬНИХ ПІДРОЗДІЛІВ НАЦІОНАЛЬНОЇ ГВАРДІЇ УКРАЇНИ

Запропоновано методу вибору параметрів технологічного процесу виготовлення активної речовини детекторів для радіологічного контролю. Розглянуто переваги застосування експериментально-теоретичного підходу при створенні математичної моделі процесу теплової взаємодії заготовки з різальним формоутворюючим інструментом. Встановлено, що такий підхід є основою для підвищення адекватності чисельних результатів моделювання реальним фізичним процесам, що дозволяє з достатньою достовірністю вибирати раціональні умови механічної обробки для забезпечення довгострокової якості детекторів іонізуючих випромінювань.

К л ю ч о в і с л о в а: ядерна безпека, детектор, іонізуючі випромінювання, сцинтилятор, обробка різанням, математичне моделювання, кінцеві елементи, нагрівально-вимірювальна система, температурне поле, коефіцієнт тепловіддачі, якість поверхні, поверхневий шар, надійність.

Постановка проблеми. Питання підвищення ядерної та радіаційної безпеки, безпеки радіоактивних відходів стають дедалі актуальнішими. Україна посідає восьме місце у світі та п'яте у Європі за величиною встановленої потужності атомної енергетики. Ядерна енергетика є базовою складовою енергозабезпечення країни. Її частка в загальному обсязі електроенергії, що виробляється, сягає 50 %. За цим показником Україна входить у групу світових лідерів [1]. Серед головних завдань нашої держави на шляху до європейської інтеграції є розширення практичного співробітництва у сфері колективної безпеки. Ядерна безпека у цій сфері займає першу позицію, оскільки ядерні ризики та ядерні аварії мають транскордонний характер.

Згідно із Законом “Про Національну гвардію України” [2] забезпечення охорони ядерних установок, ядерних матеріалів, радіоактивних відходів, інших джерел іонізуючого випромінювання державної власності входить до переліку її основних функцій. Оснащення відповідних спеціальних підрозділів передбачає використання різноманітних засобів радіаційного контролю, що залежить від складності поставленої задачі. Особливе місце серед універсальних приладів, які дозволяють вимірювати кількість іонізуючих частинок, їхню енергію і розподіли енергії (енергетичні спектри), належить сцинтиляційним детекторам. Вони прості у використанні, ефективно працюють при високих дозах випромінювань у широких діапазонах температур і тиску, стійкі до вологи та механічного навантаження, мають невелику вагу і не потребують великої кількості додаткового обладнання. Як активну речовину (сцинтилятор) у вітчизняних детекторах частіше за все використовують оптичні полімерні матеріали на основі полістиролу, які при проходженні крізь них іонізуючих випромінювань спалахують видимим або ультрафіолетовим світлом.

Технологія виготовлення полімерних сцинтиляторів включає декілька етапів механічної обробки. Головним завданням кожного з них є забезпечення високої якості поверхні при мінімальному тепломеханічному навантаженні поверхневого шару матеріалу. Через здатність полімерних молекул акумулювати значну долю тепла змінюється їх будова та взаємне розташування, що зменшує чутливість матеріалу до випромінювань та скорочує довговічність його функціонування, отже, підвищує ризик безпечного використання. Саме тому у розробленні технологічних процесів значна увага приділяється питанням раціонального вибору матеріалу ріжучого інструмента та його геометрії і призначенню параметрів режиму різання.

Традиційні методи пошуку оптимальних умов обробки передбачають проведення великої кількості фізичних експериментальних досліджень процесу обробки і всебічний аналіз впливу кожного з параметрів на кінцеву якість виробу. Враховуючи довготривалість такого пошуку та високу вартість робіт, доцільним є використання методів математичного моделювання, за якими можливо передбачати наслідки зміни параметрів і таким чином встановлювати найбільш сприятливі умови для забезпечення високої якості детекторів та надійності їх роботи. Достовірність результатів моделювання значною мірою залежить від отримання максимально наближеної до реальних значень температури у зоні контакту та встановлення умов теплообміну між заготовкою та навколишнім

середовищем. Експериментальне визначення теплофізичних даних завжди пов'язане з певними складнощами методичного характеру, як то вибір способу реєстрації, аналіз багатьох даних, перевірка відтворюваності результатів. Для неметалів з малою теплопровідністю виконання всіх цих завдань потребує розроблення особливої методики дослідження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Використання полімерних термопластичних матеріалів як сцинтиляторів у детекторах іонізуючих випромінювань стає все більш поширеним завдяки їх високій ефективності (близько 100 % для заряджених частинок і кілька десятків відсотків для γ -квантів), мінімальній витраті часу на окрему реєстрацію частинок (до 10^{-9} с), лінійній залежності амплітуди імпульсів від енергії, яку частинка передає активній речовині (сцинтилятору) [3, 4, 5]. Формування функціональних властивостей починається з полімерізації матеріалу і закінчується етапом чистової механічної обробки різанням та поліруванням. Запорукою довговічності експлуатації детектора є обробка інструментами, що здатні максимально відводити тепло із зони контакту, а саме – синтетичними або природними алмазами. При цьому проблематичним є отримання необхідної геометрії ріжучої частини інструмента та її відновлення після зношування. Крім того, застосування алмазних інструментів суттєво підвищує собівартість виробу, тому пошук альтернативних ріжучих матеріалів та нових конструкцій інструмента залишається актуальним питанням [6].

Сучасний розвиток експериментальних засобів і методів дослідження теплових явищ процесів механічної обробки дозволяє суттєво спростити процес визначення найбільш сприятливих умов виготовлення відповідальних деталей. Побудова математичної моделі процесу різання зводиться до розв'язування диференційного рівняння теплопровідності матеріалу та математичних рівнянь, що враховують умови взаємодії заготовки з різальним інструментом та навколишнім середовищем. Головною складністю при цьому є нестационарність процесу взаємодії інструмента з заготовкою. Для таких випадків у нагоді стають чисельні методи моделювання, що покладені в основу програмного пакета ANSYS. Принципи і особливості моделювання теплових процесів у цьому пакеті представлені у працях [7–12]. Проте проблема моделювання теплофізики процесів обробки залишається актуальною, оскільки є багатофакторною зв'язаною задачею. Якщо стосовно металевих матеріалів вже існує певний досвід побудови математичних моделей, то для полімерних матеріалів, внаслідок їх принципових відмінностей у властивостях, він потребує суттєвого доопрацювання.

Метою статті є дослідження забезпечення надійності функціонування полімерних детекторів іонізуючих випромінювань шляхом обґрунтованого вибору технологічних параметрів механічної обробки.

Виклад основного матеріалу. Об'єктом дослідження у статті є процес обробки торцевим фрезеруванням сцинтилятора із термопластичного полімерного матеріалу на основі полістиролу. Його невеликі теплопровідність (0,14 Вт/м·К), теплостійкість (70–80 °С) і здатність акумулювати велику частину (до 100 %) енергії від механічної роботи стають на заводі стандартним (розробленим для металевих матеріалів) рішенням у фізичних дослідженнях процесу поширення тепла. Саме для такої групи матеріалів використання чисельних методів є найбільш виправданим і доцільним. При цьому достовірність результатів через високу відповідальність матеріалу слід підтвердити реальними фізичними даними.

Побудова достовірної математичної моделі процесу взаємодії заготовки з різальним інструментом починається з отримання максимальної кількості даних про реальний об'єкт. Частіше за все такі дані є результатом чисельних і багатоваріантних фізичних та чисельних експериментів, які взаємодоповнюють один одного.

Побудова математичної моделі заготовки в процесі обробки здійснювалася в програмному пакеті ANSYS за методом кінцевих елементів (KE). Вся реалізація математичного аналізу складалась з 4 етапів.

1. Підготовка вихідної бази даних для розрахунків (геометрія, фізико-механічні властивості заготовки, генерація сіткового розбиття) – модуль введення вихідних даних (препроцесор).
2. Розрахунок рівнянь теплопровідності та отримання бази чисельних рішень – модуль обчислень (процесор).
3. Візуалізація та інтерпретація результатів моделювання – модуль виведення результатів (постпроцесор).
4. Перевірка адекватності математичної моделі реальній фізичній моделі.

На першому етапі вибудовується геометрична твердотільна модель зони контакту з урахуванням розмірів заготовки та ріжучої частини інструмента. Потім створюється KE-аналог геометричної

моделі шляхом генерування, модифікації та подрібнення сітки з КЕ. З метою зменшення витрат часу на обчислення бажано вибирати різний крок сітки. Його мінімальний розмір доречно встановлювати у місці безпосереднього контакту заготовки з інструментом та максимальної концентрації тепла (рис. 1). За результатами декількох попередніх обчислень зроблене припущення, що геометрична модель з 8280 КЕ може бути прийнята за основу для подальшого вдосконалення і встановлення найкращого поєднання відтворюваності експериментальних даних за найкоротший час розрахунків.

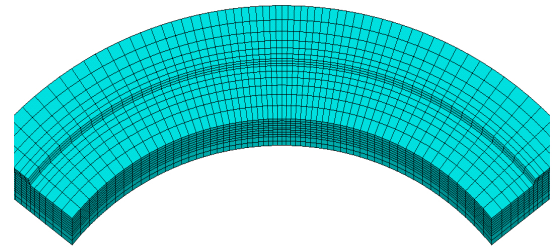


Рис. 1. Геометрична модель заготовки (8280 КЕ)

Після занесення до бази даних фізико-механічних властивостей заготовки (бажано у вигляді функцій від температури) геометрична модель стає чисельною. На етапі її розрахунку визначається вид теплового аналізу, його особливості (нестационарність, нелінійність) та розв'язується система алгебричних рівнянь, що на основі узагальненого закону про збереження енергії описує теплову взаємодію заготовки з інструментом. До системи рівнянь входять такі вирази.

1. Опис просторового диференційного рівняння теплопровідності з урахуванням нелінійності властивостей полімерного матеріалу залежно від температури [13]:

$$C_p \rho(\Theta) \frac{\partial \Theta}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(\Theta) \frac{\partial \Theta}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda(\Theta) \frac{\partial \Theta}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda(\Theta) \frac{\partial \Theta}{\partial z} \right], \quad (1)$$

де C_p – питома теплоємність полімерного матеріалу, Дж/г·°С; ρ – щільність, кг/м³; Θ – температура у довільній точці заготовки, °С; τ – час, с; x, y, z – координати довільної точки заготовки; λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/м·°С.

2. Граничні умови на поверхнях заготовки, що контактують з навколишнім середовищем:

$$\frac{\partial \Theta_{\text{пов}}}{\partial n} = -\frac{\alpha_{\text{об}}}{\lambda} (\Theta_{\text{пов}} - \Theta_0), \quad (2)$$

де $\Theta_{\text{пов}}$ – температура на поверхні, °С; n – вектор нормалі до поверхні; $\alpha_{\text{об}}$ – коефіцієнт теплообміну з навколишнім середовищем, Вт/м²·°С; Θ_0 – температура навколишнього середовища, °С.

3. Граничні умови на поверхні контакту полімерного матеріалу з інструментом:

$$\Theta_{\text{пов}} = \Theta_{\text{пов.екс}}, \quad (3)$$

де $\Theta_{\text{пов.екс}}$ – температура на обробленій поверхні згідно з експериментальними даними, °С.

4. Граничні умови для інших поверхонь заготовки:

$$\lambda(\Theta_{\text{пов}}) \cdot \frac{\partial \Theta_{\text{пов}}}{\partial n} = \Theta_0. \quad (4)$$

У програмному пакеті ANSYS розв'язування рівняння теплопровідності (1) подане матричними рівняннями, які найбільш пристосовані для КЕ додатків. Вхідними параметрами для розрахунку є початкові і граничні умови теплообміну (2 – 4). З самого початку температурне поле у заготовці можна описати як

$$\Theta(x, y, z) = \Theta_0; \tau = 0. \quad (5)$$

Зі зміною значень часу в процесі обробки для розв'язування рівняння (2) необхідно задати значення параметрів Θ_0 , $\Theta_{\text{пов}}$ та $\alpha_{\text{об}}$. Перший параметр Θ_0 відповідає температурі навколишнього середовища, при якій проводяться натурні дослідження. Значення другого параметра $\Theta_{\text{пов}}$ можна призначати згідно з експериментальними даними термографічних досліджень процесу обробки за допомогою тепловізора або за даними від термопар, що вводяться в тіло інструмента. При цьому слід вибирати максимальні значення температури у зоні контакту. Експериментального визначення потребує і третій параметр – коефіцієнт теплообміну $\alpha_{\text{об}}$, який залежить від фізичних властивостей середовища, режиму його руху, форми та розмірів поверхні деталі, що оброблюється. Для цього пропонується застосувати розрахунково-експериментальний підхід до вирішення зворотної задачі. Такий підхід зводиться до пошуку такого значення $\alpha_{\text{об}}$, для якого розрахункові значення чисельної моделі та експериментальні дані теплових характеристик наближалися б одне до одного [7].

Найбільш простим і надійним способом для цього є постановка і вирішення нестационарної задачі теплопровідності у матеріалі, що оброблюється різанням при статичному нагріванні.

Методика дослідження зводиться до визначення ізотерм температурного поля і меж його поширення в тілі заготовки під дією точкового джерела тепла. На рис. 2, а представлена скомпонована із семи елементів нагрівально-вимірювальна система, що дозволяє керувати потужністю теплового джерела та реєструвати температурне поле по торцю заготовки. Вимірювання здійснюється таким чином. Як нагрівальний елемент 1 використовується паяльник зі стрижнем-конусом (діаметр вершини 1,5 мм). Регулювання потужності струму, що подається, виконується електричним перетворювачем (Metex 322) 2, який попередньо калібрується термометром 3. Динаміка поширення температурного поля у заготовці 6 фіксується тепловізором (FLIR A20) 4 та аналізується за допомогою програмного забезпечення ThermoCAM Researcher 1.7 5. Стале температурне поле (рис. 2, б) реєструється фотокамерою на рідкокристалевій плівці (Hallcrest, США), чутливість якої $25 \pm 0,5$ °С, що закріплена на торці заготовки 7.

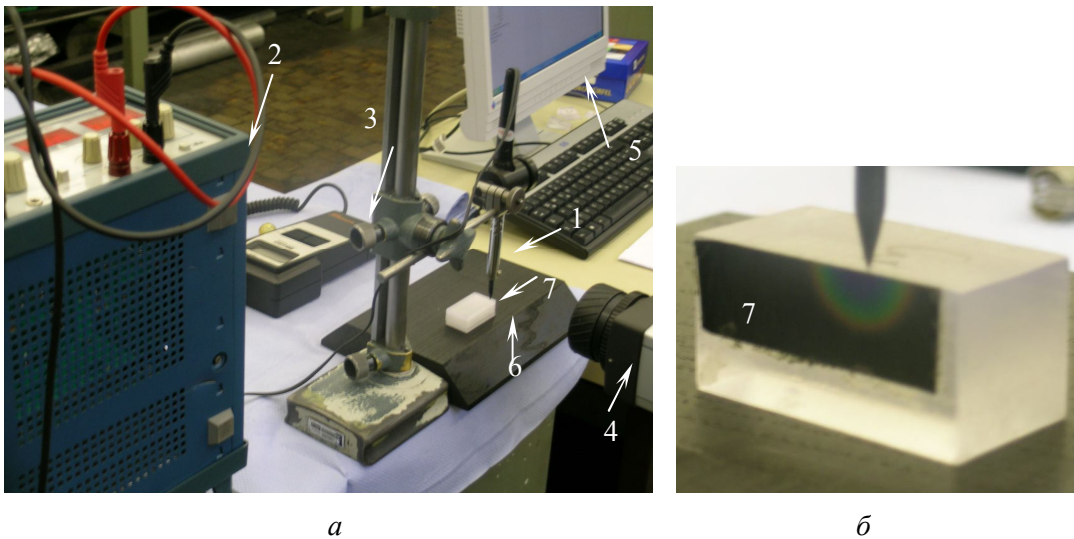


Рис. 2. Реєстрація поширення температурного поля у полімерному матеріалі при статичному нагріванні: а – нагрівально-вимірювальна система (роз’яснення її елементів наведено у тексті); б – картина температурного поля у полімерному матеріалі

Експериментальні дослідження за даною методикою здійснювались з використанням заготовки із полістиролу. Її розміри: ширина – 22 мм, довжина – 42 мм, висота – 22 мм. На грані зразка для визначення меж розподілу температурного поля було нанесено сітку із ліній з кроком 5 мм. Температура нагрівального елемента підбиралася такою, щоб відповідна тепла картина на рідкокристалічній плівці мала чіткі межі ізотерм. За результатами низки вимірів для полістиролу встановлено раціональні для теоретичних досліджень умови: температурне навантаження $\Theta = 90$ °С, час прикладання $\tau = 95$ с. Відповідне температурне поле у поверхневому шарі полістиролу поширюється на глибину 8,5 мм та має ширину 14,4 мм.

Таким чином, для здійснення першого етапу чисельного розрахунку статичної задачі про розподіл тепла у заготовці отримані необхідні вихідні дані: розмір заготовки, місце прикладання теплового джерела та його температура, розміри температурного поля.

Наступним кроком є створення твердотільної моделі заготовки, що нагрівається, за допомогою пакета ANSYS (див. рис. 3, а). Для більш достовірного відтворення реальної картини модель була розбита на 31980 KE типу Solid 70 (див. рис. 3, б), вибраного з бази даних пакета. Для підвищення точності розрахунку в області прикладання теплового джерела використано локальне згущення сітки KE. Місце прикладання теплового джерела на рис. 3, а позначено стрілкою.

Рішення нелінійної двовимірної задачі стаціонарної теплопровідності відповідно до рівняння (1) з граничними умовами (2 – 4) зводиться до вибору такого значення коефіцієнта тепловіддачі від заготовки у навколишнє середовище $\alpha_{об}$, при якому розрахункова тепла картина поширення температурного поля стає близькою до експериментальної (див. рис. 3, в). У результаті чисельної ідентифікації чисельної моделі з результатами експерименту (див. рис. 2, б) встановлено, що при значенні $\alpha_{об} \approx 0,2$ Вт/(м²·К) тепла картина найбільш близька до реальної.

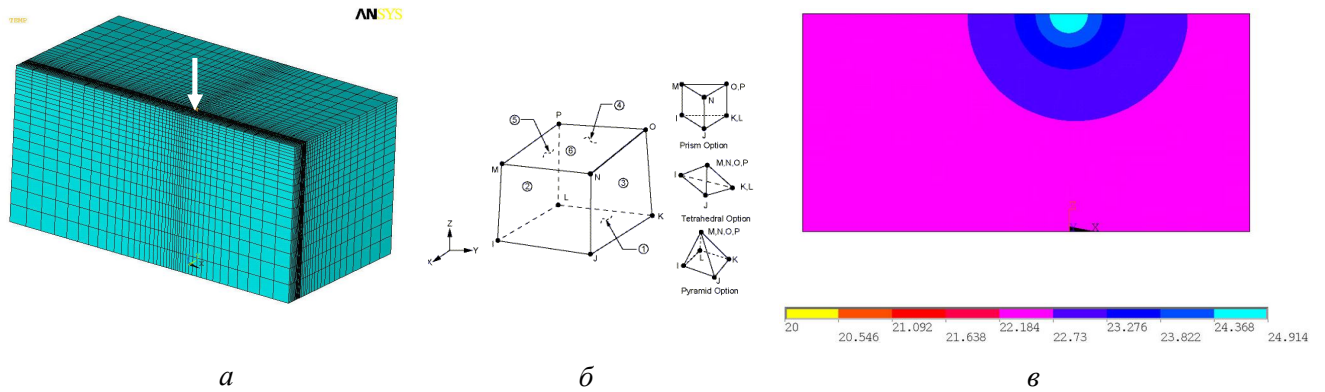


Рис. 3. Чисельна модель статичного нагріву полімерної заготовки:
 а – кінцево-елементна апроксимація твердотільної моделі; б – тип КЕ;
 в – теплова картина прогріву заготовки

Подальші розрахунки теплового навантаження заготовки у динаміці в процесі обробки тепер можна виконувати з набагато меншими припущеннями. Так, згідно з попередніми даними цілком прийнятною альтернативою алмазному інструменту можуть бути ріжучі пластини із твёрдосплавного матеріалу вольфрам-кобальтової групи. За набагато меншої вартості вони мають різні варіанти виконання геометрії ріжучої частини, малий радіус закруглення кромки, достатню теплопровідність, їх можна легко замінювати у разі зносу. Запропонований чисельно-експериментальний підхід до пошуку реальних значень необхідних коефіцієнтів теплообміну підвищує адекватність математичної моделі реальним фізичним процесам. Таким чином, для підвищення надійності функціонування сцинтиляційних матеріалів у детекторах іонізуючих випромінювань і скорочення витрат на їх виготовлення достатньо скорегувати розроблену математичну модель згідно з властивостями ріжучого інструмента та значеннями максимальної температури на обробленій поверхні. Це дає можливість вже на стадії виготовлення гарантувати високу якість роботи детекторів протягом всього терміну експлуатації, що повністю відповідає сучасним вимогам до оснащення спеціальних підрозділів Національної гвардії України.

Висновки

Забезпечення надійності функціонування сцинтиляційних матеріалів, чутливих до радіаційних випромінювань, передбачає жорстке дотримання всіх умов технологічного процесу їх виготовлення, визначених за результатами попередніх фізичних та математичних досліджень. Використання потужного апарату математичного моделювання дозволяє не тільки значно спростити і скоротити процес вибору раціональних параметрів механічної обробки, а й зменшити собівартість готових виробів.

Створення математичної моделі теплової взаємодії заготовки з різальним інструментом доцільно здійснювати на базі розрахунково-експериментальних даних, які мають взаємодоповнювати одне одного. Для підвищення достовірності результатів моделювання бажано на основі експериментальних досліджень створювати чисельні підмоделі нагрівання заготовки і шляхом численного наближення картини поширення температурного поля встановлювати реальні коефіцієнти теплообміну.

Список використаних джерел

1. Шевцов, А. І. Ядерна безпека в Україні та євроінтеграційні процеси [Текст] / А. І. Шевцов, М. Г. Земляний, А. З. Дорошкевич // Стратегічна панорама. – 2014. – Т. 4. – С. 38–44.
2. Про Національну гвардію України [Текст] : закон України [прийнято Верхов. Радою 14 жовт. 2014 р. № 1697-VII] // Відомості Верховної Ради. – 2015. – № 2–3. – С. 12.
3. Сидоренко, В. В. Детекторы ионизирующих излучений на судах [Текст] : справочник / В. В. Сидоренко, Ю. А. Кузнецов, А. А. Оводенко. – Л. : Судостроение, 1984. – 240 с.

4. Голубев, Б. П. Дозиметрия и радиационная безопасность на АЭС [Текст] : учебник / Б. П. Голубев, В. Ф. Козлов, С. Н. Смирнов. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 216 с.
5. Румянцев, С. В. Справочник по радиационным методам контроля [Текст] / С. В. Румянцев, А. С. Штань, В. А. Гольцев. – М. : Энергоатомиздат, 1982. – 240 с.
6. Гринев, Б. В. Пластмассовые сцинтилляторы [Текст] / Б. В. Гринев, В. Г. Сенчишин. – Х. : Акта, 2003. – 320 с.
7. Каплун, А. Б. ANSYS в руках инженера [Текст] : практ. руководство / А. Б. Каплун, Е. М. Морозов, М. А. Олферьева. – М. : Едиториал УРСС, 2003. – 272 с.
8. Методология расчета тепловых деформаций заготовки при точении с применением различных видов охлаждения [Текст] / Ф. Лиерат, В. А. Сукайло, А. И. Грабченко, Н. В. Вереzub // Технології в машинобудуванні : вісн. НТУ “ХПІ”. – Х. : НТУ “ХПІ”, 2003. – № 9, Т. 1. – С. 19–28.
9. Aurich, J. C. 3D Finite Element Modelling of Segmented Chip Formation [Текст] / J. Aurich, H. Bil // Annals of CIRP. – 2006. – Vol. 55. Iss. 1. – P. 47–51.
10. Carslow, H. S. Conduction of Heat of Solids [Текст] / H. S. Carslow, J. C. Jaeger. – Oxford : Clarendon Pr., 1992. – 510 p.
11. Guo, Q. Micromechanical modeling of local field distribution for a planar composite under plastik deformation [Текст] / Q. Guo, X. Liu, G. Hu // Acta Machanika. – 2006. – Vol. 5. Iss. 8. – P. 19–30.
12. Komanduri, R. Thermal modeling of the metal cutting process [Текст] / R. Komanduri, Z. B. Hou // Int. J. of Mechanical Sciences. – 2000. – V.42. Iss. 9. – P. 1715–1752.
13. Резников, А. Н. Основы расчета тепловых процессов в технологических системах [Текст] / А. Н. Резников, Л. А. Резников. – Куйбышев : КуАИ, 1986. – 153 с.

Стаття надійшла до редакції 10.12.2015 р.