

УДК 536.5+004.42

## ДІАГНОСТИКА ПОКРИТТЯ З ДЕФЕКТАМИ ШЛЯХОМ ДЕВІАЦІЇ ТЕПЛОВОГО ПОЛЯ

С. В. Прохоренко<sup>1,2</sup>, Даріуш Плох<sup>2</sup>, Я. М. Кавин<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Національний університет «Львівська політехніка»,  
вул. С. Бандери, 12, Львів, 79000, Україна

<sup>2</sup> Uniwersytet Rzeszowski, Centrum Mikroelektroniki i Nanotechnologii,  
al. Rejtana 16c, 35-959 Rzeszów, Polska

<sup>3</sup> Українська академія друкарства,  
вул. Під Голоском, 19, Львів, 79020, Україна

*Запропоновано лабораторну модель та фізичні характеристики її елементів для проведення дослідження скритих дефектів поверхні на основі аналізу зональної девіації неоднорідності температурного поля, індукованого спрямованим тепловим потоком. Результати розрахунків наведено за допомогою діаграми температурного розподілу в зоні скритих дефектів поверхні. Термічна візуалізація результатів подана за допомогою моделювання процесу поширення теплового поля та зональної девіації його неоднорідності в зоні скритих поверхневих дефектів із застосуванням різної геометрії сопел (режимів розташування), а отже з різним кутом падіння теплового потоку на зону поверхні із скритими дефектами.*

**Ключові слова:** мультифізична модель, скритий дефект поверхні, розподіл температур, геометрія сопла, термографічна камера, термоповітряна паяльна станція, імпульсний оптичний нагрів.

**Постановка проблеми.** Аналізуючи градієнтну зміну енергії (в нашому випадку градієнт тепла) внаслідок підведення до досліджуваної поверхні потоку теплової енергії з метою діагностики покриття, зокрема виявлення скритих поверхневих дефектів важливо дослідити напрямок і кут підведення цього потоку до поверхні, а також поширення теплового поля у поверхневих шарах, зокрема проаналізувавши неоднорідність температурного розподілу в зоні скритих поверхневих дефектів.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Систему діагностики поверхневих дефектів методом термічної візуалізації розробляли і досліджували вчені С. Прохоренко, Б. Жилкін, К. Мац, Д. Плох та ін. Проаналізувавши дослідження, ми з'ясували ефективність виявлення скритих дефектів на основі поширення температурного поля методом термічної візуалізації. Зокрема, в 2015 р. на XX міжнародному метрологічному семінарі «Методи і техніка у фізичних вимірах» у м. Жешув (Польща), була виголошена доповідь на тему «Система параметричної

оцінки потоку носія теплової енергії для діагностики покриття, що не проводять електричний струм».

**Мета статті** — практичне застосування методу термічної візуалізації для виявлення скритих поверхневих дефектів у контексті моделювання процесу поширення теплового поля та зональної девіації його неоднорідності в зоні скритих поверхневих дефектів із використанням різної геометрії сопел.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Для виявлення скритих поверхневих дефектів методом термічної візуалізації на основі девіації неоднорідності температурного поля був створений лабораторний стенд на відповідній елементній базі [1], [2], [3].

#### Лабораторний стенд

Експериментальні позиції для дослідження:

- Генератор потоку носія теплової енергії (в ролі якого використовують потік повітря з можливістю контролю його параметрів).
- Термоповітряна паяльна станція АОУЕ 968 HOTAIR з мікропроцесорним управлінням, з каліброваною форсункою, а також система її топологічного налаштування із досліджуваної сфери.
- Лампа імпульсна для спалахів «Hensel Галоген Ламп» із генератором Тріо 6000 для пристрою імпульсного оптичного нагріву.
- Реєстратор теплового випромінювання.
- Термографічна камера /тепловізор/ FLIR SC7000 з InSb сенсором /датчиком/ (1.5–5.1 мкм) із роздільною здатністю матриці 640×512 пікселів і об'єктив ХЗ із полем зору 3.2×2.4 мм.
- Для читання оброблених зображень із термографічної камери використовують програму «Альтаір».
- Для наплення керамічного покриття на металевій сітці (як теплові маркери) використано керамічний емалевий спрей.

#### Моделювання

Для моделювання девіантності теплового поля використано метод кінцевих елементів в інтегральному програмному середовищі ComSol 5.1., що дозволяє створити мультифізичну модель системи, а отже, і самого процесу [4].

Використано модель, зі сталевий підставки, прикритої захисним шаром із дефектами. В нашому випадку захисний шар — /папір/ державна банкнота з елементами захисту, що містять металеві вставки у вигляді тришарової сітки з керамічним покриттям — в якості дефектів. Представлено три шари окремих сіток, розмір комірки — 2×1 мм. Кожна сітка була напилена керамічною емаллю. Шари були відокремлені один від одного шарами теплоізоляції. До захисного шару з дефектами завдяки термоповітряній паяльній станції через сопло підводиться тепловий потік, який нагріває захисне покриття з дефектами. Сопло можна встановлювати в перпендикулярному напрямку до поверхні або під певним кутом. Розподіл тепла (ступінь нагріву) захисного покриття з дефектами фіксує термографічна камера (тепловізор), яка встановлена перпендикулярно до досліджуваної поверхні (захисного покриття).

Результати дослідження вказують на помітну зміну /відхилення/, введеного в об'єм, матеріалу теплового потоку, що демонструє розподіл температури, деталізований за виміральною лінією (рис. 1).

Процес комп'ютерного моделювання залежить від часу, а час від параметрів комп'ютерного обладнання. Фактором, що впливає на це, є оперативна пам'ять. Від оперативної пам'яті залежить також, яку опцію при формуванні сітки Mesh слід підібрати так, щоб була оптимальна для обладнання, на якому ми працюємо. Тому підготовка параметрів для розрахунку має бути попередньо оптимізована. Результат розрахунку представлений за допомогою графіків розподілу температур на поверхні скритого дефекту. Термічну візуалізацію результатів розрахунку та досліджень подано на основі моделювання процесу поширення теплового поля на поверхні скритого дефекту, що індуковане тепловими потоками з сопел, розміщеними під різними кутами до поверхні скритих дефектів.

З метою перевірки поширення теплового потоку повітря під різними кутами створено дві моделі сопел. Для цього змінено геометрію, а матеріали та рекомендації з теплообміну не були змінені.

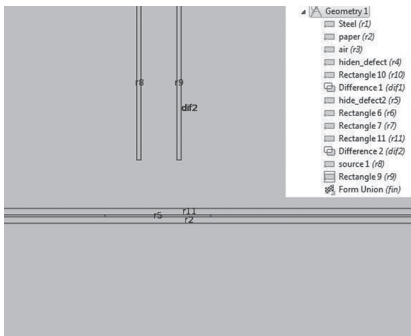


Рис. А. Геометрія сопла, тепловий потік якого спрямований перпендикулярно до поверхневого дефекту

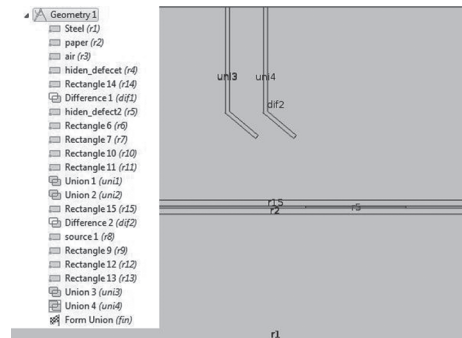


Рис. В. Геометрія сопла, тепловий потік якого спрямований під кутом до поверхневого дефекту



Рис. 1. Результат моделювання процесу поширення теплового поля на поверхні дефекту, індуковане тепловим потоком через пряме сопло

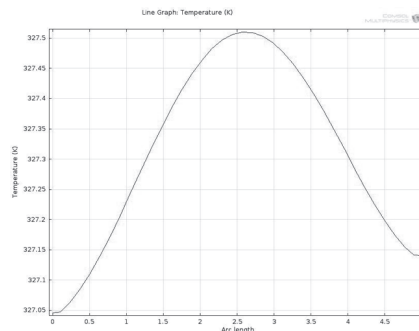


Рис. 2. Розподіл температури на поверхні дефекту індукованої тепловим потоком через пряме сопло

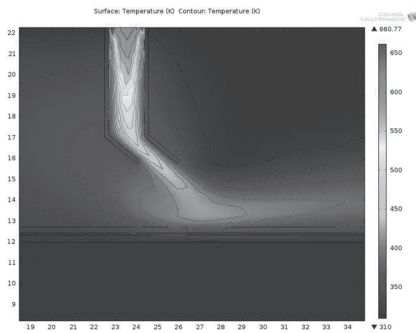


Рис. 3. Результат моделювання процесу поширення теплового поля на поверхні дефекту, індуковане тепловим потоком через сопло, що спрямоване під кутом до поверхні скритого дефекту

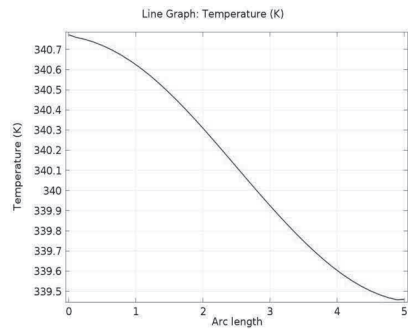


Рис. 4. Розподіл температур на поверхні дефекту, індукованій тепловим потоком через сопло, що спрямоване під кутом до поверхні скритого дефекту

**Висновки.** Контрольна сітка, що нанесена на поверхню показує розподіл теплового потоку газу і водночас є тепловим тестером для встановлення оптимальних параметрів, щоб не пошкодити досліджувану поверхню. Отже, контроль кута потоку теплоносія стосовно поверхні на яку він подається є важливим елементом у методі термічної візуалізації, зокрема в поширенні неоднорідності температурного поля. З цього огляду потрібно належно контролювати температуру потоку газу та відстань сопла від досліджуваної поверхні.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Жилкин Б. П., Ларионов И. Д., Шуба А. Н. Устройство для измерения температурного поля газового потока. pat.RU.2230300. Дата начала отсчета срока действия патента: 10.04.2002, опубликовано: 10.06.2004.
2. Спосіб Створення Оптичного Контрасту для Тепловізійних Приладів. Прохоренко С. та ін. pat.UA 89421U. Пат. UA 89421 U, МПК G 01 J 5/60, № U 2013 105932. Подано: 02.09.2013, опубліковано 25.04.2014, Бюл. №8.
3. Sposób bezdotykowej kontroli jednorodności ochronnych powłok powierzchniowych. Maś K. i tak dalej. pat.PL P.403346. Declaration Pat. (PL) P.403346. Podano: 2013.03.28, opub. biuletyn UP 20, 2014.
4. Егоров В. И. Применение ЭВМ для решения задач теплопроводности. учеб пособ. Санкт-Петербург: СПб ГУ ИТМО, 2006. 77 с.

### REFERENCES

1. Zhilkin, B. P., Larionov, I. D., & Shuba, A. N. Ustroistvo dlia izmereniia temperaturnogo polia gazovogo potoka. pat.RU.2230300. Data nachala otscheta sroka deistviia patenta: 10.04.2002, opublikovano: 10.06.2004 (in Russian).
2. Prokhorenko, S. ta in. Sposib Stvorennia Optychnoho Kontrastu dlia Teploviziinykh Pryladiv. pat.UA 89421U. Pat. UA 89421 U, МПК G 01 J 5/60, № U 2013 105932. Podano: 02.09.2013, opublikovano 25.04.2014, Biul. № 8 (in Ukrainian).

3. Maś, K. i tak dalej. Sposób bezdotykowej kontroli jednorodności ochronnych powłok powierzchniowych. pat.PL P.403346. Declaration Pat. (PL) P.403346. Podano: 2013.03.28, opub. biuletyn UP 20, 2014 (in Polish).
4. Egorov, V. I. (2006). Primenenie EVM dlia resheniia zadach teploprovodnosti. Sankt-Peterburg: SPb GU ITMO (in Russian).

## **DIAGNOSTICS OF COATING WITH DEFECTS BY THE DEVIATION OF THE HEAT FIELD**

S. V. Prokhorenko<sup>1,2</sup>, Dariusz Ploch<sup>2</sup>, Ya. M. Kavyn<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Lviv Polytechnic National University,  
12, Bandera St., Lviv, 79013, Ukraine*

<sup>2</sup> *University of Rzeszow, Center for Microelectronics and Nanotechnology,  
16c, Aleja Rejtana, 35-959 Rzeszow, Poland*

<sup>3</sup> *Ukrainian Academy of Printing,  
19, Pid Holoskom St., Lviv, 79020, Ukraine  
yaroslav-kavin@ukr.net*

*The laboratory model and physical characteristics of its elements for the study of hidden defects of the surface have been presented on the basis of the analysis of zonal deviation of the heterogeneity of the temperature field induced by the directional heat flux. The results of calculations have been presented using the temperature distribution diagram in the area of hidden surface defects. The thermal visualization of the results has been presented by simulating the heat field propagation process and zonal deviation of its heterogeneity in the area of hidden surface defects with the application of different geometry of the nozzles (location modes) and, correspondingly, with a different angle of incidence of the heat flux to the area of the surface with hidden defects.*

**Keywords:** *multiphysical model, hidden surface defect, temperature distribution, nozzle geometry, thermographic chamber, thermoair soldering station, pulsed optical heating.*

*Стаття надійшла до редакції 31.08.2017.*

*Received 31.08.2017.*