

УДК 681.325

Н.Я. Габльовська, М.А. Кононенко, Т.І. Луцишин, Д.С. Румежак

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ*

## ДО ПИТАННЯ МОЖЛИВОСТІ ВИЯВЛЕННЯ ГЛИБИНИ ЗАЛЯГАННЯ МІКРОДЕФЕКТУ ПРИ ДВОСТОРОННЬОМУ ДОСТУПІ ДО ЗОНИ КОНТРОЛЮ ЕЛЕМЕНТІВ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ, ЩО ПЕРЕБУВАЮТЬ ПІД ДІЄЮ НАВАНТАЖЕНЬ

*Проаналізовано можливість виявлення глибини залягання мікроефекту в металах в момент його утворення при дії навантаження за результатами контролю зміни температури на протилежних поверхнях об'єкту контролю*

**Ключові слова:** навантаження, мікроефект, дислокація, теплопровідність, температурний розподіл, глибина залягання мікроефекту.

### Вступ

**Постановка проблеми.** На сьогоднішній день відомо, що руйнування металу і їх сплавів із зміною структурних рівнів супроводжується трансформацією внутрішньої енергії, яка в кінцевому рахунку перетворюється на теплову, що супроводжується зміною температури в зоні утворення мікроефекту. Це дає можливість визначити температурний розподіл у структурі металу, що перебуває під дією навантажень, в момент утворення мікроефекту.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** При вивченні механіки руйнувань необхідно оцінити сам характер перебігу цього процесу. Вважається, що в металах ще на стадії кристалізації неминуче присутні «зародки руйнувань» як області накопичення дефектів кристалічної структури [1]. Одним із типів таких неоднорідностей кристалічної ґратки є дислокації. Ці лінійні дефекти кристалічної структури є носіями надлишкової енергії, густина яких може визначати поведінку металів під дією навантажень. Кожна утворена під дією навантаження дислокація має певну енергію. Подальше збільшення навантаження активізує процес дифузії дислокацій і за рахунок їх активного переміщення і об'єднання відбувається дисипація їх енергії в поверхневу енергію мікроефекту, що супроводжується локальним стрибкоподібним підвищенням температури [2].

Процес передачі теплоти від зони зародження мікроефекту як джерела тепла відбувається за допомогою теплопровідності.

При підвищенні температури число електронів, що приймає участь в процесі теплопровідності, продовжує збільшуватися пропорційно температурі, але в той же час зменшується їх довжина вільного пробігу. Перше явище домінує у всьому температурному діапазоні в металах з високою концентрацією дефектів решітки, що знаходить своє відображення в постійному зростанні теплопровідності з ростом

температури. Чим більший шлях вільного пробігу електронів, тим більше теплопровідність. Домішки спотворюють правильність розташування атомів в кристалічній ґратці і знижують теплопровідність. Підвищення температури, збільшуючи провідність кристалічної ґратки, підвищує теплопровідність, а збільшуючи амплітуду коливань атомів, зменшує середню довжину шляху вільного пробігу електронів, що в результаті знижує теплопровідність [3].

Швидкість нагрівання і розповсюдження тепла у сталі залежить від її теплопровідності і теплоємності, а також форми і розміру зразка.

Найбільшу теплопровідність мають сталі, близькі за складом до заліза, меншою теплопровідністю – леговані сталі. Із підвищенням температури сталей зменшується теплопровідність і необхідно більше часу на їх нагрівання, тобто поширення тепла.

Метою даної роботи є аналіз можливості виявлення глибини залягання мікроефекту в момент його утворення за температурним розподілом на протилежних гранях об'єкту контролю, що перебуває під дією навантажень.

На даному етапі досліджень аналізується можливість вирішення задачі відшукання джерела тепла і його положення у певному обмеженому об'ємі.

Така задача називається оберненою задачею теплопровідності. В теорії диференціальних рівнянь така обернена задача є некоректною і її розв'язок в аналітичному вигляді отримати неможливо. Для наближеного розв'язку необхідно визначити точний розподіл температури на поверхнях зразка і зміну її в часі.

### Виклад основного матеріалу

Рівняння теплопровідності з тепловим джерелом є неоднорідним рівнянням. Виділення теплоти в момент утворення дефекту є практично миттєвим явищем. Тому можна вважати, що в наступні моменти перерозподіл температури в об'ємі та на повер-

хні відбувається рівномірно. Це приводить до спрощеного розгляду фізичної картини температурного поля.

Якщо припустити, що у досліджуваному зразку є дефекти (тріщини, каверни), які також впливають на розподіл температури, то розв'язок даної задачі буде містити відхилення від реальної картини. Це пов'язане із ефектом екранування на вільних поверхнях. Розрахований тепловий ефект утвореного дефекту, як джерела теплоти буде містити завищені значення. А це призведе до завищення в оцінці розміру утвореного дефекту. Тому у наших міркуваннях ми вважатимемо, що досліджуваний об'єкт є бездефектним.

Розглядаючи термодинамічну модель [4] в основу якої покладено рівняння теплопровідності у наступному вигляді:

$$\operatorname{div}[a \cdot \operatorname{grad}(T)] + \frac{q_v}{c\rho} = \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (1)$$

де  $c$  – питома теплоємність середовища;  $\rho$  – густина середовища;  $T \equiv T(\vec{r}, t)$  – об'ємно-часова функція розподілу температури;  $a = \frac{\chi}{c \cdot \rho}$  – коефіцієнт теплопровідності, що характеризує швидкість зміни температури;  $q_v \equiv q_v(\vec{r}, t)$ , та враховуючи, що стан об'єкта, що перебуває під дією навантаження характеризується динамічними процесами утворення і анігіляції різного роду дефектів, неможливо знівелювати той факт, що дефекти постійно взаємодіють, а кількість тепла що виділяється під час перебудови останніх є значною.

Враховуючи розрахунок кількості тепла [5] проведений з врахуванням як впливу енергії, що виділяється під час зародження мікрodefektів так і вплив точкових дефектів, які утворились поблизу, застосовано наступну модель теплового джерела [6]:

$$Q(\vec{r}) = \sum c_i \cdot \delta(\vec{r} - \vec{r}_i), \quad (2)$$

де  $\delta(\vec{r} - \vec{r}_i)$  – функція Дірака [7];  $c_i$  – тепловий ефект утворення мікротріщини;  $\vec{r}_i$  – розташування мікротріщини.

Дослідження дефектної мікроструктури металу [3] показують, що при пластичній деформації утворюються мікротріщини, поблизу яких спостерігається максимальне накопичення точкових дефектів, кількість яких зменшується в залежності від віддалі до мікротріщини. Тому, для математичних розрахунків доцільно припустити, що поширення тепла від джерела енергії можна описати за допомогою гаусівського розподілу.

Враховуючи [8], рівняння для визначення кількості теплоти від джерела буде мати вигляд [9]:

$$Q(\vec{r}) = (2/(\pi\sigma))^{3/2} \cdot P \cdot \exp\left(-2 \cdot |\vec{r} - \vec{r}_0|^2 / \sigma\right), \quad (3)$$

де  $P$  – потужність джерела тепла;  $\sigma$  – середнє квадратичне відхилення;  $\vec{r}_0$  – положення джерела теплової енергії.

Наведена в [10] термодинамічна модель та створена на основі неї система контролю розвитку мікрodefektів у металевих конструкціях, що перебувають під дією навантаження, не дозволяє до кінця вирішити завдання виявлення місця розташування джерела енергетичних змін, тобто утворення мікрodefektу.

Зрозуміло, що при експериментальному дослідженні неможливо отримати повний розподіл температур, внаслідок розмірів термодавача і геометрії зразка. Для одержання чисельного розв'язку необхідно максимальна інформація. Тому ми пропонуємо використати моделювання температурних розподілів від джерела на двох протилежних поверхнях змодельованого зразка, в точках, що розташовані на одній вісі.

Для визначення температурних розподілів було змодельовано зразок у формі паралелепіпеда з розмірами 0,5x0,15x0,08см, з фізико-механічними властивостями конструкційної сталі Ст20. Для розв'язання рівняння теплопровідності (1) визначено відповідні початкові та крайові умови.

Припускаємо, що до подачі навантаження у зразку спостерігається рівномірний розподіл температур і два його протилежні кінці перебувають при сталій температурі 15°C, отже крайовими умовами є:

$$T(x, 5, z, t) = T(x, -5, z, t) = 15. \quad (4)$$

При відомому масштабному рівні мікрodefektу, який становить 10-200 мкм, кількість теплоти, що виділяється при його утворенні дорівнює 36-40 Дж [5]. Дія джерела, яке створює даний тепловий ефект, є короткочасною. Це дозволило отримати температурні розподіли на паралельних поверхнях зразка в залежності від глибини залягання джерела енергетичної зміни [2]. Розрахунок проводився в середовищі програмного пакету Flex PDE версії 9 компанії PDE Solution Inc [11].

При розташуванні джерела енергетичних змін на глибині, що дорівнює половині товщини зразка на центральній його вісі одержано ідентичні розподіли температурного поля на паралельно розташованих поверхнях (рис. 1).

Змінюючи координати джерела енергетичних змін вздовж центральної вісі отримано різні температурні розподіли на площинах протилежних граней змодельованого зразка (рис. 2 та 3).

Ця відмінність показує, що у випадку утворення дефекту на глибині відмінній від 1/2 товщини зразка по його центральній вісі, то виникатиме часова затримка спостереження максимуму температури на протилежних поверхнях об'єкту дослідження (рис.4 а) та б).

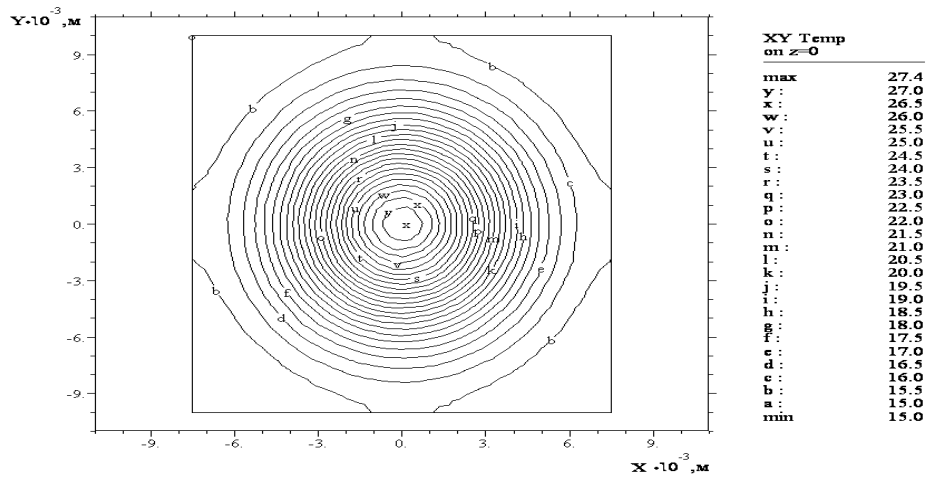


Рис. 1. Ізолінії температурного розподілу на поверхні зразка при глибині залягання джерела енергетичних змін на 1/2 товщини зразка по його центральній осі

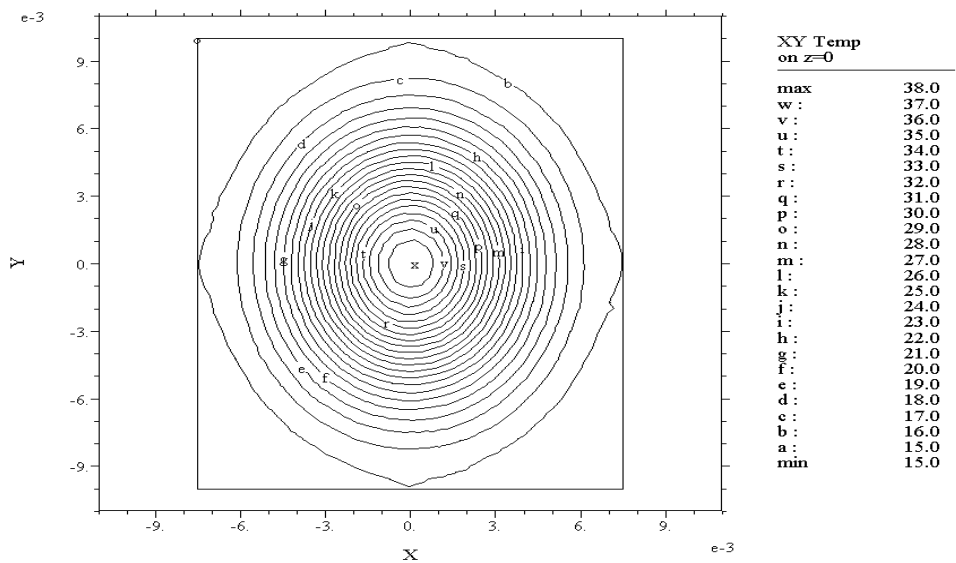


Рис. 2. Ізолінії температурного розподілу на верхній грані зразка при глибині залягання джерела енергетичних змін на 1/3 товщини зразка по його центральній осі від верхньої грані

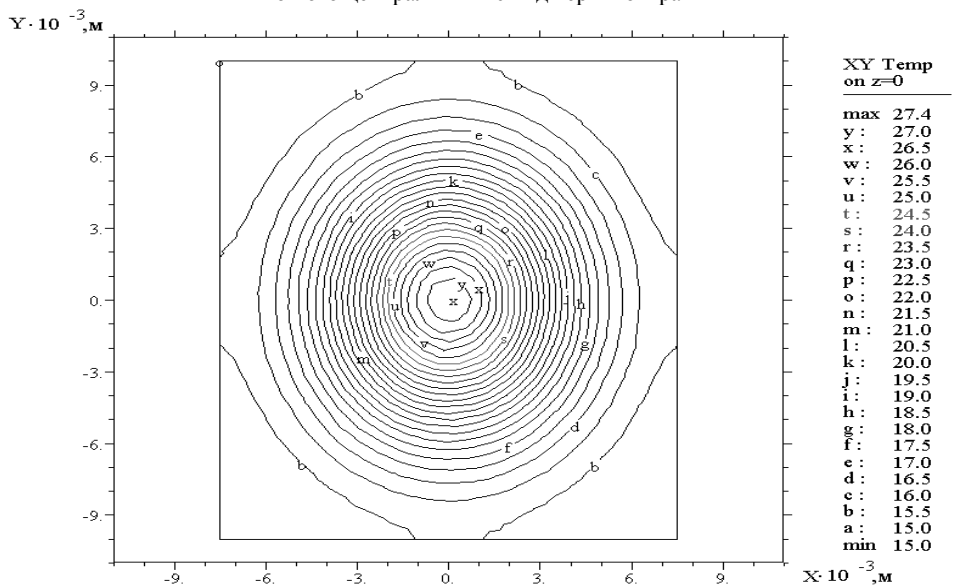


Рис. 3. Ізолінії температурного розподілу на нижній грані зразка при глибині залягання джерела енергетичних змін на 1/3 товщини зразка по його центральній осі від верхньої грані

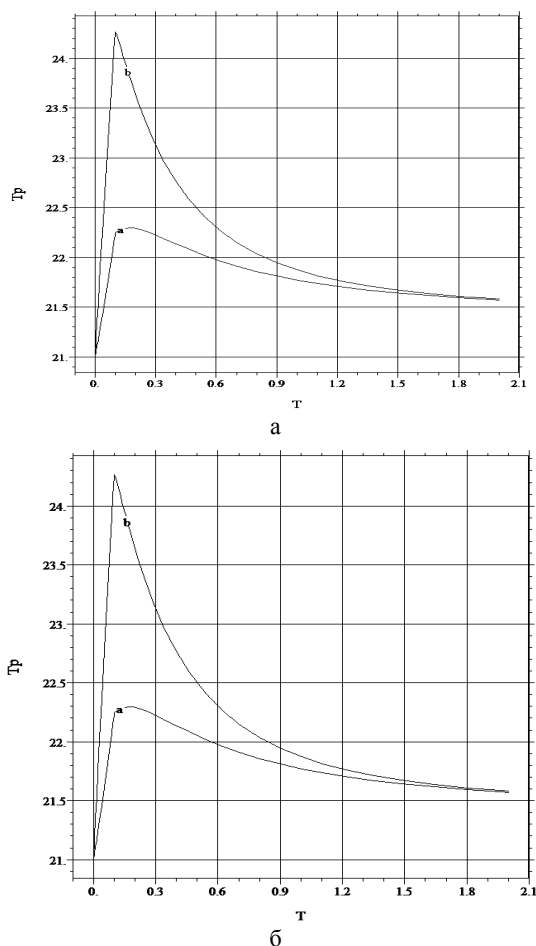


Рис. 4. Часовий розподіл зміни температури ( $T_p$ ) моделі утворення дефекту на 1/3 від верхньої грані зразка (а) та на 2/3 від нижньої грані зразка (б)

## Висновки

На наступному етапі досліджень розробленої моделі необхідно встановити температурно-часові залежності виявленого теплового розподілу на протилежних поверхнях об'єкта досліджень в залежності від глибини залегання джерела енергетичних змін. Результати досліджень можуть бути покладені в основу робіт з вдосконалення існуючої системи контролю розвитку мікротріщин у напружено-деформованих металевих конструкціях [6].

## К ВОПРОСУ ВОЗМОЖНОСТИ ВЫЯВЛЕНИЯ ГЛУБИНЫ ЗАЛЕГАНИЯ МИКРОДЕФЕКТА ПРИ ДВУСТОРОННЕМ ДОСТУПЕ К ЗОНЕ КОНТРОЛЯ ЭЛЕМЕНТОВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ, НАХОДЯЩИХСЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НАГРУЗОК

Н.Я. Габльовская, М.А. Кононенко, Т.И. Луцышин, Д.С. Румежак

Проанализирована возможность выявления глубины залегания микродефекта в металлах в момент его образования при воздействии нагрузки по результатам контроля изменения температуры на противоположных поверхностях объекта контроля.

**Ключевые слова:** нагрузка, микродефект, дислокация, теплопроводность, температурное распределение, глубина залегания микродефекта.

## THE QUESTION DETECTION DEPTH TO MACRO-DEFECT WITH BILATERAL ACCESS TO ZONE CONTROL ELEMENTS OF METAL STRUCTURES THAT ARE UNDER LOADING

N.Ya. Gabl'ovs'ka, M.A. Kononenko, T.I. Luctushun, D.S. Rymezhak

The ability to detect the depth of micro-defects in metals at the time of its formation in the load on the results of monitoring temperature changes at opposite surfaces of the control object analyzed.

**Keywords:** load microdefects, dislocation, thermal conductivity, temperature distribution, the depth microdefects.

## Список літератури

1. Федоров В.В. Кинетика повреждаемости и разрушения твердых тел [Текст] / В.В. Федоров. – Ташкент: Фан, 1985. – 166 с.
2. Луцышин Т.И. Дослідження термомеханічних властивостей металу в момент зародження мікроефекту / Т.И. Луцышин, Н.Я. Габльовська, М.А. Кононенко // Всеукраїнський цюквартальний науково-технічний журнал «Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ». – Івано-Франківськ, 2006. – № 4 (21). – С. 86-89.
3. Технология комплексного исследования разрушения деформированных металлов и сплавов в разных условиях нагружения [Текст]: учеб. пособие / Г.В. Пачурин, А.Н. Гуцин, К.Г. Пачурин, Г.В. Пименов. – Н. Новгород: Нижегород. гос. ун-т, 2005. – 141 с.
4. Габльовська Н.Я. Дослідження термодинамічних ефектів при утворенні мікротріщин в сталевих конструкціях / Н.Я. Габльовська // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – Івано-Франківськ: "Факел", 2005. – №1(14). – С. 103-107.
5. Грабар І.Г. Термоактиваційний аналіз та синергетика руйнування [Текст] / І.Г. Грабар. – Ж.: ЖІПТ, 2002р. – 430 с.
6. Габльовська Н.Я. Система контролю розвитку мікротріщин у напружено-деформованих металічних конструкціях [Текст]: автореф. дис. канд. техн. наук: спец. 05.11.13 / Факел - Івано-Франківськ, 2008. – 22 с.
7. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики [Текст]: справочник / В.Е. Кузьмичев. – К.: Наук. думка, 1989. – 861 с.
8. Ясній П.В. Пластично деформовані матеріали: тома і тріцино тривкість [Текст] / П.В. Ясній. – Львів: Світ, 1998. – 292 с.
9. Исаченко В.П. Теплопередача. [Текст] / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Мукомел. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 461 с.
10. Габльовська Н.Я. Моделирование деформационных процессов с целью восстановления универсальных зв'язків між параметрами, що характеризують мікро- та макро-структуру металу / Н.Я. Габльовська // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2005. – №1(10). – С. 156-160.
11. FlexPDE 9 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [www.pdesolutions.com](http://www.pdesolutions.com).

Надійшла до редколегії 19.03.2015

**Рецензент:** канд. техн. наук, проф. С.А. Чеховський, Івано-Франківський національний університет нафти і газу, Івано-Франківськ.