

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОМЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МЕТАЛУ В МОМЕНТ ЗАРОДЖЕННЯ МІКРОДЕФЕКТУ

Т.І.Луцишин, Н.Я.Габльовська, М.А.Кононенко

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42141

e-mail: public@nung.edu.ua

*Показано, что один из методов контроля момента зарождения микродефекта в металлах при пластической деформации может быть основан на оценке изменения температуры поверхности тела.*

*It is shown, that one of the control methods of the moment of microdefect origination can be based upon the temperature valuation on the body.*

На сьогодні в механіці пружно-пластичного деформування та руйнування металів і їх сплавів накопичено значний матеріал, який дає підстави стверджувати, що кінетика даних процесів пов'язана із зміною структурних рівнів пластичної деформації, характерною ознакою яких є трансформація внутрішньої енергії в інші форми енергії, а в кінцевому рахунку – в теплову.

Метою роботи є встановлення взаємозв'язків між параметрами, які характеризують момент зародження мікродфекту у металі, що перебуває у напружено-деформованому стані, виходячи з термоактиваційного аналізу його структури.

Одним із основних питань вивчення механізмів руйнування твердих тіл є оцінка самого характеру перебігу цих процесів. Пружна, крихка або пластична поведінка матеріалів під дією зовнішніх навантажень визначається конкретними умовами навантаження твердого тіла і його фізико-хімічною природою. Розрізняють дві основні причини дефектоутворення в металах: це процес кристалізації та процес пластичної деформації. Природа процесу утворення металів та сплавів на їх основі під час кристалізації така, що в структурі з самого початку неминуче присутні "зародки руйнувань", тобто області накопичення дефектів кристалічної структури. Характер порушення суцільності кристалічної будови металів при пластичній деформації визначається властивостями самих металів.

Металеві конструкції є дисипативними системами, тобто системами, в яких розсіювання повної механічної енергії переходить в інші форми енергії, а в кінцевому рахунку в теплову. Механізми дисипації енергії в металах базуються на наявності неоднорідностей кристалічної ґратки – дислокаційних структур або дислокацій [1]. Дислокації є невід'ємною частиною реальних металів і носіями надлишкової енергії, густина яких визначає поведінку металів під дією навантаження. При виготовленні металу початкова густина дислокацій  $\rho_0$  складає переважно менше  $10^{-8} \text{ см}^{-2}$  [2]. Дія навантаження на метал призводить до безпосереднього збільшення в ньому густини дислокацій  $\rho$ . На межі переходу металу з пружного в пластичний стан досягається критичне значення густини дисло-

кацій  $\rho_{кр}$ , але самі дислокації у металі розташовуються хаотично. Під дією навантаження спрацьовує один із механізмів дисипації внесеної енергії, а саме: перетворення її в енергію утворення дислокацій. За рахунок цього, кожна новоутворена одиночна дислокація володіє визначеною кількістю енергії.

При подальшому збільшенні навантаження за рахунок трансляційного переміщення дислокації утворюються структури у вигляді скупчень і клубків. Щоб зберегти просторову суцільність, метал вимушений створювати періодичну структуру. Це призводить до перебудови структури металу і формування коміркових або сіткових дислокаційних структур [3]. Границі коміркової структури починають притягувати дислокації. Товщина цих границь з часом поступово збільшується. Густина дислокацій на границях збільшується, тоді як у тілі самих комірок вона стає практично початковою  $\rho_0$  ( $\sim 10^{-8}-10^{-9} \text{ см}^{-2}$ ) [1]. Це призводить до нестійкості границь комірчастої структури, і подальший приплив дислокацій в ці границі неможливий. Внаслідок цього відбувається перебудова структури металу – виникає смугова структура. Накопичення ще більшої концентрації дислокацій викликає виникнення аморфної структури, яку називають крихкою зоною, схожою на губку. Утворення цієї структури є передвісником зародження мікродфекту. В аморфній зоні активізується процес дифузії дислокацій, і за рахунок їх активного переміщення і об'єднання відбувається дисипація їх енергії в поверхневу енергію мікродфекту, що супроводжується локальним стрибкоподібним підвищенням температури.

При подальшій дії певного навантаження у вістрі мікродфекту накопичується енергія, яка в подальшому витрачається на розвиток утвореного мікродфекту. Процеси дисипації на даному етапі відбуваються більш мляво, оскільки робота з розірвання основних зв'язків кристалічної ґратки потребує значної кількості енергії.

Із термодинамічних теорій руйнування, які базуються на густині енергії деформації, що визначається на основі термодинамічних констант, найпоширенішою є ергодинамічна теорія В.В.Федорова [4]. Результати з дослідження руйнування металів і сплавів на основі ерго-

динамічної теорії міцності з використанням термодинамічного критерію руйнувань – густини внутрішньої енергії наведено в [5]. Відзначено, що відповідність числового значення критичної густини внутрішньої енергії значенню ентальпії плавлення підтверджує, що локальні об'єми, які відповідають за руйнування, перебувають у квазіморфному стані, а між процесами механічного руйнування і плавлення існує структурно-енергетична аналогія.

Це дає можливість визначити температурний розподіл у структурі металу, що перебуває під дією навантаження, в момент утворення мікрodefекту.

Процес передачі теплоти від джерела (в даному випадку – зони зародження мікрodefекту) відбувається за допомогою теплопровідності.

В загальному випадку процес передачі теплоти теплопровідністю в твердому тілі супроводжується зміною температури  $T$  як у просторі, так і в часі:

$$T = f(x, y, z, t), \quad (1)$$

де:  $x, y, z$  – координати джерела;  $t$  – час.

Ця функція визначає температурне поле в однорідному ізотропному тілі. Під температурним полем будемо розуміти сукупність значень температури в даній момент часу для всіх точок досліджуваного об'єму металу, в якому протікає процес.

Границю відношення зміни температури ( $\Delta T$ ) до відстані між ізотермічними поверхнями по нормалі ( $\Delta n$ ), яка прямує до нуля, називають градієнтом температури, який у загальному випадку розраховується за формулою

$$\text{grad}T = \lim_{\Delta n \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta n} = \frac{\partial T}{\partial n}, \quad (2)$$

Градієнт температури – це вектор, направлений по нормалі до ізотермічної поверхні в бік збільшення температури і чисельно рівний частковій похідній від температури по цьому напрямку.

Для поширення теплоти в будь-якому тілі необхідною умовою є наявність різниці температур в різних точках тіла. Зв'язок між кількістю теплоти  $\delta Q$ , яка проходить за проміжок часу  $dt$  через елементарну площину  $dS$ , розташовану на ізотермічній поверхні, і градієнтом температури, встановлюється за допомогою гіпотези Фур'є [2], згідно з якою

$$\delta Q = -\chi \cdot dS \cdot \text{grad}T dt = -\chi \cdot dS dt \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right). \quad (3)$$

де  $\chi$  – коефіцієнт теплопровідності.

Тепловий потік, що проходить через довільну поверхню знаходять за допомогою виразу

$$q = \int_S j dS = -\int_S \chi \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right) dS. \quad (4)$$

де  $j$  – густина теплового потоку.

Кількість теплоти, що пройшла за одиницю часу через цю поверхню визначається інтегралом

$$Q = -\int_0^\tau \int_S \chi \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right) dS dt. \quad (5)$$

Для визначення температурного розподілу на поверхні тіла необхідно розв'язати нестационарне рівняння теплопровідності, яке має вигляд

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q_v}{c\rho}, \quad (6)$$

де:  $c$  – питома теплоємність середовища;  $\rho$  –

густина середовища;  $\left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)$  –

оператор Лапласа;  $a = \frac{\chi}{c\rho}$  – температуропо-

відність, що характеризує швидкість зміни температури.

Рівняння теплопровідності, враховуючи наявність джерела тепла, виходячи з масштабного рівня пластичної деформації, буде мати вигляд

$$\text{div} [\alpha \cdot \text{grad}(T)] + Q = \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (7)$$

Визначення температурного розподілу на поверхні зразка у формі паралелепіпеда (рис.1), передбачає розв'язання рівняння теплопровідності (7) з відповідними початковими та крайовими умовами. Як матеріал зразка береться конструкційна сталь Ст20, а температура зовнішнього середовища  $15^\circ\text{C}$ .

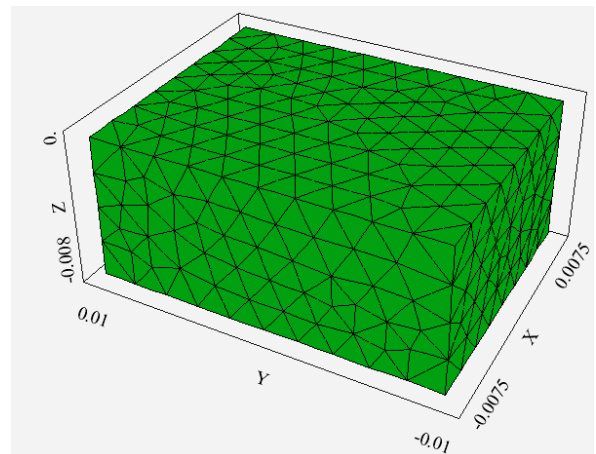


Рисунок 1 — Елемент зразка з ймовірною зоною утворення мікрodefекту

До навантаження у зразку спостерігається рівномірний розподіл температури

$$T(x, y, z, 0) = 15. \quad (8)$$

Припускаємо, що два протилежні кінці зразка перебували при сталій температурі, отже крайовими умовами є

$$T(x, 5, z, t) = T(x, -5, z, t) = 15. \quad (9)$$

У даній задачі джерелом тепла є дефект малих розмірів. Тому для математичних розрахунків припускаємо, що джерело енергії можна

описати за допомогою гауссівського розподілу температури [2]

$$Q(x, y, z) = \left(\frac{2}{\pi}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{A}{\sigma^3} \times \exp\left(-2 \frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2}{\sigma^2}\right), \quad (10)$$

де:  $A$  – потужність джерела тепла;  $\sigma$  – середнє квадратичне відхилення;  $(x_0, y_0, z_0)$  – координати центра джерела тепла.

Враховуючи трансляційне переміщення дислокаційних структур при пластичній деформації металів, масштабний рівень мікрodefекту буде становити 10-200 мкм, а кількість теплоти, що виділяється під час утворення такого мікрodefекту, буде дорівнювати 36-40 Дж [1, 2, 3]. Дія джерела, яке створює даний тепловий ефект, є короткочасною. Це дало змогу розрахувати температуру на поверхні зразка залежно від глибини залягання мікрodefекту. Розрахунок проводився за допомогою програми Flex PDE версії 5 компанії PDE Solution Inc [6] (рис. 2).

Застосовуючи вказану програму, також було визначено температурний розподіл по площі верхньої грані зразка залежно від глибини залягання мікрodefекту (рис. 3).

Одержані температурні розподіли по площі верхньої грані зразка залежно від глибини залягання мікрodefекту дають підстави зробити висновок, що інформативним параметром для контролю моменту зародження мікрodefекту є зміна температури на поверхні зразка.

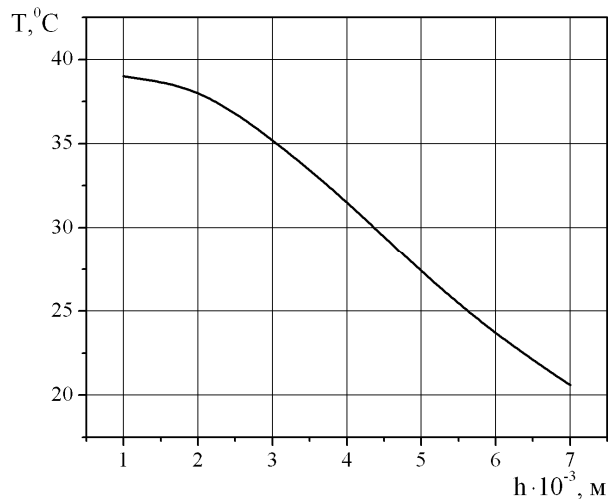
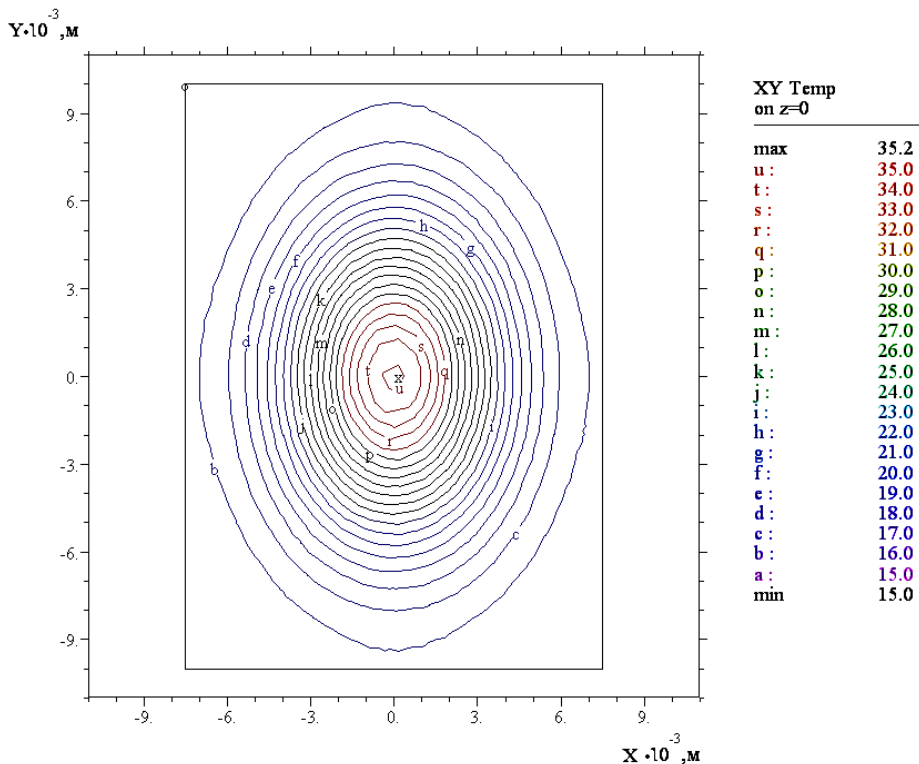


Рисунок 2 — Залежність температури на поверхні тіла від глибини залягання мікрodefекту по центральній осі зразка

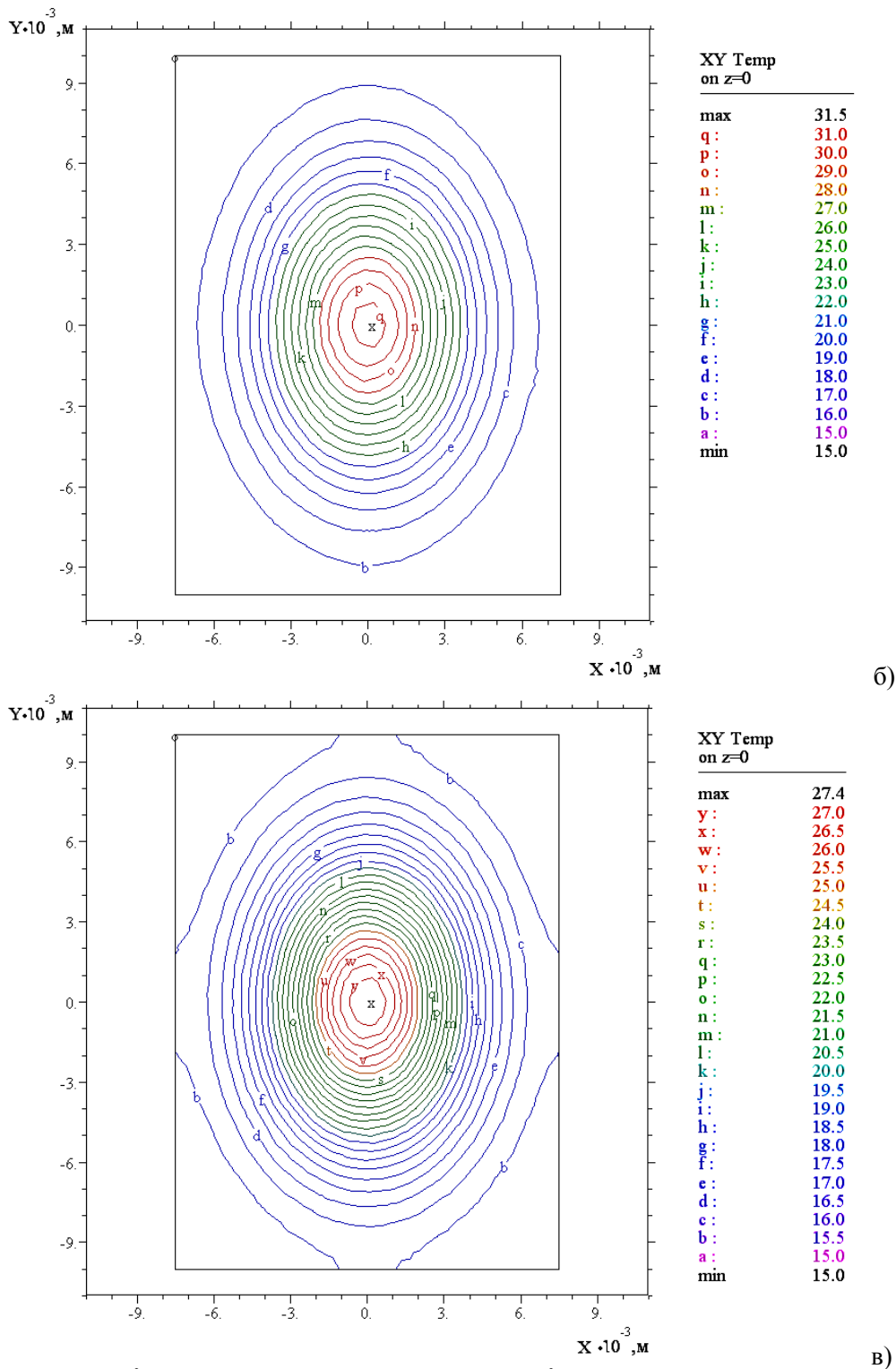
Отже, розглянувши металеву конструкцію, що перебуває у напружено-деформованому стані як дисипативну систему та дослідивши її термомеханічні властивості, можна стверджувати про можливість контролю моменту зародження мікрodefекту за зміною температури на поверхні металу в зоні ймовірного утворення мікрodefекту.

**Література**

1. Иванова В.С. Синергетика: Прочность и разрушение металлических материалов. – М.: Наука, 1992. – 159 с.



a)



**Рисунок 3 — Температурний розподіл на поверхні зразка при глибині залягання мікродфекту**

2. Болеста І.М. Фізика твердого тіла: Навчальний посібник. – Львів: Видавн. центр ЛНУ імені Івана Франка, 2003. – 480 с.

3. Ясній П.В. Пластично деформовані матеріали: втомі і тріщинотривкість. – Львів: Світ, 1998. – 292 с.

4. Панин В.Е., Федоров В.В., Ромашов Р.В., Хачатурьян С.В, Коршунов В.Я. Явление стру-

ктурно-энергетической аналогии процессов механического разрушения и плавления металлов и сплавов // Синергетика и усталостное разрушение металлов. – М.: Наука, 1989. – С. 29-44.

5. Грабар І.Г. Термоактивційний аналіз та синергетика руйнування: Наукова монографія. – Житомир: ЖІТІ, 2002. – 312 с.

6. www.pdesolutions.com