

УДК 621.19.24

ПІДХІД РЕАЛІЗАЦІЇ НОВОГО ТЕРМОАКУСТИЧНОГО МЕТОДУ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ

І.З. Лютак

Кандидат технічних наук, доцент
Кафедра програмного забезпечення автоматизованих системІвано-Франківський національний університет нафти і газу
вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна, 76019
Контактний тел.: (03422) 4-60-77
E-mail: ihorlt@mail.ru

А.А. Мандра

Кандидат технічних наук, начальник
Кременчуцького лінійно-виробничого управління
магістральних газопроводів УМГ «Черкаситрансгаз»
с. Піщане, Кременчуцький р-н, Полтавська обл
Контактний тел.: (05366) 5-21-50
E-mail: ihorlt@mail.ru

Представлено метод визначення кількості теплової енергії, що буде виділятися в околі дефекту при поширенні акустичної хвилі. Для побудови методу представлено підхід моделювання виділення теплової енергії при пластичній деформації металеві пластини скінченними елементами

Ключові слова: термоакустичний метод, акустичні хвилі, метод скінченних елементів

Представлен метод определения количества тепловой энергии, выделяющейся в окрестности дефекта при распространении акустической волны. Для построения метода представлен подход моделирования выделения тепловой энергии при пластической деформации металлической пластины конечными элементами

Ключевые слова: термоакустический метод, акустические волны, метод конечных элементов

The method of determining the number of heat that will be highlighted in the vicinity of a defect during acoustic waves propagation. To construct the method modeling approach of the allocation of heat during plastic deformation of metal plate by finite elements is presented

Key words: thermoacoustical method, acoustic waves, finite element method

Вступ

Термоакустичний метод це новий підхід до неруйнівного контролю металевих конструкцій на наявність в них дефектів типу тріщин, розшарувань та різкого зменшення товщини. Неруйнівний контроль термоакустичним методом проводиться на певній площі досліджуваного об'єкту контролю, що вигідно відрізняє його від поширеної на даний час ультразвукової дефектоскопії. Нешкідливість акустичного випромінювання для людини вигідно відрізняє цей метод від рентгенівських методів.

Термоакустичний метод починали розвивати із 1970-х років [1]. Проте практичне застосування термоакустичного методу почалось із випуском комерційних тепловізорів за доступною ціною [2, 3]. Термоакустичний метод полягає у детектуванні теплових плям

в околі втомних тріщин чи розшарувань при існуванні в досліджуваному об'єкті потужного акустичного (ультразвукового) поля.

Основа термоакустичного методу складає вібротермальний підхід, що був започаткований у 80-х роках [4]. Він полягав у визначенні процесу генерування тепла дефектами у низькочастотному діапазоні. Модифікацією такого підходу вважалося застосовувати короткочасові імпульси ультразвукової частоти при детектуванні термальних плям інфрачервоною камерою [5]. Широкого застосування такий підхід набув із випуском комерційно доступних інфрачервоних камер із високою роздільною здатністю [6]. Вивчення генерування тепла в околі дефектів дало можливість проводити дослідження у напрямку створення методу неруйнівного контролю. Додатковим поштовхом до створення методу є використання високо потужних

генераторів акустичного поля, що працюють на фіксованих частотах 20 або 40 кГц [7].

На даний час подальший розвиток термоакустичного методу можна визначити у двох напрямках. Першим напрямком є генерування пружних коливань низької частоти, так, що інфрачервоної камері необхідно кілька секунд для отримання термального зображення і обробки результатів у частотній області [7, 9]. Основною перевагою такого підходу є те, що не потрібно генерувати високо потужні коливання. Модифікацією такого методу є використання потужного коротко часового імпульсу, що дозволяє зменшувати час контролю [9]. Іншою перевагою такого підходу є використання частото модульованого сигналу, що дозволяє підвищити достовірність виявлення дефектів різних геометричних розмірів [8].

Іншим напрямком розвитку термоакустичного методу є застосування коротко часового імпульсу, що, як правило, триває менше 1 с з метою забезпечити генерування такої кількості тепла в околі дефекту, щоб було можна виявити його, досліджуючи поверхню об'єкту контролю інфрачервоною камерою [9]. Перевагами такого підходу є практично моментальне виявлення дефектів. Також деякими дослідниками було проведено дослідження виявлення дефектів малих геометричних розмірів [9].

В Івано-франківському національному технічному університеті нафти і газу проводиться дослідження теоретичних основ та експериментальної реалізації термоакустичного методу неруйнівного контролю [10]. В результаті аналізу існуючих досліджень встановлено, що основним недоліком для подальшого розроблення термоакустичного методу є відсутність інформації про термоакустичні параметри досліджуваного металу, зокрема сталі.

З метою розвитку запропонованого методу неруйнівного контролю та забезпечення можливості чисельно передбачати кількість теплової енергії, що буде виділятися в околі дефекту, необхідно розробити теоретичний та експериментальний підходи для отримання інформації про термоакустичні параметри досліджуваного металу.

Підхід математичного моделювання параметрів термоакустичного явища

Термоакустичний метод складається фактично із двох окремих методів контролю (акустичний та тепловий), що з'єднані одним дослідним зразком. Тому важливо дослідити зв'язок між цими окремими підходами. Спершу, для оцінки матеріалу досліджуваного об'єкту необхідно провести вимірювання розсіювання акустичної (механічної) енергії тріщиною. З цією метою проводяться лабораторні дослідження демпфування матеріалу із тріщиною та без неї.

Подальші дослідження доцільно проводити числовими методами, оскільки, лабораторні експерименти є трудомісткими та малоінформативними. Числове моделювання проводитиметься пакетом реалізації методу скінченних елементів Abaqus. Для проведення числових експериментів необхідно створити відповідну модель матеріалу досліджуваного зразка. Для проведення термоакустичних досліджень необхідно осо-

бливу увагу приділити температурним залежностям механічних констант. Так, модуль Юнга залежить від температури у діапазоні, що представлений кривою на рис. 1. Залежність коефіцієнта Пуассона від температури вважатимемо незначною. Загальною температурою навколишнього середовища вважатимемо 20°C. При проведенні моделювання фізичний рівень температури 20°C моделюватимемо для спрощення як 0°C.

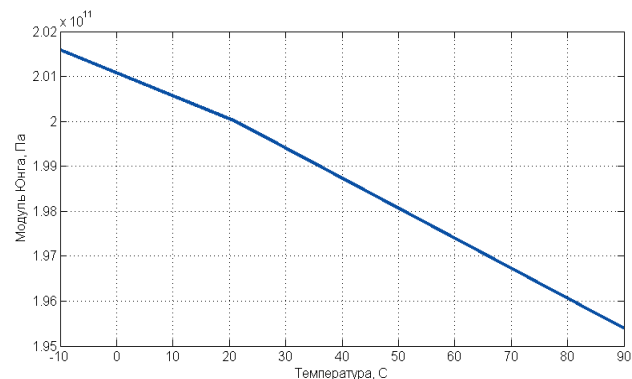


Рис. 1. Залежність модуля Юнга від температури

Зважаючи на температурну залежність модуля Юнга, напруження σ_{np} , що виникатимуть в досліджуваному зразку у пружній зоні будуть такими:

$$\sigma_{np} = E(t) \cdot \epsilon_e, \tag{1}$$

де $E(t)$ – модуль Юнга, t – температура, ϵ_e – технічна деформація.

Знання тільки пружних механічних параметрів матеріалу є недостатніми для моделювання непружних його властивостей, зокрема пластичності. Для проведення чисельного моделювання пластичності, яка є у кривій деформація-напруження, необхідно провести додаткові перетворення одиниць із технічних в дійсні, оскільки експериментальні значення, як правило, подаються в технічних одиницях [11]:

$$\begin{aligned} \sigma_t &= \sigma_e (1 + \epsilon_e), \\ \epsilon_t &= \ln(1 + \epsilon_e). \end{aligned} \tag{2}$$

де σ_t, ϵ_t – дійсні значення відповідно напружень та деформацій; σ_e, ϵ_e – технічні значення відповідно напружень та деформацій.

Деформація в пластичній зоні ϵ_t^{pl} обчислюється так [12]:

$$\epsilon_t^{pl} = \ln(1 + \epsilon_e) - \frac{\sigma_t}{E}. \tag{3}$$

При пластичній деформації проходять процеси модифікації структури зерен металу. Зображення кристалів сталі при різних ступенях розтягу було проведено за допомогою нейронного дифрактометра для аналізу напружень та деформацій (рис. 2) [13]. Середній розмір зерна сталі в ненапруженому стані становить 17 мкм (рис. 2а). При збільшенні деформації зерна сталі починають витягуватись (рис. 2б). При деформації 6.6 зерна сталі значно витягуються і пластична деформація є значною (рис. 2с). Після припинення прикладання зусилля залишкові деформації розмір зерна в напрямку поперечному прикладанню зусилля

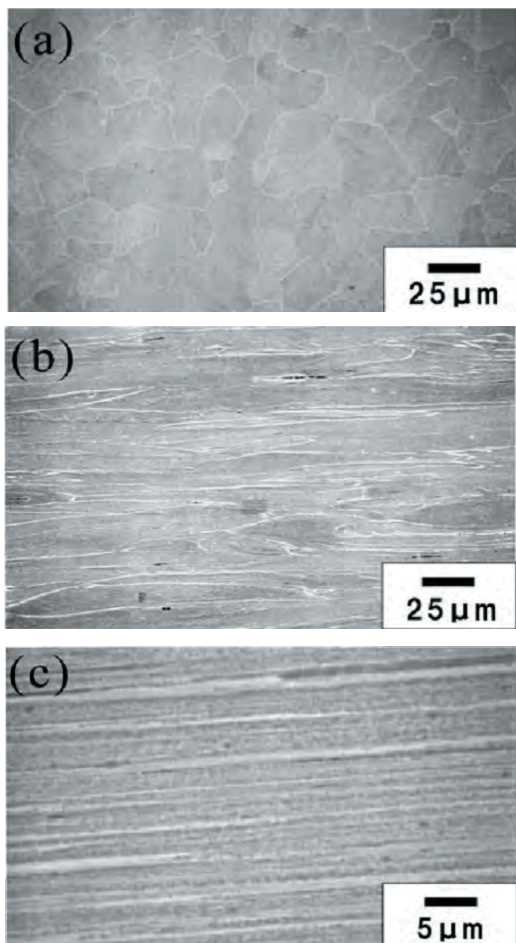
становив 64 нм. Додатковий аналіз сталі показав присутність великої густини дислокацій та внутрішніх напружень.

Як результат модифікації структури металу проходять допоміжні процеси, які збільшують внутрішню енергію, або температуру металу в місці пластичних деформацій. Беручи до уваги велику теплопровідність металів, виявлення процесів виділення тепла внаслідок пластичної деформації необхідно проводити при малих значеннях часу спостереження та рівню збільшення амплітуди прикладеного зусилля, що створює такі деформації.

Для можливості моделювання процесу виділення тепла під час пластичної деформації металу поряд із математичною моделлю пластичності металу необхідно розв'язати модель зв'язку із тепловими процесами. Такою математичною моделлю є:

$$\dot{\epsilon}^{pl} = \eta \frac{\sigma}{\epsilon^{pl}}, \tag{4}$$

де $\dot{\epsilon}^{pl}$ – потік теплової енергії, η - коефіцієнт перетворення теплової енергії від непружної деформації, σ - напруження, ϵ^{pl} – швидкість пластичної деформації.



а) деформація 0, б) деформація 2.0, с) деформація 6.6
Рис. 2. Зображення сталі за допомогою нейронного дифрактометра

Для вибраної моделі інкременту пластичної деформації обчислюється так:

$$\bar{\epsilon}^{pl} = \epsilon^{pl} n(\sigma, \epsilon^{pl}, \theta), \tag{5}$$

де ϵ^{pl} – скалярна величина пластичної деформації; n – вектор напрямку потоку зусилля, що залежить від напружень, пластичної деформації та температури θ .

Рівняння (4) та (5) об'єднуються за зворотною Ейлеревою схемою, тому на кінець інкременту потік теплової енергії обчислюється так:

$$\dot{\epsilon}^{pl} = \frac{1}{2\Delta t} \eta \Delta \epsilon^{pl} \frac{n(\sigma, \epsilon^{pl}, \theta)}{\sigma + \sigma_t}, \tag{6}$$

де σ_t – зміна напружень в часі.

Для вибраної нами моделі напруження не залежать від швидкості зміни амплітуди зусилля, тому:

$$\sigma = \sigma^0(\epsilon^{pl}, \theta), \tag{7}$$

де σ^0 – скалярні значення еквівалентних напружень, наприклад Мізеса.

Початковим кроком для визначення дійсних значень $\dot{\epsilon}^{pl}$ ми прийняли лінійну модель залежності температури від пластичних деформацій, рис. 3.

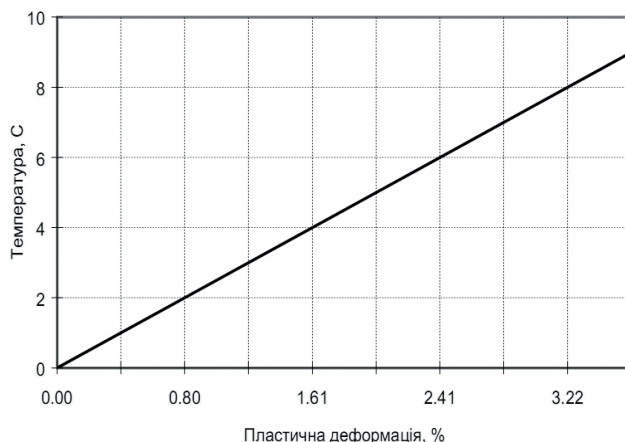


Рис. 3. Температурна залежність пластичної деформації сталі

На основі вибраної моделі опису теплових явищ від пластичної деформації сталі необхідно провести чисельні дослідження з метою оцінити діапазони взаємного впливу трьох різних процесів:

- величини прикладених зусиль для досягнення пластичних деформацій сталі;
- рівня генерування теплової енергії від пластичних деформацій;
- величини концентрації теплової енергії в околі пластичних деформацій з врахуванням теплопровідності сталі.

Побудова скінчено елементної моделі сталюго бруска та її обчислення

Для проведення обчислення математичної моделі побудуємо тривимірний об'єкт бруска із поперечними розмірами 2 мм у формі квадрата. Довжина бруска становить 200 мм (рис. 4).

Граничними умовами математичної моделі є нульові переміщення у двох напрямках, що лежать площині поперечного перерізу сталю бруска. У напрямі, що співпадає із довжиною сталю бруска граничні умови є вільними.

Навантаження прикладене посередині сталю бруска, його амплітуда зростає від нульового значення до максимального за час 0.07 с.

Початкові умови математичної моделі є нульовими. Причому, сила земного тяжіння не враховувалась.

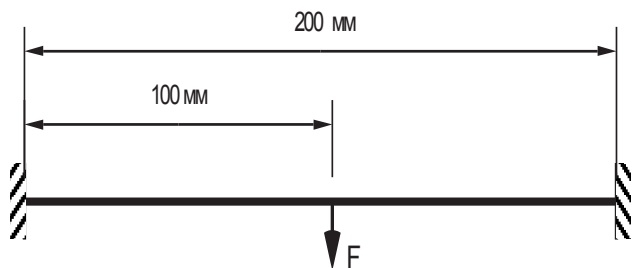


Рис. 4. Модель для проведення обчислень

До параметрів матеріалу входять пружні властивості (модуль Юнга та коефіцієнт Пуассона), модель пластичності, температурна залежність деформації пластичності, коефіцієнт теплопровідності, коефіцієнт перетворення пластичної деформації в теплову енергію, густина сталі та питома теплоємність.

Для збільшення точності проведення моделювання поширення напружено-деформованого та температурного полів вибрано скінченний елемент із квадратичним інтегруванням по його довжині. Це дозволяє обчислювати зміну згаданих полів не тільки від елемента до елемента (лінійне інтегрування) але також і по довжині елемента.

Для розбиття тривимірною сталю бруска було згенеровано 1280 скінченних елементів. У напрямку поперечного перерізу згенеровано по чотири скінченних елементи.

Це дозволяє отримувати інформації про поширення температурного поля по глибині сталю зразка внаслідок теплопровідності.

Температурне поле обчислюється виходячи із термобалансу.

Температурне поле отримуємо використовуючи зворотну диференційну схему. Застосування методу включає використання несиметричної матриці Якобі для з'єднаних рівнянь

$$\begin{pmatrix} K_{uu} & K_{u\theta} \\ K_{\theta u} & K_{\theta\theta} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta u \\ \Delta \theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_u \\ R_\theta \end{pmatrix}, \quad (8)$$

де K_{ij} – підматриці здвоєного Якобіана, Δu – корекція інкременту зміщення, $\Delta \theta$ – корекція інкременту температури, R_u – залишковий вектор механічних параметрів, R_θ – залишковий вектор термальних параметрів.

Після проведення розрахунків отримано розподіл напружень по довжині сталю бруска, рис. 5 та рис. 6.

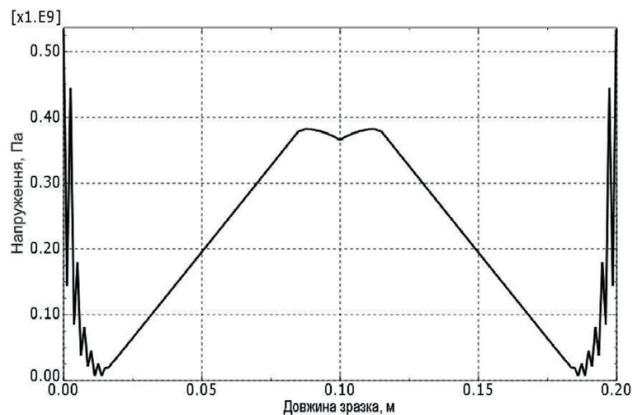


Рис. 5. Розподіл напружень по довжині зразка

Як видно із рис. 5, напруження на границі сталю бруска є вищими ніж в місці прикладання зусилля. Проте об'єм матеріалу, що задіяний у пластичній деформації сталю зразка в місцях його защемлення є незначний у порівнянні із місцем прикладання зусилля. Тому при аналізі розподілу температурного поля від пластичної деформації найбільша кількість теплової енергії зосереджується у місці прикладання зусилля, рис. 6.

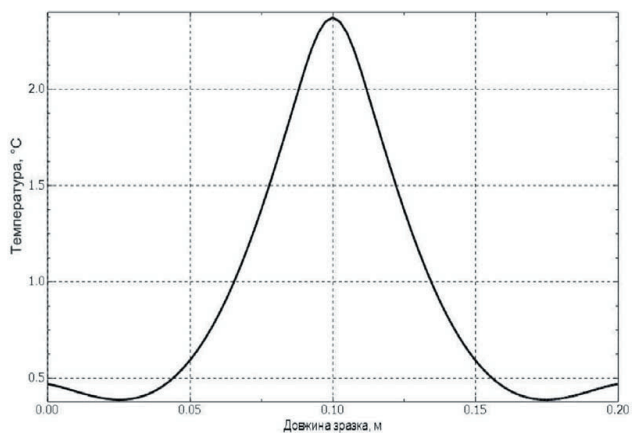


Рис. 6. Розподіл температури від пластичних деформацій зразка

Як видно із рис. 7, максимальна температура в сталюму брусі складає близько 2.5°C, а величина напружень сягає 380 МПа.



Рис. 7. Розподіл температур від пластичних деформацій на зразку

Висновки

Застосування методу скінченних елементів дозволяє отримувати інформацію про кількість виділення тепла матеріалом, що підлягає значним деформаціям і при застосуванні відповідних методів моделювання поширення ультразвукової хвилі в металі дозволяти-

ме обчислити термоакустичний ефект на неоднорідностях.

Подальшим дослідженням необхідно провести лабораторні вимірювання термопластичної залежності металу для побудови реальних залежностей температурної кривої від пластичних деформацій згідно вибраної математичної моделі цього фізичного явища.

Література

1. R. L. Thomas. Thermal NDE techniques-from photoacoustics to thermosonics / R. L. Thomas. // AIP Conf. Proc. Quantitative Nondestructive Evaluation.- Volume 615.- Issue 1.- p. 3-13.
2. D. Wu. Characterization of layered materials using lock-in thermography / D. Wu, A. Salerno, J. Rantala and G. Busse // Progress in natural science. In: 9th International Conference on Photoacoustic and Photothermal Phenomena.- China.- 1996.- p 1-6.
3. D. T. Wu. Lock-in thermography for nondestructive evaluation of materials / D. T. Wu and G. Busse. // Revue Generale de Thermique.- 1998.- Volume 37.- Issue 8.- p. 693-703.
4. C. J. Pye. Heat emission from damaged composite materials and its use in nondestructive testing / C. J. Pye and R. D. Adams // Journal of Physics D: Applied Physics.- 1981.-Issue 5.- Volume 14.- p. 927-928.
5. R. B. Mignogna. Thermographic investigation of high-power ultrasonic heating in materials / R. B. Mignogna, R. E. Green, J. C. Duke, E. G. Henneke, and K. L.Reifsnider // Ultrasonics.- 1981.- Volume 19.- Issue 4.- p. 159-160.
6. L. D. Favro. Infrared imaging of defects heated by a sonic pulse / L. D. Favro, X. Y. Han, Z. Ouyang, G. Sun, H. Sui, and R. L. Thomas // Review of Scientific Instruments.- 2000.- Volume 71.- Issue 6.- p. 2418-2422.
7. T. Zweschper. Ultrasound lock-in thermography - a defect-selective NDT method for the inspection of aerospace components / T. Zweschper, A. Dillenz, and G. Busse // Insight.- 2001.- 43.- p.173-182.
8. Dillenz. Elastic wave burst thermography for NDE of subsurface features / Dillenz, T. Zweschper, and G. Busse // Insight.- 2000.- Vol. 42.- no. 12.- p. 815-832.
9. M. Morbidini. Prediction of the thermosonics signal from fatigue cracks in metals using vibration damping measurements / M. Morbidini, P. Cawley, T. Barden, D. Almond, Ph. Duffour // J. Appl. Physics.- 2006.- 100.- p. 104905-104919.
10. Лютак І. З. Наукові основи нового неруйнівного термоакустичного методу контролю фізико-механічних параметрів металевих конструкцій // Праці Луганського відділення Міжнародної Академії інформатизації. Науковий журнал. – 2007. – № 2 (15). – С. 90-94.
11. Y. B. Guo. Mechanical Properties of Hardened AISI 52100 Steel in Hard Machining Processes / Y. B. Guo, C. R. Liu // Journal of Manufacturing Science and Engineering.- 2002.- Vol. 124.- Issue 1.- p. 1-9.
12. Документація на пакет програм скінченно-елементного аналізу Abaqus [електронний ресурс]: версія 6.9.1 / Компанія Simulia.- 2009.- 1 електронний оптичний диск (DVD-ROM).- Системні вимоги: Windows XP.- Назва з титул. екрану.
13. T. Suzuki. High Tensile Strength of Low-Carbon Ferritic Steel Subjected to Severe Drawing / T. Suzuki, Y. Tomota, A. Moriai, and H. Tashiro // Materials Transactions.- 2009.- Vol. 50.- No. 1.- p. 51-55.