

Ю.Й. Стрілецький, к.т.н., доц.*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу*

Спосіб дослідженні нерівномірності температурного імпедансу металевої пластини

Запропоновано спосіб визначення нерівномірності температурного спектрального імпедансу металевої смуги за результатами вимірювання параметрів нестационарного теплового поля. Для формування теплового потоку із відомою спектральною характеристикою пропонується використовувати нагрівник із фіксованою температурою, який стрибкоподібно змінює температуру в точці нагріву. В процесі нагрівання досліджуваної смуги фіксується температура в сукупності точок які лежать на одній лінії з точкою нагріву. Розроблено алгоритм обробки сигналів для знаходження якісної оцінки спектрального температурного імпедансу. Відмінності спектрального теплового імпедансу на різних ділянках при їх однакових геометричних розмірах свідчать про зміни структури металу на них. Запропонований спосіб дослідження дозволяє розширити можливості контролю локальних структурних змін в металах неруйнівним способом із використанням теплового поля.

Ключові слова: *структурні зміни металу; температурний імпеданс; аперіодична ланка; передаточна характеристика.*

Вступ. Значна кількість технологічного обладнання виготовлена з металу. Тому надійність його експлуатації суттєво пов'язана із властивостями металу. Під дією надлишкових зусиль металеві деталі деформуються. Поява пластичної деформації призводить до неконтрольованих змін в структурі металу, тому експлуатувати такі деталі в подальшому не можна, оскільки невідомі зміни його міцнісних характеристик.

Огляд літературних джерел. Відомі способи визначення пластичної деформації проводяться магнітними [1] і акустичними методами [2]. Однак дані методи дослідження ділянок із пластичною деформацією мають певні обмеження, пов'язані із необхідністю використання полів високої інтенсивності чи еталонів [3].

Зміна структури металу внаслідок пластичної деформації спричиняють зміни його фізичних параметрів [4]. Ці зміни призводять й до зміни теплопровідності металу в місці пластичної деформації. На різних стадіях деформації зміна структури металу по-різному впливає на теплопровідність. Якщо внаслідок деформації руйнуються зерна в структурі металу, дислокації, то теплопровідність – зменшується. При незначних деформаціях структура металу ущільнюється і теплопровідність збільшується. Тому за допомогою аналізу розподілу теплопровідності можна визначити ділянки металу із пластичною деформацією.

Вимірювання теплопровідності проводять в режимі стаціонарного теплообміну здебільшого в лабораторних умовах на взірцях визначеної форми. При цьому вважається, що теплопровідність незмінна в усюму об'ємі взірця. Для неруйнівного контролю такі способи дослідження малопридатні.

Метою даного дослідження є розробка методу визначення якісного значення теплового спектрального імпедансу шляхом вимірюванням нестационарного температурного поля і пошуку на основі цих вимірів неоднорідної теплопровідності металевої смуги, яка свідчить про зміну структури металу і як наслідок небезпеку подальшої експлуатації цієї смуги.

Викладення основного матеріалу. Щоб знайти відмінності в теплопровідності ділянки взірця можна скористатися аналогією між переносом тепла і електричних зарядів [5]. Згідно цієї концепції тепловому опору ділянки взірця ставиться у відповідність електричний опір. Різниця температури на різних ділянках взірця є аналогом електричної напруги. З використанням таких аналогій можна розглядати металевий взірець вже не як однорідне тіло, а як множину ділянок, теплові властивості яких описує еквівалентна схема, складена із множини теплових опорів як на рисунку 1 [6].

Оскільки пластична деформація ділянки металевого взірця призводить до зміни в схемі теплових опорів, то для визначення цих опорів необхідно дослідити розподіл температури на ділянках взірця при дії джерела теплової енергії. Враховуючи велику кількість невідомих параметрів в схемі необхідно попередньо спростити дослідження шляхом забезпечення певних умов. Вважаємо, що задача максимум двомірна і температурне поле в товщі деталі рівномірне. Таке припущення дає можливість досліджувати стрижні і пластини. Також важливо, щоб не відбувалось інших видів переносу тепла окрім теплопередачі. Для цього, в процесі дослідження ділянка на якій досліджується розподіл температур теплоізолюється від конвективного і променевого теплообміну.

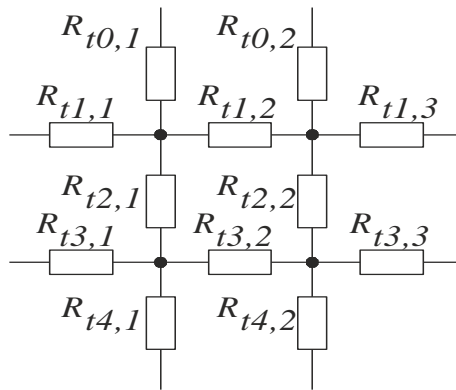


Рис. 1. Еквівалентна схема заміщення статичних теплових властивостей ділянки взірця

В режимі нестационарному теплообміні матеріал окрім температурного опору володіє здатністю накопичувати теплову енергію, що в електричній аналогії еквівалентно ємності. Еквівалентна теплова схема ускладнюється. Вузол такої схеми наведено на рисунку 2.

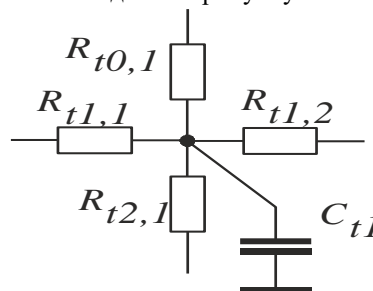


Рис. 2. Еквівалентна схема заміщення динамічних теплових властивостей ділянки взірця

Для визначення теплового опору в схемі із реактивними елементами необхідно шукати спектральний тепловий імпеданс ділянки схеми. Спектральний тепловий імпеданс ділянки схеми залежить від частоти і в електричних схемах вимірюється із використанням джерел зі змінною частотою. У випадку теплового потоку вибір виду джерела обмежений. Тому доцільно шукати значення параметрів імпедансу на різних частотах за допомогою збуджуючого сигналу із широким частотним спектром.

Одним із способів отримання широкосмугового сигналу є застосування сигналу стрибкоподібної форми. Такий сигнал легко реалізувати за допомогою джерела теплового потоку із фіксованою температурою. При нагріві таким джерелом формується стрибкоподібний температурний потік. Він призводить до виникнення перехідного процесу по температурі взірця. Якщо досліджуваний взірець ізольований від стороннього теплообміну, то джерело із постійною температурою нагріє його до врівноваженого стану, що свідчить про закінчення перехідного процесу. Час протягом якого джерело із фіксованим тепловим потоком нагріває поверхню до стаціонарного режиму називають періодом теплонасичення.

Спектральний температурний імпеданс можна визначити за формулою:

$$Z(\omega) = \frac{\Delta T(\omega)}{Q(\omega)}; \quad (1)$$

де $\Delta T(\omega)$ – амплітуда зміни температури в залежності від частоти теплового поля, $Q(\omega)$ – тепловий потік, формований джерелом.

Стрибкоподібна зміна температури описується функцією Хевісайда. Функція Хевісайда і її спектральна щільність зображені на рисунку 3.

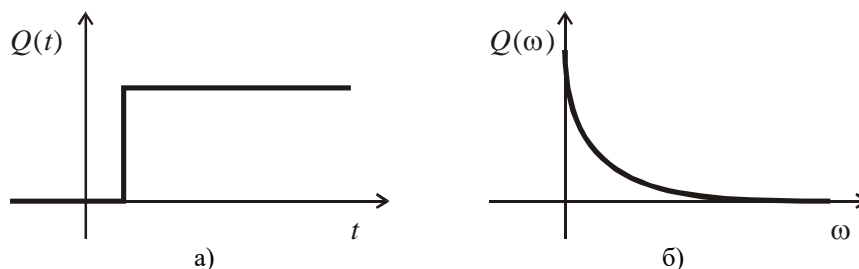


Рис. 3. Функція Хевісайда і її: а) часова форма; б) спектральна щільність.

Спектральна щільність функції Хевісайда має максимум на нульовій частоті. Тому за допомогою неї зручно формувати низькочастотні сигнали, які використовуються для досліджень імпедансів із великими ємностями. Спектральна щільність функції Хевісайда описується рівнянням [7]:

$$Q(\omega) = \frac{\pi\delta(\omega)}{2} + \frac{1}{2j\omega}; \quad (2)$$

де $\delta(\omega)$ - функція Дірака, яка описує енергію на нульовій частоті. Оцінюючи процес на ділянці де немає усталених значень можна нехтувати ним і обмежитися тільки другим доданком. Спектральний температурний імпеданс в такому випадку можна описати наступним виразом:

$$Z_t(\omega) = \Delta T(\omega) \cdot 2j\omega; \quad (3)$$

Диференціюючи результати вимірювання температури ΔT_n , отримаємо можливість позбутися множника $j\omega$, оскільки диференціювання в часовій області ΔT_n в частотній області еквівалентно діленню на $j\omega$. Таким чином, при стрибкоподібному нагріванні спектральний температурний імпеданс ділянки від нагрівника до точки вимірювання температури можна визначити за формулою:

$$Z_t(\omega) = \frac{\partial \Delta T(\omega)}{\partial t}; \quad (4)$$

Температура поверхні в процесі нагріву залежить від властивостей матеріалу і його геометричної форми. Загалом в одній точці температуру на різній віддалі від джерела нагрівання можна представити передаточною функцією аперіодичної ланки другого порядку залежну від часу [8]. Ця ланка має два часові параметри і її передаточна функція не генерує коливних процесів, що і характерно для температурного імпедансу в якого немає процесу перетікання типів енергії, яке супроводжує коливні процеси.

Передаточна характеристика аперіодичної ланки другого порядку є раціональною функцією, яку можна представити в наступному виді:

$$T(x, t) = \frac{a(x) + c(x) \cdot t + d(x) \cdot t^2}{1 + b(x) \cdot t + e(x) \cdot t^2}; \quad (5)$$

де $a(x)$, $b(x)$, $c(x)$, $d(x)$, $e(x)$ – функції, що залежать від геометричних розмірів, фізичних параметрів і відстані до точки нагрівання. При незмінних геометричних розмірах вони залежать тільки від фізичних параметрів металу і відстані до точки нагрівання. Відстань до точки нагрівання входить в аргумент. Тому для конкретних точок функції від $a(x)$ до $e(x)$ зводяться до коефіцієнтів, які знаходяться апроксимацією із використанням виміряних значень температури.

Для пошуку цих коефіцієнтів впродовж нагрівання фіксується температура ΔT_n в n точках досліджуваного взірця, які знаходяться на певній віддалі від точки нагрівання і рівній віддалі між собою.

Знаючи, що функція, яка описує температуру в різних точках залежна від часу має вигляд передаточної характеристика аперіодичної ланки можна знайти часткову похідну по часу в наступному вигляді:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{c + 2 \cdot d \cdot t}{e \cdot t^2 + b \cdot t + 1} - \frac{(b + 2 \cdot t \cdot e) \cdot (d \cdot t^2 + c \cdot t + a)}{(e \cdot t^2 + b \cdot t + 1)^2}; \quad (6)$$

Маючи коефіцієнти, які визначають динамічні властивості температурного поля у вибраній точці можна відтворити похідну по температурі в цій точці за час перехідного процесу.

Таким чином буде знайдено температурний імпеданс від точки нагрівання до кожної з точок в яких вимірювалася температура. Якщо досліджувані точки лежать на одній лінії із точкою нагрівання, то температурний імпеданс до першої точки буде залежати від ділянки до точки нагрівання (рисунку 4).

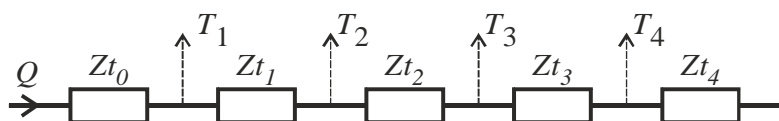


Рис. 4. Еквівалентна електрична схема теплової схеми металевої пластини

Імпеданс до інших точок буде сумою імпедансів попередніх точок. Тому різниця між температурними імпедансами сусідніх точок визначає тепловий спектральний імпеданс ділянки між ними.

Результати дослідження і обговорення. Для перевірки розробленої методики дослідження нерівномірності температурного імпедансу яка виникла внаслідок структурних змін було виготовлено металевий взірець із розміром 50x300x5мм. Для формування структурних змін в металі взірця його було розтягнуто на розривній машині до появи ділянки текучості. Після цього поверхню взірця було поліровано, для дотримання рівних геометричних розмірів взірця по довжині. Схема дослідної установки зображено на рисунку 5.

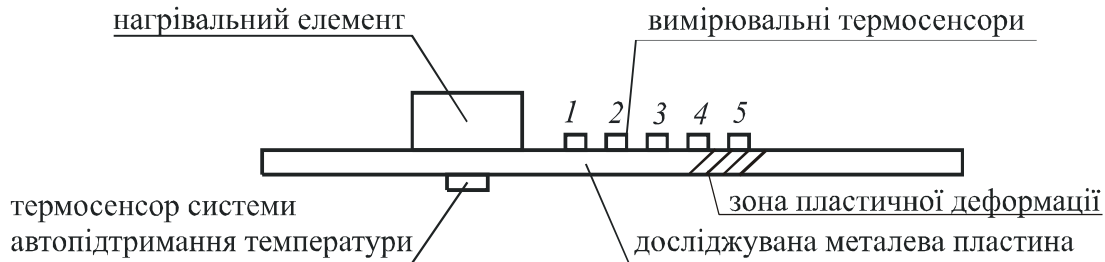


Рис. 5. Схема встановлення елементів дослідної установки

Нагрівання здійснювалося модулем Пельг'є, що покривав всю ширину смуги. Температура нагрівання контролювалася на протилежній стороні смуги. Ділянки нагрівання і вимірювання теплоізолювалися. Це створювало умови рівномірного поширення теплового потоку від точки нагрівання вздовж смуги. Температура вимірювалася в п'яти точках, дві з яких знаходилися на границі зони деформації.

Отримані в результаті вимірювання дані використано для пошуку коефіцієнтів раціональної функції (5), а за допомогою них знайдено похідну по часу згідно (7). Після чого було розраховано спектри сигналів, які є еквівалентами теплового імпедансу на ділянках вимірювання. Результати розрахунку різниці спектральних щільностей між сусідніми ділянками наведено на рисунку 7.

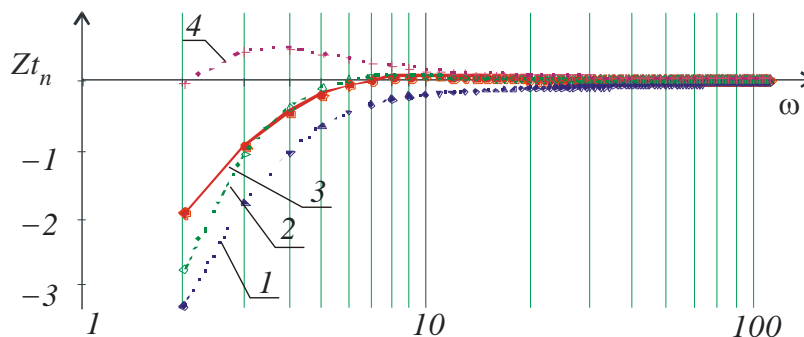


Рис. 6. Спектральний температурний імпеданс різних ділянок пластини

Аналіз результатів показав, що температурний імпеданс ділянки між термосенсорами 4 і 5 (представлені на рис. 6 поз. 4) із пластичною деформацією суттєво відрізняється від імпедансів між іншими точками. Це дає можливість стверджувати, що за допомогою аналізу температурного поля на поверхні пластини в режимі нестационарного теплообміну можна визначати ділянки із структурними змінами, в тому числі і з пластичною деформацією.

Висновки. Запропоновано спосіб визначення нерівномірності температурного спектрального імпедансу за результатами вимірювання параметрів нестационарного теплового поля. Для формування теплового потоку із відомою спектральною характеристикою використано нагрівник із фіксованою температурою, який срибкоподібно нагріває метал в точці. Шляхом описаного алгоритму обробки сигналів отриманих, при вимірюванні температури в декількох точках, які лежать на радіальній лінії від нагрівника визначається якісне значення спектрального температурного імпедансу ділянок між точками вимірювання.

Запропонований спосіб цифрової обробки дозволяє розширити можливості неруйнівного контролю локальних структурних змін в металевих деталях тепловими методами.

Список використаної літератури:

1. Теория и практика магнитной диагностики стальных металлоконструкций / Б.Е. Попов, В.Ф. Мужичук, Г.Я. Безлюдько, В.М. Долинский, Е.А. Левин [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.nio12.ru/stati/teoriya-i-praktika-magnitnoj-diagnostiki-stal'nykh-metallokonstrukcij/>.
2. Ravi-Chandar K. Propagation of ultrasonic plane waves in a plastically deformed medium / K.Ravi-Chandar, E.Schneider // Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. – Vol. 12. – Pp. 2083–2089.
3. Панасюк В.В. Механіка руйнування і міцність матеріалів / В.В. Панасюк. – Т. 5. – Львів : Фіз.-механ. ін-т ім. Г.В. Карпенка, 2001. – 1132 с.
4. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов / В.С. Чиркин. – М. : Физмат, 1959. – 356 с.
5. Беспалов В.Я. Нестационарные тепловые расчеты в электрических машинах / В.Я. Беспалов, Е.А. Дунайкина, Ю.А. Мощинский ; под ред. Б.К. Клокова. – М. : МЭИ, 1987. – 72 с.
6. Крейт Ф. Основы теплопередачи / Ф.Крейт, У.Блейк. – М. : Мир, 1983. – 512 с.
7. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы : учебник / С.И. Баскаков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высшая школа, 1988. – 448 с.
8. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке / Н.Н. Рыкалин. – М. : Гос. н.-т. изд-во машиностроительной литературы, 1951. – 296 с.

References:

1. Popov, B.E., Muzhickij, V.F., Bezljud'ko, G.Ja., Dolinskij, V.M. and Levin, E.A. (2001), *Teoriya i praktika magnitnoj diagnostiki stal'nykh metallokonstrukcij*, available at: <http://www.nio12.ru/stati/teoriya-i-praktika-magnitnoj-diagnostiki-stal'nykh-metallokonstrukcij/>
2. Ravi-Chandar, K. and Schneider, K. (1993), «Propagation of ultrasonic plane waves in a plastically deformed medium», *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 12, pp. 2083–2089.
3. Panasiuk, V.V. (2001), *Mekhanika ruinovannia i mitsnist materialiv*, Vol. 5, Fiz.-mekhan. in-t im. H.V. Karpenka, Lviv, 1132 p.
4. Chirkin, V.S. (1959), *Teplofizicheskie svojstva materialov*, Fizmat, Moscow, 356 p.
5. Bespalov, V.Ja., Dunajkina, E.A. and Moshhinskij, Ju.A. (1987), *Nestacionarnye teplovye raschety v jelektricheskikh mashinah*, in Klokov, B.K. (Ed.), MJeI, Moscow, 72 p.
6. Krejt, F. and Blejk, U. (1983), *Osnovy teploperedachi*, Mir, Moscow, 512 p.
7. Baskakov, S.I. (1988), *Radiotekhnicheskie cepi i signaly*, uchebnik, 2nd ed., pererab. i dop., Vysshaja shkola, Moscow, 448 p.
8. Rykalin, N.N. (1951), *Raschety teplovy processov pri svarke*, Gos. n.-t. izd-vo mashinostroitel'noj literatury, Moscow, 296 p.

Стрілецький Юрій Йосипович – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Методи та прилади контролю якості і сертифікації продукції» Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

Наукові інтереси:

– розробка та удосконалення цифрових методів та засобів обробки сигналів для удосконалення методів вимірювання і неруйнівного контролю.

E-mail: momental@ukr.net.

Стаття надійшла до редакції 20.10.2017.