

Н. Я. ГАБЛЬОВСЬКА, канд. техн. наук, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ;
М. А. КОНОНЕНКО, канд. техн. наук, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ;
С. М. ШВЕЦЬ, канд. техн. наук, доц., Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, Луганськ

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ЗАРОДЖЕННЯ МІКРОТРИЩИН

В результаті проведених теоретичних та експериментальних досліджень динамічних характеристик системи контролю зародження мікротріщин за стрибкоподібною зміною температури на поверхні металевої конструкції була доведена можливість застосування схожих систем контролю для виявлення мікродфектів в напружено-деформованих конструкціях при застосуванні в якості інформативного параметра швидкозмінну температуру на поверхні металу.

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований динамических характеристик системы контроля зароджения микротрещин по скачкообразному изменению температуры на поверхности металлической конструкции была доказана возможность применения подобных систем контроля для выявления микродфектов в напряженно-деформированных конструкциях при использовании в качестве информационного параметра быстроизменяющуюся температуру на поверхности металла.

As a result of theoretical and experimental research of the microcracks control system dynamic characteristics of rapidly temperature changes in the metal structure surface was proven to use such systems to identify microcracks in stress-deformed structures when using as a parameter the surface metal rapidly changing temperature.

Дослідження динамічних характеристик систем контролю з інформативним параметром, який змінюється дуже швидко є складною науково-практичною задачею. Особливий інтерес викликають системи контролю, у яких інформативним параметром є стрімка зміна вхідного сигналу, і відповідна реакція системи на цей сигнал. До таких об'єктів відноситься розроблена система контролю, яка за стрибкоподібною зміною інформативного параметру – температури на поверхні об'єкта контролю, дозволяє визначити момент зародження мікротріщин у напружено-деформованих металічних конструкціях [1].

Отже, дослідження динамічних характеристик системи, які описують поведінку системи в інтервалі часу від моменту зміни вимірюваної величини до моменту, коли з цієї системи можливо зчитати встановлені покази є актуальною задачею.

В реальних умовах експлуатації більшість металоконструкцій піддаються силовому впливу, тобто перебувають у напружено-деформованому стані, що в подальшому призводить до утворення дефектів,

які з достатньою точністю можна виявляти методами неруйнівного контролю. Передумовою дефектоутворення є зміна фізичних та механічних характеристик матеріалу конструкцій, організація контролю яких потребує значних матеріальних затрат. Результати такого контролю є багатопараметричними та малоінформативними в плані прийняття рішення щодо реального стану металу конструкції.

Задача вдосконалення методів та розробки засобів опосередкованого контролю напружено-деформованого стану металоконструкцій, що дозволяють за мінімальною кількістю інформативних параметрів виявляти момент зародження мікрodefektів та контролювати їх розвиток, була вирішена шляхом створення системи контролю розвитку мікротріщин у напружено-деформованих металічних конструкціях. В результаті проведених експериментальних досліджень та апробації даної системи було встановлено температурні розподіли по поверхні об'єкта контролю в залежності від глибини залягання мікротріщин.

На даному етапі досліджень було розглянуто металеву конструкцію, що перебуває у напружено-деформованому стані, як дисипативну систему, та досліджено її термомеханічні властивості, доведено можливість контролю моменту зародження мікротріщин, застосовуючи як інформативний параметр стрибкоподібну зміну температури на поверхні металу в зоні ймовірного утворення мікротріщини. В зв'язку з цим є доцільним проведення подальших досліджень розробленої системи, щодо можливості її застосування для контролю таких швидкоплинних явищ, як стрибкоподібна зміна температури, на поверхні досліджуваного об'єкта. Тому метою даної роботи є визначення динамічних характеристик створеної системи контролю.

Металеві конструкції, що знаходяться у напружено-деформованому стані розглядались як дисипативні структури у яких відбувається перетворення (дисипація) повної механічної енергії у інші форми енергії, які у кінцевому рахунку, перетворюються в теплову [2]. Механізми дисипації в металах базуються на наявності неоднорідностей кристалічної ґратки – дислокаційних структур або дислокацій.

Таким чином, однієї з базових вимог до системи контролю зародження та розвитку мікротріщин у матеріалі напружено-деформованих конструкцій було забезпечення вимірювання температури (теплового ефекту), стрибкоподібна зміна якої супроводжує процес зародження та поширення мікротріщин [3].

Створено систему опосередкованого контролю процесу утворення мікротріщин у металевих конструкціях, що перебувають у напружено-деформованому стані. В основу розробленої системи покладено найбільш широковживаний принцип перетворення «температура – напруга». В якості давача використовуються температурний мікроелектронний сенсор типу DS-1A, що характеризується багатофункціональністю, високою точністю, малою інерційністю, високою швидкістю, малими габаритними розмірами і масою

та практично лінійною залежністю опору від температури у широкому діапазоні (від 0^0 до 60^0C) [4].

Для забезпечення вірогідності контролю створюється надійний контакт мікроелектронного сенсора з поверхнею контрольованого виробу в зоні ймовірного утворення мікротріщин. Сигнал з мікроелектронного сенсора перетворюється у напругу, яка є пропорційною температурі. Для передачі перетвореного сигналу на відстань використовується перетворювач напруги в струм. Дискретизація аналогового сигналу здійснюється за допомогою АЦП. Обмін між вузлом обробки вхідного сигналу і ЕОМ здійснюється через паралельний порт. АЦП калібрується за допомогою сервісної програми при нульовій та максимальній вхідній напрузі.

При збільшенні навантаження на контрольований виріб, в момент зародження мікротріщин відбувається миттєве збільшення температури на поверхні виробу, значення якої, шляхом вказаних перетворень, подається на ЕОМ, на моніторі якої спостерігаються результати контролю, а саме виміряна зміна температури на поверхні контрольованого виробу та температурний розподіл. За зміною температури на поверхні виробу, що контролюється, визначається момент зародження мікротріщин.

Результати експериментальних досліджень розробленої системи підтвердили можливість використання зміни температури, як інформативного параметру для контролю зародження мікротріщин, та довели правильність запропонованих схемотехнічних рішень з реалізації засобів контролю структурних перетворень в матеріалах конструкцій в залежності від прикладених навантажень.

Одержана залежність виміряної температури на поверхні об'єкта контролю в залежності від прикладеного навантаження наведено на рис. 1.

Для доведення можливості вимірювання стрімкої зміни температури слід визначити динамічні характеристики розробленої системи, оскільки, саме такі характеристики описують поведінку системи в інтервалі часу від моменту зміни вимірюваної величини до моменту, коли з цієї системи можливо зчитати встановлені покази. На рис.2 наведено одержану експериментальним шляхом залежність виміряної температури на поверхні об'єкта контролю від часу, протягом якого навантаження збільшується рівномірно.

Як бачимо, розроблену систему можна вважати лінійною стаціонарною динамічною системою із зосередженими параметрами.

Лінійна стаціонарна динамічна система із зосередженими параметрами описується звичайним динамічним рівнянням зі сталими коефіцієнтами [5]:

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + \dots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + \dots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x, \quad (1)$$

яке в операторній формі матиме вигляд

$$(a_n p^n + \dots + a_1 p + a_0) y(t) = (b_m p^m + \dots + b_1 p + b_0) x(t), \quad (2)$$

де $p = d/dt$ - оператор диференціювання.

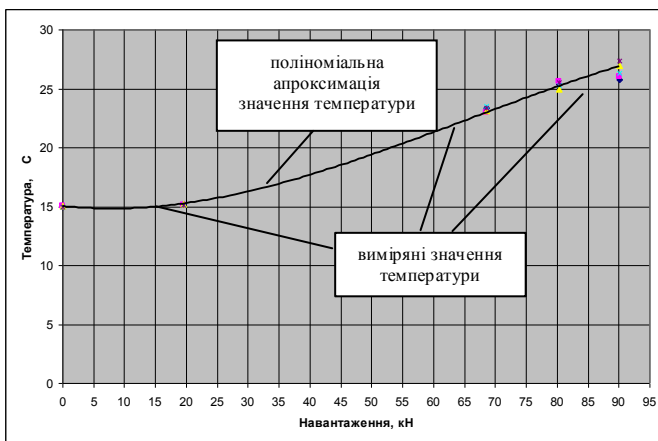


Рис. 1. Залежність температури на поверхні об'єкта контролю в залежності від прикладеного навантаження [3]

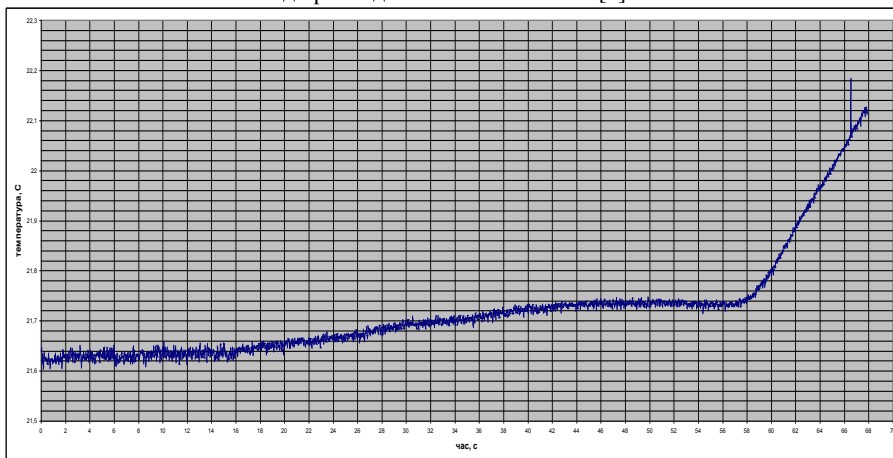


Рис.2. Залежність температури на поверхні об'єкта контролю від часу, протягом якого навантаження збільшується рівномірно [1]

Диференціальне рівняння динамічної системи є вичерпною її характеристикою, але його коефіцієнти важко піддаються експериментальному визначенню. В наслідок того, що характеристики перетворення в часовій області використовується імпульсна перехідна функція та перехідна функція лінійної динамічної системи. Використовуючи інформацію, яку вони містять, можна знайти значення коефіцієнтів

диференціального рівняння, які по-іншому важко ідентифікувати. З характеристиками перетворення в часовій області однозначно пов'язані характеристики перетворення в частотній області, що є наслідком дуальності часу і частоти.

В залежності від порядку диференційного рівняння, яке описує динаміку, засоби вимірювання та їх елементи поділяють на засоби першого, другого чи вищого порядків.

Елементи розробленої системи є засобами та перетворювачами першого порядку, оскільки відношення їх вихідного сигналу до вхідного залежать від швидкостей зміни вихідного сигналу. Для таких елементів залежність між вихідним $Y(t)$ і вхідним $X(t)$ сигналом можна записати у вигляді [6]:

$$a_1 \frac{dY(t)}{dt} + a_0 Y(t) = b_1 \frac{dX(t)}{dt}, \quad (3)$$

де $\frac{dY(t)}{dt}$ - швидкість зміни вихідного сигналу, а a_1 , a_0 і b_0 – константи.

Оскільки, зміна температури, яку необхідно контролювати розробленою системою, має стрибкоподібний характер, то зміна вихідного сигналу в часі може бути представлена у вигляді:

$$\frac{Y(t)}{X(t)} = \left(\frac{b_0}{a_0} \right) \left(1 - e^{-t/\tau} \right), \quad (4)$$

де $\tau = \frac{a_1}{a_0}$ - стала часу.

Перетворення Лапласа, що відповідає (3), можна зобразити у наступному вигляді:

$$a_1 p \cdot Y(p) + a_0 \cdot Y(p) = b_0 \cdot X(p). \quad (5)$$

Передавальну функцію, у загальному випадку, можна записати:

$$G(p) = \frac{b_0}{a_1 p + a_0}. \quad (6)$$

Передавальна функція системи складається з передавальних функцій елементів, що входять до складу даної системи. На рис. 3 зображено структурну схему системи для вимірювання зміни температури на поверхні металевих конструкцій з вказаними передавальними характеристиками елементів.



Рис. 3. Структурна схема системи для вимірювання зміни температури на поверхні металевих конструкцій

Оскільки, чутливий елемент розробленої системи залито тонким шаром епоксидної смоли, необхідно врахувати цю передавальну функцію.

Передавальна функція епоксидного шару має вигляд:

$$G_e(p) = \frac{1}{1 + p\tau_e}, \quad (7)$$

де τ_e - постійна часу шару епоксидної смоли.

Передавальна функція напівпровідникового давача визначається як

$$G_D(p) = \frac{1}{1 + p\tau_D}, \quad (8)$$

де τ_D - постійна часу корпусу давача.

Передавальна характеристика реального підсилювача має вигляд:

$$G_n(p) = \frac{k \cdot \frac{1}{1 + p\tau_n}}{1 + \frac{R_1}{R_2} \cdot k \cdot \frac{1}{1 + p\tau_n}}, \quad (9)$$

де k – коефіцієнт підсилення без петлі зворотного зв'язку;

τ_n - постійна часу підсилювача.

До складу вимірювача входить два підсилювача $G_{п1}$ та $G_{п2}$ з аналогічними характеристиками.

Передавальну характеристику аналогово-цифрового перетворювача можна зобразити у вигляді:

$$G_{АЦП}(p) = e^{-p\tau_3}, \quad (10)$$

де τ_3 - час дискретизації АЦП.

Передавальну функцію системи можна описати як добуток передавальних функцій всіх складових елементів даної системи [7]

$$G(p) = G_e(p) \cdot G_D(p) \cdot G_n(p) \cdot G_n(p) \cdot G_{АЦП}(p), \quad (11)$$

тоді, загальний вигляд передавальної функції системи буде:

$$G(p) = \frac{1}{1 + p\tau_e} \cdot \frac{1}{1 + p\tau_D} \cdot \left(\frac{k \cdot \frac{1}{1 + p\tau_n}}{1 + \frac{R_1}{R_2} \cdot k \cdot \frac{1}{1 + p\tau_n}} \right)^2 \cdot e^{-p\tau_3} \quad (12)$$

Оскільки реакція розробленої системи на одиничне збурення, тобто стрибкоподібну зміну температури, визначається як $X(p) = \frac{1}{p}$, тоді

$$Y(p) = X(p) \cdot G(p) = \frac{1}{p} \cdot \frac{1}{1 + p\tau_e} \cdot \frac{1}{1 + p\tau_d} \cdot \left(\frac{k \cdot \frac{1}{1 + p\tau_n}}{1 + \frac{R_1}{R_2} \cdot k \cdot \frac{1}{1 + p\tau_n}} \right)^2 \cdot e^{-p\tau_s} \quad (13)$$

Врахувавши у даному виразі постійні часу окремих елементів [8], отримаємо вираз:

$$Y(p) = X(p) \cdot G(p) = \frac{1}{p} \cdot \frac{1}{1 + 0,01p} \cdot \frac{1}{1 + 0,005p} \cdot \left(\frac{k \cdot \frac{1}{1 + p \cdot 10^{-3}}}{1 + \frac{R_1}{R_2} \cdot k \cdot \frac{1}{1 + p \cdot 10^{-3}}} \right)^2 \cdot e^{-0,02p} \quad (14)$$

Здійснивши зворотнє перетворення Лапласа отримаємо залежність вихідної величини від часу при стрибкоподібному збуренні на вході розробленої системи

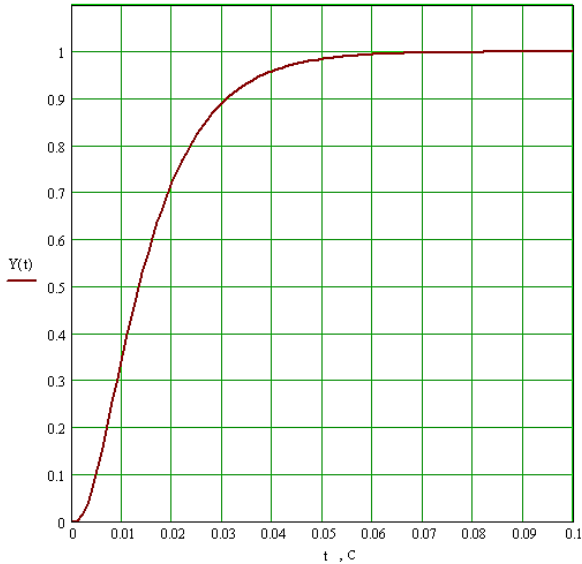


Рис.4. Залежність вихідної величини від часу при стрибкоподібному збуренні

За допомогою ітераційного обчислення визначено час $t=0,058\text{с}$, протягом якого вихідна величина відтворює вхідну величину з похибкою, що не перевищує 1%.

З метою підтвердження одержаних даних було проведено ряд експериментальних досліджень, протягом яких відтворювалася короткочасна періодична дія температури на поверхню давача, яка досягала короткочасними торканнями (з частотою 2-4 торкань за секунду)

до поверхні нагрітого металу. Температура поверхні контролювалась термоелектричним перетворювачем типу КТХК (виробництво НВФ «КонтрАвт», Росія).

Графіки зміни температури для різних частот подані на рис.5 та рис.6.

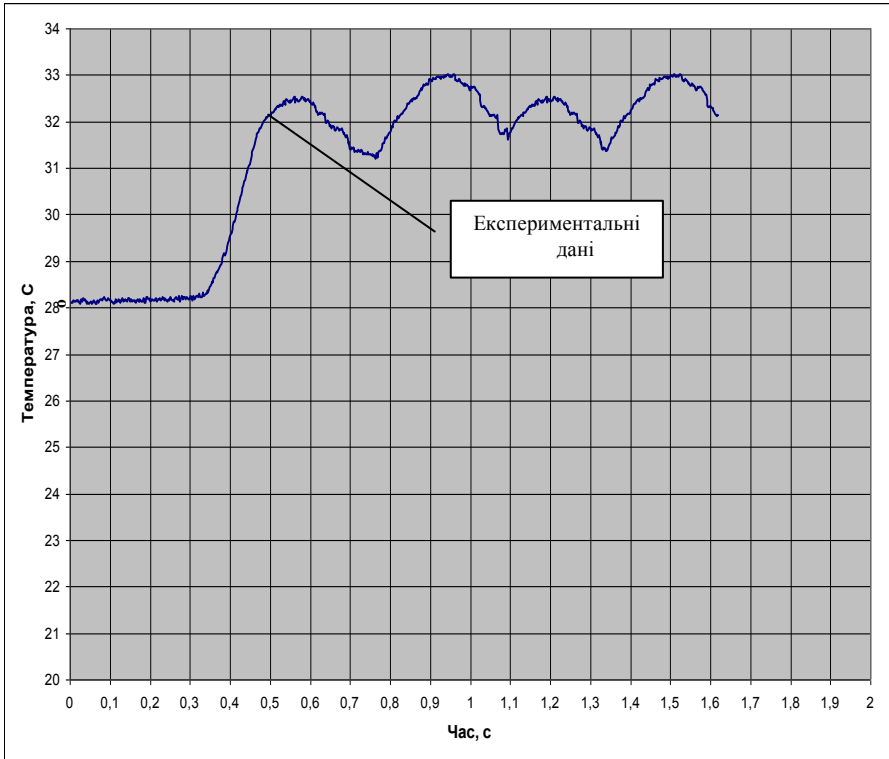


Рис.5. Графік зміни температури під час торкання давача до поверхні нагрітого металу (температура контрольованої поверхні 33⁰С) [9]

Висновки

В результаті проведених теоретичних та експериментальних досліджень динамічних характеристик системи контролю зародження мікротріщин за швидкоплинною зміною температури на поверхні металевій конструкції було доведено можливість застосування як інформативного параметра стрибкоподібну зміну температури на поверхні металу в зоні ймовірного утворення мікротріщини.

Результати досліджень підтверджують теоретично встановлені динамічні характеристики системи і можливість її застосування для оцінки швидкоплинних температурних змін на поверхні металічних конструкцій, які виникають при зародженні і розвитку мікротріщин в тілі таких конструкцій.

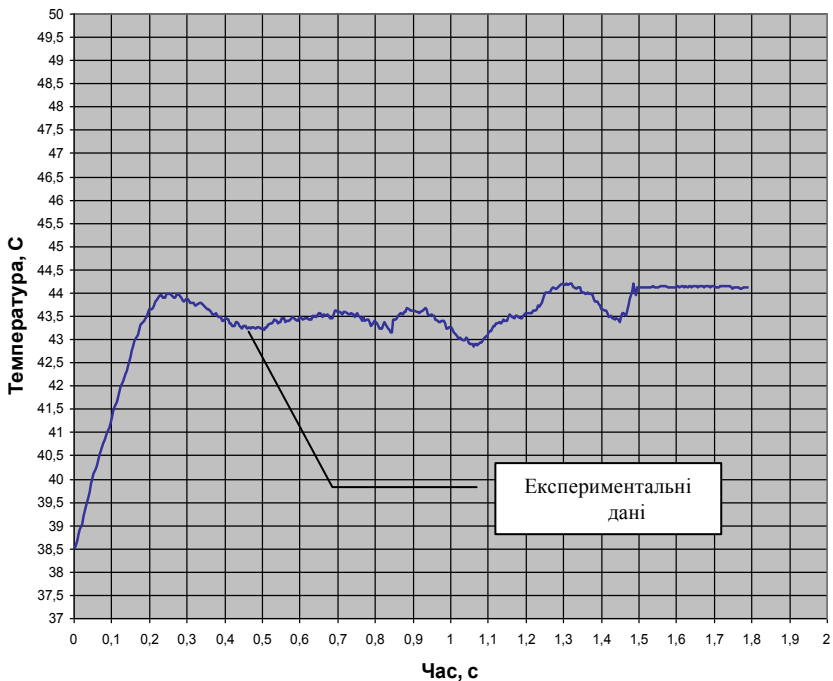


Рис.6. Графік зміни температури під час торкання давача до поверхні нагрітого металу (температура контрольованої поверхні 44⁰C) [9]

Список літератури: **1.** Габльовська Н.Я. Система контролю розвитку мікротріщин у напружено-деформованих металічних конрукціях: автореф.дис...канд. техн.наук: спец. 05.11.13 / Н.Я. Габльовська – Івано-Франківськ, 2008. – 20 с. **2.** Иванова В.С. Синергетика и фракталы в материаловедении / В.С.Иванова, А.С.Баланкин, И.Ж.Бунин, А.А.Оксогоев – Москва: Наука, 1994. – 382 с. **3.** Габльовська Н.Я. Термодинамічні ефекти як інформативні параметри для контролю розвитку мікротріщин у напружено-деформованих конрукціях / Н.Я. Габльовська //Вісник національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”. Приладобудування. - 2005. - С.85-94. **4.** N.S.Boltovets. Ge-film resistance and Si-based diode temperature microsensors for cryogenic applications / N.S.Boltovets, V.V.Kholevchuk, R.V.Konakova, V.F.Mitin // Sensors and Actuators A, – 2001. – Vol.92 – P. 191 – 196. **5.** Габльовська Н.Я. Система контролю зародження та розвитку мікротріщин та дослідження її динамічних характеристик / Н.Я.Габльовська // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2008. – С.16-20. **6.** Кисіль І.С. Метрологія, точність і надійність засобів вимірювань / І.С. Кисіль // Навчальний посібник. – Івано-Франківськ: Факел, 2002. – 400с. **7.** Болтон У. Карманный справочник инженера-метролога / У.Болтон – М.: Издательский дом "Додэка-XXI", 2002. – 384 с. **8.** В.С.Осадчук, О.В.Осадчук, Н.С.Кравчук. Мікроелектронні сенсори температури з частотним виходом / В.С.Осадчук – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2007. – 163с. **9.** Габльовська Н.Я. Система контролю розвитку мікротріщин у напружено-деформованих металічних конрукціях: дис...канд.техн.наук: спец. 05.11.13 / Габльовська Надія Ярославівна – Івано-Франківськ, 2008. – 148с.

Надійшла до редакції 15.04.12