

Г.В. Микитин^{1,2} к.т.н., с.н.с., доц., Л.С. Сікора² д.т.н., проф., Я.Л. Іваницький¹ д.т.н., с.н.с., С.Т. Штаюра¹ к.т.н., с.н.с., З.В. Дмитрів¹ гол. інж.

¹Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України

²Національний університет “Львівська політехніка”

СИСТЕМНА МОДЕЛЬ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Анотація. Розроблена системна модель визначення параметрів напружено-деформованого стану матеріалів на основі синтезу, взаємозв'язку і взаємодії: підходів та критеріїв механіки руйнування металоконструкцій; видів і методів неруйнівного контролю; методів і засобів вимірювання; метрологічного забезпечення адекватно до проблемно-об'єктної ситуації та діючих стандартів у предметних сферах.

Annotation. System model parameters determination of the stress-strain materials state based on the synthesis, correlation and interaction: fracture mechanics hardware approaches and criteria; non-destructive testing types and methods, methods and means of measurement of physical quantities; measurement assurance adequate to the objective problem-situation and the existing standards in subject areas.

Ключові слова: матеріал; напружено-деформований стан; системна модель; критерії руйнування; методи і засоби неруйнівного контролю та вимірювання; метрологічне забезпечення.

1. Актуальність проблеми визначення параметрів напружено-деформованого стану матеріалів

Проблемі визначення параметрів напружено-деформованого стану (НДС) матеріалів, відповідно розробленню методів оцінювання роботоздатності елементів енергетичного обладнання за експлуатаційних умов – складного навантаження, агресивного середовища і, на цій основі, визначення їх залишкового ресурсу присвячено багато фундаментальних та прикладних досліджень на рівні створення методологій, підходів, методик, стандартів т. і. [1,2,3,4,5,6,7]. Сьогодні відомі наукові методології, які не завжди поєднують елементи матеріалознавства, підходи механіки руйнування, методи неруйнівного контролю (НК), способи вимірювання, тому мають певні особливості. Наприклад, активні методи НК матеріалів – коерцитивної сили, магнітної анізотропії, на основі ефекту Баркгаузена не враховують фактичного енергетичного стану об'єкта контролю, оскільки інформативність зовнішнього фізичного поля не відображає змін властивостей і параметрів НДС матеріалу, обумовлених його взаємодією з власним полем металу, відповідно невідома зона концентрації механічного напруження, як основного джерела розвитку одного з дефектів – тріщини.

Відбір сигналів від власних фізичних полів металоконструкцій пасивними методами НК – акустичної емісії (АЕ), магнітної пам'яті металу (МПМ) дозволяє отримати фактичну інформацію про НДС об'єкта. В роботах [4,5] запропонована методологія визначення характеристик тріщиностійкості конструкційних матеріалів з використанням методу АЕ, який регламентує відбір сигналів АЕ від тріщин, вибір ефективних параметрів сигналів АЕ, вибір робочої частоти приймального тракту приладу, розміщення перетворювача АЕ. Методологія НК на основі методу МПМ і магнітометричних приладів, які визначають зони концентрації напружень (ЗКН), що зосереджені на глибині та в об'ємі металу, а на поверхні трансформуються у тріщини, запропонована в роботі [8]. Оцінювання НДС матеріалу відбувається за процедурою порівняння природної намагніченості – МПМ та еталонного зразка – магнітограми, зареєстрованої у ділянках із задовільним станом металу без ЗКН. Напружено-деформований стан композитних матеріалів визначають оптичним методом НК – цифрової спекл-кореляції (ЦСК) [9]. Визначення поверхневих переміщень і деформацій зразків здійснюється за схемою формування спекл-зображень у розсіяному світлі, яке відбивається від оптично шорсткої поверхні. У роботі [10] показані різні макромеханізми поширення тріщини у матеріалі, які надалі можуть бути використані для створення методики визначення параметрів НДС. Наведені методології у своїй реалізації використовують стандартизовані методики механічних випробувань, відповідні методи і засоби НК та вимірювання. В них відсутня узгоджена структура взаємозв'язку та взаємодії елементів механіки руйнування, неруйнівного контролю, вимірювання, метрологічного забезпечення відповідно до моделі об'єкта (типу тріщини) та адекватного оцінювання його стану. Ефективним і достовірним з позиції прийняття рішення про стан об'єкта технічного діагностування та відповідно управління технологічними процесами є системний підхід до моделювання складних ситуацій в енергетиці, машинобудуванні, літакобудуванні т.і. [11]. Постановка завдання – створення системної моделі визначення параметрів НДС, яка синтезує підходи механіки руйнування, методи НК, інформаційні технології відбору і оброблення сигналів та їх метрологічне забезпечення згідно проблемно-об'єктної ситуації та модифікується в ієрархію моделей відповідно до енергетичних, силових, деформаційних критеріїв і дозволяє узгодити на метрологічному рівні методику механічних випробувань і методику визначення параметрів НДС матеріалу та оцінити їх.

2. Системна модель визначення параметрів НДС матеріалів

Пропонується структура системної моделі до визначення параметрів (фізичних величин) НДС матеріалів, елементів конструкції енергетичного обладнання (рис.1). Об'єктом дослідження (ОД) I є метали, з яких виготовлений широкий спектр енергетичного обладнання. Довготривала експлуатація об'єктів та системний вплив на них зовнішніх факторів (фізичних полів) викликає деградацію металу, що призводить до зміни його первинного фізико-механічного стану. Певний вид металу, наприклад сталь має власне фізичне поле 2 та геометричні, фізичні, механічні характеристики

3, які пов'язані з відповідними фізичними величинами, що відображають властивості металу до початку експлуатації об'єкта. Вимірювані фізичні величини приймають числові значення в певному діапазоні для кожного виду металу. Рівень 4 відображає певний підхід і критерії механіки руйнування матеріалів відповідно до моделі тріщини. У даному випадку показані елементи силового підходу: статичне навантаження (розтягування) F ; вплив факторів експлуатації – температури середовища T , водню H , складових експерименту E . Зовнішній вплив змінює фізичне поле об'єкта, відповідно змінюються його геометричні, фізико-механічні властивості, що знаходять адекватне відображення у вимірюваних фізичних величинах ($2^* - 3^*$), аналітично пов'язаних з параметрами НДС металу. З метою відбору інформації про НДС об'єкта, в результаті довготривалої експлуатації, необхідно використовувати способи визначення параметрів НДС – деформації, пов'язаної з механічним напруженням, і, на цій основі, розрахунку КІН – характеристики статичної або циклічної тріщиностійкості металів. Зазначимо, що фізичне поле ОД 2 змінюється не тільки за умов експлуатації (випробування), але й при способі відбору інформації 5 – прямому, непрямому, який взаємопов'язаний з активним або пасивним методом НК.

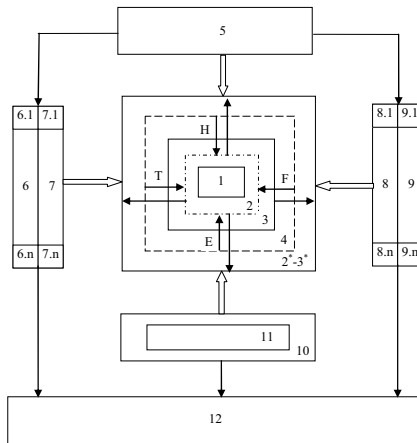


Рис. 1. Системна модель визначення параметрів НДС матеріалів

Така зміна власного фізичного поля ОД (металу) обумовлена тим, що йому властива інформаційна пам'ять, яка відображає енергетичні параметри металу, відповідно і геометричні. Для визначення параметрів НДС матеріалу використовують: фізичні методи неруйнівного контролю (за видом фізичних полів) 6 (електричні, магнітні, електромагнітні, теплові (непрямі); механічні (прямі)), решта методів – оптичні, акустичні, тензометричні т. і. відносяться до одного з п'яти видів НК [12]; відносні методи вимірювання фізичних величин, пов'язаних з параметрами руйнування 7, оскільки вони ґрунтуються

на вимірюванні змін інформативного параметра фізичного поля за умов механічного навантаження/розвантаження матеріалу. Наприклад, методи вимірювання довжини тріщини – візуальний, пружної податливості, давачів послідовного розриву, різниці електричних потенціалів, фрактографічний, акустичної емісії, ультразвуковий, вихрових струмів, магнітний т. і. [2]. Оскільки процедура контролю стану досліджуваного об'єкта ґрунтується на вимірюванні фізичних величин, зв'язаних з параметрами руйнування. Методу НК та методу вимірювання відповідають засоби НК 8 (вихрострумові дефектоскопи; пристрої безконтактних вимірювань струмів; прилади дефектоскопії, дефектометрії, структурометрії т. і) та засоби вимірювання параметрів НДС матеріалів 9 (електромагнітні вимірювачі тріщин; магнітно-вихрострумові дефектоскопи; динамометри т. і.) адекватно до використовуваних способів і принципів вимірювання фізичних величин. Визначення параметрів НДС матеріалів передбачає: методика експериментальних досліджень, методологію вимірювання фізичних величин 10, методика виконання вимірювання (МВВ) 11 та метрологічне забезпечення 12. Особливостями моделі визначення параметрів НДС конструкційних матеріалів є системний та інформаційно-фізичний рівні її створення. За структурою модель є системною, а за змістом – інформаційно-фізичною, оскільки фізичні методи і засоби контролю та вимірювання направлені на відбір інформації від досліджуваного об'єкта, яка закладена у його власному фізичному полі, відповідно у сигналі деформації. Сама структура системної моделі визначення параметрів НДС матеріалів охоплює: елементи взаємодії об'єкта із зовнішніми фізичними полями, відповідно зміну його фізико-механічних характеристик; методологію вимірювання фізичних величин, що корелюють з параметрами руйнування матеріалу; метрологічне забезпечення (МЗ). Відомі методики механічних випробувань матеріалів, методика виконання вимірювання, методи і засоби НК та вимірювання, метрологічні підходи до оцінювання точності у проблемі визначення параметрів НДС матеріалів не взаємопов'язані єдиними вимогами щодо точності оцінювання роботоздатності металоконструкцій та елементів енергетичного обладнання. Переваги запропонованої системної моделі такі: 1) ієрархічність рівнів: модель об'єкта – підхід і критерії механіки руйнування – спосіб відбору інформації – методи і засоби НК та вимірювання – методологія вимірювання (визначення) – метрологічне забезпечення; 2) багатоаспектність: обґрунтування критеріїв вибору (створення) елементів відповідного рівня адекватно проблемно-об'єктній ситуації; 3) цілісність: формування єдиних вимог щодо узгодження методики випробувань, методики визначення параметрів НДС, методики визначення метрологічних характеристик ВК системи відбору і оброблення сигналів, які обумовлюють рівень точності та адекватності оцінювання НДС металоконструкцій.

3. Методологія вимірювання параметрів НДС матеріалів

Основою процедури контролю стану складного технічного об'єкта є процедура вимірювання фізичних величин, пов'язаних з параметрами

контролю. Основою процедури вимірювання є методологія, яка орієнтована на питання: що, як і чим вимірюємо? У цьому розумінні запропонована методологія вимірювання параметрів НДС матеріалів, яка: поєднує елементи силового підходу механіки руйнування, електричного виду НК, тензометричного методу вимірювання; узгоджує вимоги механічних випробувань та вимоги методу тензометрії; забезпечує точність відбору і оброблення сигналу деформації від циліндричного зразка. Вона відображає: модель об'єкта, модель процедури вимірювання, спосіб вимірювання, фізичний ефект відбору інформації, а відповідно і метод, обґрунтовані критерії вибору первинного вимірювального перетворювача, засіб вимірювання, алгоритм опрацювання сигналу деформації. Розглянемо деякі аспекти виконання вимірювання параметрів НДС згідно нормативного документу [13]. Процедура визначення характеристик статичної тріщиностійкості металів реалізується за допомогою: тензометричного методу; випробувально-вимірювального комплексу – експериментальної установки для механічних випробувань металевих зразків; вимірювальної інформаційної системи (ВІС) [14,15]. На рис.2 наведено структурну схему одного з тензометричних ВК для вимірювання величини деформації за силовою схемою розтягування циліндра.

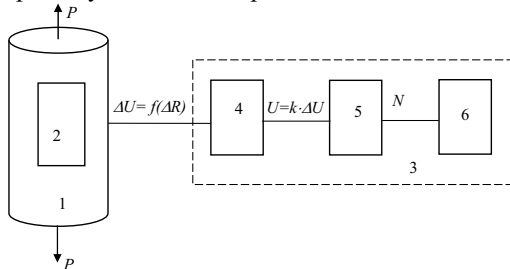


Рис. 2 Структурна схема ВК системи відбору сигналу деформації

На ОД 1 розташований тензорезистивний давач 2. ВК системи 3 складається з широкосмугового вимірювального підсилювача (ШВП) 4, аналого-цифрового перетворювача (АЦП) 5, персонального комп'ютера (ПК) 6. Вимірювання величини зусилля за деформацією матеріалів тензометричним методом охоплює такі метрологічні аспекти:

1) з метою вимірювання фізичних величин, пов'язаних з параметрами НДС певного типу матеріалу запропонована модель об'єкта – сигнал деформації за умов статичного розтягування зразка;

2) для відображення залежності між результатом вимірювання та вимірюваною величиною з врахуванням взаємодії об'єкта та засобу вимірювання розроблена модель вимірювання адекватна до моделі об'єкта, яка передбачає обґрунтування фізичного ефекту, способу, методу і засобу вимірювання;

3) в основі принципу роботи первинних вимірювальних перетворювачів

(ПВП) (або давачів) є тензоефект: зміна активного опору провідника (напівпровідника) під дією деформації ε

$$\frac{\Delta R}{R} = S_T \frac{\Delta l}{l},$$

де $\frac{\Delta R}{R}$ – відносна зміна опору провідника;

S_T – коефіцієнт тензочутливості;

$\frac{\Delta l}{l}$ – відносна деформація провідника;

4) для точного відбору інформації про НДС матеріалу необхідно застосувати критерії обґрунтованого вибору технічних і метрологічних характеристик ПВП – тензорезисторів: тип тензорезистора; схема включення для забезпечення термокомпенсації; розташування на об'єкті і технологія наклеювання; тензочутливість; плинність; механічний гістерезис; температурна нестабільність; група динамічних характеристик;

5) для визначення величин напруження σ , деформації ε використовують непрямий вид вимірювання фізичних величин – зусилля P , напруги U , які аналітично пов'язані з НДС матеріалу (згідно рис.2):

5.1) під дією зусилля P відбувається деформація мембрани давача, що викликає зміну опору ΔR мостової схеми тензорезисторів; призводить до зміни напруги ΔU на виході перетворювача (за умов: в мостовій схемі ПВП – однакові опори; тензорезистивний давач розташований поза ВК)

$$\Delta U = U_{жс} \cdot \frac{\Delta R}{4R} = \frac{1}{4} \cdot \frac{I_{жс} \cdot P}{S_T},$$

де $U_{жс}$, $I_{жс}$ – відповідно напруга і струм живлення моста;

5.2) підсилений сигнал

$$U_{ндс} = k \cdot \Delta U,$$

де k – коефіцієнт підсилення;

5.3) на виході АЦП підсилений сигнал $U_{ндс}$ перетворюється в двійковий код

$$N = \frac{k \cdot \Delta U \cdot 2^n}{U_o}, \quad N = \frac{1}{4} \cdot \frac{k \cdot I_{жс} \cdot 2^n}{S_T \cdot U_o} \cdot P,$$

де n – розрядність регістра послідовного наближення АЦП;

U_o – опорна напруга АЦП;

за результатами вимірювань отримуємо діаграму: зусилля P – напруга U ;

5.4) після закінчення процесу аналого-цифрового перетворення вся інформація про результат перетворення вхідних сигналів зберігається в пам'яті ПК, і є основою для подальшого опрацювання сигналу деформації;

5.5) алгоритмічно-програмне забезпечення системи дозволяє визначити критичне значення коефіцієнта інтенсивності напруження K_{Jc} за статичного навантаження

$$K_{Ic} = \sigma^* \sqrt{\pi l} f(\lambda),$$

де σ^* – критичне значення механічного напруження матеріалу

$$\sigma^* = \frac{P_{\max}}{S},$$

де P_{\max} – максимальне значення прикладеного зусилля,

S – площа поперечного перерізу досліджуваного зразка,

$f(\lambda)$ – безрозмірна функція, яка враховує форму і розміри зразка;

6) обґрунтований вибір методу вимірювання (сукупності способу використання, принципу і засобу вимірювання); в рамках класифікації – це метод зіставлення: метод прямого вимірювання з одноразовим порівнянням вимірюваної величини з усіма вихідними величинами багатозначної регульованої міри;

7) обґрунтований вибір способу вимірювання фізичних величин – оптимальної схеми вимірювального експерименту з метою забезпечення необхідних метрологічних характеристик;

8) для перетворення підсиленого вхідного сигналу в двійковий код використовується аналого-цифрове перетворення за методом послідовного наближення: послідовне в часі порівняння вимірюваної величини напруги U з відомою квантованою величиною U_{kv} , яка змінюється в часі стрибкоподібно за певним правилом; значення відомої величини, при якій відбувається рівність $U_{kv}(t_{вим.}) = U$ відповідає номеру відповідного рівня квантування; код N відповідає зазначеному рівню; переваги – висока швидкість і розрядність;

9) для точного знаходження вимірюваної величини зусилля, пов'язаної з деформацією використовується: тензометричний метод, схема тарування давачів навантаження (під час розтягування зразка);

10) побудова діаграми: зусилля P – розкриття вершини тріщини V і, на цій основі, визначення КІН, в залежності від довжини тріщини l реалізується за відповідним алгоритмічно-програмним забезпеченням.

З метою отримання результатів вимірювань з необхідною точністю (нормованими метрологічними характеристиками) використовується модифікована ВІС відбору і оброблення сигналів деформації [16]. В літературі [17] запропонована структура МЗ вимірювання параметрів НДС матеріалів тензометричним методом на основі: основних положень і принципів МЗ; концептуального підходу до МЗ вимірювання/ контролю, діагностування/розпізнавання; МВВ фізичних величин [5,18].

Висновок. Запропонована системна модель визначення параметрів НДС металоконструкцій має: властивість цілісності з позиції синтезу напрямків і методів дослідження; властивість модифікації з позиції критеріїв руйнування матеріалів, що трансформує її в ієрархію комплексних моделей технічного діагностування, зберігаючи при цьому метрологічну узгодженість методики механічних випробувань і методики визначення параметрів НДС металу та їх оцінювання; підґрунтя для створення методики оцінювання залишкового ресурсу потенційно-небезпечних об'єктів у різних сферах.

1. Панасюк В.В., Андрейкив А.Е., Ковчик С.Е. Методы оценки трещиностойкости конструкционных материалов. – Киев: Наук. Думка, 1977. – 280 с.
2. *Механика разрушения и прочность материалов*: Справ. пособие: В 4-х т./ Под общ. ред. В.В. Панасюка. – Киев: Наук. думка, 1988 – 1990.
3. *Неразрушающий контроль и диагностика*: Справочник / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, В.Н. Филинов и др.; Под ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1995. – 448 с.
4. Лисак М.В., Сокальський В.Р. Методичний підхід для експериментальної акустико-емісійної оцінки тріщинотривкості конструкційних матеріалів // Фізико-хімічна механіка руйнування. – № 5. – 1997. – С. 17 – 30.
5. *Механіка руйнування і міцність матеріалів*. Довідниковий посібник. За заг. ред. В.В.Панасюка. Т. 5: Неруйнівний контроль і технічна діагностика / Під. ред. З.Т. Назарчука. – Львів: ФМІ, 2001. – 1134 с.
6. *Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд і машин* // Збірник наукових праць за результатами, отриманими у 2007 – 2009 рр. – Київ: Інститут електростроювання ім. О.Є. Патона НАН України, 2009. – 709 с.
7. *ГОСТ Р 52330-2005*. Контроль неразрушающий. Контроль напряженно-деформированного состояния объектов промышленности и транспорта. Общие требования.
8. Дубов А.А., Дубов Ал.Ан., Колокольников С.М. Метод магнитной памяти и приборы контроля. – М.: ЗАО “Тиссо”, 2006. – 332 с.
9. Панасюк В.В., Іваницький Я.Л., Максименко О.П. Аналіз пружно-пластичного деформування матеріалу зони передруйнування // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – №5. – 2004. – С. 67 – 72.
10. Штаюра С. Т., Костів Р. Б., Ленковський Т. М. Вплив водню на міцність матеріалів за різних макромеханізмів поширення тріщини // Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів: В 2-х т./ Львів: ФМІ НАНУ. – 2010. – Т.1. – С. 106 – 110.
11. Сікора Л.С. Лазерні інформаційно-вимірювальні системи для управління технологічними процесами. Частина 2. Системологія прийняття рішень в складних технологічних структурах / Сікора Л.С. – Львів: Каменяр, 1998. – 453 с.
12. *ДСТУ 2865-94*. Контроль неруйнівний. Терміни та визначення.
13. *ГОСТ 8.010-99. ГСИ*. Методика выполнения измерений. Основные положения.
14. *ГОСТ 25. 506-85*. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении.
15. *Р 50-54-45-88*. Расчеты и испытания на прочность. Экспериментальные методы определения напряженно-деформированного состояния элементов машин и конструкций. Метод натурной тензометрии энергетического оборудования.
16. *ДСТУ 4675: 2006*. Розрахунки і випробування на міцність. Методика визначення характеристик динамічної тріщиностійкості металів за нормального відриву за температури від мінус 196° С до 400° С.
17. Іваницький Я. В., Штаюра С. Т., Микитин Г. В., Дмитрів З. В. Метрологічне забезпечення вимірювання параметрів напружено-деформованого стану матеріалів тензометричним методом // Матеріали 15-ої Міжнародної конференції “Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів”. – Славське, 15-20 лютого 2010. – С. 93 – 94.
18. Микитин Г. В. Основи метрології: Навчальний посібник. – Львів: СПОЛОМ, 2008. – 296 с.

Поступила 15.09.2010р.