

Invenția se referă la tehnica de măsurare, în special la extensometrie, și poate fi utilizată pentru măsurarea deformațiilor corpurilor solide supuse la întindere, inclusiv celor ireversibile, de exemplu deformațiilor reziduale critice în recipientele sub presiune, în particular în cilindrii de compozit de înaltă presiune.

Este cunoscut un senzor pentru măsurarea deformării corpurilor solide, de tip extensometru rezistiv, care conține un corp, o bază, un element elastic realizat în forma unei grinzi de îndoire, fixată pe bază de ambele părți, și elemente sensibile la deformare cu contacte [1].

Soluția cunoscută, având elementele sensibile formate pe grinda de îndoire, conduce la reducerea dimensiunilor extensometrului. Totuși, deoarece elementele sensibile sunt conectate în forma unei punți Wheatstone, este necesară asigurarea contactului fizic între corp/senzor și echipamentul de monitorizare, tensosensibilitatea senzorului fiind relativ redusă.

Cel mai apropiat după esența tehnică de dispozitivul propus este un senzor de tensiune/deformare, în care este prezentată o metodă și aparatură de detectare a tensiunii (deformării) și care permite măsurători de stres, vibrații și alte sarcini impuse unui corp, fără contact fizic între corp/senzor și echipamentul de monitorizare. Soluția presupune instalarea pe un corp solid a unui extensometru caracterizat printr-o dependență neliniară curent-tensiune, care variază în funcție de solicitarea (deformarea) aplicată unui astfel de corp. Extensometrul conține un fir acoperit cu o peliculă magnetostrictivă și, de asemenea, mai conține cel puțin o buclă de inducție conectată operativ la fiecare dintre cele două capete ale firului. Un dispozitiv de excitare (bobină) este folosit pentru a induce un răspuns AC în senzor. Răspunsul neliniar la curentul indus este citit de un dispozitiv de detectare, cum ar fi o bobină de detectare. Dispozitivul de excitare și dispozitivul de detectare sunt situate în imediata apropiere a senzorului [2].

Senzorul și metoda de măsurare menționate au o gamă foarte limitată de utilizări, deoarece dispozitivele de excitare și detectare trebuie să fie situate în imediata apropiere a senzorului. Îndepărtarea acestor dispozitive de la senzor chiar și pentru o distanță foarte scurtă, precum și, chiar și o ușoară modificare a poziției dispozitivelor de excitare și detectare față de senzor, duce la o eroare mare în măsurarea deformației, deoarece semnalul util de la elementul sensibil este prea slab pentru a fi detectat la distanță. Totodată, senzorul este dificil de fabricat și de instalat pe obiectul de testat, iar rezultatele măsurătorilor depind în mare măsură de temperatura mediului de operare.

Problema pe care o rezolvă invenția constă în măsurarea deformațiilor corpurilor solide prin detectarea modificării caracteristicilor magnetice ale materialelor supuse deformării, reducerea restricțiilor privind distanța și poziționarea (plasarea) dispozitivului de excitare și detectare față de firul sensibil al senzorului, majorarea sensibilității acestuia, reducerea erorilor de măsurare prin compensarea dependenței de temperatură și extinderea intervalului temperaturilor de lucru.

Senzorul de deformare fără contact, conform invenției, înlătură dezavantajele menționate mai sus prin aceea că conține cel puțin două segmente de microfir cu înveliș de sticlă, miezurile cărora sunt executate din aliaje feromagnetice cu structură amorfă, care posedă un comportament bistabil la remagnetizare, totodată un segment de microfir este utilizat în calitate de fir sensibil, executat dintr-un aliaj cu temperatura Curie înaltă și magnetostricție ridicată, iar cel puțin un alt segment de microfir este utilizat în calitate de fir de referință, executat dintr-un aliaj cu temperatura Curie joasă și magnetostricție aproape de zero, de asemenea, firele sunt executate cu posibilitatea inducerii de la distanță în acestea a impulsurilor electromagnetice prin aplicarea unui câmp magnetic alternativ generat de un curent sinusoidal de la un dispozitiv de excitare și detectare a impulsurilor electromagnetice induse la remagnetizarea firelor pentru determinarea mărimii deformației.

Temperatura Curie a firului de referință poate fi cu 10...15% mai mare decât temperatura maximă a intervalului de lucru al senzorului. Temperatura Curie a firului sensibil poate fi semnificativ mai mare decât cea a firului de referință. În cazul în care senzorul include cel puțin două fire de referință, aliajele din care sunt executate acestea pot fi selectate astfel încât temperatura Curie a fiecăruia să fie diferită.

Rezultatul tehnic al invenției constă în următoarele:

- reducerea dependenței rezultatelor măsurătorilor de distanță și poziționare față de dispozitivul de detectare prin utilizarea a cel puțin două segmente de microfir - unul în calitate de fir sensibil, iar altul în calitate de fir de referință, respectiv prin compararea semnalelor de răspuns la remagnetizarea segmentelor de microfir, astfel încât raportul care rezultă nu depinde de distanță și poziționare, dar este în corelație cu modificarea caracteristicilor magnetice ale buclei de histerezis la deformare;
- creșterea distanței de detectare fiabilă a deformării prin realizarea segmentelor de microfir din aliaje feromagnetice cu structură amorfă și comportament bistabil la remagnetizare, fapt care permite inducerea unor impulsuri electromagnetice scurte de o amplitudine suficientă pentru a fi detectate la o distanță relativ mare;
- creșterea tensosensibilității prin alegerea și fabricarea firului sensibil din aliaje cu o magnetostricție ridicată, firul sensibil fiind supus suplimentar unui tratament termomecanic;
- reducerea erorilor de măsurare prin alegerea și fabricarea firului de referință din aliaje cu temperatura Curie mai mică decât temperatura Curie a firului sensibil, fapt care permite compensarea dependenței de temperatură a mediului ambiant;
- extinderea intervalului temperaturilor de lucru prin utilizarea a cel puțin două fire de referință, care au temperatura Curie diferită, selectată astfel încât compensarea dependenței de temperatură să fie posibilă într-un interval mult mai larg de temperatură a mediului ambiant.

Invenția se explică prin desenele din fig. 1-5, care reprezintă:

- fig. 1, structura schematică a senzorului de deformare fără contact;
- fig. 2, secvența impulsurilor de răspuns la remagnetizarea a două fire;
- fig. 3, ciclul de histerezis la remagnetizarea a două fire;
- fig. 4, dependența ariei buclei de histerezis de deformația firului sensibil;
- fig. 5, aria buclei de histerezis a unui fir de referință în funcție de temperatură.

Senzorul de deformare fără contact (fig. 1) conține cel puțin două segmente de microfir cu înveliș de sticlă 2 și 3, realizate pe bază de aliaje feromagnetice cu structură amorfă și montate pe suprafața unui corp solid 1. Un segment de microfir este utilizat în calitate de fir sensibil 2, iar cel puțin un alt segment de microfir este utilizat în calitate de fir de referință 3. Firul sensibil 2 este realizat pe bază de aliaj cu o magnetostricție pozitivă ridicată, iar firul de referință 3 - pe bază de aliaj cu o magnetostricție aproape de zero. Un dispozitiv de excitație și detectare 4 este utilizat pentru inducerea impulsurilor electromagnetice prin aplicarea unui câmp magnetic extern produs de un curent alternativ sinusoidal 9 (fig. 2) și, corespunzător, pentru detectarea impulsurilor electromagnetice 5 și 7 induse la remagnetizarea firului de referință 3, respectiv a impulsurilor electromagnetice 6 și 8 induse la remagnetizarea firului sensibil 2 (fig. 2).

Senzorul de deformare fără contact funcționează în modul următor.

La baza funcționării senzorului stă aplicarea unui câmp magnetic extern și analiza răspunsului sistemului la câmpul magnetic aplicat. Analiza necesară se bazează pe metoda de comparare a răspunsului magnetic al materialului realizat în forma unor segmente de microfir (US 8258441 B2 2012.09.04; US 9212955 B2 2015.12.15). Utilizarea firului de referință 3 și metodei respective de comparare a răspunsului magnetic permite rezolvarea problemei dependenței pronunțate a rezultatelor măsurărilor deformării de distanță și poziționare față de dispozitivul de excitație și detectare 4.

La apropierea dispozitivului de excitație și detectare 4 de corpul solid 1, pe care este fixat senzorul, asupra firului sensibil 2 și firului de referință 3, situate aproape unul de celălalt, acționează câmpul magnetic generat de curentul alternativ sinusoidal 9. Datorită comportamentului bistabil la remagnetizare răspunsul magnetic al senzorului se caracterizează printr-un salt gigant Barkhausen, fapt care permite inducerea impulsurilor electromagnetice scurte 5...8. Impulsurile 5 și 7 induse la remagnetizarea firului de referință 3, respectiv, impulsurile 6 și 8 induse la remagnetizarea firului sensibil 2 sunt de o amplitudine suficientă pentru a fi detectate de către dispozitivul de excitație și detectare 4, începând de la o anumită distanță. Răspunsul magnetic al senzorului la câmpul magnetic alternativ aplicat depinde de deformația la întindere. Altfel spus, modificarea caracteristicilor magnetice ale buclei de histerezis (fig. 3) este în corelație cu deformația la care este supus materialul magnetic. În cazul firului sensibil 2,

care este realizat din aliaje cu o magnetostricție ridicată, aria buclei de histerezis, respectiv forța coercitivă H_C^{SW}

cresc odată cu deformația la întindere. Totodată, aria buclei de histerezis, respectiv forța coercitivă H_C^{RW} a firului de referință 3, care este realizat din aliaje cu o magnetostricție aproape de zero, nu depinde de deformația la întindere. Deci, răspunsul magnetic al senzorului poate fi determinat prin detectarea impulsurilor electromagnetice 5...8 (fig. 2) induse la remagnetizarea prin salt gigant Barkhausen și calcularea valorii numerice a raportului dintre aria buclei de histerezis a firului sensibil 2 și aria buclei de histerezis a firului de referință 3. Valoarea care rezultă trebuie recalculată în funcție de coeficientul sensibilității la întindere a firului sensibil 2 cu un algoritm încorporat pe o unitate de procesare a semnalelor. Rezultatul obținut în urma calculelor va reprezenta mărimea deformației, care nu depinde de distanța față de dispozitivul de excitație și detectare 4. Astfel, aplicând metoda de comparare a caracteristicilor magnetice ale buclelor de histerezis a firului sensibil 2 și firului de referință 3, poate fi determinată mărimea deformației corpului solid 1.

Exemplu

Senzorul poate fi utilizat pentru măsurarea deformațiilor corpurilor 1 supuse la întindere, cum ar fi, de exemplu, detectarea deformațiilor critice în cilindrii de compozit de înaltă presiune. În acest caz, senzorul poate fi fixat pe căptușeala interioară a unui balon de compozit de înaltă presiune, iar dispozitivul de excitație și detectare 4 poate semnala o eventuală stare de deformare prin scanare localizată pe suprafața cilindrului de compozit. Trebuie de menționat că senzorul de deformare fără contact este simplu și poate fi ușor montat pe suprafața corpului solid 1, în exemplul dat pe căptușeala interioară a balonului, datorită faptului că două sau mai multe segmente de microfir 2 și 3 sunt situate aproape unele de altele și pot fi integrate în tehnologia existentă de fabricare a cilindrilor de compozit de înaltă presiune.

Deoarece firul de referință 3 și firul sensibil 2 sunt realizate din aliaje feromagnetice cu structură amorfă și comportament bistabil la remagnetizare, procesul de remagnetizare a firelor are loc printr-un salt gigant Barkhausen, fapt care permite inducerea unor impulsuri electromagnetice scurte de o amplitudine mare. Datorită acestui fapt impulsurile 5...8 (fig. 2) induse la remagnetizare au o amplitudine suficientă pentru a fi detectate la o distanță relativ mare, astfel fiind posibilă creșterea distanței de detectare fiabilă a deformației.

În fază primară firul sensibil 2 este realizat din aliaje cu o magnetostricție ridicată, fiind fabricat conform tehnologiei standard după metoda Taylor-Ulitovski. Sensibilitatea la deformare (întindere) a firului sensibil 2, obținut în faza de tragere conform tehnologiei standard, este prezentată cu o linie întreruptă în fig. 4. În această fază valoarea tensosensibilității este situată în intervalul 200...400. Ulterior, în faza a doua, firul sensibil 2 este supus unui tratament termomecanic, în urma căruia coeficientul tensosensibilității poate atinge valori de circa 40000, mult peste

cele existente. Variația tensosensibilității firului sensibil 2 după aplicarea tratamentului termomecanic este ilustrată cu o linie continuă în fig. 4.

Datorită realizării firului de referință 3 din aliaje cu temperatura Curie mai mică decât temperatura Curie a firului sensibil 2 devine posibilă reducerea erorii de măsurare a deformării prin compensarea dependenței de temperatură a mediului ambiant. Astfel, în intervalul temperaturilor de lucru de la T_1 până la T_2 , odată cu creșterea temperaturii mediului ambiant, momentul magnetic, respectiv aria buclei de histerezis a firului de referință 3 se micșorează datorită apropierii de temperatura Curie T_k (fig. 5). Totodată, creșterea temperaturii mediului ambiant nu influențează în același fel caracteristicile firului sensibil 2, care este realizat din aliaje cu temperatura Curie semnificativ mai mare și cu o magnetostricție ridicată. Anume, în intervalul temperaturilor de lucru al senzorului, odată cu creșterea temperaturii mediului, scade tensiunea mecanică exercitată de învelișul de sticlă pe interiorul firului sensibil 2, fapt care contribuie la micșorarea ariei buclei de histerezis a firului sensibil 2. Deci, în intervalul temperaturilor de lucru de la T_1 până la T_2 , odată cu creșterea temperaturii, se constată, din două cauze diferite, micșorarea simultană a ariei buclei de histerezis SH a firului sensibil 2, respectiv, a firului de referință 3. De unde rezultă că raportul dintre aria buclei de histerezis a firului sensibil 2 și aria buclei de histerezis a firului de referință 3 se menține aproximativ constant, fapt care conduce la reducerea erorilor de măsurare prin compensarea reciprocă a dependenței de temperatură a mediului ambiant. Datorită utilizării a două sau mai multe fire de referință 3 din aliaje cu temperatura Curie diferită și prin selectarea lor astfel încât dependența de temperatură să fie compensată pe două sau mai multe intervale aflate în vecinătate, are loc extinderea intervalului temperaturilor de lucru al senzorului. Calcularea valorii numerice a raportului dintre aria buclei de histerezis a firului sensibil 2 și aria buclei de histerezis a firului de referință 3, respectiv ajustările pentru compensarea reciprocă a dependenței de temperatură și extinderea intervalului temperaturilor de lucru al senzorului pot fi realizate pe o unitate de procesare cu încorporarea unui algoritm corespunzător.

Astfel, soluția tehnică propusă permite măsurarea deformațiilor corpurilor prin detectarea modificării caracteristicilor magnetice ale materialelor supuse deformării, asigurând reducerea restricțiilor privind distanța și plasarea dispozitivului de excitație și detectare față de firul sensibil al senzorului, creșterea sensibilității acestuia, reducerea erorilor de măsurare prin compensarea dependenței de temperatură și extinderea intervalului temperaturilor de lucru.