

VALUTAZIONE DELL'INTEGRITÀ STRUTTURALE: UN APPROCCIO SPERIMENTALE CON TECNICHE ACUSTOELASTICHE

Vangi Dario

*Dipartimento di Meccanica e Tecnologie Industriali, Università di Firenze
Via di S. Marta, 3 – 50139 Firenze
e-mail: vangi@dmf.unifi.it*

Sommario

Viene presentata una attività volta allo sviluppo di una tecnica ultrasonora innovativa che utilizzando il fenomeno della acustoelasticità, permette di “misurare” direttamente il fattore di intensificazione delle tensioni.

In una struttura in esercizio, la presenza di un difetto porta ad una distorsione del campo di tensione il cui livello dipende dai carichi applicati, dalla posizione, tipo e geometria del difetto. Poiché la velocità di propagazione degli ultrasuoni dipende dallo stato di tensione presente nel mezzo, attraverso una mappatura del tempo di volo è possibile ottenere una mappa dello stato di tensione nel componente e calcolare direttamente i fattori K_I e K_{II} di intensificazione delle tensioni. I fattori così valutati risultano essere quelli dovuti al difetto reale e allo stato di tensione effettivamente presente sul componente. Attraverso una valutazione completamente sperimentale del K si elimina quindi la necessità di ricondurre la geometria del difetto ad uno schema necessariamente semplificato e non si ha la necessità di valutare lo stato di tensione esistente. Viene riportato un esempio applicativo effettuato su un provino con una cricca di fatica.

Abstract

This paper describe an ultrasonic approach for experimental structural integrity evaluation. The method is based on acoustoelasticity effect and allows a direct measure of stress intensity factor K . The presence of a defect in the structure modifies the stress field; the ultrasonic propagation velocity is dependent of stress level and then mapping the sound velocity around the defect is equivalent to mapping the stress field and allows to compute the stress intensity factor K_I and K_{II} . In the paper an

application test is presented. The result achieved shows that the ultrasonic method proposed is suitable for application in automated system for ultrasonic inspection.

1. Introduzione

Nel lavoro viene presentato un approccio completamente sperimentale per la valutazione dell'integrità strutturale su componenti o strutture. L'approccio è basato sulla misura, con tecniche ultrasonore, degli effetti indotti dalla presenza di difetti all'interno della struttura sul campo di tensione locale. L'effetto su cui si basa la è quello acustoelastico, che lega la velocità di propagazione degli ultrasuoni all'entità dello stato di tensione presente [1-3].

Numerosi ricercatori hanno utilizzato l'effetto acustoelastico per la misura di stati di tensione [4-11], utilizzando diverse tecniche di ispezione, diversi tipi di onde e diversi tipi di trasduttori, piezoelettrici e elettromagnetici. Per l'approccio presentato sono state considerate le onde longitudinali in quanto presentano diversi vantaggi rispetto alle onde trasversali o alle superficiali [12-15]: soprattutto risposta più marcata (costante acustoelastica più elevata nei materiali di interesse ingegneristico) e maggiore facilità di accoppiamento acustico col materiale da ispezionare. Inoltre l'uso di tali onde con tecnica in riflessione consente di effettuare una ispezione puntuale determinando la somma delle componenti di tensione nel piano, anche in zone a forte gradiente di tensione come quella presente all'intorno di un difetto.

Considerando un sistema di riferimento con l'asse z perpendicolare alla superficie del componente e facendo propagare un fascio di onde ultrasonore longitudinali lungo la direzione z , dalla formulazione di Hughes e Kelly [1] e si ottiene:

$$\frac{V - V_0}{V_0} = A_{//} \mathbf{s}_z + A_{\perp} (\mathbf{s}_x + \mathbf{s}_y) \quad (1)$$

che esprime la variazione della velocità V di propagazione dell'onda a seguito dell'applicazione di un generico stato di sollecitazione, avendo indicato con V_0 la velocità di propagazione in assenza di tensioni e con $A_{//}$ e A_{\perp} le costanti acustoelastiche. Tali costanti possono essere ricavate facendo propagare in un provino soggetto a tensione monoassiale il fascio ultrasonoro in direzione parallela (“//”) e perpendicolare (“ \perp ”) alla direzione della tensione.

Le tensioni indicate rappresentano i valori di tensione mediati lungo tutto il percorso dell'onda nel materiale. Nella maggior parte dei casi si ha che la tensione \mathbf{s}_z ha media nulla lungo lo spessore del componente mentre sono presenti una o ambedue le componenti nel piano:

$$\mathbf{s}_z \approx 0 \quad \text{e} \quad \mathbf{s}_x + \mathbf{s}_y = \mathbf{s}_I + \mathbf{s}_{II} \neq 0$$

Quindi in generale si avrà bisogno della sola costante A_{\perp} :

$$\frac{V - V_0}{V_0} = A_{\perp} (\mathbf{s}_x + \mathbf{s}_y) \quad (2)$$

La variazione di velocità dell'onda può essere misurata attraverso la misura della variazione di tempo di volo dell'onda Tof , noto lo spessore h del pezzo. Poiché le variazioni di velocità a seguito delle variazioni di tensione sono dell'ordine di pochi m/s risulta necessario considerare che anche lo spessore è funzione dello stato di tensione:

$$h = h_0 \left[1 - \frac{\mathbf{n}}{E} \cdot (\mathbf{s}_x + \mathbf{s}_y) \right] \quad (3)$$

Sviluppando in serie di Taylor l'espressione relativa alla variazione di tempo di volo e ritenendo solo i termini di primo ordine si ottiene un legame diretto tra variazione relativa dei tempi di volo e somma delle tensioni nel piano:

$$\frac{\Delta tof}{tof_0} = A'_\perp \cdot (\mathbf{s}_x + \mathbf{s}_y) \quad (4)$$

avendo posto

$$A'_\perp = \left(\frac{\mathbf{n}}{E} + A_\perp \right) \quad (5)$$

In presenza di un difetto lo stato di tensione locale è governato dalla singolarità [16] e per un generico stato di tensione ed orientazione del difetto si può scrivere:

$$(\mathbf{s}_x + \mathbf{s}_y) = \frac{2}{\sqrt{2}r} [K_I \cos(\mathbf{J}/2) - K_{II} \sin(\mathbf{J}/2)] \quad (6)$$

dove K_I e K_{II} sono i fattori di intensificazione delle tensioni per modo I e modo II rispettivamente, r e \mathbf{q} sono la distanza e l'angolo in coordinate polari del punto considerato rispetto all'apice del difetto. Combinando quest'ultima equazione con la (4) si ottiene:

$$\frac{\Delta tof}{A'_\perp tof_0} = \frac{2}{\sqrt{2}r} [K_I \cos(\mathbf{J}/2) - K_{II} \sin(\mathbf{J}/2)] \quad (7)$$

Dall'ispezione ultrasonora si ottengono i valori della somma delle tensioni in vari punti attorno al difetto. Individuando il punto di massimo $\mathbf{D}of$ e assunto questo come punto corrispondente all'apice del difetto, si può, effettuando almeno tre misure indipendenti in punti differenti, ricavare i valori incogniti K_I e K_{II} e \mathbf{q} . In generale è tuttavia conveniente effettuare numerose misure in punti differenti e ricavare le incognite attraverso la risoluzione ai minimi quadrati del sistema di equazioni (di tipo non lineare) ottenute. E' possibile, nel caso in cui l'apice del difetto non sia facilmente identificabile, considerare anche r come variabile.

2. Esempio applicativo

Per la validazione dell'approccio è stato considerato il caso di un provino rettangolare in lega di alluminio con modulo di Young $E = 70000$ MPa, rapporto di Poisson $\nu = 0.34$, tensione di snervamento $\sigma_y = 97$ MPa, con dimensioni: spessore 8 mm, larghezza 70 mm, lunghezza utile 150 mm.

Il valore della costante acustoelastica A^* è stato determinato con una prova di calibrazione effettuata sottoponendo il provino a vari livelli di tensione monoassiale e misurando il tempo di volo ad ogni livello di tensione raggiunta. Dalla (4), con $\sigma_y = 0$ è stato quindi ricavato il valore di $A^* = 6.97E-12$ m²/N. Tale valore risulta in buon accordo con quello reperibile in letteratura [15] per leghe di alluminio B53S pari a $6.08E-12$ m²/N.

Dato il piccolo valore della costante acustoelastica, le variazioni di velocità ultrasonora per stati di tensione inferiori allo snervamento sono dell'ordine di pochi m/s e le corrispondenti variazioni di tempo di volo, su spessori di materiale di pochi mm, risulta dell'ordine di poche decine di ns. Questo impone una particolare attenzione alle procedure per la misura del tempo di volo, sia numeriche che sperimentali, legate queste ultime alle variabilità tra una misura e l'altra dell'accoppiamento acustico tra sonda e materiale. Per minimizzare tali effetti le prove sono state effettuate disponendo il provino in una vasca con acqua e con una attrezzatura in grado di fornire il carico in queste condizioni, ed utilizzando un robot cartesiano per la movimentazione e posizionamento della sonda ultrasonora. Ciò ha permesso di effettuare le misure di tempo di volo ultrasonore in riflessione con tecnica in immersione, minimizzando gli errori dovuti all'accoppiamento acustico. Inoltre sono stati considerati gli echi relativi a riflessioni multiple all'interno del materiale al fine di aumentare virtualmente lo spessore del provino, aumentando la distanza percorsa dalle onde ultrasonore. In figura 1 è riportata una immagine della attrezzatura utilizzata.

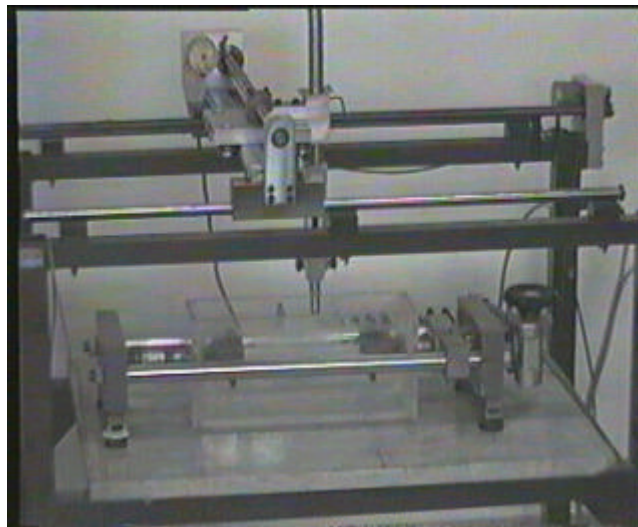


Figura 1

Immagine del robot cartesiano, della vasca e della attrezzatura per caricare il provino.

Successivamente su tale provino, a partire da un foro centrale di diametro 30 mm sono state fatte propagare per fatica due cricche in posizione diametralmente opposte, di lunghezza pari a 3.5 mm. Quando tale provino viene ad essere caricato longitudinalmente, nell'intorno della cricca si ha un campo di tensione praticamente biassiale provocato dalla sollecitazione del difetto secondo il modo I, e descrivibile con una espressione teorica del K [17]:

$$K_I = \beta s_n \sqrt{p_i} \quad ; \quad K_{II} = 0 \quad (8)$$

Dato il valore del rapporto $a/D = 0.117$ dove a è la dimensione della cricca e D il diametro del foro, si assume $\beta = 2.4$. Il valore così calcolato viene utilizzato per un confronto sul valore stimato con la tecnica ultrasonora.

Le misure di tempo di volo sono state effettuate in 16 punti nell'intorno dell'apice della cricca, secondo una griglia come mostrato in figura 2, sottoponendo il provino a vari livelli di carico, fino ad una tensione nominale massima di 21 MPa. Non sono state effettuate misure nelle immediate vicinanze dell'apice in quanto in tali punti non si otteneva un eco dell'onda riflessa sufficientemente accurato.

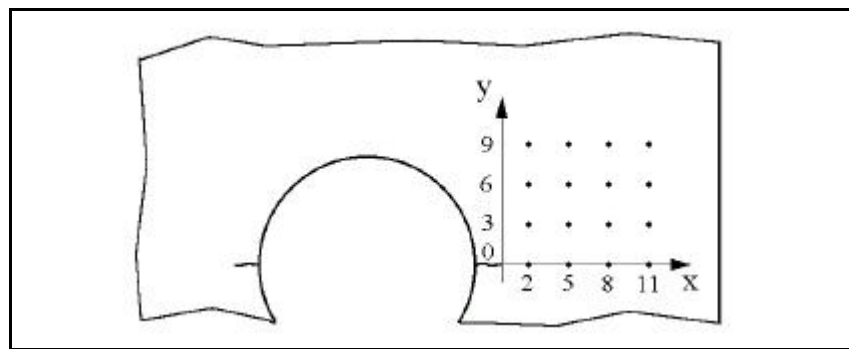


Figura 2

Schema del provino con la posizione dei punti di misura a partire dall'apice della cricca.

In figura 3 è riportato un confronto tra l'andamento della somma delle tensioni in funzione della distanza dall'apice della cricca, nella direzione X, misurato e quello valutato con la (6) e la (8).

Utilizzando tutte le misure eseguite, considerando nota la posizione dell'apice della cricca e quindi r nota, sono state ottenute 16 equazioni del tipo (6), le quali risolte ai minimi quadrati hanno fornito i valori: $K_I = 169.5 \text{ MPa}\cdot\text{mm}^{1/2}$ e $K_{II} = 9.3 \text{ MPa}\cdot\text{mm}^{1/2}$.

I valori teorici di confronto, valutati con la (8) per una tensione nominale di 21 MPa forniscono: $K_I = 167.1 \text{ MPa}\cdot\text{mm}^{1/2}$ e $K_{II} = 0 \text{ MPa}\cdot\text{mm}^{1/2}$. L'accordo tra dati teorici e sperimentali confermando la validità dell'approccio seguito.

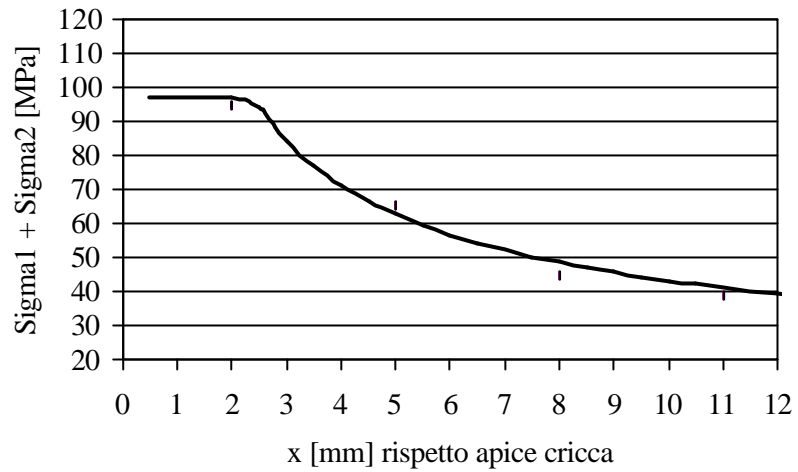


Figura 3

Confronto tra andamento teorico (linea continua) e sperimentale delle tensioni in funzione della distanza x dall'apice della cricca.

Considerando invece r incognita la precisione nella valutazione del K diminuisce rimanendo però su errori inferiori al 10% rispetto al valore teorico di riferimento.

3. Approccio ultrasonoro per la valutazione della integrità strutturale

La tecnica descritta ed i risultati presentati sono esemplificativi per un nuovo approccio completamente sperimentale per la valutazione dell'integrità strutturale. L'approccio classico per la valutazione della integrità strutturale si compone di due momenti, l'ispezione della struttura con tecniche non distruttive che, individuato il difetto, fornisce una caratterizzazione geometrica del difetto (detection, location, sizing) e un momento di analisi e decisionale, che fornisce l'accettabilità o meno del difetto a seguito di confronto con normative o di calcolo sulla sua pericolosità con strumenti propri della meccanica della frattura.

L'approccio proposto prevede invece un momento ispettivo che si limita alla detection del difetto e una successiva ispezione locale nell'intorno del difetto volta alla caratterizzazione non della geometria del difetto ma della distorsione del campo di tensione dovuta al difetto stesso quando sulla struttura agisce un determinato sistema di carichi esterni. Tale ispezione avviene sempre con tecniche ultrasonore, misurando l'entità dell'effetto acustoelastico generato dalla variazione del livello di tensione nell'intorno del difetto. Risultato di tale ispezione è il valore dei fattori K_I e K_{II} di intensificazione delle tensioni a cui segue quindi la valutazione di un indice di pericolosità del difetto. Tale approccio non necessita della conoscenza delle dimensioni geometriche del difetto, delle sue coordinate rispetto alla struttura e dello stato di sollecitazione nella zona del difetto.

La integrità strutturale viene valutata quindi senza necessità di schematizzare il difetto riconducendolo a modelli e geometrie tabulate e schematizzando uno stato di tensione nominale ma in modo diretto considerando la geometria, l'orientazione e posizione del difetto reale e lo stato di tensione.

Dal punto di vista operativo tale approccio si presta ad essere utilizzato in congiunzione con i sistemi automatizzati di ispezione ultrasonora classici che producono una mappatura p-scan del componente, in quanto la catena di misura rimane essenzialmente la stessa. In tal caso, data la maggior risoluzione, devono essere inserite tra le sonde dell'array del sistema automatico, sonde ad alta frequenza (>10 MHz). E' possibile quindi programmare il sistema per effettuare una scansione a griglia con passo fine nell'intorno del difetto individuato ed elaborare i dati con un algoritmo dedicato.

4. Conclusioni

Viene presentato un approccio per la valutazione completamente sperimentale dell'integrità strutturale. Tale approccio, piuttosto che sulla caratterizzazione geometrica del difetto, è basato sulla misura dell'alterazione del campo di tensione provocato dalla presenza di un difetto in una struttura. Quindi la sequenza tradizionale della valutazione di integrità, basata sull'ispezione prima e sull'assessment numerico poi viene modificata in una prima ispezione in cui è sufficiente la detection del difetto ed in una seconda ispezione attorno alla zona del difetto che mappa direttamente la distorsione del campo di tensione. Tale misura è resa possibile dalla correlazione esistente tra velocità di propagazione delle onde ultrasonore all'interno del mezzo e livello dello stato di tensione presente. Dalla misura dei tempi di propagazione delle onde all'interno del materiale si ricava direttamente il valore di K_I e K_{II} , fattori di intensificazione delle tensioni e quindi una valutazione dell'integrità della struttura.

Tale approccio utilizza una catena di misura tipica dei controlli non distruttivi ad ultrasuoni classici e risulta facilmente implementabile su sistemi automatizzati di controllo ultrasonoro.

Bibliografia

- [1] Hughes D.S., Kelly J.L. “*Second-Order Elastic Deformation of Solids*” Physical Review, **92**, no. 5, 1145-1149, **1953**.
- [2] Thurston R. N., Brugger K. “*Third-Order Elastic Constants and the Velocity of small Amplitude Elastic Waves in Homogeneously Stressed Media*” Physical Review, **133**, no 6A, A1604 – A1610, **1964**.
- [3] Brugger K. “*Thermodynamic Definition of Higher Order Elastic Coefficients*” Physical Review, **133**, n. 6A, A1611-A1612, **1964**
- [4] Luthi T. “*Determination of Biaxial and Triaxial Stress Distributions Using Ultrasonics*” NDT International, **3**, n. 6, 351-356, **1990**.
- [5] Kino G. S., Hunter J. B., Johnson G. C., Selfridge A. R., Barnett D. M., Hermann G., Steele C. R. “*Acoustoelastic Imaging of Stress Fields*” J. Appl. Phys. **50**, 2607-2613, **1979**
- [6] Schramm R. E., Clark A.V., Szelazek J. “*Safety Assessment of Railroad Wheels by residual Stress Measurements*” SPIE, **2458**, 97-109, **1997**
- [7] Clark Jr A.V., “*Determination of Stresses in Slightly Orthotropic Plates Using Off-axis Horizontally Polarized Ultrasonic Shear Waves*” Ultrasonics, 249-255, **1983**
- [8] Clark Jr A.V., Moulder J. C. “*Residual Stress Determination in Aluminium Using Electromagnetic Acoustic Transducers*” Ultrasonics, 253-259, **1985**
- [9] Cunningham B, Holt A. C., Johnson G. C., “*Sensitivity of an ultrasonic technique for axial stress determination*” Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation Vol. 7B, Plenum Press, New York, 1405 – 1412, **1988**
- [10] King R. B., Fortunko C. M. “*Determination of In-plane Residual Stress States in Plates Using Horizontally Polarized Shear Waves*” J. Appl. Phys. **54**, 3027-3035, **1983**
- [11] Vangi D. “*Uso degli ultrasuoni per la misura di stati di tensione monoassiale di origine termica*” atti del XXVII convegno AIAS, Perugia **1998**
- [12] Sato H., Kolosov O. V., Nagata Y., Koda T., Yamanaka K. “*Acoustoelastic Imaging of Plate Thickness and Sound Velocity During Tensile Testing at Low Temperature*” Jpn. J. Appl. Phys. **33**, 6373-6378, **1994**
- [13] Leon-Salamanca T., Bray D.F. “*Residual Stress Measurement in Steel Plates and Welds Using Critically Refracted Longitudinal (Lcr) Waves*” Res. Nondestr. Eval. **7**, 169-184, **1996**
- [14] Tanala E., Bourse G., Fremiot M., De Belleval J. F. “*Determination of Near Surface Residual Stress on Welded Joints Using Ultrasonics Methods*” ,NDT&International, **28**, No. 2, 83-88, **1995**
- [15] Szilard J. “*Ultrasonic Testing, non-conventional testing techniques*”, Wiley & Sons Ltd, **1982**
- [16] Broek D., “*Elementary engineering fracture mechanics* “, Dordrecht [etc.], Nijhoff, **1987**.
- [17] Anderson T.L., “*Fracture mechanics : fundamentals and applications* “, Boca Raton, CRC, **1995**