

**Associazione Italiana per l'Analisi delle Sollecitazioni (AIAS)**  
**XXXVI Convegno Nazionale – 4-8 Settembre 2007**  
**Università degli Studi di Napoli Federico II – Seconda Università degli Studi di Napoli**

## **MISURA DELLA RIDUZIONE DI SPESSORE PER CORROSIONE IN LAMIERE DI ALLUMINIO MEDIANTE TECNICA LASER**

C. Caltagirone, D. Cerniglia, V. Nigrelli

*Dipartimento di Meccanica, Università degli Studi di Palermo, Viale delle Scienze – 90128  
Palermo, e-mail: [cerniglia@dima.unipa.it](mailto:cerniglia@dima.unipa.it), [nigrelli@dima.unipa.it](mailto:nigrelli@dima.unipa.it)*

**Parole chiave:** laser ultrasuoni, corrosione, onde guidate.

### **Sommario**

Nel lavoro vengono determinate le variazioni di spessore di lamiere di alluminio, appositamente assottigliate per simulare l'effetto della corrosione, impiegando la tecnica ultrasonora non a contatto basata sull'uso di un laser pulsato per la generazione delle onde ultrasonore e di una sonda piezoelettrica non a contatto per la ricezione. Sia il laser che la sonda sono stati posizionati dallo stesso lato dei provini per valutare la possibilità di eseguire le prove anche con accessibilità da un solo lato.

Per caratterizzare le aree della lamiera con assottigliamento è stata determinata la variazione subita dalla velocità di gruppo del modo  $A_0$  sulla curva di dispersione. Le estensioni delle zone a spessore ridotto sono state valutate dall'analisi dell'ampiezza normalizzata, mentre con il metodo dello shift di frequenza si sono quantificate le variazioni dello spessore della lamiera.

### **Abstract**

This work provides the detection of thinning defects in aluminum plates, suitably machined to simulate corrosion, using a non-contact ultrasonic technique based on the use of pulsed laser to generate acoustic waves and of air-coupled transducer to detect them. Both laser and sensor are placed on the same side of the plates to assess the possibility to test when access on both sides is not permitted.

Change of group velocity of  $A_0$  mode on the dispersion curve has been determined. Dimension of thinned areas has been determined by analyzing wave amplitude, whereas thinning depth measurements have been done with the frequency shift method.

### **Introduzione**

L'impiego delle tecniche ad ultrasuoni, tra i vari metodi dei controlli non distruttivi, è particolarmente utile per individuare l'assottigliamento di lamiere causato dalla corrosione e misurare quindi la velocità di corrosione in termini di diminuzione di spessore del materiale nell'unità di tempo. La scoperta di nuovi materiali compositi e ceramici e l'utilizzo della microelettronica hanno permesso di costruire apparecchiature ad ultrasuoni più potenti, affidabili ed anche meno costose, che permettono di eliminare il contatto con il

pezzo, favorendo così lo sviluppo di metodi di ispezione più veloci [1-2]. Più recente è l'impiego del laser nei metodi ad ultrasuoni. Esso consente una maggiore efficienza nella generazione degli ultrasuoni, svincola dalla distanza dalla struttura da ispezionare, favorisce la ripetibilità delle condizioni di generazione e consente lo sviluppo di sistemi di ispezione automatizzati [3-4].

Lo studio di lamiere di alluminio con assottigliamento di spessore è stato effettuato da Zhu *et al.* [5] usando sonde a contatto. La riduzione di spessore è stata calcolata dalla variazione della velocità di gruppo delle onde guidate, utilizzando un metodo basato sugli elementi di contorno. Tuzzeo *et al.* [6] hanno valutato la diminuzione di spessore in lastre di alluminio utilizzando trasduttori capacitivi accoppiati ad aria.

Nel presente lavoro vengono determinate le variazioni di spessore di lamiere di alluminio, appositamente assottigliate per simulare l'effetto della corrosione, impiegando la tecnica ultrasonora non a contatto basata sull'uso di un laser pulsato per la generazione delle onde e di una sonda piezoelettrica non a contatto per la ricezione. Sia il laser che la sonda sono stati posizionati dallo stesso lato dei provini per valutare la possibilità di eseguire le prove anche quando l'accessibilità sia da un solo lato. Per caratterizzare le aree della lamiera con assottigliamento di spessore è stata determinata la variazione subita dalla velocità di gruppo del modo  $A_0$  sulla curva di dispersione. Le estensioni delle zone a spessore ridotto sono state valutate dall'analisi dell'ampiezza normalizzata, mentre con il metodo dello shift di frequenza si sono quantificate le variazioni dello spessore della lamiera.

## Prove sperimentali

Il laser utilizzato è uno Q-switched Nd:YAG con energia massima di impulso di 425 mJ, a 1064 nm, con una frequenza di ripetizione dell'impulso di 120 Hz e durata di 6-8 ns. La sonda piezoelettrica usata in ricezione ha frequenza nominale di 1MHz, larghezza di banda a -6 dB di 438 kHz e un'area attiva del diametro di 12.5 mm.

I provini esaminati sono due lastre di alluminio 200 mm x 280 mm, con spessori di 5 mm e 10 mm, in cui sono state eseguite alle macchine utensili delle riduzioni dello spessore del 5%, 10%, 15% e 20% su quello da 5 mm, mentre in quello da 10 mm del 5%, 10%, 20% e 30%. Il setup sperimentale completo è mostrato nella Figura 1. Il fascio laser viene focalizzato in una sorgente lineare di 10 mm x 1 mm. La sonda, opportunamente angolata, è posizionata dallo stesso lato del fascio laser e ad una distanza da esso di 130 mm; la distanza tra sonda e provino è di 5 mm, lungo la normale all'area attiva della sonda. La scansione dei provini è stata effettuata lungo tutta la lunghezza con avanzamenti della linea di generazione di 10 mm.

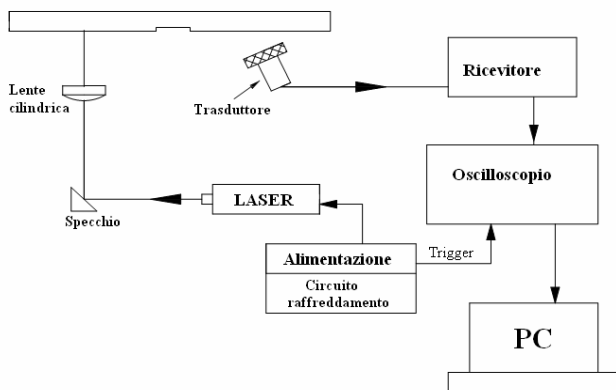


Fig. 1- Setup sperimentale

## Risultati

Le onde guidate generate dall'impulso laser nella lamiera di 5 mm mostrano diversi modi di propagazione. Per valutare la variazione dei modi che si sono propagati nelle varie zone della lamiera è stata eseguita la trasformata wavelet dei segnali, che rappresenta i coefficienti wavelet in un diagramma tridimensionale in funzione del tempo di arrivo e della frequenza delle onde [7]. La Figura 2 mostra la trasformata wavelet del segnale acquisito in zona integra (a) e in zone con assottigliamento dello spessore del 20% (b), del 15% (c), del 10% (d) e del 5% (e).

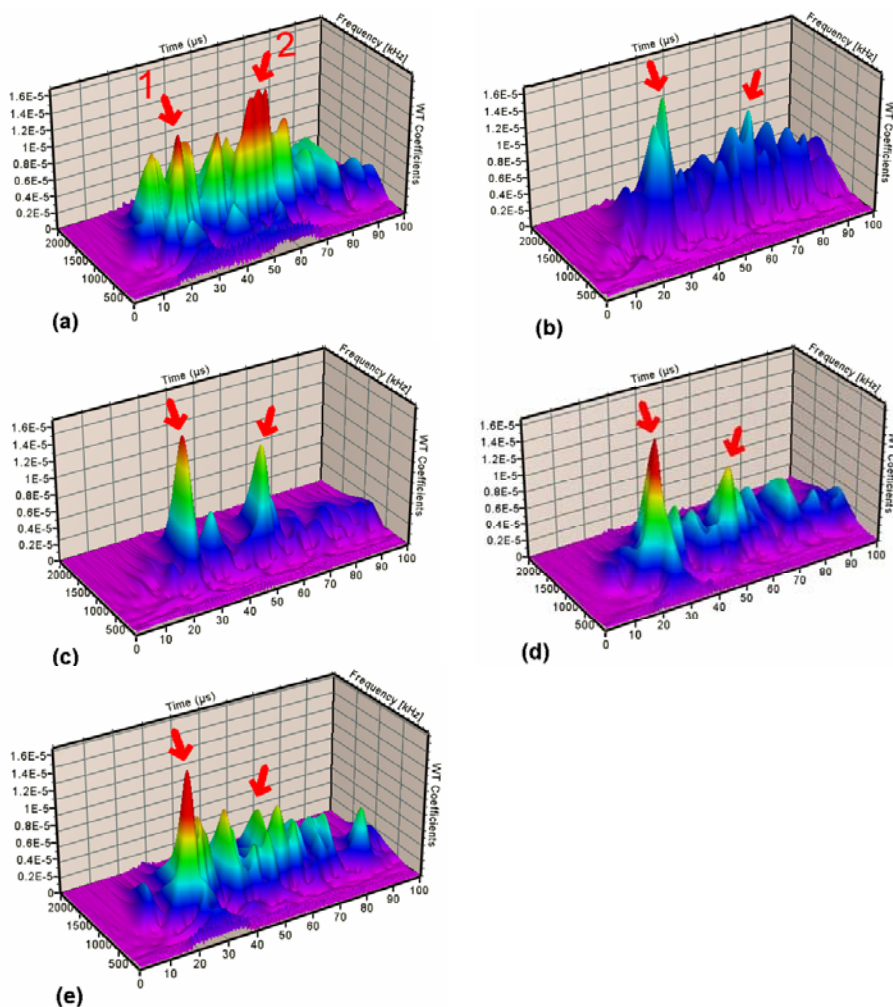


Fig. 2 - Trasformata wavelet del segnale acquisito in zona con spessore 5mm (a), con assottigliamento del 20% (b), del 15% (c), del 10% (d), del 5% (e).

Si è studiata la variazione della velocità di gruppo che subiscono i vari modi nell'attraversare la lamiera nelle vari regioni. Le varie velocità di gruppo  $v_g$  calcolate relativamente al primo picco di Figura 2 sono rappresentate in Figura 3 insieme alla curva del modo  $A_0$  per il provino di spessore di 5 mm.

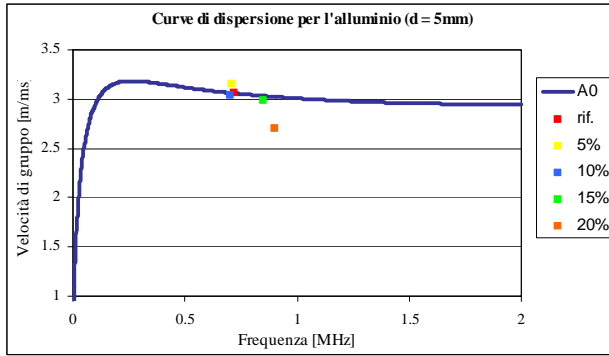


Fig. 3 - Curva di dispersione del modo A<sub>0</sub> e relativi punti della v<sub>g</sub> al variare della percentuale di assottigliamento della lamiera

Le velocità di gruppo relative alle zone con assottigliamento dello spessore subiscono una variazione rispetto alla curva del modo A<sub>0</sub> per il provino di spessore 5 mm. Nel grafico di Figura 4 si riporta la differenza a 1 del rapporto tra le velocità di gruppo per le varie zone con assottigliamento rispetto alla zona con spessore di 5 mm, da cui si evince la diminuzione del rapporto all'aumentare degli assottigliamenti.

La riduzione di spessore è stata calcolata usando la formula [8-9]:

$$\frac{\Delta d}{d} = - \frac{\Delta f}{f_r + \Delta f} \quad (1)$$

con  $\Delta d/d$  = variazione di spessore,  $\Delta f$  = variazione di frequenza,  $f_r$  = frequenza di riferimento. Con le frequenze ricavate dalla trasformata wavelet, relative al primo picco, si ottengono i valori riportati in tabella 1.

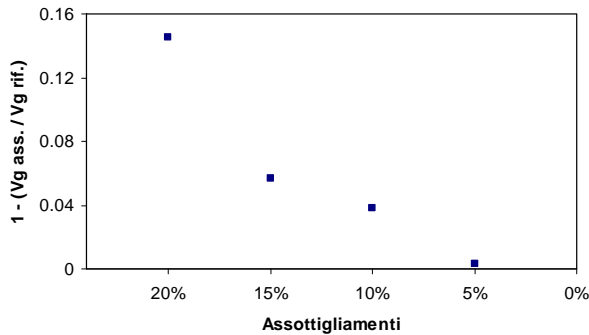


Fig. 4 - Variazione della velocità di gruppo in funzione degli assottigliamenti di spessore

Zone considerate	$\frac{\Delta d}{d}$ %
Assottigliamento del 20%	-20.1%
Assottigliamento del 15%	-15.2%

Tav. 1 – Misure della variazione di spessore

Per gli assottigliamenti del 20% e 15% l'equazione (1) fornisce valori che si discostano rispettivamente dello 0.1% e dello 0.2%. Per gli assottigliamenti del 10% e del 5%, essendo

piccola l'entità assoluta (0.5 e 0.25 mm rispettivamente), la tecnica usata non ha mostrato sufficiente sensibilità.

Per determinare l'estensione delle varie zone con assottigliamento dello spessore si è rappresentata (Figura 5) l'ampiezza massima di ciascun pacchetto dei segnali relativi al primo picco di Figura 2 acquisiti lungo la scansione della lamiera. L'attenuazione delle ampiezze nelle zone con assottigliamento dello spessore del 20%, 15%, 10% e 5% si estendono per circa 30 mm, pari all'estensione reale degli assottigliamenti.

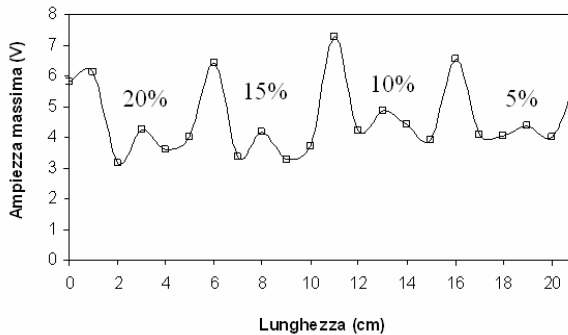


Fig. 5 - Ampiezza dei vari segnali in funzione della lunghezza della lamiera

Le onde che si generano nella lamiera di 10 mm sono quelle superficiali di Rayleigh, che interessano soltanto un sottile strato superficiale, avente profondità all'incirca pari alla lunghezza d'onda. La scansione eseguita dal lato senza scavi si è mostrata sensibile soltanto alle zone con assottigliamento dello spessore del 30% e 20%, come si nota dalla Figura 6 in cui è riportata l'ampiezza dei vari segnali in funzione della lunghezza della lamiera.

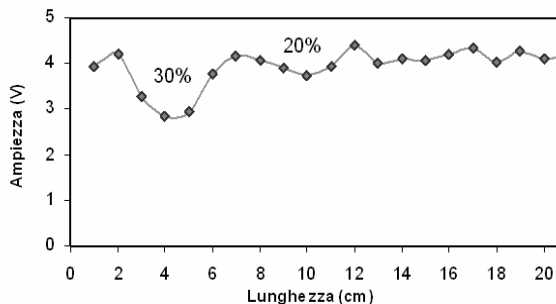


Fig. 6 - Ampiezza dei segnali in funzione della lunghezza dal lato senza scavi

Per poter valutare l'estensione delle zone con assottigliamento del 10% e del 5% si è eseguita l'ispezione dal lato in cui si sono realizzati gli scavi.

Sono state eseguite due scansioni, una con avanzamenti della linea di generazione di 10 mm (in totale 21 step), e la seconda con avanzamenti di 5 mm (in totale 42 step) valutando l'ampiezza normalizzata dell'onda superficiale, cioè il rapporto tra l'ampiezza di ciascun segnale con quella massima.

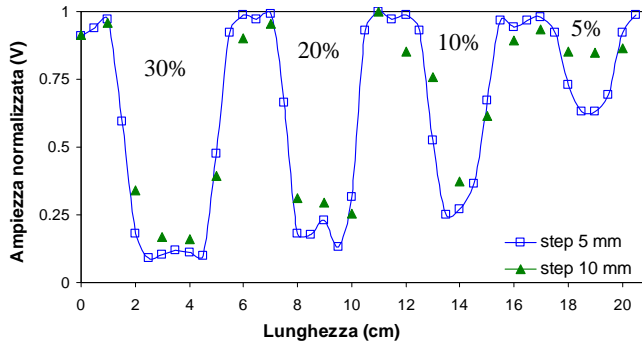


Fig. 7 - Ampiezza dei vari segnali in funzione della lunghezza della lamiera

Dalla Figura 7 si conferma che la zona con assottigliamento dello spessore del 30% è estesa 30 mm circa, mentre le zone con assottigliamento dello spessore del 20%, 10% e 5% si estendono per circa 20 mm. Le due scansioni danno andamenti circa uguali, anche se quella con avanzamenti di 5 mm è più precisa, e confermano la ripetibilità delle prove.

La Figura 8 mostra la trasformata di Fourier dei segnali relativi al provino di spessore 10 mm. L'attenuazione subita dai segnali, soprattutto in corrispondenza del picco di frequenza massima di 800 kHz, consente una valutazione qualitativa immediata dell'assottigliamento.

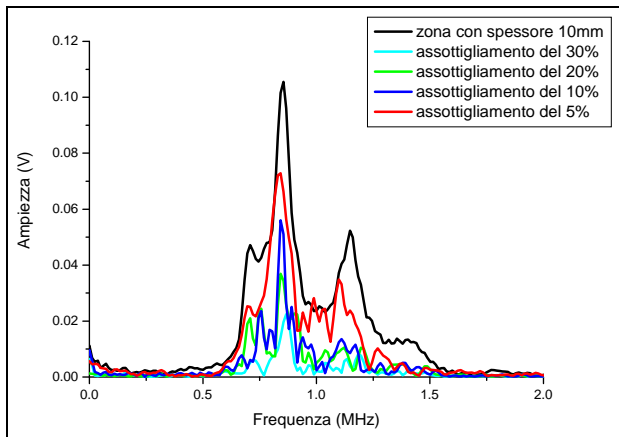


Fig. 8 – Trasformata di Fourier dei segnali nel provino di spessore 10mm

Per determinare gli assottigliamenti delle varie zone per ciascun gruppo di segnali relativi a più scansioni si sono considerate le ampiezze massime, medie e minime della componente di frequenza a 800 kHz. Si è poi calcolato il rapporto tra l'ampiezza media dei segnali relativi alle zone con assottigliamento dello spessore e l'ampiezza media del segnale relativo alla zona di spessore 10 mm. Successivamente lo stesso procedimento è stato ripetuto considerando l'ampiezza massima e minima dei segnali. I dati ottenuti sono rappresentati in Figura 9, da cui si evince la diminuzione del rapporto delle ampiezze al diminuire dello spessore della lamiera.

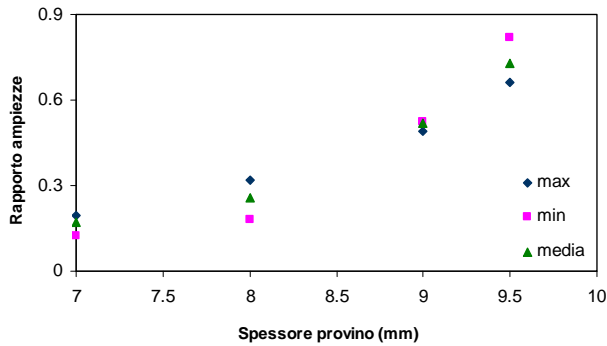


Fig. 9 - Rapporto tra le ampiezze dei segnali

## Conclusioni

Si è determinata la riduzione di spessore, realizzata con operazione di fresatura a simulare gli effetti della corrosione, in lamiere di alluminio impiegando la tecnica ultrasonora non a contatto basata sulla generazione laser e la ricezione con trasduttori piezoelettrici non a contatto. Nelle configurazioni impiegate la sorgente ed il ricevitore sono stati posizionati dallo stesso lato della lamiera per dimostrare l'applicabilità del metodo anche quando l'altra superficie non fosse accessibile. Sono stati ispezionati due provini di spessore 5 e 10 mm, su cui sono state effettuate più ispezioni per verificare la ripetibilità dei risultati.

Per il provino dello spessore di 5mm si sono calcolate le trasformate wavelet dei segnali. Si è calcolata la variazione di velocità di gruppo e per determinare le dimensioni delle varie zone si è calcolata l'ampiezza normalizzata; con il metodo dello shift di frequenza si sono valutati gli assottigliamenti di spessore.

Per il provino dello spessore di 10mm si è calcolata l'estensione delle varie zone con assottigliamento di spessore dalla misura delle ampiezze normalizzate. Si è eseguita la trasformata di Fourier dei segnali e, attraverso lo studio dell'ampiezza massima della componente di frequenza, si è rilevata la variazione dello spessore della lamiera.

## Bibliografia

- [1] - W. A. Grandia, C. M. Fortunko: *NDE Application of Air-coupled Ultrasonic Transducers*, Proc. IEEE International Ultrasonics Symposium, pp. 1-13 (1995)
- [2] - M. Castaings, P. Cawley: *The Generation, Propagation, and Detection of Lamb Waves in Plates using Air-coupled Ultrasonic Transducers*, J. Acoustical Society of America, pp. 3070-3077 (1996)
- [3] - C. B. Scruby, L. E. Drain: *Laser Ultrasonic Techniques and Applications*, Adam Hilger, Bristol (1992)
- [4] - K. L. Telschow, R. J. Conant: *Optical and Thermal Parameter on Laser Generated Ultrasound*, J. Acoustical Society of America, vol. 88 (1990)
- [5] - W. Zhu, J. L. Rose, J. N. Barshinger, V. S. Agarwala: *Ultrasonic Guided Wave NDT for Hidden Corrosion Detection*, Research Nondestructive Evaluation, pp. 205-225 (1998)

- [6] - D. Tuzzeo, F. Lanza di Scalea, A. Ajovalasit: *Ispezione Ultrasonora di Componenti Strutturali di Uso Aeronautico con Tecnica non a Contatto*, Atti XXX convegno AIAS, pp. 1537-1546 (2001)
- [7] - C. K. Chui: *An introduction to wavelets, Vol. 1, Wavelet analysis and its applications*, Academic Press, Boston (1992)
- [8] – J. L. Rose: *Ultrasonic waves in solid media*, Cambridge University Press, New York (1999)
- [9] – M. Arone, D. Cerniglia, V. Nigrelli: *Defect characterization in Al welded joints by non-contact Lamb wave technique*, J. Materials Processing Technology, vol. 176, pp. 95-101 (2006)