

CARATTERIZZAZIONE DEI MATERIALI CON CORRENTI INDOTTE VIA ANALISI DIMENSIONALE

A. Tamburrino¹, A. Sardellitti¹, F. Milano¹, V. Mottola¹, M. Laracca², L. Ferrigno¹

*¹Dipartimento di Ingegneria Elettrica e dell'Informazione «M. Scarano», Università degli
Studi di Cassino e del Lazio Meridionale*

²Dept. of Astronautics, Electrical and Energy Engineering, Sapienza University of Rome

Lo sviluppo di tecniche di ispezione non-distruttive è un tema di estremo interesse e attualità, dato l'affermarsi dei nuovi paradigmi Industria 4.0. e Zero-Defect Manufacturing [1-2]. Alla base di questi nuovi paradigmi, vi è, infatti, l'adozione di metodi (i) economici, (ii) compatibili con il tempo reale e (iii) capaci di essere integrati in sistema di misura in linea.

Negli anni si sono sviluppate una grande varietà di tecniche di indagine non-distruttiva. Tra queste, l'ispezione a correnti indotte (ECT) riveste sicuramente un ruolo di primo piano, poiché in grado di soddisfare tutti i requisiti previsti dai suddetti paradigmi.

In questo contributo viene affrontato il problema della stima di spessore di laminati metallici, pratica estremamente diffusa nell'industria per verificare la qualità dei prodotti e controllare la condizioni di parti metalliche. Questo è il caso di lavorazioni che prevedono l'impiego di saldature, ad esempio, o ancora per verificare lo stato di parti soggette a corrosioni.

In letteratura è possibile trovare diversi metodi di stima dello spessore basato su ECT, ascrivibili principalmente a tecniche multi-frequenza [3] e a correnti pulsate [4]. Il metodo proposto si distingue dai precedenti perché basato su una derivazione completamente differente, permettendo di combinare i vantaggi dei metodi esistenti. In particolare, (i) tempo di misura estremamente ridotto, (ii) rigorosa invarianza rispetto al lift-off, (iii) accuratezze eccellenti.

Lo scenario in cui questo lavoro si inserisce è quello della referenza [6], in cui, per la prima volta, l'analisi dimensionale è stata introdotta nell'ambito dei test non-distruttivi. Nello specifico, il teorema di Buckingham è uno strumento molto potente perché permette di ridurre sistematicamente il numero di variabili necessarie a descrivere il problema dell'ECT.

La grandezza misurata in un test a correnti indotte (generalmente l'impedenza della bobina utilizzata nel test) dipende da una grande varietà di fattori quali: la geometria della bobina (raggio interno, raggio esterno, altezza, numero di spire), la geometria del piatto metallico (spessore), le sue proprietà elettromagnetiche (conducibilità elettrica, permeabilità magnetica), il lift-off e la frequenza di eccitazione.

Come mostrato in [5], la stessa relazione tra parametri e misure, senza alcuna approssimazione, può essere riscritta in termini di quantità adimensionali, sfruttando il teorema di Buckingham. Tale forma adimensionale del problema coinvolge sempre un numero di variabili inferiore rispetto al numero di grandezze dimensionali di partenza. Nel caso in esame, nota la geometria della bobina, la versione adimensionale della quantità misurata ($\bar{\pi}_1$) dipende unicamente da tre parametri legati al prodotto $\sqrt{\omega\sigma}$ (π_2), allo spessore (π_3) e al lift-off (π_4). Questa riduzione (del 50%) della dimensionalità del problema permette da una parte di semplificare notevolmente l'analisi e lo sviluppo di nuovi metodi e dall'altra di abbattere significativamente i tempi per l'identificazione numerico/sperimentale della relazione tra dati misurati e parametri..

Siccome l'interesse è per la stima dello spessore, la conducibilità del piatto e la frequenza di eccitazione sono ritenute note (per cui lo è π_2) ed il problema inverso può essere formulato in uno spazio bi-dimensionale.

In altri termini, dato che la quantità misurata dipende unicamente dai parametri adimensionali π_3 e π_4 , la sua relazione con quest'ultimi può essere rappresentata mediante curve di livello in questo piano.

Si consideri di effettuare una misura $\bar{\pi}_1^{exp}$ a frequenza f_0 , allora le curve di livello $|\bar{\pi}_1(\pi_3, \pi_4)| = |\bar{\pi}_1^{exp}|$ e $\angle \bar{\pi}_1(\pi_3, \pi_4) = \angle \bar{\pi}_1^{exp}$ si intersecano in un unico punto nel piano adimensionale (π_4, π_3) [5], che rappresenta la soluzione del problema inverso. Si supponga, ora, di effettuare una serie di misure alla stessa frequenza f_0 ma variando (in maniera non controllata) il lift-off. Ad ogni misura corrisponde un nuovo punto di intersezione nel piano bi-dimensionale. Siccome lo spessore (π_3) resta fisso durante le operazioni di misura allora i punti di intersezione devono essere allineati lungo una retta orizzontale a π_3 costante. Il valore di π_3 lungo cui si allineano questi punti fornisce la stima di spessore desiderata.

In altri termini, l'analisi condotta nello spazio adimensionale mette in luce un aspetto chiave: l'incertezza sul valore di lift-off può sfruttata in maniera costruttiva per aumentare l'accuratezza del metodo di misura. Infatti, il metodo proposto presuppone unicamente la possibilità di eseguire misure a lift-off differenti, senza alcuna conoscenza di quest'ultimo. Siccome è noto che i punti debbano disporsi su una retta orizzontale, è possibile processare i dati provenienti da misure diverse per incrementare le prestazioni.

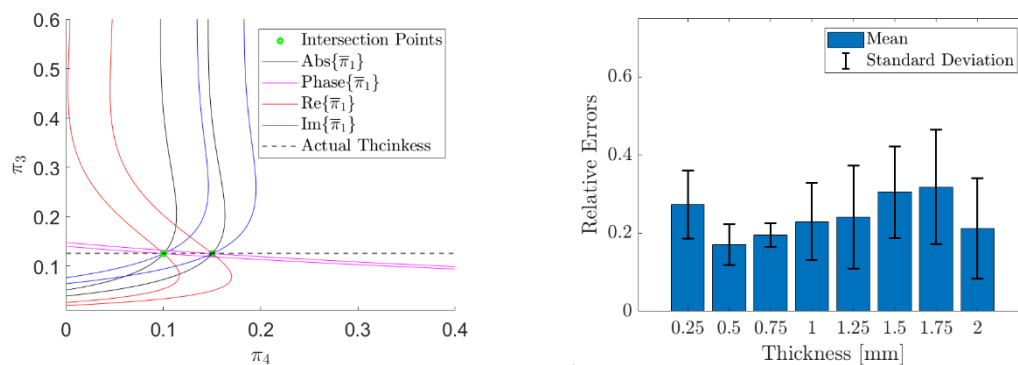


Figure 1. Left: the intersections of level curves lie on a straight line when lift-off changes. Right: mean and standard deviation of the reconstructed thickness on 10 repeated measurements.

In Figura 1 è possibile apprezzare le eccellenti prestazioni del metodo su 10 misure ripetute. I dati sono stati prodotti numericamente e corrotti da rumore gaussiano bianco con deviazione standard allo 0.25% del valore misurato, riproducendo il rumore di misura di un impedenziometro reale [6]

Bibliografia

- [1] J. Vrana and R. Singh, Nde 4.0-a design thinking perspective, Journal of Nondestructive Evaluation, 40 (2021).
- [2] P.A. D. Foivos Psarommatis, Gökan May and D. Kiritsis, Zero defect manufacturing: state-of-the-art review, shortcomings and future directions in research, International Journal of Production Research, 58 (2020).
- [3] E. Pinotti and E. Puppini, Simple lock-in technique for thickness measurement of metallic plates, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement (2013).
- [4] M. Fan, B. Cao, A. I. Sunny, W. Li, G. Tian, and B. Ye, Pulsed eddy current thickness measurement using phase features immune to lift-off effect, NDT & E International, (2017).
- [5] A. Tamburrino, A. Sardellitti, F. Milano, V. Mottola, M. Laracca and L. Ferrigno, Old but not obsolete: Dimensional analysis in nondestructive testing and evaluation, Ndt & E International (2024).
- [6] Available on-line at <https://www.gwinstek.com/en-global/products/downloadSeriesDownNew/10096/742>.