

PROGETTO E REALIZZAZIONE DI UN SETUP PER L'ANALISI DEL ROLLING CONTACT: RISULTATI PRELIMINARI

M. Pau, A. Baldi e M. Peddis

Università degli Studi di Cagliari, Dipartimento di Ingegneria Meccanica

Piazza d'Armi, 09123 Cagliari

Tel. 070-6755704, Fax 070-6755717

E-mail: pau@dimeca.unica.it

SOMMARIO

Presso il Dipartimento di Ingegneria Meccanica dell'Università di Cagliari (DIMECA) è attiva, da alcuni anni, una linea di ricerca orientata alla valutazione dei principali parametri di contatto (forma e dimensioni dell'area nominale di contatto, area reale di contatto, distribuzione delle pressioni di contatto) in interfacce metalliche, mediante una tecnica sperimentale basata sull'impiego di onde ultrasoniche.

L'applicazione di questo metodo ha consentito di ottenere informazioni su contatti a geometria semplice quali, ad esempio, quelli sfera-piano [1-2] su casi più complessi di rilevante impatto ingegneristico come quello relativo all'interazione tra ruota e rotaia ferroviaria [3-4].

Il principale punto di forza dell'indagine ultrasonica risiede nella sua capacità di fornire informazioni sullo stato del contatto a partire da misure del coefficiente di riflessione all'interfaccia, garantendo in tal modo sia la più completa non-invasività (nessun mezzo viene ad interpersi tra i corpi a contatto) e sia la possibilità di investigare "in process". In particolare quest'ultima peculiarità permette di monitorare le variazioni dei parametri di contatto in tempo reale (ad esempio a seguito di variazioni nel carico applicato o nella configurazione geometrica dell'accoppiamento) senza che sia necessario rimuovere i corpi per esaminare gli effetti che tali modifiche hanno generato.

Appare importante sottolineare che, a tutt'oggi, la letteratura riporta esempi di impiego del metodo ultrasonico a problemi di contatto quasi esclusivamente nell'analisi di situazioni statiche. Tuttavia, è facilmente intuibile che la possibilità di estendere il campo di applicazione della tecnica a situazioni dinamiche, aumenterebbe in misura considerevole il range di casi di interesse ingegneristico potenzialmente testabili. In considerazione di ciò, il presente studio si pone come obiettivo principale quello di verificare la validità ed affidabilità del metodo ultrasonico per lo studio di situazioni dinamiche, con particolare riferimento a problemi di "rolling contact".

ABSTRACT

Since some years, at Department of Mechanical Engineering of University of Cagliari (DIMECA) researches are currently carried out on the assessment of contact parameters in metallic interfaces by means of an experimental technique based on ultrasonic waves.

The application of such method allowed us to obtain information both about simple geometry contacts like sphere vs. plate [1-2] and more complex cases like wheel-rail interaction [3-4].

The ultrasonic analysis is able to supply information about the contact state starting from qualitative and quantitative observations of the reflection coefficient at the interface, thus being non-invasive and allowing the “in process” monitoring of the contact conditions consequent either to geometry or load modifications without to remove the bodies to examine the effect of such variations.

It is noticeable that to date, the scientific literature reports examples of application of this technique mostly under static conditions, while it's easily understandable that the extension to dynamic situations would greatly expand the power of such tool, dramatically increasing the number of engineering cases potentially testable.

On the ground of the above mentioned considerations, the main purpose of the present study is to assess the reliability and validity of the ultrasonic method to investigate dynamic contacts, with particular emphasis on rolling contact problems, which are typical of both wheel-rail and roller bearings contacts.

1. INTRODUZIONE E PRINCIPI TEORICI

Le prime analisi di problemi di contatto basate sull'impiego di onde ultrasoniche, risalgono alla fine degli anni '50 e negli anni '60 principalmente sotto forma di tecnica per la valutazione qualitativa della pressione esistente sulle superfici di contatto [5].

Il principio del metodo, che trae origine dalla ben nota tecnica “pulse-echo” consiste nell'invio, sull'area di contatto, di onde ultrasoniche ad alta frequenza (tipicamente nel range 1-20 MHz) che sono parzialmente riflesse dall'interfaccia di contatto e parzialmente trasmesse attraverso essa. L'analisi quantitativa e qualitativa dell'onda riflessa (o in modo analogo dell'onda trasmessa), può essere messa in relazione alla variazione delle caratteristiche del contatto, rendendo in tal modo possibile la valutazione di parametri quali area nominale e reale di contatto, pressione e rigidità di contatto. Tuttavia la maggior parte degli studi realizzati negli ultimi 30 anni si riferisce a situazioni di contatto statiche. Alcuni test dinamici sono stati effettuati da Kendall e Tabor nel 1971 [6]; essi esaminarono la trasmissione ultrasonica attraverso *sliding contacts* ottenuti da accoppiamenti vetro-vetro e acciaio-acciaio, ricavando una relazione tra la variazione dell'area reale di contatto e il coefficiente di attrito. Numerosi esperimenti sono stati, inoltre, effettuati a metà degli anni '90 da Geiger et al. [7], Saiki et al. [8], Stancu-Niederhorn et al. [9] ed Engel et al. [10] finalizzati alla determinazione dell'area reale di contatto nei processi di metal forming, quindi ancora una volta sostanzialmente su contatti striscianti. A conoscenza degli autori, la letteratura non riporta esempi di applicazione della tecnica ultrasonica e problemi di contatto da rotolamento, che pure grande importanza assumono in molte applicazioni di rilevante impatto ingegneristico.

Partendo da tali considerazioni, il presente studio intende proporre alcuni risultati preliminari relativi all'applicazione del metodo ultrasonico per l'analisi del rolling contact, con l'obiettivo primario di verificare le problematiche legate all'esecuzione dei test sperimentali e l'affidabilità dei risultati.

2. MATERIALI E METODI

2.1 Il sistema a due dischi

La scelta del tipo di setup da utilizzare per l'analisi dinamica del contatto è stata condizionata da alcuni fattori quali ad esempio la necessità di ottenere aree di contatto sufficientemente grandi (e dunque maggiormente “visibili”) per valori del carico applicato non troppo elevati e la possibilità di accedere in modo abbastanza confortevole con il trasduttore ultrasonico ad almeno una delle superfici dei corpi a contatto. Tali ragioni, unitamente al fatto che il DIMECA ha in corso da qualche tempo una collaborazione con il Railway Technical Research Institute (Tokyo, Japan) finalizzata allo studio del contatto ruota-rotaila, hanno portato alla progettazione e realizzazione di una macchina a due dischi: uno cavo (di diametro 490 mm) ed uno pieno (di diametro 160 mm) calettato sull'albero motore) aventi profilo cilindrico e accoppiati secondo una configurazione epicycloidale (Fig. 1)

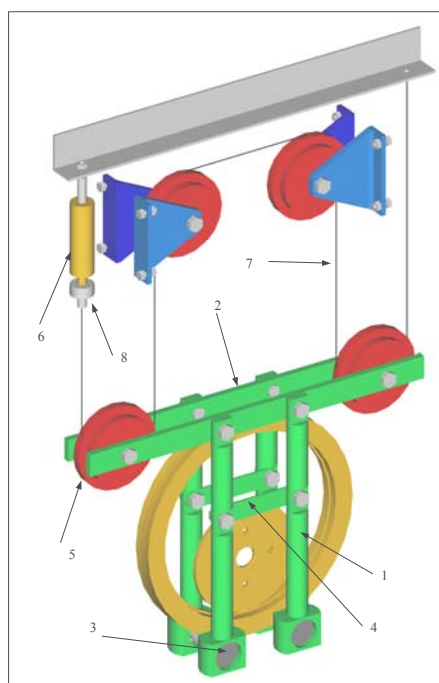


Fig. 1 – Layout del sistema a due dischi

Il materiale impiegato per entrambi i componenti è l'Ergal. La configurazione di contatto che ne deriva è di tipo conforme, ma i raggi di curvatura dei due dischi ed i carichi applicati sono tali per cui le dimensioni dell'area di contatto (stimate nell'ordine dei 10 mm di larghezza per un carico applicato di 20 kN) rendono il caso ancora potenzialmente trattabile con la teoria di Hertz. In realtà, la larghezza finita delle superfici cilindriche a contatto provoca l'insorgere di effetti di bordo che influenzano in modo rilevante la distribuzione delle pressioni di contatto; dunque per ciò che concerne questo aspetto la stessa teoria non può descrivere completamente la condizione sperimentale.

Dal punto di vista costruttivo, il disco di dimensioni maggiori è di fatto un anello la cui sezione è stata realizzata con una particolare forma allo scopo di garantire da un lato una rotazione ottimale e, nel contempo, assicurare la presenza di una superficie di contatto quasi piana. Il sistema di carico è costituito da due coppie di tiranti (1) connessi a due bracci di carico (2) sulla parte superiore e forniti di alloggiamenti per i cuscinetti (3) su quella

inferiore; per evitare la divergenza dei tiranti sono stati inseriti dei traversini di rinforzo (4). Alle due estremità dei bracci di carico sono montate delle carrucole folli (5) che trasmettono la forza esercitata dal martinetto idraulico (6) tramite una fune metallica (7); l'entità della forza applicata è monitorata mediante una cella di carico (8). Tutto il sistema è sostenuto da un telaio in acciaio realizzato con profilati saldati tra loro.

Il moto del disco più piccolo (che trascina con sé per attrito l'anello) è assicurato da un motore elettrico di potenza 1.1 kW a 1430 giri/min, che è collegato all'albero per mezzo di pulegge con rapporto di trasmissione 1:4. Nella parte bassa del telaio è stato disposto il sistema di movimentazione del trasduttore ultrasonico (Fig. 2) la cui tipologia è stata scelta tenendo conto anche di impieghi dinamici simili in particolare relativi al settore dei controlli non distruttivi nell'industria.

Come verrà meglio descritto nei paragrafi seguenti, alla fine si è optato per un controllo in immersione mediante "squirter", in virtù del fatto che tale sistema è in grado di garantire un costante livello di accoppiamento tra trasduttore e superficie di ingresso dei corpi a contatto, senza richiedere la totale immersione dei componenti.

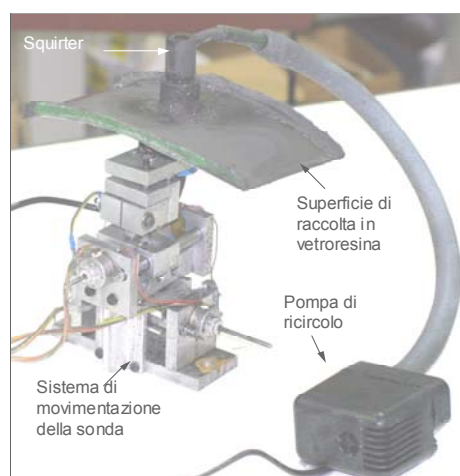


Fig. 2 – Il sistema di scansione

Nella prima realizzazione, il sistema di movimentazione della sonda è stato assemblato in modo tale da eseguire scansioni lineari XY, poiché la curvatura poteva ritenersi, da una prima stima, sufficientemente elevata da garantire la corretta riflessione del fascio ultrasonico senza apprezzabili perdite di segnale; in realtà le prove preliminari hanno mostrato che tale supposizione era quantomeno ottimistica. Infatti a seguito della presenza dello squirter (la cui superficie superiore va a sovrapporsi parzialmente all'elemento radiante della sonda) il fascio risulta non essere raccolto in modo ottimale dopo la riflessione dall'interfaccia di contatto. Questo fenomeno negativo veniva, inoltre, ulteriormente aggravato dall'impiego di sonde focalizzate (indispensabile per garantire una elevata risoluzione nella ricostruzione delle mappe di contatto) per le quali il fascio è concentrato su regioni spaziali estremamente ridotte.

Il problema è stato risolto passando ad una scansione di tipo "polare" mantenendo rettilineo il moto di traslazione in direzione parallela alle generatrici di anello e disco, e movimentando la sonda nella direzione ortogonale alla precedente in modo tale da seguire la curvatura dell'anello; ciò ha garantito un posizionamento del trasduttore costantemente perpendicolare rispetto alla superficie di ingresso e, dunque, una riflessione costante del fascio alla massima ampiezza, evitando in tal modo l'insorgere di perdite di segnale indesiderate. Il

miglioramento ottenuto a seguito di tale modifica risulta evidente nella Fig. 3, che riporta l'elaborazione grafica della riflessione ultrasonica dalla superficie dell'anello (le tonalità di colore verso il blu indicano una riflessione bassa o assente mentre quelle sul rosso rappresentano i valori massimi del coefficiente di riflessione). A sinistra si osserva il risultato della scansione lineare XY, che mostra un segnale nitido solo nella porzione centrale, mentre la mappa a destra, eseguita con il sistema polare, evidenzia una riflessione ottimale su tutta la regione investigata.

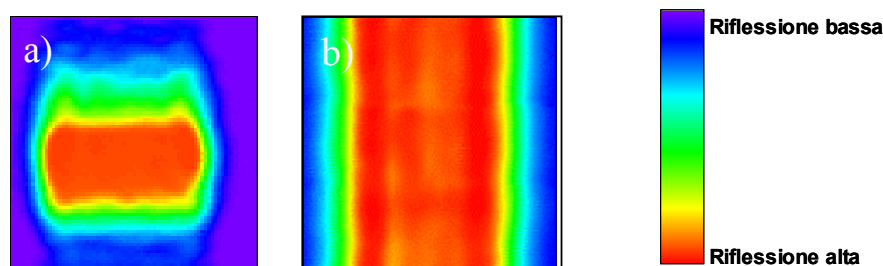


Fig. 3 – Elaborazione grafica della riflessione ultrasonica dalla superficie di ingresso dell'anello
a) sistema lineare XY b) sistema polare

2.2 Il sistema ultrasonico

Come accennato in precedenza, il setup a due dischi prevede, tra l'altro, la presenza di un sistema di scansione polare al quale è solidalmente collegata la sonda ultrasonica da movimentare sulla regione di contatto.

Scartato l'impiego di trasduttori a contatto per l'impossibilità di assicurare un accoppiamento costante tra sonda e superficie dell'anello, e scartata la possibilità di utilizzare una sonda di tipo "wheel-probe" (adatta al test di componenti in moto ma caratterizzata da scarsa risoluzione), si è puntato che la soluzione più idonea potesse essere quella che prevedeva l'impiego di trasduttori ad immersione. Tuttavia, stante l'evidente impossibilità di immergere anche solo una porzione del setup, ci si è orientati sull'impiego di uno squirter (Panametrics B103A) capace di fornire, mediante collegamento ad una linea di alimentazione d'acqua a flusso lento, un velo d'acqua dello spessore di pochi mm, ma sufficiente per una corretta trasmissione del segnale ultrasonico dalla sonda alla superficie di contatto e viceversa.

All'interno dello squirter è stata alloggiata una sonda Krautkramer focalizzata (sferica) ad immersione, di frequenza 10 MHz e lunghezza di focalizzazione 2,5"; il sistema è illustrato in Fig. 4

La sonda è collegata ad un detector Krautkramer HIS2, ed il segnale viene costantemente monitorato attraverso un oscilloscopio digitale Hewlett-Packard 54520A. Sia il sistema di movimentazione che il detector sono controllati a loro volta da un Personal Computer mediante un software realizzato in ambiente LabView, che consente

- di gestire in modo del tutto automatico le procedure di acquisizione del valore di picco e della posizione dei difetti, così come fornite dall'unità HIS2;
- di acquisire direttamente dall'oscilloscopio sul computer (ed eventualmente conservare su file, se necessario) l'onda ultrasonica completa;
- di controllare il movimento della sonda sia in tempo reale, sia mediante sequenze programmabili generate dall'utente;
- di eseguire l'elaborazione dei dati ottenuti, visualizzandoli graficamente in tempo reale sotto forma di "mappe".

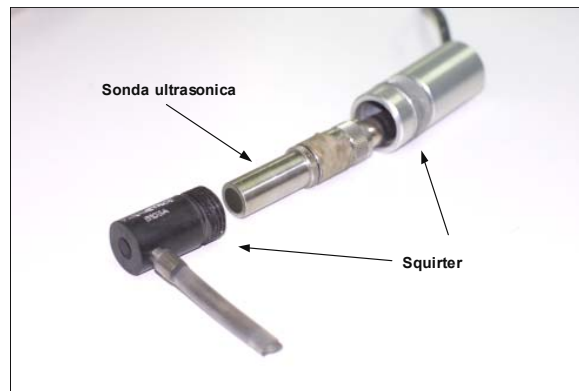


Fig. 4 – Particolare dell'insieme trasduttore-squirter

3. RISULTATI E DISCUSSIONE

3.1 Prove statiche preliminari

Nella prima fase dello studio sono state analizzate le caratteristiche del contatto in assenza di movimento al fine di testare l'affidabilità del sistema di acquisizione del segnale ultrasonico (in particolar modo per ciò che concerne il funzionamento dello squirter) e di verificare eventuali problemi di allineamento insorgenti durante la fase di carico.

Una prima verifica grossolana dello stato del contatto (e dunque indirettamente della bontà dell'allineamento delle due superfici) è stata realizzata introducendo campioni di pellicola pressosensibile Fuji Prescale HS tra la ruota e l'anello, e analizzando l'impronta generata a seguito dell'applicazione del carico. Questa procedura preliminare è stata preferita ad una scansione ultrasonica di tentativo, anche eseguita con passo non troppo fine, poiché di norma il tempo necessario a completare il test è decisamente superiore a quello della prova con la pellicola Fuji.

Come mostra la Fig. 5, l'operazione di allineamento (necessaria per assicurare una distribuzione regolare della pressione di contatto) risulta particolarmente critica ed è sufficiente un errore anche modesto per fornire un accoppiamento insoddisfacente.



Fig. 5 – Area di contatto generata da un cattivo allineamento tra anello e disco (Pellicola Fuji Prescale HS)

Una volta ottenuto un accoppiamento regolare, che si concretizza mediante un'area di contatto di forma pressoché rettangolare, si è proceduto alla scansione ultrasonica che, nel test definitivo, è stata eseguita movimentando la sonda con passo pari a 0.1 mm; come appurato in

precedenti esperienze, tale valore rappresenta un buon compromesso tra rapidità di esecuzione della scansione completa e livello di risoluzione ottenibile.

Come si può osservare dalla Fig. 6, che riporta i risultati del test statico per un carico applicato di 12 kN, forma e dimensioni dell'area di contatto risultano essere abbastanza simili per entrambe le tecniche sperimentali impiegate, se si eccettua una modesta riduzione di larghezza osservata nel test ultrasonico.

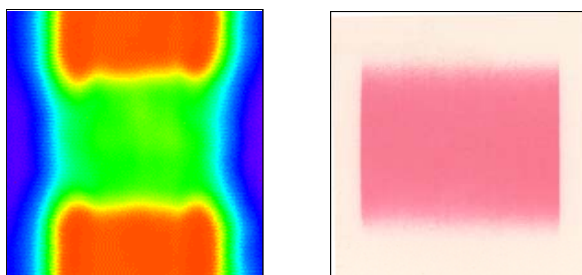


Fig. 6 – Confronto fra le aree di contatto ottenute con la tecnica ultrasonica (sinistra) e con la pellicola pressosensibile Fuji (destra)

La spiegazione di tale fenomeno è da ricercarsi nell'esistenza di picchi di pressione di contatto che sono peculiari di questa particolare configurazione testata; infatti la geometria degli elementi a contatto, che è sostanzialmente riconducibile al caso di due cilindri ad assi paralleli ma aventi lunghezza estremamente ridotta, fa sì che, sotto carico, si generi una concentrazione di sforzi sui bordi dei due elementi. Poiché la riflessione ultrasonica dall'interfaccia è funzione della pressione di contatto secondo una legge esponenziale negativa, quando la pressione raggiunge livelli piuttosto elevati la quota parte di energia ultrasonica riflessa diventa molto bassa (nell'ordine dell'1-2%) essendo le onde ultrasoniche quasi interamente trasmesse dai materiali a contatto le cui microasperità superficiali hanno raggiunto un livello di contatto molto intimo. Tutto ciò si traduce in una perdita di riflessione che, in questo caso, si confonde con l'assenza di segnale rilevata all'esterno dell'area di contatto fornendo l'impressione visiva di una riduzione di sezione che in realtà non esiste.

3.2 Prove dinamiche

Al termine della fase preliminare si è proceduto all'esecuzione dei test dinamici veri e propri. Come accennato in precedenza, la velocità massima di rotazione disponibile nel sistema è di 1430 giri/min che, nella configurazione geometrica realizzata, si traduce in una velocità periferica di circa 20 Km/h. Tuttavia durante le prove, per motivi di sicurezza, non si è raggiunto mai il regime di rotazione limite e la velocità massima si è attestata sul valore di 16 Km/h. In questa prima esperienza di applicazione del metodo ultrasonico ad analisi di contatto di tipo dinamico, non è stato ritenuto opportuno mettere a punto un sistema capace di riprodurre condizioni di rotolamento realistiche simili a quelle riscontrabili in un sistema ruota-rotai reale (ossia con velocità dell'ordine dei 50 Km/h e oltre) essenzialmente per due ragioni: la prima è rappresentata dalla necessità di capire quanto attendibili possono essere i risultati forniti dalla tecnica ultrasonica e questo può essere fatto in prima istanza mediante confronto con la situazione statica, per la quale i risultati ottenuti sono già stati abbondantemente validati. Come è noto, l'aumento della velocità produce modificazioni delle caratteristiche di aderenza nell'area di impronta, alterando in modo sostanziale la distribuzione delle pressioni di contatto sull'interfaccia. Dunque i test eseguiti a velocità elevate avrebbero potuto portare ad investigare su regioni di contatto caratterizzate da parametri non facilmente prevedibili e, comunque, meno controllabili. In secondo luogo, dagli

esperimenti erano richieste risposte precise anche dal punto di vista della “leggibilità” del segnale ultrasonico a seguito dell’inserimento del trasduttore nel sistema squirter. Anche in questo caso, alte velocità comportano importanti variazioni nelle caratteristiche del velo d’acqua che assicura la continuità di trasmissione del fascio ultrasonico; essa, infatti, può risultare potenzialmente difficoltosa a meno di non assicurare un significativo livello di portata del flusso di alimentazione dell’acqua. A seguito di tali considerazioni, si è proceduto ad eseguire alcuni test con carichi di 4 e 8kN e velocità variabili tra 6 e 16 Km/h. I risultati delle elaborazioni grafiche relative alla ricostruzione delle aree di contatto sono riportati di seguito.

Nelle Fig.7 e 8 sono riportate le aree di contatto per un carico applicato rispettivamente di 4 e 8kN e quattro livelli crescenti di velocità (6, 10, 13 e 16 Km/h). Dalle immagini è possibile osservare che la variazione di velocità non produce apprezzabili effetti sulla rappresentazione dell’area di contatto, se si eccettuano fenomeni di variabilità “casuale” originati dalla bontà dell’allineamento eseguito prima dell’inizio della prova.

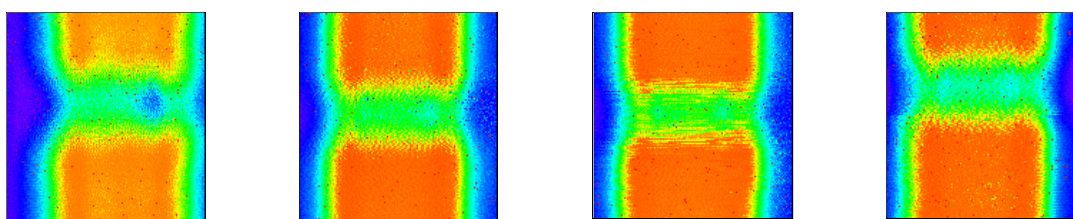


Fig. 7 – Aree di contatto dinamiche (carico applicato 4 kN, velocità 6, 10, 13 e 16 Km/h)

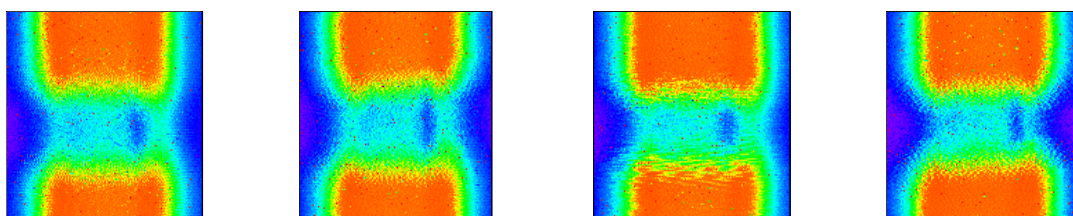


Fig. 8 – Aree di contatto dinamiche (carico applicato 8 kN, velocità 6, 10, 13 e 16 Km/h)

Analizzando le mappe ottenute ad una velocità di 10 Km/h per due livelli di carico (rispettivamente 4 e 8 kN, Fig. 9) si può osservare che il sistema di acquisizione riesce a catturare in modo soddisfacente l’aumento di dimensioni dell’area di contatto anche in condizioni dinamiche.

Infine in Fig. 10 è illustrato il confronto tra le elaborazioni grafiche del coefficiente di riflessione relative ad un carico applicato di 4 kN sia per il caso statico (a sinistra) e sia per quello dinamico (velocità 10 Km/h); i risultati mostrano una sostanziale uguaglianza nelle aree di contatto registrate, tuttavia occorre sottolineare che la rappresentazione dinamica dell’area è affetta da un certo livello di rumorosità che può essere imputato:

- alle vibrazioni del sistema
- a non perfette lavorazioni della ruota e/o dell’anello, le cui variazioni di spessore provocano oscillazioni del segnale ultrasonico
- ad eccentricità (anche lievi) nel montaggio della ruota che, a causa della grande sensibilità del sistema, si traducono anch’esse in fluttuazioni del segnale secondo modalità analoghe a quelle riscontrate nel caso precedente.

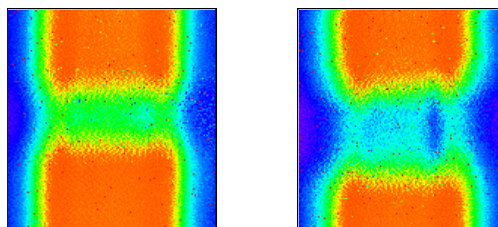


Fig. 9 – Aree di contatto dinamiche alla velocità di 10 Km/h
(a sinistra carico applicato 4kN, a destra 8 kN)

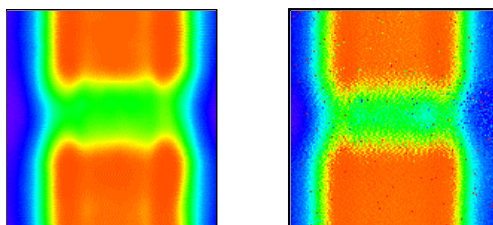


Fig. 10 – Aree di contatto per un carico applicato di 4 kN
(a sinistra condizioni statiche, a destra velocità 10 Km/h)

Ad ogni modo si tratta di problemi che possono essere superati curando con maggiore attenzione le fasi di realizzazione e montaggio dei componenti. Nessun problema è stato riscontrato, invece, per ciò che attiene la corretta trasmissione del segnale ultrasonico. Infatti, almeno nel range di velocità periferiche testate, non si è osservata alcuna alterazione significativa del velo d'acqua che potesse in qualche modo invalidare l'acquisizione.

Non si è proceduto a prove con livelli di carico oltre gli 8 kN poiché i fenomeni di usura superficiale si sono dimostrati piuttosto importanti e la geometria iniziale degli elementi a contatto rischiava di essere seriamente compromessa anche da brevi intervalli temporali di rotazione a carichi superiori.

A tale proposito è stato osservato che l'Ergal non si è dimostrato un materiale ottimale per questo tipo di indagini perché, seppur dotato di buone proprietà meccaniche compressive e basso modulo di elasticità (parametro che consente di ottenere aree di contatto significative anche a carichi relativamente bassi) risente in modo eccessivo della fatica superficiale, presentando fenomeni di pitting anche dopo poche ore di funzionamento.

4. CONCLUSIONI

Sono stati illustrati alcuni risultati preliminari relativi alla sperimentazione di una tecnica, basata sull'impiego di onde ultrasoniche, per l'analisi di problemi di contatto dinamici, con particolare riferimento allo studio del rolling contact. A tal fine è stato progettato e realizzato un sistema a due dischi uno dei quali collegato ad un motore elettrico (max velocità di rotazione 1435 giri/min) equipaggiato con un sistema di scansione polare che movimenta una sonda ad immersione focalizzata inserita in un sistema squirter. L'onda ultrasonica riflessa dall'interfaccia di contatto, la cui ampiezza è proporzionale al livello di contatto esistente, viene successivamente elaborata graficamente in modo tale da ricostruire delle "mappe" che forniscono informazioni su forma e dimensioni dell'area di contatto e, almeno a livello qualitativo, sulla distribuzione delle pressioni di contatto al suo interno. Nella prima fase dello studio sono state eseguite prove statiche per verificare il corretto funzionamento dell'insieme trasduttore-squirter e tarare l'allineamento dei corpi a contatto, anche mediante

confronto con il sistema di pellicole pressosensibili Fuji Prescale. Nella seconda fase dell'indagine si è proceduto all'acquisizione del segnale ultrasonico proveniente dall'interfaccia di contatto per differenti velocità di rotazione (nel range 0-16 Km/h) e per alcuni livelli di carico (max 8 kN).

I risultati hanno confermato in modo sostanziale la validità dell'approccio ultrasonico quale strumento di indagine per l'analisi di problemi di contatto dinamici, tuttavia occorre eseguire ulteriori test in condizioni più severe (in particolar modo per ciò che concerne i livelli di carico e le velocità di rotazione) per verificare l'applicabilità della tecnica a casi di rilevante impatto ingegneristico.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Pau M., Aymerich F., Ginesu F. (2001), Measurements of nominal contact area in metallic interfaces: a comparison between an ultrasonic method and a pressure sensitive film, *Wear* 249 (5-6), pp. 533-535
- [2] Aymerich F., Pau M. and Ginesu F. (2003), Evaluation of nominal contact area and contact pressure distribution in a steel-steel interface by means of ultrasonic technique, *JSME International Journal Series C Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing*, Vol. 46, No. 1
- [3] Pau M., Aymerich F., Ginesu F. (2002), Distribution of contact pressure in wheel-rail contact area, *Wear* 253 (1-2), pp. 265-274
- [4] Pau M. (2003), Estimation of real contact area in a wheel-rail system by means of ultrasonic waves, *Tribology International* (in press)
- [5] Krachter H., (1958) Ein neuartiges verfahren zur messung von druckkräften mit ultraschall, *Werkstatt und Betrieb*, 5, pp. 246-248
- [6] Kendall K. and Tabor D., (1971) An ultrasonic study of the area of contact between stationary and sliding surfaces, *Proc. of Royal Society of London Part A* 323, pp. 321-340
- [7] Geiger M., Engel U. and Vollersten F. (1992), In situ ultrasonic measurement of the real contact area in bulk metal forming, *Annals of the CIRP* Vol. 41/1/92, pp. 255-258
- [8] Saiki H., Sakata Y., Satonaka S., Zhan Z. and Marumo Y., (1993) Estimation of contact conditions in lubricated frictional interface of forging processes by using ultrasonic examination, *Advanced Technology of Plasticity, Proc. Of the Fourth Intl. Conf, on Technology of Plasticity*, pp. 1126-1131
- [9] Stancu-Nieder Korn S., Engel U. and Geiger M. (1993), A new method for investigating the relation between real contact area and friction in bulk metal forming process, *Wire* 43 (6), pp.381-386
- [10] Engel U., Schwind M. and Stancu-Nieder Korn S., (1994), New applications of non-destructive testing in metal forming technology, *Journal of Engineering Manufacture Part B*, 208, pp. 259-267